

Universidad Nacional de Ingenieria

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



“ Determinación de las Características del Nuevo Sistema de Distribución Primaria en 20 kV de Electrolima ”

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

MIGUEL ALBERTO CONTRERAS CARPIO

PROMOCION: 1986 - I

LIMA . PERU . 1991

TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
PROLOGO	5
CAP.1 INTRODUCCION	5
CAP.2 ANTECEDENTES	9
CAP.3 DESCRIPCION DE LOS PROBABLES SISTEMAS DE DISTRIBUCION PRIMARIA	16
3.1 Introducción	16
3.2 Sistemas adoptados por otros países	17
3.3 Descripción de los probables sistemas	18
CAP.4 ANALISIS DE LA PERFORMANCE DEL ACTUAL SISTEMA DE DISTRIBUCION PRIMARIA DE 10 kV	19
4.1 Introducción	19
4.2 Estadísticas y análisis de fallas por sobretensiones del la SET Chavarría y la SET Fuente	19
4.2.1 Estadísticas de fallas	19
4.2.2 Análisis de fallas producidas por sobretensiones	21
4.3 Indices de fallas en redes subterráneas ..	23
CAP.5 COMPORTAMIENTO TEORICO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION ANTE FALLAS MONOFASICAS A TIERRA, EN FUNCION DEL ATERRAMIENTO DEL NEUTRO	
5.1 Introducción	32
5.2 Comportamiento teórico de las tensiones ($3V_0$) y corrientes ($3I_0$) residuales, ante fallas monofásicas a tierra	32

5.3	Cálculo teórico de tensiones y corrientes ante fallas monofásicas a tierra de una red de 20 kV	38
5.3.1	Descripción de la red de 20 kV	38
5.3.2	Mediciones y cálculos previos efectuados	39
5.3.3	Cálculo teórico de tensiones y corrientes ante fallas monofásicas a tierra de la red de 20 kV	41
5.4	Influencia de las resistencias de puestas a tierra y de la impedancia de tierra, ante fallas monofásicas a tierra	44
5.4.1	La resistencia de puesta a tierra ..	45
5.4.2	La impedancia de tierra	48
5.4.3	La resistencia de falla	
CAP.6 PRUEBAS DE FALLA MONOFASICA A TIERRA REALIZADAS		
6.1	Introducción	83
6.2	Procedimiento	84
6.2.1	Caso A: Sistema 3Ø con neutro corrido y F.T.	86
6.2.2	Caso B: Sistema 3Ø con neutro puesto a tierra (no corrido)	87
6.2.3	Caso C: Sistema 3Ø con neutro aislado	88
6.3	Resultados obtenidos en la prueba	89
CAP.7 COMPARACION ENTRE LOS VALORES TEORICOS Y LOS		

VALORES REGISTRADOS EN LA PRUEBA	97
7.1 Determinación del valor de la resistencia de falla	97
7.2 Comparación entre los valores teóricos y los valores registrados en la prueba	98
7.3 Análisis de resultados	99
 CAP.8 PROTECCION RECOMENDADA CONTRA FALLAS MONOFASICAS A TIERRA, PARA LOS PROBABLES SISTEMAS DE DISTRIBUCION PRIMARIA	 107
8.1 Introducción	107
8.2 Sistema 3Ø con neutro aislado	108
8.3 Sistema con neutro puesto a tierra	111
8.4 Sistema 3Ø con neutro corrido y P.T.	112
 CAP.9 COSTOS COMPARATIVOS DE LAS REDES, PARA LOS PROBABLES SISTEMAS DE DISTRIBUCION PRIMARIA	 117
9.1 Introducción	117
9.2 Comparación de los sistemas aislados y puestos a tierra	117
9.2.1 Comparación general de los sistemas.	117
9.2.2 Consideraciones sobre el nivel de aislamiento	117
9.3 Comparación de costos	119
 CONCLUSIONES	 127
 RECOMENDACIONES	 131
 REFERENCIAS	 132
 ANEXOS	 133

RELACION DE FIGURAS

- Fig. Nº1 DIAGRAM UNIFILAR DE LA LINEA (HUALMAY-EMSAL)
AEREA DE 20 KV DE LA ZONAL DE HUACHO
- Fig. Nº2 CASO A: SISTEMA 3Ø CON NEUTRO CORRIDO
- Fig. Nº3 CASO B: SISTEMA 3Ø CON NEUTRO P.T.
- Fig. Nº4 CASO C: SISTEMA 3Ø CON NEUTRO AISLADO
- Fig. Nº5 MEDICION DE LA TENSION HOMOPOLAR Y LAS
TENSIONES DE FASE RESPECTO AL POTENCIAL DE
TIERRA
- Fig. Nº6 CONDICIONES ANORMALES DE OPERACION EN UN
SISTEMA 3Ø CON N.A., EN CASO FALLA A TIERRA, EN
INSTALACIONES CON UN SOLO ALIMENTADOR
- Fig. Nº7 CONDICIONES NORMALES DE OPERACION EN UN SISTEMA
3Ø CON NEUTRO AISLADO
- Fig. Nº8 CONDICIONES ANORMALES DE OPERACION EN UN
SISTEMA 3Ø CON NEUTRO AISLADO, EN CASO DE FALLA
MONOFASICA A TIERRA, EN INSTALACIONES CON MAS
DE UN ALIMENTADOR
- Fig. Nº9 CONDICIONES NORMALES DE OPERACION EN UN SISTEMA
3Ø CON NEUTRO P.T., EN CASO DE VARIOS
ALIMENTADORES
- Fig. Nº10 CONDICIONES ANORMALES DE OPERACION EN UN
SISTEMA 3Ø CON NEUTRO P.T., EN CASO DE FALLA
MONOFASICA A TIERRA, EN INSTALACIONES CON MAS
DE UN ALIMENTADOR

RELACION DE CUADROS

Cuadro Nº1	REDES SUBTERRANEAS DE M.T. EN SERVICIO
Cuadro Nº2	REDES AEREAS DE M.T. EN SERVICIO
Cuadro Nº3	SISTEMAS DE DISTRIBUCION PRIMARIA DE OTROS PAISES
Cuadro Nº4	CLASIFICACION DE LAS FALLAS SEGUN SU CAUSA
Cuadro Nº5	CLASIFICACION DE LAS FALLAS SEGUN SUS COMPONENTES
Cuadro Nº6	Nº DE FALLAS EN LAS REDES Y EQUIPOS DE LA SET CHAVARRIA CLASIFICADO POR CAUSA Y COMPONENTE (PERIODO 1985-1988)
Cuadro Nº7	Nº DE FALLAS EN LAS REDES Y EQUIPOS DE LA SET FUENTE CLASIFICADO POR CAUSA Y COMPONENTE (PERIODO 1985-1988)
Cuadro Nº8	INDICE DE FALLAS EN REDES SUBTERRANEAS DE M.T.
Cuadro Nº9	DISTRIBUCION DE LA LINEA HUAIMAY-EMSAL
Cuadro Nº10	MEDICIONES DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO Y DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
Cuadro Nº11	VALORES DE TENSIONES Y CORRIENTES TEORICOS EN CONDICIONES DE FALLA MONOFASICA A TIERRA (LINEA HUAIMAY-EMSAL)
Cuadro Nº12	VALORES PROMEDIOS DE TENSIONES Y CORRIENTES REGISTRADOS EN LA PRUEBA EN CONDICIONES NORMALES Y DE FALLA MONOFASICA A TIERRA
Cuadro Nº13	SECUENCIA DE LAS PRUEBAS DE FALLA MONOFASICA A TIERRA REALIZADAS EN LA LINEA HUAIMAY-EMSAL
Cuadro Nº14	CUADRO COMPARATIVO ENTRE LOS VALORES TEORICOS Y REGISTRADOS, DE TENSIONES Y CORRIENTES EN COND. DE FALLA MONOFA. A TIERRA.
Cuadro Nº15	COMPARACION ENTRE LOS SISTEMAS AISLADOS Y PUESTOS A TIERRA
Cuadro Nº16	COSTOS UNITARIOS DE INSTALACION DE LAS PROBABLES REDES DE 20KV (miles de dolares/km)
Cuadro Nº17	COMPARACION ENTRE LOS COSTOS DE LAS PROBABLES REDES DE 20KV DE FUTURAS SET

- Gráf. Nº20 CORRIENTE DE FASE(S) vs R FALLA (Falla 10t en PF2); para cada caso (Caso A, B y C)
- Gráf. Nº21 CORRIENTE DE FASE(T) vs R FALLA (Falla 10t en PF2); para cada caso (Caso A, B y C)
- Gráf. Nº22 RESISTENCIA DE P.T. vs RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL TERRENO
- Gráf. Nº23 IMPEDANCIA DE SEC. CERO vs RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL TERRENO

RELACION DE GRAFICOS

Gráf. Nº1	RED SUBTERRANEA DE M.T. (km vs años)
Gráf. Nº2	RED AEREA DE M.T. (km vs años)
Gráf. Nº3	VARIACION DE CANTIDADES RESIDUALES
Gráf. Nº4	VARIACION DE TENSIONES RESIDUALES
Gráf. Nº5	VARIACION DE CORRIENTES RESIDUALES
Gráf. Nº6	TENSION HOMOPOLAR(3Vo) vs R FALLA (Falla 10t en PF1); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº7	CORRIENTE HOMOPOLAR(3Io) vs R FALLA (Falla 10t en PF1); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº8	TENSION FASE(R)-TIERRA vs R FALLA (Falla 10t en PF1); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº9	TENSION FASE(S)-TIERRA vs R FALLA (Falla 10t en PF1); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº10	TENSION FASE(T)-TIERRA vs R FALLA (Falla 10t en PF1); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº11	CORRIENTE DE FASE(R) vs R FALLA (Falla 10t en PF1); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº12	CORRIENTE DE FASE(S) vs R FALLA (Falla 10t en PF1); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº13	CORRIENTE DE FASE(T) vs R FALLA (Falla 10t en PF1); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº14	TENSION HOMOPOLAR(3Vo) vs R FALLA (Falla 10ten PF2); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº15	CORRIENTE HOMOPOLAR(3Io) vs R FALLA (Falla 10t en PF2); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº16	TENSION FASE(R)-TIERRA vs R FALLA (Falla 10t en PF2); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº17	TENSION FASE(S)-TIERRA vs R FALLA (Falla 10t en PF2); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº18	TENSION FASE(T)-TIERRA vs R FALLA (Falla 10t en PF2); para cada caso (Caso A, B y C)
Gráf. Nº19	CORRIENTE DE FASE(R) vs R FALLA (Falla 10t en PF2); para cada caso (Caso A, B y C)

PROLOGO

El presente tema de tesis desarrolla un estudio preliminar, el cual nos permitirá seleccionar la condición del neutro más conveniente del futuro sistema de distribución primaria (Media Tensión, M.T.) en 20 kV de Electrolima. Es decir, si dicho futuro sistema debe ser con el neutro aislado como lo es el sistema actual de 10 kV, o con el neutro puesto a tierra.

En el capítulo 2 se citan los antecedentes del presente tema de tesis. En él se indica las razones por las cuales se optó, para el caso particular de Electrolima para el actual sistema de M.T., desde el principio de su desarrollo a principios del siglo, por un sistema trifásico con neutro aislado.

Adicionalmente en el capítulo 2 se indica el incremento progresivo tanto de las redes subterráneas como aéreas, del actual sistema de M.T. de Electrolima.

En la primera parte del capítulo 3 se hace una revisión de los sistemas de distribución primaria, adoptados actualmente por compañías de servicio de electricidad de otros países. Posteriormente en dicho capítulo se hace una breve descripción de probables sistemas de distribución, que pueden adoptarse para el caso particular de Electrolima.

En el capítulo 4 se hace un análisis del comportamiento del actual sistema de distribución primaria de 10 kV de Electrolima. Dicho análisis está orientado a evaluar aque-

llos aspectos del actual sistema, que están vinculados a la condición del neutro del sistema. Tales aspectos se refieren básicamente a fallas por sobretensiones de origen interno -producidas por fallas monofásicas a tierra- que ocurren en el actual sistema, producto de que la red este operando como sistema trifásico con neutro aislado.

En el capítulo 5 se hace un análisis detallado del comportamiento teórico de las redes ante fallas monofásicas a tierra, en función del aterramiento del neutro. En dicho capítulo, se podrá apreciar como se comportan las tensiones y corrientes residuales -magnitudes que aparecen en condiciones de falla monofásica a tierra- ante estas condiciones; y como dependen de la condición del neutro del sistema. También se podrá apreciar las variaciones de las tensiones de fase respecto al potencial de tierra, las cuales inciden directamente sobre el dieléctrico los equipos y accesorios del sistema.

Adicionalmente en el capítulo 5, se podrá apreciar la influencia de las resistencias de puestas a tierra y de la impedancia de tierra, ante fallas monofásicas a tierra.

En el capítulo 6 se describen las pruebas de falla monofásica a tierra que han sido necesarias realizar; para comprobar el análisis teórico realizado en el capítulo 5. Dichas pruebas nos permitió contar con magnitudes referenciales, tanto de tensiones como de corrientes en condiciones de falla monofásica a tierra.

En el capítulo 7 se efectúa una comparación entre los valores teóricos (Cap.5) y los valores registrados (Cap.6) de magnitudes de tensiones y corrientes, en condiciones de falla monofásica a tierra. Asimismo, se realiza un análisis de los resultados obtenidos.

En el capítulo 8 se explica en forma breve el principio en que debe basarse la protección contra fallas monofásicas a tierra, vía relés especiales para estos fines. Como premisa se analiza un sistema trifásico con neutro aislado en condiciones normales de operación, procediendo a analizar lo que ocurre en el caso de una puesta a tierra simple. Este análisis se realiza para instalaciones con varios alimentadores, tal como será la futura red. Luego se procede a analizar el mismo comportamiento para un sistema trifásico con neutro puesto a tierra (no corrido), y finalmente para un sistema trifásico con el neutro corrido y puesto a tierra. En cada análisis, se hará la recomendación sobre el sistema de protección correspondiente a dichas condiciones.

En el capítulo 9 se efectúa una comparación de costos de las redes, para los probables sistemas de distribución primaria en 20 kV. En dicho capítulo, en un inicio se efectúa una comparación de las características principales de los sistemas aislados y puestos a tierra; ello con la finalidad de entender con mayor claridad, la diferencia de costos. Luego se efectúa la comparación de costos de los sistemas en discusión.

Es deseo del autor, que el presente trabajo contribuya a la selección del adecuado futuro sistema de distribución primaria en 20 kV de Electrolima. Dicho sistema nos debe conllevar a: un menor riesgo al público en general por fallas monofásicas a tierra en líneas aéreas; una disminución de sobretensiones dando una mayor confiabilidad de servicio; una economía en la distribución de la energía y, en general a mejorar y optimizar la performance del sistema de distribución.

Para concluir, expreso mi agradecimiento a Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad Electrolima S.A., y a la ADIDE (Asociación de Ingenieros de Electrolima), por el significativo aporte en la realización de presente tesis.

INTRODUCCION

Habiéndose iniciado el proceso de implantación del nuevo nivel de tensión (20kV) del sistema de distribución primaria (M.T.), en el área de responsabilidad de ELECTROLIMA; el presente trabajo desarrolla un estudio preliminar, el cual nos permitirá seleccionar la condición del neutro más conveniente de la futura red en 20 kV. Es decir, si dicha red deberá ser un sistema trifásico con neutro aislado como lo es la red actual; con neutro puesto a tierra (no corrido), o con neutro corrido y puesto a tierra.

Adicionalmente a la condición del neutro más conveniente de la futura red, la cual es una de las características más importantes del sistema de distribución; en el presente trabajo se determinarán características adicionales de los probables sistemas de distribución primaria. Entre ellas podemos citar: el comportamiento de dichos sistemas ante fallas monofásicas a tierra; consideraciones de sobretensiones en todo el sistema y el adecuado nivel de aislamiento de los equipos y accesorios, y consideraciones sobre la protección contra fallas monofásicas a tierra. Finalmente, se evalúan costos de las redes para los probables sistemas de distribución primaria en 20 kV.

Como puede apreciarse, para definir cual es el sistema más conveniente, se evalúa tanto aspectos técnicos como eco-

nómicos.

En lo referente a los aspectos técnicos, en primer lugar se evalúa el comportamiento de las redes y equipos media tensión en el radio de influencia de la SET Fuente y SET Chavarría, del actual sistema de distribución primaria de 10 kV de Electrolima, el cual opera como sistema trifásico con neutro aislado. Tales comportamientos -vinculados a la condición del neutro del sistema- se refieren básicamente a fallas por sobretensiones de origen interno producidas por fallas monofásicas a tierra, producto de que la red este operando como sistema trifásico con neutro aislado.

Posteriormente se evalúa el comportamiento teórico ante fallas monofásicas a tierra de los probables sistemas de distribución primaria, entre los cuales tenemos: sistema trifásico con neutro aislado; sistema trifásico con neutro puesto a tierra (no corrido) y sistema trifásico con neutro corrido y puesto a tierra.

Con la finalidad de comprobar en forma práctica el comportamiento teórico; se planteó la necesidad de efectuar pruebas de fallas monofásicas a tierra, las cuales fueron realizadas en la red de 20 kV (Hualmay-Emsal) con que cuenta actualmente el sistema de media tensión de Electrolima. Como se podrá apreciar, dichas pruebas nos permitió contar con magnitudes referenciales tanto de tensiones como de corrientes en condiciones de falla monofásica a tierra.

Esta comprobación del comportamiento teórico-práctico; por un lado, nos servirá para determinar que magnitudes pueden ser tomadas como referencias para seleccionar un adecuado sistema de protección contra fallas monofásicas a tierra; por otro lado, nos permitirá contar con magnitudes de tensiones referenciales que nos ayudará a seleccionar el adecuado nivel de aislamiento de los equipos y accesorios de los componentes del futuro sistema de distribución primaria de 20 kV.

Antes de efectuar una valorización de las redes para los probables sistemas de distribución primaria, para entender con mayor claridad el porqué de la diferencia de costos entre un sistema ú otro; como premisa se efectúa un resumen de las características más importantes de los probables sistemas de distribución primaria, tanto aislados como puestos a tierra. Posteriormente, con las consideraciones que el caso amerita; se procede a efectuar una valorización y comparación de los costos unitarios (por kilómetro) de instalación de las redes troncales y laterales de los probables sistemas de distribución primaria en 20 kV, como son: sistema 3Ø con neutro aislado; sistema 3Ø con neutro puesto a tierra (no corrido) y sistema con neutro corrido y P.T..

Adicionalmente, para el sistema 3Ø con neutro puesto a tierra (no corrido) y con el neutro corrido, se evaluado los costos de instalación de las redes, considerando la alternativa de usar el franqueador a

tierra (ground cradle), el cual servirá para disminuir los elevados valores de resistencia de falla monofásica tierra, -producida por rotura de conductores líneas aéreas-, que se obtendrían en zonas de alta resistividad.

Complementariamente en base a los planes pilotos de 20 kV (para 20 años), se ha evaluado los costos de instalación de las redes correspondientes a las futuras subestaciones de transmisión Zavala, Chorrillos y Canto Grande. Ello para cada uno de los probables sistema en 20 kV mencionados anteriormente.

Analizando tanto técnica como económicamente, bajo las consideraciones anteriormente expuestas, y considerando la experiencia que se tiene actualmente de otros países; se procede a recomendar el sistema de distribución que debería adoptarse para las futuras redes de 20 kV.

Como se ha podido apreciar, el análisis del presente tema de tesis se centra sobre el sistema de distribución primaria. No está dentro del alcance del presente trabajo, evaluar la influencia que se tendría, el optar por un sistema ú otro, en el sistema de generación, transmisión y distribución secundaria.

CAPITULO 2 ANTECEDENTES

Como es sabido, para el caso particular de Electrolima, para la red de M.T., se optó desde el principio de su desarrollo, a principios del siglo, por un sistema trifásico con neutro aislado. Dicho sistema estuvo justificado principalmente en que, debido a que la red era casi íntegramente subterránea, se contaba con la ventaja de poderla mantener en operación aún con fallas monofásicas a tierra -sin exponer al público en general a un elevado riesgo eléctrico-, en beneficio de la continuidad de servicio.

Es así, que la actual red de M.T. (10 kV) de Electrolima, es alimentada de las denominadas subestaciones de transmisión (SET) 60/10 kV; en las cuales, los transformadores tienen la conexión estrella con neutro sólidamente puesto a tierra en el lado de 60 kV, mientras que en el lado de 10 kV la conexión es en triángulo; es decir, la red actual de 10 kV no tiene neutro físico.

Como consecuencia de ello, una de las principales características de la red de 10 kV, es la de presentar bajos valores de corrientes, cuando se produce una falla monofásica a tierra, lo que dificulta su detección y eliminación.

Si consideramos que en los últimos años se ha tendido

hacia un mayor uso de las líneas aéreas, ver cuadros N°1, N°2 gráficos N°1 N°2, fundamentalmente por razones económicas; se puede deducir que en el caso de producirse una falla monofásica a tierra por rotura de un conductor en líneas aéreas, se expone al público en general un alto grado de riesgo eléctrico. Esto debido a que los dispositivos de protección contra cortocircuitos, no detectarían las corrientes de falla monofásica a tierra, por ser de magnitudes relativamente bajas comparadas con las fallas trifásicas francas.

Por otro lado, al producirse dicha falla en estos sistemas -trifásico con neutro aislado-, se producen sobretensiones que afectan el dieléctrico de los accesorios y equipos del sistema, disminuyendo su vida útil y, por ende la performance del sistema.

Por todo lo expresado, y considerando que el futuro sistema de distribución primaria de Electrolima debe empezar a desarrollarse, bajo un criterio técnico acorde con la nueva realidad; es que se ha emprendido un conjunto de estudios con el objetivo de determinar cual es el sistema más conveniente que se debe adoptar para la futura red. Dicho sistema nos debe conllevar a: un menor riesgo al público en general por fallas monofásicas a tierra en líneas aéreas; una disminución de sobretensiones dando una mayor confiabilidad de servicio; una economía en la a. ener ía y, en general a mejorar y optimizar la distribución.

CUADRO No 1

REDES SUBTERRANEAS DE M.T. EN SERVICIO
(KILOMETROS)

AÑO	10 kV	2.3 kV	TOTAL
1975	1726	51	1777
1976	1869	51	1920
1977	1962	50	2012
1978	2049	50	2099
1979	2117	50	2167
1980	2173	50	2223
1981	2239	50	2289
1982	2334	50	2384
1983	2434	50	2484
1984	2467	50	2517
1985	2489	50	2539
1986	2500	50	2550
1987	2517	50	2567
1988	2536	50	2586
1989	2546	50	2596

Comentario: En los últimos diez años las redes subterráneas de M.T. se han incrementado en 429 Km, lo que representa el 20% respecto al año 1979

CUADRO No 2

REDES AEREAS DE M.T. EN SERVICIO
(KILOMETROS)

AÑO	30 kV	10 kV	2.3 kV	TOTAL
1975	154	385	350	889
1976	165	400	324	889
1977	166	437	335	938
1978	166	472	332	970
1979	160	498	330	988
1980	160	531	330	1021
1981	160	608	330	1098
1982	160	667	330	1157
1983	160	717	330	1207
1984	162	750	330	1242
1985	162	796	328	1286
1986	162	821	325	1308
1987	162	862	325	1349
1988	162	923	325	1410
1989	162	926	325	1413

Comentario: En los últimos diez años las redes aéreas de M.T. se han incrementado en 425 Km, lo que representa el 43% respecto al año 1979.

CUADRO No-3

SISTEMAS DE DISTRIBUCION PRIMARIA DE OTROS PAISES

PAIS Y/O CIA.	NIVELES DE TENSION (kv)	SISTEMA 3 Ø	OBSERVACIONES.	REFERENCIA
MEXICO: CIA. DE LA LUZ Y FUERZA DEL CENTRO (CLFC)	23	TRES HILOS - AISLADOS TRES HILOS - CON NEUTRO P.T.	SISTEMA CENTRAL OTROS ESTADOS	COPIERA IU REUNION 7 - 13 DE NOV. 1971
TAIWAN: TAIWAN POWER COMPANY	6.6 / 11.4 Y 22.8	CUATRO HILOS - CON NEUTRO P.T.		IEEE. CONFERENCE RECORD 1976 UNDERGROUND TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE SEPT. 27 - OCT. 1, 1976
FRANCIA: ELECTRICITE DE FRANCE (REGIONES RURALES DE BAJA DENSIDAD DE POBLACION)	15 - 33	TRES HILOS, CON NEUTRO P.T. A TRAVES DE UNA IMPEDANCIA QUE LIMITA LA CORRIENTE DE FALLA 1 Ø A UN VALOR DE 300 A	- LAS FALLAS 1Øt SON DETECTADAS MIDIENDO LA CORR. RESIDUAL(3Iø) - REGIONES RURALES DE BAJA DENSIDAD DE POBLACION	EDF - JUNIO 1980 ELECTRICITE DE FRANCE "LA ELECTRIFICACION DE LAS REGIONES RURALES DE BAJA DENSIDAD DE POBLACION"
GRAN BRETANA		TRES HILOS, CON NEUTRO P.T. A TRAVES DE UNA IMPEDANCIA QUE LIMITA LA CORRIENTE DE FALLA 1 Ø A UN VALOR DE 300 A		
AUSTRALIA		TRES HILOS, CON NEUTRO PUESTO SOLIDAMENTE A TIERRA.	LA TIERRA ES UTILIZADA COMO CONDUCTOR DE RETORNO	
IRLANDA		TRES HILOS - AISLADO		
VENEZUELA	20 / 34.5	TRES HILOS, CON NEUTRO PUESTO SOLIDAMENTE A TIERRA.		CADAFE: U CONFERENCIA LATINA- MERICANA DE ELECTRIFICACION RURAL
BRASIL: SAU PAULO	3.8 , 13.2 , 21	CUATRO HILOS, CON NEUTRO PUESTO SOLIDAMENTE A TIERRA.		LIGHT- SERVICIOS DE ELECTRICIDADE S.A. SAO PAULO-1973(SISTEMA DE DISTRIBUICAO AEREA DE ENERGIA DA CIDADE SAO PAULO)
USA	14.4 / 24.9	CUATRO HILOS, CON NEUTRO PUESTO SOLIDAMENTE A TIERRA.	LAS FALLAS 1Øt CON ALTA RESIS- TENCIAS DE FALLA SON DETECTA- DAS MEDIANTE PELES DE FALLAS A TIERRA.	DISTRIBUTION SYSTEMS WESINGHOUSE ELECTRIC CORPOR. IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, VOL, PAS-102, No-9 SEP.1983
ALEMANIA		- TRES HILOS, AISLADO - TRES HILOS CON BOBINA DE SUPRESION DE ARCO - TRES HILOS, CON R O X PARA LIMITACION DE INTENSIDAD	REDES DE POCA EXTENSION, CONSU- MO PROPIO DE LA CENTRAL REDES DE LINEAS AEREAS 10...110 kv REDES DE CABLES 10...110 kv, EN CIUDADES	MANUAL DE LAS INSTALACIONES DE DISTRIBUCION DE ENERGIA ELEC- TRICA (BBC)

CAPITULO 3 DESCRIPCION DE LOS PROBABLES SISTEMAS DE DISTRIBUCION PRIMARIA

3.1 Introducción

disyuntiva principal que se presenta en la selección de un sistema de distribución, es la de conectar o no el neutro del sistema a tierra.

En general, las opiniones sobre la oportunidad de la conexión **tierra del** neutro, están divididas. Hay países en los que no se efectúa esta conexión, dejando el punto neutro aislado; y en otros en los que se supone necesario hacerlo.

Cabe señalar que durante el funcionamiento normal, los sistemas con el punto neutro conectado a tierra y aquellos que lo tienen aislados, se comportan prácticamente de la misma manera. La influencia de la **conexión** del punto neutro se manifiesta sólo durante condiciones **anormales** como, por ejemplo, cuando se producen puestas a tierra accidentales. El comportamiento de los sistemas con neutro aislado y de aquellos con punto neutro conectado a tierra, son muy diferentes frente a tales efectos.

En los sistemas conectados a tierra hay pocas probabilidades de que el alto voltage primario origine accidentes o dificultades en las líneas secundarias,

debido a la tendencia de este voltaje elevado a dirigirse primero a tierra en el caso de ocurrir algún defecto, y por consiguiente, hace operar los dispositivos de protección primarios debido al cortocircuito que se forma.

En los sistemas aislados se puede mantener la continuidad de servicio aún con fallas a tierra. Si bien este sistema sin tierra puede a menudo proporcionar un servicio más continuo, posee inconveniente de ofrecer un peligro mayor a consecuencia de que el alto voltaje primario pueda ser aplicado secundario si fallará el aislamiento de los transformadores.

En los sistemas con el neutro puesto a tierra, también existe la posibilidad de correr el neutro del sistema mediante un conductor neutro.

3.2 Sistemas adoptados por otros países

Con la finalidad de revisar experiencias de otros países, se ha elaborado el cuadro N°3, el cual resume los sistemas de distribución primaria adoptados por compañías de servicio de electricidad de otros países.

Como se puede apreciar en dicho cuadro, actualmente la tendencia general de las compañías de los países que se mencionan; es optar, por un sistema con el neutro puesto a tierra en comparación con el sistema aislado.

3.3 Descripción de los probables sistemas

El futuro sistema de distribución primaria en 20 kV de Electrolima, será alimentado de las denominadas subestaciones de transmisión (SET) 60/20 kV; los transformadores de dichas subestaciones de transmisión en general presentarían la conexión estrella con neutro puesto a tierra ó triángulo en el lado de 60 kV, mientras que en el lado de 20 kV la conexión estrella, pudiendo ser con neutro aislado, neutro puesto a tierra (no corrido), o con neutro corrido y puesto a tierra. De lo mencionado, se puede deducir que el futuro sistema de distribución primaria en 20 kV, puede ser:

- a) Sistema trifásico con neutro aislado.
- b) Sistema trifásico con neutro puesto a tierra.
- c) Sistema trifásico con neutro corrido y puesto a tierra.

CAPITULO 4

ANALISIS DE LA PERFORMANCE DEL ACTUAL SISTEMA DE DISTRIBUCION PRIMARIA DE 10 kV

4.1 Introducción

Un completo análisis de la performance del actual sistema de distribución primaria - sistema trifásico con neutro aislado - esta fuera del alcance del presente trabajo. El análisis que efectuaremos en presente capítulo, esta centrado a evaluar aquellos aspectos del actual sistema, que están vinculados a la condición del neutro del sistema. Tales aspectos, se refieren básicamente a fallas por sobretensiones (de origen interno) que ocurren en el actual sistema, producto de que este operando como sistema trifásico con neutro aislado.

El mencionado análisis, se basará en estadísticas de fallas, las cuales a su vez, se basan en las "Boletas de Desperfectos" emitidas por el sector de sala de maniobras y que son elaboradas por los sectores de mantenimiento de la compañía.

4.2 Estadísticas y análisis de fallas por sobretensiones del la SET Chavarria y la SET Puente

4.2.1 Estadísticas de fallas

Las estadísticas de fallas serán elaboradas para

las redes de radios de influencia de las subestaciones de transmisión Chavarria y Puente.

información que se tiene, ha sido elaborada en base a la recopilación de datos del periodo 1985-1988, la cual ha sido clasificada por causas y componentes fallados. La clasificación de las fallas según su causa, la que será aplicada a los diversos componentes, se muestra en cuadro N°4. La clasificación de las fallas según sus componentes se muestra en el cuadro N°5

A continuación indicaremos las características de las redes de las mencionadas subestaciones de transmisión.

Características de las redes de la SET Chavarria

Las redes de distribución primaria dentro del radio de influencia de la SET Chavarria posee las características siguientes:

Número de alimentadores	18
Número de subestaciones:	
Convencionales	72
Compactas	262
Aéreas	59
Número de clientes en 10kV	
Kilómetros de terna	35.44
Kilómetros de cable	134.67

Características de las redes de la SET Fuente

Las redes de distribución primaria dentro del radio de influencia de la SET Fuente posee las características siguientes:

Número de alimentadores	17
Número de subestaciones:	
Convencionales	81
Compactas	129
Aéreas	63
Número de clientes en 10kV	90
Kilómetros de terna	51.02
Kilómetros de cable	80.87

Los resultados obtenidos en la clasificación de fallas según las causas que los originaron y componentes fallados, para las redes y equipos de media tensión en el radio de influencia de las SET Chavarría y SET Fuente en el periodo 1985-1988, se muestra en el cuadro N^o6 y N^o7 respectivamente.

4.2.2 Análisis de fallas producidas por sobretensiones

Las sobretensiones en el sistema de distribución primaria de 10 kV con neutro aislado, prácticamente se presentan por causas de origen interno; y no por causas de origen externo como descargas atmosféricas, ya que éstas muy raramente se presentan en el área de responsa-

bilidad de Electrolima.

Cuando una fase en un sistema con neutro aislado se pone a tierra, las otras dos fases están por encima de la tensión fase tierra. Cuando se elimina la falla a tierra o se interrumpe el arco en corriente cero, la capacitancia del sistema retiene una carga y mantiene una tensión a tierra como tensión de compensación (o de equilibrio). Si la fase es vuelta a poner a tierra y/o vuelve a saltar el arco, puede sumarse una tensión de equilibrio adicional, dependiendo de la tensión del sistema y del punto de onda de tensión de corriente alterna en el que se produce la nueva puesta a tierra. Si la falla a tierra es intermitente o si se trata de una falla de descarga **intermitente**, la tensión puede seguir aumentando hasta que falle alguna aislación. Esta tensión a tierra puede alcanzar fácilmente varias veces el valor de la tensión de fase. Observese que la sobretensión es a tierra y que las tensiones fase-fase no son afectadas.

Esta elevada tensión a tierra incide sobre todo el sistema; ocasionando que algún punto débil de aislación falle. Fallas múltiples en lugares bien separados de un sistema, frecuentemente pueden producirse casi al mismo tiempo. Esto ex-

plica las misteriosas fallas múltiples que ocurren simultáneamente (denominadas en **Electrolima**: falla en equipos y/o red adyacentes).

Como se puede apreciar tanto en el cuadro N^o6 como en el cuadro N^o7, el mayor porcentaje de fallas en las redes y equipos de las **subestaciones de transmisión indicadas**, se deben **sobretensiones** que se producen producto de que la red actual de 10 kV este operando como sistema aislado.

Es conveniente indicar, que la cantidad de fallas debido a otras causas de origen **interno**, tales como conexión y desconexión de circuitos, que son susceptibles de ocasionar **sobretensiones** en el actual sistema son relativamente bajas.

4.3 Indices de fallas en redes subterráneas

Para comparar el comportamiento de diferentes sistemas de distribución, **se requiere de indices de comparación.**

Según el Manual de Sistemas de Estadísticas CIER para **Distribución (Falla de componentes 1989, Ref. N^o1)**, el indice de falla es definido como sigue:

$$If = n / t$$

Donde :

If Indice de falla de (los) componente (s).

n Número fallas ocurridas en el (los)
componente(s) en el periodo considerado.
t Universo de(los) componente(s) en el pe-
riodo considerado (100 unidades).

Como puede apreciar el Manual de Sistemas de Estadísticas CIER ha sido elaborado el año 1989; por dicha razón, en la actualidad no se tiene a disponibilidad índices de sistemas de distribución de países vecinos que integran la CIER (Comisión de Integración Eléctrica Regional: Argentina, Bolivia, Colombia, Chile, Ecuador, Paraguay, Uruguay y Venezuela).

Revisando informaciones al respecto, se ha ubicado el promedio de índices de fallas de redes subterráneas en Nº Fallas / 100 km / año de 34 compañías de electricidad americanas.

Gracias al sector Programación y Control Técnico de Electrolima, se ha evaluado el promedio de índice de fallas en redes subterráneas de media tensión para el periodo 1985-1990.

En el cuadro N08 se hace una comparación del índice de falla promedio de redes subterráneas de media tensión de Electrolima vs el promedio de 34 compañías de electricidad que operan en los Estados Unidos.

Como puede apreciarse en el cuadro N08, el índice de fallas de Electrolima supera en un 65% al promedio de 34 compañías de Electricidad que operan en los Estados

Unidos.

Por lo expuesto, puede decirse que la performance general de la red de M.T. es considerablemente menor que la esperada, particularmente debido a que la gran mayoría de los kilómetros de circuitos son en cable subterráneo. Ello significa que los porcentajes de falla son relativamente altos, en comparación sistemas de otros países.

Es posible que un número de estos incidentes de falla puedan ser directa o indirectamente atribuidos a las condiciones de sobrevoltajes, como consecuencia de que las redes estén operando como sistemas aislados.

Debe tenerse en cuenta que los cables subterráneos de 10 kV tienen una capacidad de sobretensión/tiempo, ellos no están diseñados para operar bajo la condición de una fase a tierra por un periodo indefinido. Por consiguiente, sea cual fuere el sistema, debe estar provisto de dispositivos de protección contra fallas a tierra.

Posteriormente se podrá deducir que para mejorar este índice, y por ende otros, se requiere de que el futuro sistema distribución primaria sea con el punto neutro puesto a tierra y no aislado como lo es actualmente.

Una de las funciones principales de la puesta a tierra del sistema, es limitar las condiciones sobre-

voltaje que pueden resultar de condiciones anormales de operación, tanto en estado transitorio como estado estable. Adicionalmente, el método de la puesta tierra del sistema debe ser tal que para una falla monofásica a tierra en algún punto de la red, la amplitud de la corriente de falla y/o el desplazamiento del neutro, sean tal que permitan que la falla sea fácilmente detectada por los relés o dispositivos protección.

CUADRO No 4

CLASIFICACION DE LAS FALLAS SEGUN SU CAUSA

C A U S A S	
CONDICIONES CLIMATICAS	- HUMEDAD - LLUVIA
MEDIO AMBIENTE	- CONTAMINACION AMBIENTAL - CORROSION - INCENDIO NO DEBIDO A FALLAS - CAIDA O CRECIMIENTO DE ARBOL
TERCEROS	- DAÑO INTENCIONAL - ROBO O INTENTO - DAÑO POR SEDAPAL - DAÑO POR C.P.T. - DAÑO POR CONSTRUCTORA - CHOQUE DE VEHICULO - FALLA EN INST. PARTIC. - COMETAS
PROPIAS DE LA RED	- ERROR DE OPERACION - SOBRECARGA - INSTALACION O MONTAJE DEFICIENTE - MATERIAL O EQUIPO INDECUADO - APLICACION INCORRECTA DE EQUIPO - FALTA DE MANTENIMIENTO - SOBRETENSION Y/O FALLA EN EQUIPO O RED ADYACENTE - FALSO CONTACTO - DETERIORO POR ENVEJECIMIENTO - DEFECTO DE FABRICACION - NO DETERMINAADAS

CUADRO No 5

CLASIFICACION DE LAS FALLAS SEGUN SUS COMPONENTES

DEPENDENCIA	COMPONENTES
EQUIPOS ELECTRICOS	INTERRUPTOR
	SECCIONADOR
	TRANSFORMADOR DE DISTRIB.
	RELE
	ATSLADOR DE BARRAS
REDES AEREAS	BARRAS GENERALES
	CONDUCTOR
	UNION A PRESION
	POSTES
	SECCIONADORES
REDES SUBTERRANEAS	VIENTOS
	AISLADORES
	CABLE
	EMPALME
	TERMINAL INTERIOR
CONECTOR DE CODO	TERMINAL EXTERIOR

Nº DE FALLAS EN LAS REDES Y EQUIPOS DE LA SET CHAVARRIA
 CLASIFICADO POR CAUSA Y COMPONENTE
 (PERIODO 1985 - 1988)

CAUSA	SUBCAUSA	COMPONENTES	FALLAS	
CONDICION CLIMATICA	HUMEDAD	S TERMINAL EXT.	1	0.68
	TOTAL HUMEDAD		1	0.68
	TOTAL CONDICIONES CLIMATICAS		1	0.68
REDO AMBIENTE	CONTAMINACION	S TERMINAL EXT.	1	
	AMBIENTAL	TOTAL CONT. AMBIENTAL	1	0.68
	CORROSION	S TERMINAL EXT.	2	
	TOTAL CORROSION		2	1.36
	INCENDIO NO POR FALLA	S CONECTOR DE CODO	1	
	TOTAL INCENDIO NO/FALLA		3	2.04
	TOTAL MEDIO AMBIENTE		6	4.09
TERCEROS	DAÑO INTER-CIUDAD	A CONDUCTOR CABLE S TERMINAL EXT.	3 1 1	
	TOTAL DAÑO INTER-CIUDAD		5	3.40
	ROBO/INT. DE ROBO	S CABLE S OTRO COMPONENTE	5 1	
	TOTAL ROBO/INT. ROBO		6	4.08
	DAÑO POR SEDAPAL	S CABLE	1	
	TOTAL DAÑO POR SEDAPAL		1	0.68
	DAÑO POR C.P.T.	A CONDUCTOR S CABLE	3 3	
	TOTAL DAÑO POR C.P.T.		6	
	DAÑO POR CONSTRUCC.	S CABLE	3	
	TOTAL DAÑO POR CONSTRUCC.		3	2.04
	FALLAS EN EQUIPOS ELECTRICOS DE M.T.			
	FALLAS EN REDES AERIAS DE M.T.			
	FALLAS EN REDES SUBTERRANEAS DE M.T.			
CONTINUA...	CHOQUE DE VEHICULO	A CONDUCTOR A POSTE S CABLE S EMPALME CABLE R/A S TERMINAL EXT.	6 7 1 2 1	
	TOTAL CHOQUE DE VEH.		17	11.56
	FALLA INSTALAC. PARTICIDULAR	S CABLE	1	
	TOTAL FALLA INST. PARTI.		1	
	COMETAS	A CONDUCTOR A SECCIONADOR	7 1	
	TOTAL COMETAS		8	5.44
	TOTAL TERCEROS		45	30.61
PROPIAS DE LA RED	ERROR DE OPERACION	E TRANSF. DE DIST. TOTAL ERROR OPERA.	1 1	0.68
	SOBRECARGA	E TRANSF. DE DIST. A CONDUCTOR S CABLE	2 1 1	
	TOTAL SOBRECARGA		4	4.08
	SOBREEXTENSION Y/O FALLA EN ADYACENTE	E SECCIONADOR E TRANSF. DE DIST. A CONDUCTOR A SECCIONADOR S CONECTOR DE CODO	1 11 4 2 2	
	TOTAL SOBRET. Y/O FALLA		20	13.61
	INSTALACION DEFICIENTE	R RELE O MONTAJE S EMPALME DERECHO S TERMINAL EXT. S CONECTOR DE CODO	1 2 4 1 2	
	TOTAL INST. /MONT. DEF.		10	6.90
CONTINUA...	MATERIAL O EQUIPO INADECUADO	A CONDUCTOR A AISLADOR S EMPALME DERECHO S EMPALME ASIM. S TERMINAL EXT.	1 1 1 1 1	
	TOTAL MAT./EQUIP. INADE.		5	3.40
	OPERACION INCORR.	E INTERRUPTOR E SECCIONADOR	1 1	
	TOTAL OPER. INCORR. E.		2	1.36
	FALTA DE MANTENIMIENTO	E INTERRUPTOR E SECCIONADOR E TRANSF. DE DIST. A CONDUCTOR A AISLADOR	2 1 9 3 2	
	TOTAL FALTA MANTIEN.		16	10.88
	FALSO CONTACTO	E SECCIONADOR E TRANSF. DE DIST. A CONDUCTOR A UNION A PRESION S CABLE S TERMINAL INT. S TERMINAL EXT. S CONECTOR DE CODO	1 6 2 1 1 3 3	
	TOTAL FALSO CONTACTO		19	12.24
	DETERIORO POR ENVEJECIMIENTO	E INTERRUPTOR A CONDUCTOR CABLE	1 4 4	
	TOTAL DETERIORO ENVEJ.		9	4.09
	TOTAL PROPIAS DE LA RED		84	57.14
DEFECTO DE FABRICACION		S CABLE	1	
	TOTAL DEFECTOS DE FABRICACION		1	0.68
CAUSAS NO DETERMINADAS		E TRANSF. DE DIST. E AISLA. DE BARRAS S CABLE S CONECTOR DE CODO	2 1 6 1	
	TOTAL CAUSAS NO DETERMINADAS		10	6.80

CUADRO N° 6

Nº DE FALLAS EN LAS REDES Y EQUIPOS DE LA SET CHAVARRIA

CLASIFICADO POR CAUSA Y COMPONENTE

(PERIODO 1985 - 1988)

Nº DE FALLAS EN LAS REDES Y EQUIPOS DE LA SET PUENTE
 CLASIFICADO POR CAUSA Y COMPONENTE
 (PERIODO 1985 - 1988)

SURCAUSA		COMPONENTES		FALLAS	
CONDICION CLIMATICA	HUMEDAD	E SECCIONADOR	TOTAL	CONDICION CLIMATICA	HUMEDAD
LLUVIA	A CONDUCTOR		2	LLUVIA	A CONDUCTOR
TOTAL LLUVIA			2	TOTAL LLUVIA	
TOTAL CONDICIONES CLIMATICAS 3 1.82					
MEDIO AMBIENTE					
CORROSION	A CONDUCTOR		1	CORROSION	A CONDUCTOR
UNION PRESION			1	UNION PRESION	
VIENTO	A TERMINAL EXT.		2	VIENTO	A TERMINAL EXT.
TOTAL CORROSION			5	TOTAL CORROSION	
TOTAL CORROSION 5 3.03					
CAID./CRECI. DE ARBOL	A CONDUCTOR		1	CAID./CRECI. DE ARBOL	A CONDUCTOR
TOTAL CAID./CRECI. ARBOL			1	TOTAL CAID./CRECI. ARBOL	
TOTAL INCENDIO NO/FALLA 1 0.61					
INCENDIO NO	S CABLE		1	INCENDIO NO	S CABLE
PAR FALLA			1	PAR FALLA	
TOTAL INCENDIO NO/FALLA			1	TOTAL INCENDIO NO/FALLA	
TOTAL INCENDIO NO/FALLA 1 0.61					
TOTAL MEDIO AMBIENTE 7 4.24					
ANIMALES					
E INTERRUPTOR			1	E INTERRUPTOR	
A SECCIONADOR			1	A SECCIONADOR	
TOTAL ANIMALES			2	TOTAL ANIMALES	
TOTAL ANIMALES 2 1.21					
TERCEROS					
DAYO INTEN- CIONAL	A CONDUCTOR		2	DAYO INTEN- CIONAL	A CONDUCTOR
S CABLE			2	S CABLE	
TOTAL DAYO INTENCIONAL			7	TOTAL DAYO INTENCIONAL	
TOTAL DAYO INTENCIONAL 7 4.24					
ROBO/INT. DE ROBO	A CONDUCTOR		1	ROBO/INT. DE ROBO	A CONDUCTOR
S CABLE			3	S CABLE	
TOTAL ROBO/INT. ROBO			4	TOTAL ROBO/INT. ROBO	
TOTAL ROBO/INT. ROBO 4 2.42					
DAYO POR CONSTRUC.	A POSTE		1	DAYO POR CONSTRUC.	A POSTE
S CABLE			12	S CABLE	
TOTAL DAYO POR CONSTRUC			13	TOTAL DAYO POR CONSTRUC	
TOTAL DAYO POR CONSTRUC 13 7.88					
PODA/TALA	A CONDUCTOR		1	PODA/TALA	A CONDUCTOR
S TERMINAL EXT.			1	S TERMINAL EXT.	
TOTAL PODA/TALA ARBOL			2	TOTAL PODA/TALA ARBOL	
TOTAL PODA/TALA ARBOL 2 1.21					

E FALLAS EN EQUIPOS ELECTRICOS DE M.T.
 A FALLAS EN REDES AEREAS DE M.T.
 S FALLAS EN REDES SUBTERRANEAS DE M.T.

CUADRO N° 7

Nº DE FALLAS EN LAS REDES Y EQUIPOS DE LA SET PUENTE
 CLASIFICADO POR CAUSA Y COMPONENTE
 (PERIODO 1985 - 1988)

CONTINUA...		CONTINUA...	
PROPIAS DE LA RED	MATERIAL O EQUIPO	UNION A PRESION	EMPALME DERECHO
RED	S CUACO		1
RED	S EMPALME ASIM.		4
RED	S TERMINAL EXT.		1
RED	S TERMINAL INT.		1
TOTAL MAT./EQUIP. INADE.			8
TOTAL MAT./EQUIP. INADE. 8 4.85			
OPERACION			
INCORR. EQUIP.	E SECCIONADOR		1
TOTAL OPER. INCORR. E.			2
TOTAL OPER. INCORR. E. 2 1.21			
FALTA DE MANTENIMIENTO			
E INTERRUPTOR			4
E SECCIONADOR			1
E TRANSF. DE DIST.			4
E BARRAS GENERALES			1
E CONDUCTOR			3
A SECCIONADOR			2
TOTAL FALTA MANTIENI.			15
TOTAL FALTA MANTIENI. 15 9.09			
FALSO SECCIONADOR			
E SECCIONADOR			1
A TRANSF. DE DIST.			7
A CONDUCTOR			1
S TERMINAL EXT.			3
S CONECTOR DE CODO			5
TOTAL FALSO CONTACTO			17
TOTAL FALSO CONTACTO 17 10.30			
DETERIORO POR ENVEJECIMIENTO			
E SECCIONADOR			1
E TRANSF. DE DIST.			2
A CONDUCTOR			1
TOTAL DETERIORO ENVEJE.			4
TOTAL DETERIORO ENVEJE. 4 2.42			
TOTAL PROPIAS DE LA RED 96 58.18			
DEFECTO DE FABRICACION			
E INTERRUPTOR			3
E SECCIONADOR			2
TOTAL DEFECTOS DE FABRICACION			5
TOTAL DEFECTOS DE FABRICACION 5 3.03			
CAUSAS NO DETERMINADAS			
E TRANSF. DE DIST.			2
S CABLE			4
S TERMINAL EXT.			2
S TERMINAL INT.			1
S CONECTOR DE CODO			1
TOTAL CAUSA NO DETERMI.			10
TOTAL CAUSA NO DETERMI. 10 6.04			

Cuadro No-8

INDICE DE FALLAS EN REDES SUBTERRANEAS DE M.T.

EMPRESA Y/O CIA.	No DE FALLAS / 100 KM/AÑO	REFERENCIA
ELECTROLIMA PROMEDIO (1985 - 1989)	12.4 (165 %)	INFORME DEL SERVICIO PROGRAMACION CONTROL TECNICO
PACIFIC POWER & LIGHT COMPANY (ANO 1972) AVERAGE 34 UTILITY COMP. OPERATING IN THE UNITED STATES	7.52 (100 %)	IEEE CONFERENCE RECORD-SUPPLEMENT APRIL 1 - 5 1974

CAPITULO 5

COMPORTAMIENTO TEORICO DE LAS REDES ANTE FALLAS MONOFASICAS A TIERRA, EN FUNCION DEL ATERRAMIENTO DEL NEUTRO

5.1 Introducción

En condiciones anormales de operación, tal como una falla monofásica a tierra, aparecen tensiones ($3V_0$) y corrientes residuales ($3I_0$), cuyas magnitudes dependen principalmente, entre otros factores, de la condición del neutro del sistema. Estas magnitudes pueden ser tomadas como referencia, para determinar la ocurrencia de una falla monofásica a tierra.

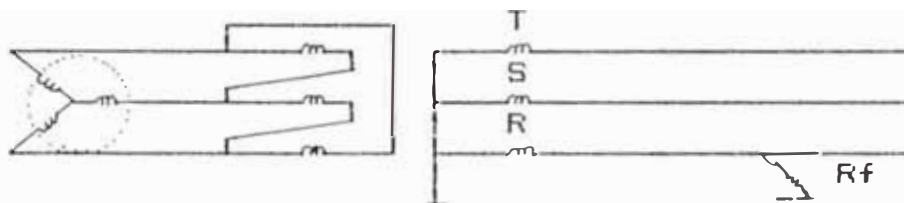
Adicionalmente, en tales condiciones, también ocurren variaciones de las tensiones de fase respecto al potencial de tierra, las cuales inciden directamente sobre el dieléctrico de los equipos y accesorios del sistema.

A continuación analizaremos el comportamiento de éstas magnitudes, ante fallas monofásicas a tierra.

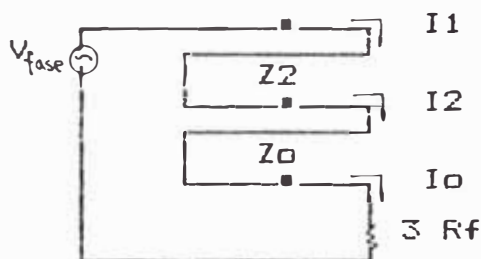
5.2 Comportamiento teórico de las tensiones ($3V_0$) y corrientes ($3I_0$) residuales, ante fallas monofásicas a tierra

El comportamiento teórico de las tensiones residuales ($3V_0$) y corrientes residuales ($3I_0$), ante fallas monofásicas a tierra, es función del aterramiento del

neutro. Dicho comportamiento, para un sistema trifásico generalizado, será brevemente explicado considerando el circuito simple de un grupo generador-transformador y línea aérea en la cual se produce una falla monofásica a tierra a través de una resistencia de falla (R_f), de una de las fases, según el diagrama siguiente:



Cuando se produce una falla monofásica a tierra de una de las fases (R) se tiene el circuito equivalente mostrado en el siguiente esquema:



Dicho circuito está formado por las tres impedancias equivalentes de secuencia en serie (Z_1 impedancia Sec. Positiva, Z_2 impedancia de Sec. negativa y Z_0 impedancia de Sec. cero u homopolar). Las impedancias del transformador y la línea están en serie; en este

caso el generador no participa en la red de secuencia cero, debido a que su neutro es aislado.

En este caso se tiene:

$$I_1 = I_2 = I_0$$

$$I_0 = \frac{V_{\text{fase}}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 R_f}$$

Si asumimos que $Z_1 = Z_2$ [Impedancia de Sec. (+) igual a la Imp. de Sec. (-)]; tenemos:

$$I_0 = \frac{V_{\text{fase}}}{2 Z_1 + Z_0 + 3 R_f}$$

Como: $I_1 = I_2 = I_0$

$I_R = I_1 + I_2 + I_0$ (Corriente de falla por la fase R)

$$I_R = 3 I_0$$

$$I_R = \frac{3 V_{\text{fase}}}{2 Z_1 + Z_0 + 3 R_f}$$

Si dividimos entre Z_1 , el numerador y denominador de la expresión anterior, tenemos:

$$I_R = \frac{3 V/Z_1}{2 + Z_0/Z_1 + 3 R_f/Z_1} \dots\dots\dots (a)$$

La relación Z_0/Z_1 del sistema es definido como la relación de impedancias de secuencia cero y secuencia positiva vista desde el punto de falla; esta relación es variable, dependiendo del método de aterramiento, posición de la falla y disposición del sistema.

La relación R_f/Z_1 es definido como la relación de la resistencia de falla y la impedancia de secuencia positiva vista desde el punto de falla, esta relación es variable dependiendo **de las condiciones de** como se produce contacto de la fase con tierra, y de la resistividad eléctrica del terreno.

Cuando se estima la distribución de las cantidades residuales a través del sistema, es conveniente usar el punto de falla como referencia, como este es el punto de inyección de las cantidades desbalanceadas hacia el sistema. El voltage residual ($3V_0$) es medido en **relación** a la tensión fase-neutro normal del sistema, y la corriente residual ($3I_0$) es comparada con la corriente de falla trifásica en el punto de falla. Puede **demonstrarse** que estas cantidades pueden ser expresadas en terminos de la relación Z_0/Z_1 y R_f/Z_1 del sistema.

Si hacemos $K = Z_0/Z_1$ $K_1 = R_f/Z_1$ y teniendo en cuenta que $I_{falla} 3\phi = V/Z_1$, de la expresión (a) tenemos:

$$I_R = 3I_0 - \frac{3 I_f 3\phi}{2 + K + 3 K_1}$$

$$3I_0 = \frac{3 I_f 3\phi}{2 + K + 3 K_1} \dots\dots\dots (1) \quad [\text{Corri.residual}]$$

Similarmente son halladas las tensiones **residuales**, de:

$$V_0 = - I_0 Z_0$$

$$V_0 = - \frac{V Z_0}{2 Z_1 + Z_0 + 3 R_f}$$

$$V_0 = - \frac{V Z_0/Z_1}{2 + Z_0/Z_1 + 3 R_f/Z_1}$$

$$V_0 = - \frac{V K}{2 + K + 3 K_1}$$

$$3V_0 = - \frac{3 K V}{2 + K + 3 K_1} \dots\dots (2) \text{ [Tens. Residual]}$$

En el Gráf. N°3 se muestra la variación de las tensiones ($3V_0$) y corrientes residuales ($3I_0$) como múltiplos de la tensión fase-neutro y de $I_{f3\phi}$ respectivamente, en función de la relación $K=Z_0/Z_1$, para un valor nulo de R_{falla} ($K_1=R_f/Z_1=0$).

El Gráf. N°3 obtenido en base a las fórmulas (1) y (2), nos permite analizar el comportamiento de $3V_0$ y $3I_0$ ante fallas monofásicas a tierra de un sistema 3ϕ con el neutro aislado, y con el neutro puesto a tierra, mediante un análisis de la variación del factor K

Z_0/Z_1 para cada caso. Esto debido que, impedancia de secuencia cero (Z_0) está afectada por el método de aterramiento, pudiendo contener tanto componentes resistivos como reactivos de comparables magnitudes.

En un sistema con el neutro aislado Z_0 es muy grande y de signo opuesto a Z_1 , debido a que Z_0 sólo representa la reactancia capacitiva a tierra. Con un valor de K alto según el Gráf. N°3 se puede apreciar que el

valor de la tensión residual ($3V_0$) se aproxima a tres veces la tensión fase-neutro nominal. En el mismo gráfico se aprecia que la corriente residual ($3I_0$), de valor igual al que viaja por la fase fallada, tiene un valor pequeño comparado con la corriente de falla trifásica ($I_{f3\phi}$). Por dicha razón en un sistema 3ϕ con el neutro aislado, al producirse una falla monofásica a tierra, no actúan los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

En un sistema 3ϕ con el neutro puesto sólidamente a tierra, Z_0 formado básicamente por la reactancia homopolar del transformador, es muy pequeño comparado con Z_1 . En este caso se tiene generalmente un valor de $K \leq 1$. En el Gráf. N°3 se puede apreciar que el valor de la tensión residual ($3V_0$) disminuye considerablemente en comparación con un sistema 3ϕ con neutro aislado. Por otro lado, el valor de la corriente residual ($3I_0$) se incrementa a un valor tal que puede alcanzar teóricamente hasta 1.5 veces la corriente de falla trifásica ($I_{f3\phi}$). Por dicha razón, en un sistema 3ϕ con el neutro puesto a tierra, al producirse una falla monofásica a tierra franca, es probable que operen los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

Cabe indicar que un sistema 3ϕ con el neutro puesto sólidamente a tierra y corrido presenta teóricamente y en la práctica real un valor menor de K con respecto al que presenta un sistema 3ϕ con el neutro puesto a

tierra pero no corrido.

Adicionalmente, con la finalidad de observar el comportamiento, tanto de la tensión residual (V_o) como de la corriente residual (I_o), ante fallas monofásicas a tierra en función de la resistencia de falla (R_f); se ha graficado estas magnitudes vs el factor $K=Z_o/Z_1$ para diferentes valores del factor $K_1=R_f/Z_1$. En los Gráf. N°4 y N°5 se puede apreciar dicho comportamiento.

5.3 Cálculo teórico de tensiones y corrientes ante fallas monofásicas a tierra de una red de 20 kV

5.3.1 Descripción de la red de 20 kV

Considerando que la red en 20 kV con que cuenta actualmente el sistema de distribución de ELECTROLIMA, es la que suministra energía eléctrica a la empresa de la sal (EMSAL) en la zonal de Huacho, la cual ha sido tendida con cuatro conductores representando a un sistema trifásico con neutro corrido y puesto a tierra; se efectuará para dicha red los calculos teóricos en mención.

Esta red de la zonal de Huacho es básicamente línea aérea. Como se mencionó, es trifásica de cuatro conductores (con neutro corrido y P.T.). Dicha línea se inicia en una subestación elevadora a la intemperie de 10/21 kV, ubicada en

la SET de Hualmay (66/10 kV), el transformador dicha subestación elevadora es de 3 MVA, el cual tiene la conexión estrella con neutro puesto a tierra en el lado de 21 kV, y la conexión en triángulo en el lado de 10 kV. La línea continúa hasta llegar a una SE tipo interior en la Urbanización Los Cipreses (a 4 Km. Aprox. de la SET de Hualmay) punto de entrega y medición al cliente. Finalmente la línea sigue hasta llegar a la planta de EMSAL (25 Km Aprox.).

El extremo final de la línea llega a una SE de distribución tipo interior de 20/0.46 kV (en la planta de EMSAL); el transformador de dicha subestación es de 800 kVA, el cual tiene la conexión estrella con neutro puesto a tierra en el lado de 20 kV, y la conexión en triángulo en el lado de 0.46 kV.

La línea en mención tiene una longitud total aproximada de 30 Km, tendida en tramos consecutivos de acuerdo a la distribución que se muestra en el cuadro N°9 .

En la figura N°1 se muestra el diagrama unifilar del circuito de la línea en mención.

5.3.2 Mediciones y cálculos previos efectuados

a) Mediciones de la resistividad eléctrica del terreno y resistencia de puesta a tierra

Con la finalidad de realizar un cálculo, el cual sea lo más exacto posible; se han realizado mediciones de resistividad del terreno en dos puntos representativos de dicha línea. Dicho puntos serán tomados como puntos falla, denominándolos punto de falla 1 (PF1) y punto de falla 2 (PF2). La ubicación de dichos puntos de falla se muestran en la figura N°1 .

Adicionalmente se han efectuado mediciones de resistencia de puesta a tierra de los pozos de tierra donde van conectados los puntos neutros de los transformadores, tanto al inicio de la línea (SE elevadora de Hualmay) como al extremo final de la misma (SE de EMSAL).

Los resultados de dichas mediciones se muestran en el cuadro N° 10 .

b) Cálculo de los parámetros eléctricos

Teniendo en cuenta la disposición y secciones de los conductores, según las estructuras utilizadas en la línea aérea de kV, y considerando un valor promedio de la resistividad del terreno obtenida en base las mediciones efectuadas que se indica el punto (a); mediante un programa computacio-

nal, se ha calculado los parámetros eléctricos de la línea, como son:

Impedancia de secuencia positiva $Z (+)$,
Impedancia de secuencia negativa $Z (-)$,
Impedancia de secuencia cero $Z (0)$ y
Suceptancia

Estos cálculos, han sido efectuados considerando a la línea en mención como un sistema trifásico con neutro aislado, y como un sistema trifásico con neutro corrido.

En el Anexo II, se muestra un resumen de los valores de dichos parámetros, obtenidos según las estructuras empleadas.

5.3.3 Cálculo teórico de tensiones y corrientes ante fallas monofásicas a tierra de la red de 20 kV

Con los valores anteriores, los datos de las características técnicas de los transformadores de potencia empleados, y considerando los valores medidos de resistencia de puesta a tierra (de los pozos de puesta a tierra según corresponda) que indicamos en el punto 5.3.2; mediante un programa computacional, se han calculado magnitudes referenciales, tanto de tensiones como de corrientes, que obtendríamos en el punto de medición, en condiciones de falla monofásica a tierra. Primero simulando que dicha falla ocurre

en el PF1 (a 1.2 Km de la SET Hualmay) y luego en el PF2 (a 28.8 Km de la SET Hualmay). Estos cálculos, su vez, han sido efectuados simulándose en dicha red cada uno de los tres probables sistemas de la futura red. Estos probables sistemas han sido denominados caso A, B, y C, los cuales son:

Caso A: Sistema 3Ø con neutro corrido y F.T..

Caso B: Sistema 3Ø con neutro puesto a tierra.

Caso C: Sistema 3Ø con neutro aislado.

Para estos cálculos se ha considerado diversos valores de resistencia de falla.

Los resultados de dichos cálculos, para cada valor de resistencia de falla considerado según sea el caso y punto de falla se muestran en el Cuadro Nº 11 .

Con la finalidad de analizar el comportamiento de las tensiones ($3V_o$) y corrientes ($3I_o$) residuales ante fallas monofásicas a tierra vs. la resistencia de falla, de la línea aérea en 20 kV en mención, se han elaborado los siguientes gráficos:

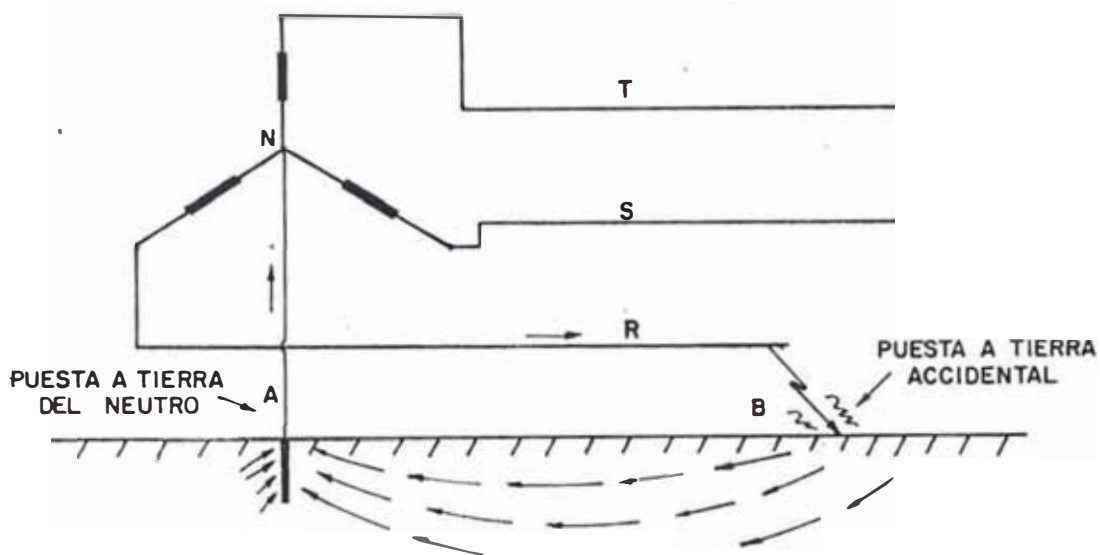
Gráf. Nº6 TENSION HOMOPOLAR ($3V_o$) vs R FALLA (Falla 1Øt en PF1) para cada caso (Caso A, B y C)

Gráf. Nº7 CORRIENTE HOMOPOLAR ($3I_o$) vs R FALLA (Falla 1Øt en PF1); para cada caso (Caso A, B y C)

- Gráf. Nº8 TENSION FASE(R)-TIERRA vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF1); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº9 TENSION FASE(S)-TIERRA vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF1); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº10 TENSION FASE(T)-TIERRA vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF1); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº11 CORRIENTE DE FASE(R) vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF1); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº12 CORRIENTE DE FASE(S) vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF1); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº13 CORRIENTE DE FASE(T) vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF1); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº14 TENSION HOMOPOLAR(3Vo) vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF2); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº15 CORRIENTE HOMOPOLAR(3Io) vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF2); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº16 TENSION FASE(R)-TIERRA vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF2); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº17 TENSION FASE(S)-TIERRA vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF2); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº18 TENSION FASE(T)-TIERRA vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF2); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº19 CORRIENTE DE FASE(R) vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF2); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº20 CORRIENTE DE FASE(S) vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF2); para cada caso
(Caso A, B y C)
- Gráf. Nº21 CORRIENTE DE FASE(T) vs R FALLA
(Falla 1Øt en PF2); para cada caso
(Caso A, B y C)

5.4 Influencia de las resistencias de puestas a tierra y de la impedancia de tierra, ante fallas monofásicas a tierra

Como se puede apreciar en el siguiente esquema:



IMPEDANCIA DE TIERRA

la corriente producida por una falla monofásica (puesta a tierra accidental) en sistemas con el punto neutro conectado a tierra, pero sin conductor neutro, depende -entre otros factores- de: la resistencia que encuentra la corriente al pasar desde el electrodo que conecta el punto neutro (N) con la tierra (puesta a tierra del neutro); la resistencia de falla que representa la puesta a tierra accidental en el punto B, y por la impedancia propia de la tierra entre A y B.

La conexión a tierra del punto neutro en A, es ejecutada mediante sistemas especiales, con electrodos, mallas, etc..

Supongamos que la puesta a tierra del neutro en A, es

efectuado con un electrodo . La resistencia presentada al paso de la corriente del electrodo a tierra, se denomina resistencia de puesta a tierra.

La resistencia de puesta a tierra del neutro, la impedancia de tierra, forman parte de la impedancia de secuencia cero del sistema. La resistencia de falla que representa la puesta a tierra accidental, se encuentra en serie con las redes de secuencia del sistema, para el caso de fallas monofásicas a tierra (ver punto 5.2). Por lo expresado, es conveniente conocer el comportamiento de cada una de ellas.

5.4.1 La resistencia de puesta a tierra

En la evaluación de las resistencias de puestas a tierra, tiene importancia fundamental la resistividad del terreno. Esta resistividad se expresa en $\Omega\text{-m}$ suponiendo una sección de 1 m^2 ; y depende de la naturaleza del terreno, de la humedad, de las sustancias ácidas y básicas que contenga, etc..

Si bien la conductibilidad de la mezcla de los materiales componentes de la tierra en su superficie y bajo ella, es muy baja comparada con la de los materiales conductores; la tierra podría considerarse como semiconductor, siendo el valor de la relación de resistividades $\rho_{\text{tierra}}/\rho_{\text{cobre}}$ de 10^8 hasta 10^{12} .

A pesar de la alta resistividad, la tierra puede ser recorrida por corrientes de muy alta intensidad, ya que la sección que éstas utilizan prácticamente no tiene limitaciones.

Cabe indicar que a consecuencia de una alta resistividad de la tierra, el paso de la corriente del electrodo a la tierra, produce una gran caída de tensión; de manera que, no se puede siempre atribuir a la tierra un potencial cero, pues, una corriente produce gradientes de tensión en su superficie.

Para calcular los valores de las resistencias de puestas a tierra, de un electrodo, de un sistema mallas, ú otro; parte de ciertas premisas y, mediante un desarrollo matemático se llega a la expresión que determina el valor de dichas resistencias de puestas a tierra.

Por ejemplo, para calcular el valor de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo, se tiene las siguientes expresiones:

Para un electrodo horizontal:
(a nivel del suelo)

$$R = \frac{0.732}{L} \rho \text{ Log } (2L/d)$$

Para un electrodo vertical ;
(A nivel del suelo)

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \text{ Ln } (4L/d)$$

Donde: R Resistencia de puesta a tierra.
Resistividad eléctrica del terreno.
L Longitud del electrodo.
d Diámetro del electrodo.

Como se puede apreciar en las expresiones anteriores, la resistencia de puesta a tierra de los electrodos, es principalmente una función de la resistividad eléctrica del terreno y de la longitud del electrodo. Las relaciones $\text{Log}(2L/d)$ y $\text{Ln}(4L/d)$ tienen menor influencia tratándose de funciones logarítmicas. En consecuencia, el diámetro mínimo de los electrodos está determinado principalmente por criterios mecánicos, pues de él depende, la rigidez mecánica necesaria para que el electrodo pueda ser clavado en el suelo.

La resistencia de puesta a tierra - evaluada mediante las expresiones anteriores - de un electrodo de 2.4m de longitud y un diámetro de 16mm (cuyo uso está normalizado actualmente en Electrolima) en función de la resistividad eléctrica del terreno, se muestra en el Gráf. N^o22. En él se puede apreciar claramente, como incide el valor de la resistividad eléctrica del terreno en el valor de la resistencia de puesta a tierra. Por ello, con la finalidad de obtener resistencias de puestas a tierra, de valores a-

ceptables según normas internacionales, en zonas de alta resistividad; se procede al tratamiento del terreno con sales, a fin de disminuir el valor de la resistividad eléctrica de la zona, y por ende, el de la resistencia de puesta a tierra.

A continuación se indica los valores de las resistividades eléctricas típicas del terreno de Lima (según el plano de la resistividad eléctrica de Lima, Ref. N92):

TIPO DE TERRENO	RESISTIVIDAD (Ω -m)	
Arenoso-húmedo	10	30
Agrícola-arcilloso-arenoso-húmedo	20	60
Arcilloso-húmedo	40	90
Arcilloso-arenoso-ligeramente con ripio	60	150
Arenoso 70% pedregoso 20% arcilloso 10%	100	250
Arenoso	200	400
Pedregoso 60% arenoso 20% arcilloso 10%	300	600
Pedregoso 80% arenoso 15% arcilloso 5%	500	-1000
Pedregoso 70% arcilloso-arenoso 30% seco	500	-1200

5.4.2 La impedancia de tierra

El conocimiento del comportamiento de la tierra recorrida por grandes corrientes, es importante para la determinación de las corrientes producidas por fallas monofásicas a tierra. Como ya se mencionó, a pesar de su alta resistividad, la

tierra puede ser recorrida por corrientes de muy alta intensidad, ya que la sección que éstas utilizan no tiene prácticamente limitaciones.

Como se sabe, la corriente de falla producida por una falla monofásica a tierra, retorna principalmente por el terreno en los sistemas con el punto neutro conectado a tierra; y por terreno y conductor neutro en el caso de un sistema Δ con neutro corrido. En ambos casos, para determinar el valor de la impedancia de secuencia cero equivalente (incluye la del conductor y el terreno); es necesario, emplear métodos que tomen en consideración la resistividad eléctrica del terreno.

Este problema ya ha sido extensamente analizado por diferentes investigadores, destacándose los análisis realizados por J.R. Carson, él cual propuso métodos de cálculo, cuyos resultados más aproximan a los valores reales. Carson presentó su ecuación en forma de series.

Según J.R. Carson, la resistividad eléctrica del terreno tiene un paradójico efecto a saber: que la resistividad y la frecuencia afecta la expresión de la reactancia; mientras que, la resistencia de tierra no es dependiente de la resistividad, si no básicamente de la frecuencia. Con un incremento de la resistividad, se tiene un

incremento de la sección de tierra atravesada por la corriente, manteniéndose la frecuencia constante.

La fórmula simplificada - dada por J.R. Carson - satisfactoria en la práctica para todos los cálculos de potencia, para determinar la impedancia de secuencia cero de un lazo formado por un simple conductor con retorno por tierra es:

$$Z_0 = r + r_e + j X_0$$

El término $r + r_e$ comprende la resistencia r del conductor aumentada por:

$$r_e = \pi^2 \times f \times 10^{-04} \quad \Omega/\text{km} ;$$

Para X_0 se tiene:

$$X_0 = 28.938 \times 10^{-04} \times f \times \text{Log} (D_e/RMG) \quad \Omega/\text{km} ;$$

Donde:

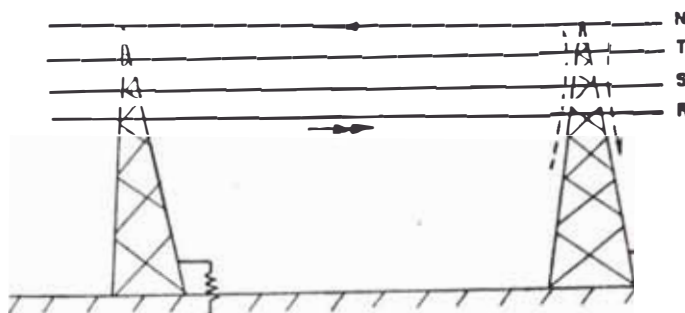
f Frecuencia en ciclos por segundo (Hz).

D_e Profundidad equivalente de la vía de retorno por el suelo ($D_e = 658.368 \sqrt{\rho/F}$).

Resistividad eléctrica del suelo, en $\Omega\text{-m}$.

RMG Radio medio equivalente del grupo de conductores, en m.

En el caso de tener un cuarto conductor, el cual es aterrado cada cierto tramo, tal como se aprecia en la figura siguiente:



se tiene ahora dos caminos de retorno, uno es el conductor neutro y el otro es el terreno. Por consiguiente, la impedancia de secuencia **cero** disminuirá. El valor de esta nueva impedancia para efectos prácticos- puede ser determinada a partir de la impedancia de secuencia cero de un sistema sin conductor neutro, multiplicada por un coeficiente de acoplamiento. Dicho coeficiente depende de: la impedancia propia del circuito formado los conductores y tierra; la impedancia propia del circuito formado por el conductor neutro y tierra, y la impedancia mutua de ambos circuitos anteriores.

En el Gráf. N^o23 se muestran los valores de impedancia de secuencia cero, tanto para un sistema sin conductor neutro como para aquél con conductor neutro, en función de la resistividad eléctrica del terreno. Dichos valores han sido **calculados** empleando el método de J.R. Carson,

considerando una disposición de conductores según estructura A-55 (ver anexo I); conductor de Cu de 70 mm² para las fases y de 16 mm² para el neutro, y una temperatura de operación de 30°C.

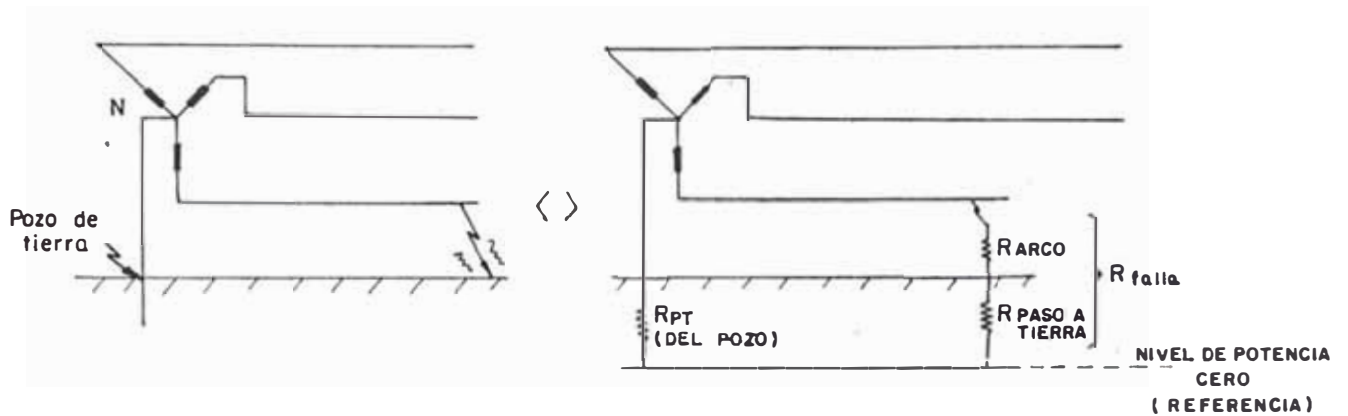
En el Gráf. N^o23, se puede apreciar que el conductor neutro reduce la impedancia de secuencia cero de un sistema sin dicho conductor. Esta reducción para el caso de la línea Hualmay-Emsal; es del orden del 9% para una resistividad de 5Ω-m; y del orden de 16% para una resistividad de 1000Ω-m .

Asimismo, se puede apreciar que a medida que se incrementa el valor de la resistividad del terreno; el valor de la impedancia secuencia cero para ambos casos -sistema con neutro o sin él- no presentan una variación sustancial, tal como ocurre con el valor de la resistencia de puesta a tierra (ver Gráf.N^o22).

5.4.3 La resistencia de falla

En el caso de roturas de conductores, el contacto del conductor roto con el suelo formaría el paso de la corriente a tierra; formándose una resistencia de falla, la cual representa la puesta a tierra accidental.

Según se aprecia en el siguiente esquema:



puede decirse que la resistencia de falla, está formada por la resistencia de arco más la resistencia de paso a tierra.

El arco eléctrico es un puente de vapor incandescente compuesto por electrones impulsados eléctricamente desde un electrodo negativo hacia uno positivo. En el caso de producirse una falla tierra producida por rotura de un conductor; el conductor roto y tierra harán de electrodos.

Si llamamos v a la caída de potencial a través del arco i al flujo de corriente; en un régimen no uniforme, dv/di será la resistencia que ofrecerá el arco al paso de la corriente. Si bien el arco es inestable; en todas las gamas

comunes de frecuencia (menos de 10 kilociclos), la relación dv/di tiende a ser relativamente baja. Ello significaría que la resistencia al paso de la corriente que ofrece el arco eléctrico, tiene relativa incidencia sobre la resistencia de falla total.

La resistencia de paso tierra depende principalmente de la resistividad eléctrica del terreno. Es decir, de que tan buena conductibilidad eléctrica, de la mezcla de los materiales componentes de la tierra en su superficie y bajo ella, se tengan en el lugar de contacto del conductor roto con el terreno.

Investigaciones sobre estimaciones de valores de resistencias y corrientes de falla que se obtendrían en diferentes tipos de terrenos; han sido realizadas por diferentes compañías de servicio eléctrico. Dichas compañías han estado preocupadas en investigar y desarrollar técnicas para la detección de fallas monofásicas a tierra con altas impedancias de falla.

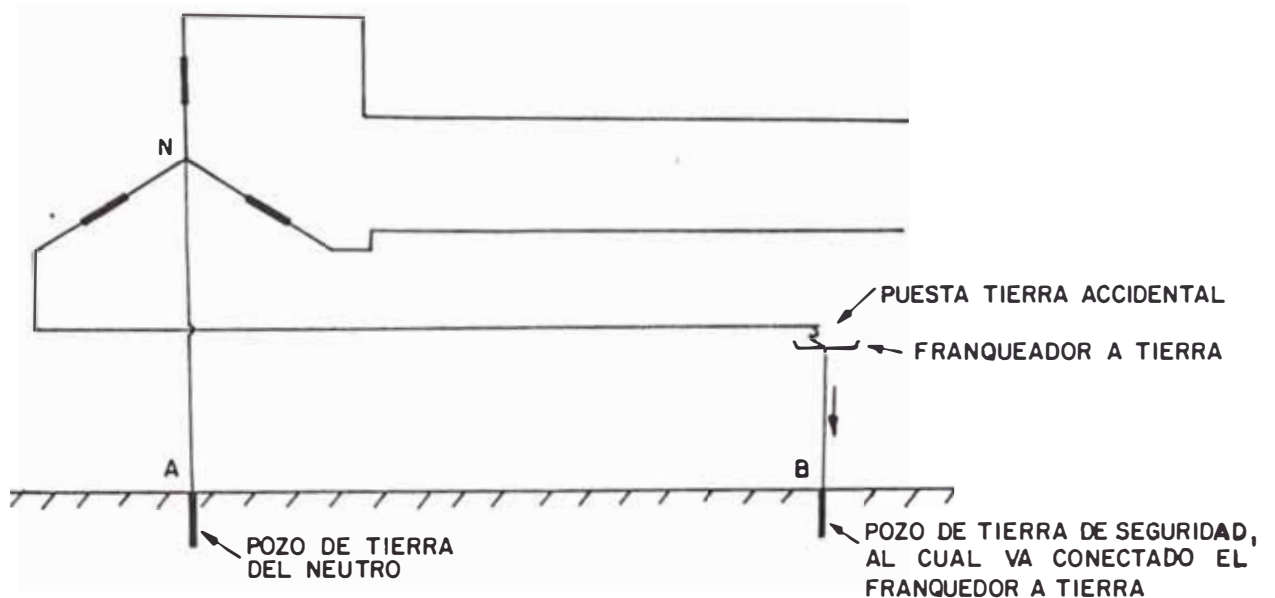
Como ejemplo, citaremos la realizada por la Pennsylvania Power Light Co. sobre seis alimentadores de distribución de 12 kV en un sistema 3 ϕ con neutro corrido multiaterrado (Ref. N03). Dicha compañía realizó una serie de pruebas repetitivas fallas monofásicas a

tierra sobre diferentes superficies, las cuales en promedio arrojaron los siguientes resultados (ver anexo III):

-Un conductor desnudo que cae sobre árbol, produce una corriente de falla muy pequeña, del orden de 1.2A, y una impedancia de falla promedio de 6000Ω .

-Un conductor desnudo que cae sobre césped, grava, y concreto; produce una corriente de falla de aproximadamente 90A para las tres superficies. Ello corresponde a una impedancia de falla de aproximadamente 80Ω para cada una de las tres superficies.

Los valores de impedancias de fallas, producto de fallas monofásicas a tierra producidas por roturas de conductores; disminuirían apreciablemente, si se considera la alternativa utilizar el franqueador a tierra (ground cradle, ver anexo IV). Dicho franqueador a tierra, en un sistema con el neutro puesto a tierra no corrido permitirá que el conductor roto haga contacto con un camino de resistencia a tierra relativamente baja. Este valor de resistencia a tierra, como se puede apreciar en figura siguiente:



estará predominantemente dada por el valor de la resistencia de puesta a tierra del pozo de tierra de seguridad, al cual va conectado el franqueador a tierra.

Actualmente en la líneas aéreas de M.T., resistencia de puesta a tierra del pozo de tierra de seguridad (de cada estructura), según lo establecido en el actual CNE (Pág.28 Tomo IV), y tal como se estipula en Electrolima, no debe ser superior a 25Ω.

Por lo expuesto, de utilizarse el franqueador el valor de la resistencia de falla esperada, debe ser del orden de la resistencia de puesta a

tierra del pozo de tierra de seguridad, al cual va conectado el franqueador. Y tal como se pudo apreciar en el punto 5.4.1 y en el Graf. Nº22, este valor de resistencia de puesta a tierra depende principalmente de la resistividad del terreno.

En caso de utilizarse el franqueador a tierra, en un sistema 3Ø con neutro corrido al producirse una falla monofásica, debería producirse un cortocircuito y abrir los dispositivos de protección correspondientes. Ello considerando que el franqueador va conectado al conductor neutro.

CUADRO No 9

DISTRIBUCION DE LA LINEA HUALMAY-EMSAI

TRAMO	Longitud (Km)	Conductor (mm ²)	Struct. Predomin.	Long. del Poste (m)	
SET de Hualmay	1	0.5	3x70+1x16	A-55	15
1	>2	1.5	3x35+1x16	A-55	15
2	(SE de los Cipreses)	2.2	3x70+1x16	A-57	15
3	(SE de los Cipreses)	25.0	3x35+1x16	A-57	15

* Ver normas LI-9-215 y LI-9-217 (Anexo I)

CUADRO No10

MEDICIONES DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO Y DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

RESISTIVIDAD DEL TERRENO ($\Omega \cdot m$)				
LUGAR	\ddagger		PROMEDIO	TIPO DE TERRENO
PF1 (punto de falla 1)		175	110	Arenoso-pedregoso
PF2 (punto de falla 2)	0.3	5	2.7	Salitroso, con capas de agua a poca profundidad.

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA (Ω)			
UBICACION	\ddagger		PROMEDIO
Pozo de tierra de proteccion en SE Hualmay (solo)		17.8	18.5
Pozo de tierra del sistema en SE Hualmay (solo)		14.2	14.2
Pozo de tierra del sistema en SE Hualmay, conectado con el neutro corrido		2.15	2.15
Malla de tierra de la SET Hualmay (65 kV)		0.9	0.9
Pozo de tierra de proteccion en SE EMSAL (solo)			0.17
Pozo de tierra del sistema en SE EMSAL, conectado con el neutro corrido			0.12

\ddagger Valores obtenidos por el personal del Serv. Ing. de Distribución.

$\ddagger\ddagger$ Valores proporcionados por el personal del Serv. Mantenimiento Equipos Eléctricos de Distribución (lecturas tomadas en días diferentes y con equipos también diferentes).

CUADRO No 11

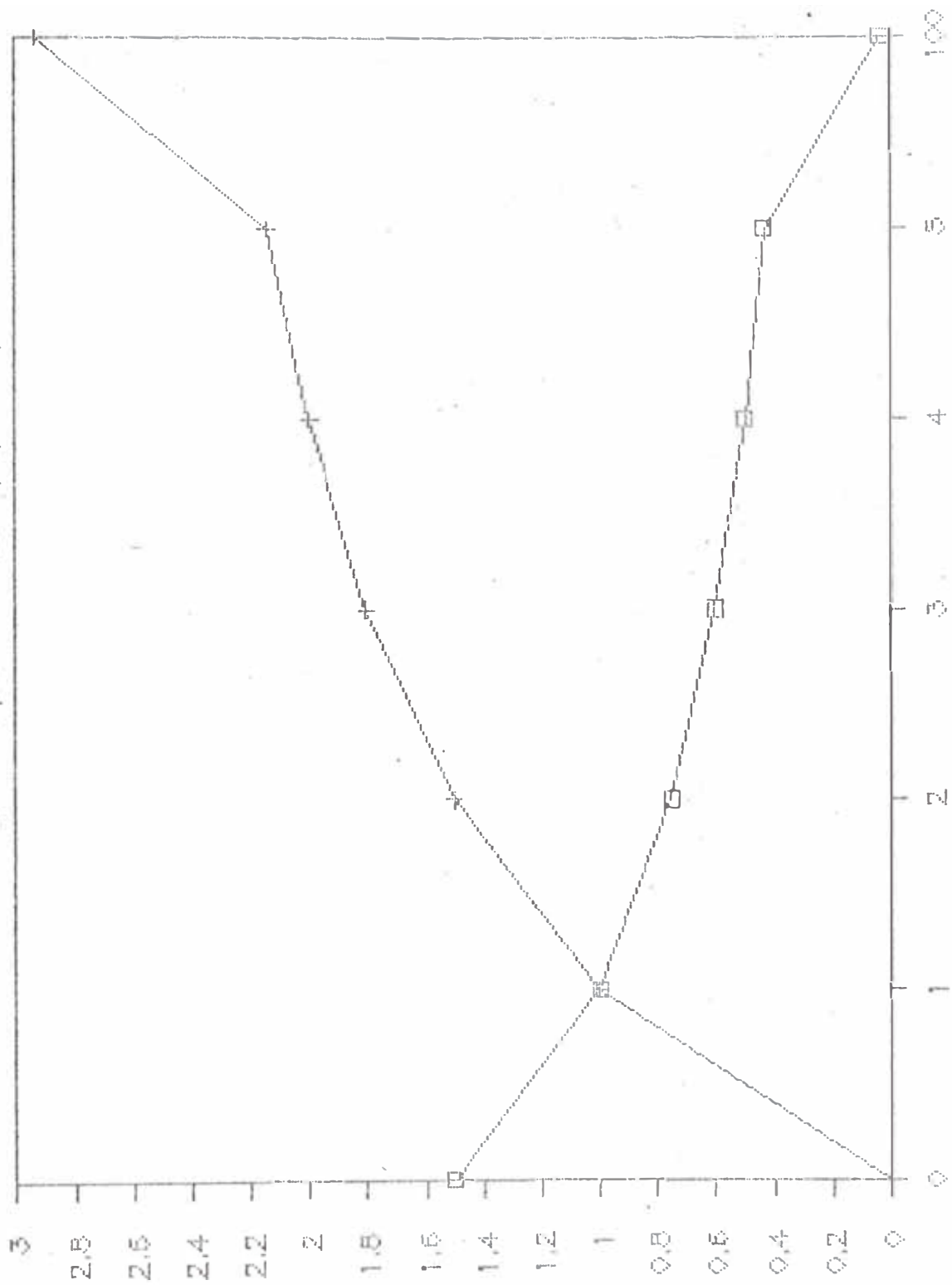
VALORES DE TENSIONES Y CORRIENTES TEORICOS EN CODICIONES DE FALLA
MONOFASICA A TIERRA (LINEA HUALMAY-EMSAL)

Sistema	Pto.de falla	Resist.de falla (Ω)	3 Vc (kV)	3 Io (A)	I r † (A)	I s (A)	I t (A)	V r-o † (kV)	V s-o (kV)	V t-o (kV)
Sistema : 3 φ	Pto.de falla : 1	0	7.253	822.229	817.638	6.131	5.812	0.994	11.921	11.137
		80	1.317	149.369	148.709	6.213	6.466	11.984	12.064	12.676
		100	1.066	120.996	120.474	6.256	6.453	12.107	12.141	12.646
		200	0.546	61.752	61.749	6.312	6.422	12.320	12.304	12.571
		1000	0.109	12.512	14.002	6.362	6.384	12.447	12.438	12.493
Corrido : (Caso A)	Pto.de falla : 2	0	2.619	296.923	289.225	7.360	6.879	8.696	12.012	12.187
		80	1.055	119.594	116.597	6.796	6.263	11.745	12.162	12.574
		100	0.898	101.696	99.222	6.739	6.257	11.916	12.206	12.572
		200	0.506	57.463	56.278	6.587	6.285	12.242	12.327	12.546
		1000	0.113	12.594	13.766	6.428	6.356	12.441	12.438	12.492
Puesto : a Tierra:	Pto.de falla : 1	0	24.290	558.298	555.356	6.186	10.288	0.710	11.730	20.040
		80	5.569	128.007	127.429	6.620	7.079	10.257	12.862	13.868
		100	4.630	106.420	106.040	6.593	6.950	10.650	12.817	13.606
		200	2.510	57.702	57.702	6.508	6.670	11.510	12.683	13.049
		1000	0.538	12.331	13.801	6.411	6.439	12.271	12.522	12.563
Puesto : (Caso B)	Pto.de falla : 1	0	10.672	245.374	238.116	7.068	8.196	7.499	11.003	15.809
		80	4.663	107.140	104.088	7.033	6.769	10.375	12.497	13.782
		100	4.026	92.541	89.957	6.969	6.673	10.695	12.544	13.542
		200	2.372	54.502	53.171	6.763	6.488	11.485	12.590	13.070
		1000	0.542	12.487	13.595	6.469	6.381	12.263	12.517	12.592
Puesto : Aislado:	Pto.de falla : 1	0	38.108	0.091	19.767	11.256	11.313	0.015	21.853	21.933
		80	37.744	0.109	19.608	10.758	11.635	1.585	20.913	22.576
		100	37.562	0.096	19.528	10.623	11.706	1.968	20.643	22.690
		200	36.188	0.089	18.890	9.856	11.860	3.782	19.159	22.996
		1000	20.154	0.000	11.786	5.664	9.900	10.512	11.095	19.245
Puesto : (Caso C)	Pto.de falla : 2	0	38.952	0.092	19.936	11.217	11.410	0.411	21.956	22.317
		80	38.555	0.096	19.649	10.717	11.720	1.868	20.991	22.934
		100	38.363	0.085	19.556	10.579	11.778	2.243	20.714	23.042
		200	36.940	0.090	18.907	9.907	11.918	4.022	19.203	23.316
		1000	20.649	0.000	11.792	5.625	9.922	10.605	11.006	19.412

† Fase fallada

GRAF. No 3: Varia. de Magnitu. residuales

Varia. en el punto de falla ($Rf/Z1=0$)



$$K = \left(\frac{Z_0}{Z_1} \right) + \frac{Z_0}{Z_1} \text{ para } 1\phi$$

□ Z_0 para 1ϕ

Wave y λ en multiples

CAPITULO 6 PRUEBAS DE FALLA MONOFASICA A TIERRA REALIZADAS

6.1 Introducción

Como se ha podido apreciar en el capítulo 5, el comportamiento ante fallas monofásicas a tierra, de un sistema 3Ø con el neutro puesto a tierra y el de aquel cuyo neutro es aislado, son completamente diferentes. Con la finalidad de comprobar los resultados teóricos y definir la conveniencia de un sistema u otro, se planteó la necesidad de efectuar pruebas de falla monofásica a tierra, las cuales nos permitiría contar con magnitudes referenciales tanto de corrientes como de tensiones en dichas condiciones. Cabe indicar que las magnitudes referenciales de tensiones nos permite, adicionalmente, a definir el adecuado nivel de aislamiento de los equipos y accesorios de la futura red.

Considerando que la red en 20 kV con que cuenta actualmente el sistema de distribución de ELECTROLIMA, es la que suministra energía eléctrica a la empresa de la sal (EMSAL) en la zonal de Huacho; se recomendó que en dicha red, básicamente línea aérea, se efectúen las pruebas en mención, las cuales fueron llevadas a cabo el 25.11.89.

Las pruebas de falla monofásica a tierra llevadas a cabo, fueron realizadas efectuándose el seccionamiento

Y desprendimiento de la fase R (en dos puntos, en forma independiente) de la línea aérea en 20 kV, hasta que físicamente haga contacto con el terreno, registrando en dichos instantes los valores de tensiones y corrientes correspondientes. Dichas pruebas han sido efectuadas, simulando en la línea aérea de 20 kV tres probables sistemas de la futura red de 20 kV, los cuales fueron:

Sistema 3 Ø con neutro aislado

Sistema 3 Ø con neutro puesto a tierra (no corrido)

Sistema 3 Ø con neutro corrido

6.2 Procedimiento

Las pruebas se efectuaron simulando, en la línea en mención, cada uno de los siguientes casos:

Caso A: Sistema 3 Ø con neutro corrido (multiaterrado)

Caso B: Sistema 3 Ø con neutro puesto a tierra (no corrido)

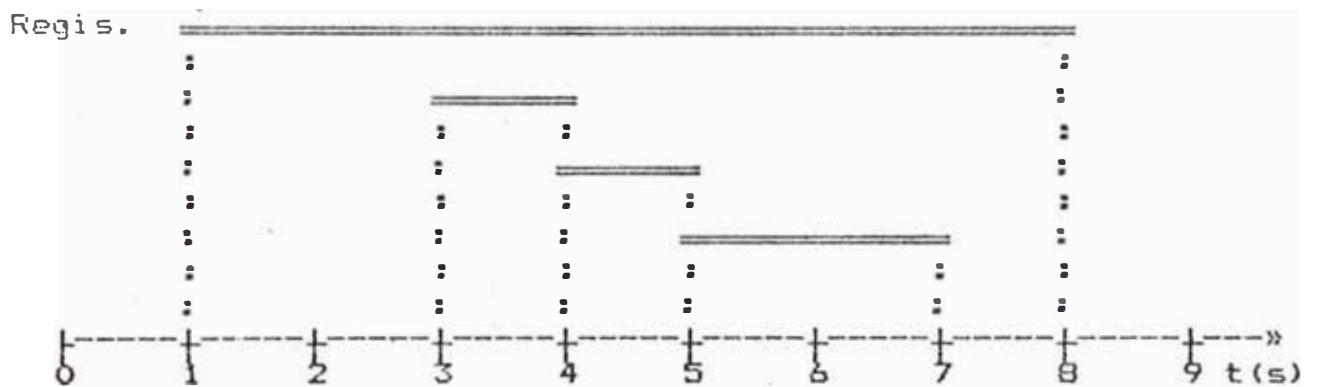
Caso C: Sistema 3 Ø con neutro aislado

En cada caso simulado (encontrándose el transformador de EMSAL en vacío) se llevaron a cabo pruebas de falla monofásica a tierra en dos puntos, el primer punto de falla (PF1) se encontraba a 1.2 Km (aproximadamente) de la SET de Hualmay; mientras que el segundo punto de falla (PF2) a 28.8 Km (aproximadamente) de la SET de Hualmay (Ver Fig. N°1).

En cada caso y para cada punto, para simular la falla

monofásica tierra se efectuó el seccionamiento y desprendimiento de la fase R (inferior) de la línea aérea 20 kV, hasta que físicamente haga contacto con el terreno; registrándose en esos instantes los valores de las magnitudes eléctricas, que según el caso se indica en los puntos 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3 .

A continuación se muestra el diagrama aproximado de secuencia de eventos seguidos, en cada caso y para cada punto de prueba:



- (0) Inicio de la cuenta para la prueba (señal de alerta).
- (1) Arranque del registrador.
- (2) Señal de alerta para el operador de la pértiga, el cual deberá desconectar el conductor en el siguiente segundo.
- (3-4) Maniobra de desconexión del conductor.
- (4-5) Duración de la caída del conductor.
- (5-7) Permanencia del conduc. con tensión en el suelo.
- (7) Apertura del interruptor en 10 kV, sacando de servicio la línea.

(8) Parada del registrador.

Consideramos importante recalcar que el diagrama de secuencia de eventos presentado es aproximado; por tanto, el tiempo de duración de cada evento que indicamos no es el real. El tiempo de duración real que ha sido posible determinar en las pruebas, es el tiempo total que comprende desde el instante en que se desconecta el conductor, cae a tierra y permanece el conductor con tensión en el suelo. Dicho tiempo de duración total para cada prueba, se muestra en el cuadro N°12

Cabe indicar que antes de las pruebas, se instruyó conveniente al personal que participaba. Así mismo, al finalizar cada una de las pruebas, se confirmaba por radio desde la SET Hualmay, la apertura del interruptor correspondiente, así como la colocación de la puesta a tierra en la celda de 10 kV, para volver preparar el circuito para la siguiente prueba.

A continuación se describe la forma como se simuló cada caso, así como la forma de medición y registro de las magnitudes eléctricas.

6.2.1 Caso A: Sistema 3Ø con neutro corrido y F.T.

Esta es la configuración en que se encuentra trabajando actualmente la línea en la que se efectuaron las pruebas, la cual presenta el esquema que se muestra en la Figura N°2.

Para obtener los valores de tensiones se instalaron los 3 transformadores de tensión (30/0.11 kV), y para obtener los valores tanto de la corriente residual como de las corrientes por las fases R y T, se instalaron 3 transformadores de corriente (180/5 A); según las disposiciones que se muestran en la figura N^o2. El registro de las magnitudes (tensiones y corrientes) se efectuaron con el oscilógrafo, el cual consideró el registro de las siguientes:

TENSIONES: $3V_0$ Tensión Homopolar

V_{ro} Tensión de la fase R respecto al potencial de tierra.

V_{so} Tensión de la fase S respecto al potencial de tierra.

V_{to} Tensión de la fase T respecto al potencial de tierra.

CORRIENTES: $3I_0$ Corriente homopolar

I_r Corriente de la fase R

I_t Corriente de la fase T

6.2.2 Caso B: Sistema 3 ϕ con neutro puesto a tierra (no corrido)

En este caso se obtuvo la configuración que se muestra en la Figura N^o3, para lo cual se desconectó el conductor neutro de la línea, de los puntos neutros de los transformadores ubicados en los dos extremos de la línea (en el lado de

conexión en estrella puesto a tierra). Adicionalmente se desconectó las bajadas de puestas a tierra del conductor neutro, tanto en los puntos cercanos a los mencionados transformadores como en los puntos adyacentes al punto de falla 1 (PF1) y al punto de falla 2 (PF2); esto con la finalidad de obtener un sistema trifásico con neutro puesto sólidamente a tierra (no corrido) lo más real posible.

La disposición de los transformadores para obtener la medición de los valores de tensiones y corrientes, fué la misma que para el caso anterior. Asimismo, el oscilógrafo consideró el registro de los mismos parámetros que en el caso anterior (Caso A).

6.2.3 Caso C: Sistema 3Ø con neutro aislado

Para simular este caso se obtuvo la configuración que muestra en la Figura N°4, para lo cual adicionalmente a las desconexiones efectuadas para el caso anterior, se desconectó los neutros puesto a tierra de cada uno de los transformadores ubicados en los extremos de la línea (en el lado de la conexión en estrella).

disposición de los transformadores (de tensión) para obtener la medición de los valores de tensiones fue la misma que para los casos an-

teriores.

En éste caso, a diferencia de los anteriores, debido a que se simuló un sistema 3 \emptyset con neutro aislado, sólo se usaron los dos transformadores de corriente (180/5A) instalados en las fases R y T.

En el presente caso el oscilógrafo consideró el registro de las siguientes magnitudes:

TENSIONES: $3V_0$ Tensión homopolar

V_{r0} Tensión de la fase R respecto al potencial de tierra

V_{s0} Tensión de la fase S respecto al potencial de tierra

V_{t0} Tensión de la fase T respecto al potencial de tierra

CORRIENTES: I_r Corriente de la fase R

I_t Corriente de la fase T

Con la finalidad de ahorrar tiempo y obtener los registros mencionados para cada caso y para cada punto de falla (PF1 y PF2) en un solo día; las pruebas fueron efectuadas según la secuencia que se indica en el cuadro NQ13 .

6.3 Resultados obtenidos en la prueba

En el cuadro NQ12 se muestra los valores promedios de tensiones y corrientes registrados en la prueba, tanto en condiciones normales como en condiciones de

falla monofásica a tierra.

En el anexo V se muestra el registro y esquema empleado por el Serv. Mant. SET y Centrales, sector que se encargó de efectuar los mencionados registros.

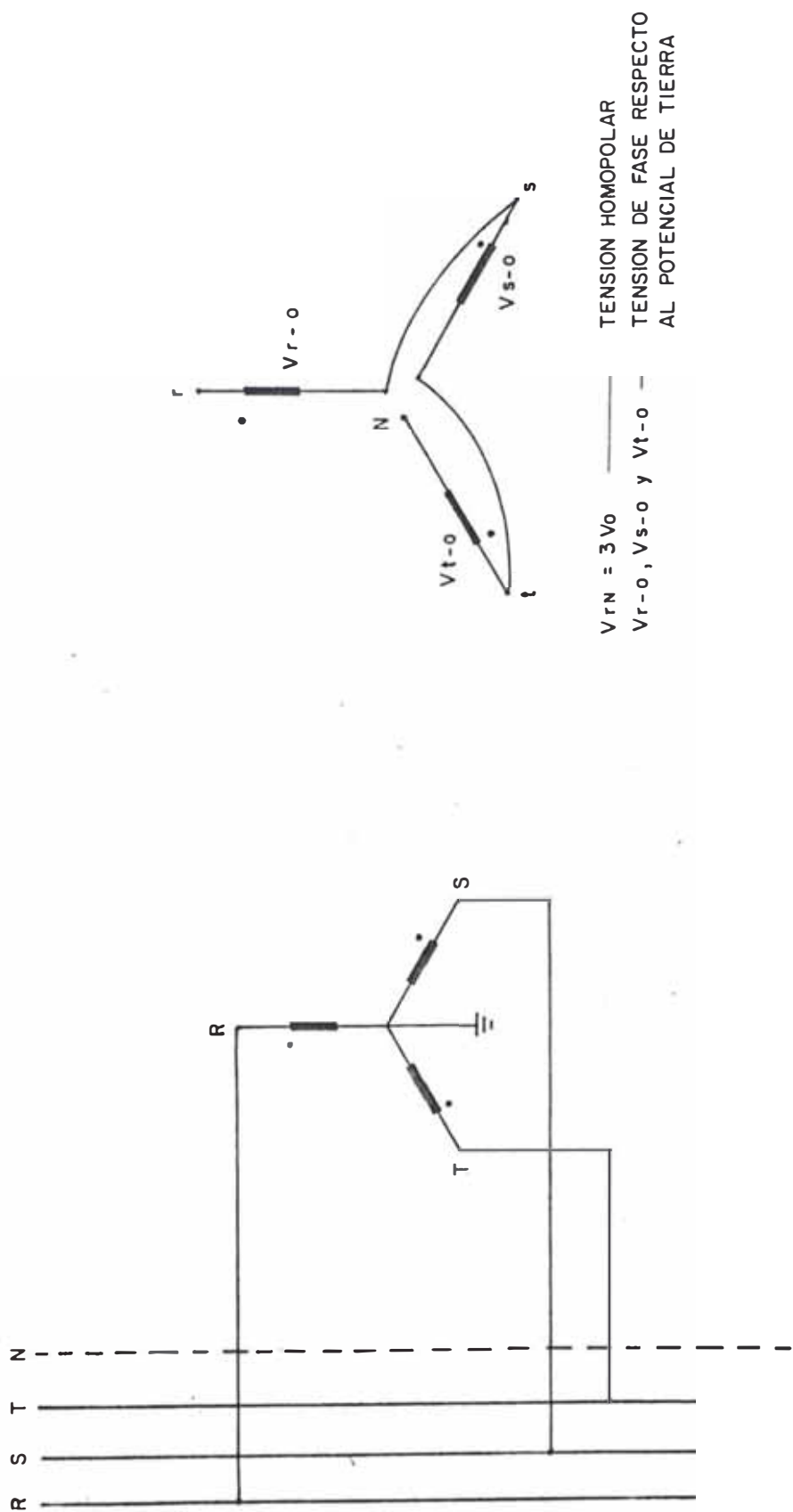


FIG. N° 5

MEDICION DE LA TENSION HOMOPOLAR Y LAS TENSIONES DE FASE RESPECTO AL POTENCIAL DE TIERRA

CUADRO No 12

VALORES PROMEDIOS DE TENSIONES Y CORRIENTES REGISTRADOS EN LA PRUEBA EN CONDICIONES NORMALES Y DE FALLA MONOFÁSICA A TIERRA (LINEA HUALMAY-EMSAL)

Caso	No- de	3Vo (kV)	Tensión Homopolar	Corriente Homopolar	Ir (A)	I t (A)	Vro (kV)	Vso (kV)	Tens.fase(R)-tierra	Tens.fase(S)-tierra	Tens.fase(T)-tierra	Duración
Caso A:	1	0.32	6.36	445.00								1.16
Sistema 3ø:												
con neutro:	7	0.38	5.80	477.00	-	12.12	9.09	12.12	12.43	12.12	11.22	1.00
Corrido												
	2	0.36	3.60	254.00		12.10	10.10	12.10	12.10	12.10	10.10	1.20
Caso B:	5	0.42	9.70	280.00		12.12	79.00	12.12	..	12.12	..	1.16
Sistema 3ø:												
con neutro:												
Fuente a	3	0.23	5.30	222.00		12.10	31.00	12.10	9.43	12.10	12.80	16.17
Tierra												
Caso C:	6	0.51	32.20	158.00		12.12	95.40	12.12	5.76	12.12	15.16	18.19
Sistema 3ø:												
con neutro:												
Aislado	4	0.21	31.80	158.00	--	12.12	95.00	12.12	7.34	12.12	20.21	22.90

‡ Esta prueba fue repetida (ver prueba No- 7)

Valores tendientes a cero

.. Valor impreciso (no tomado en cuenta)

Valor no registrado

R --> Fase fallada

CUADRO No 13

SECUENCIA DE LAS PRUEBAS DE FALLA MONOFASICA A TIERRA REALIZADAS
EN LA LINEA HUALMAY-EMSAL

No-Prueba	Caso Simulado	Punto de Falla	Observaciones
1 ‡	:Caso A: Sistema 3 ϕ con :neutro corrido	PF1	:Se usó pozos separados para el neutro: :P.T. del trafo de potencia y para la : :P.T. de los trafos de medida.
2	:Caso A: Sistema 3 ϕ con :neutro corrido	PF2	:Se usó pozos separados para el neutro: :P.T. del trafo de potencia y para la : :P.T. de los trafos de medida.
3	:Caso B: Sistema 3 ϕ con :neutro puesto a tierra :(no corrido)	PF2	:Se usó pozos separados para el neutro: :P.T. del trafo de potencia y para la : :P.T. de los trafos de medida.
4	:Caso C: Sistema 3 ϕ con :neutro aislado	PF2	:Se usó un pozo común para el neutro : :P.T. del trafo de potencia y para la : :P.T. de los trafos de medida.
5	:Caso B: Sistema 3 ϕ con :neutro puesto a tierra :(no corrido)	PF1	:Se usó un pozo común para el neutro :P.T. del trafo de potencia y para la : :P.T. de los trafos de medida.
6	:Caso C: Sistema 3 ϕ con :neutro aislado	PF1	:Se usó un pozo común para el neutro : :P.T. del trafo de potencia y para la : :P.T. de los trafos de medida.
7	:Caso A: Sistema 3 ϕ con :neutro corrido	PF1	:Se usó un pozo común para el neutro :P.T. del trafo de potencia y para la : :P.T. de los trafos de medida.

‡ Esta prueba fue repetida (ver prueba No-7) para poder efectuar los registros necesarios (bajo las mismas condiciones de puesta a tierra).

CAPITULO 7
 COMPARACION ENTRE LOS VALORES TEORICOS Y LOS VALORES
 REGISTRADOS EN LA PRUEBA

7.1 Determinación del valor de la resistencia de falla

El valor de la resistencia de falla, será determinado a partir a partir del valor de la corriente homopolar ($3I_0$) registrada en la prueba.

Como ya indicó en el punto 5.2, la corriente homopolar esta dada por:

$$3I_0 = \frac{3 V_{\text{fase}}}{2 Z_1 + Z_0 + 3 R_f} \dots\dots (a)$$

Donde: $3I_0$ Corriente homopolar.

V Tensión de fase.

Z_1, Z_0 Impedancias de secuencia positiva y cero respectivamente.

R_f Resistencia de falla.

Despejando R_f de la expresión (a) tenemos:

$$R_f = \frac{1}{3} \left[\frac{3 V_{\text{fase}}}{3I_0} - (2Z_1 + Z_0) \right] \dots\dots (b)$$

Como se puede apreciar en la expresión (b), el valor de la resistencia de falla es función de: los parámetros Z_1 y Z_0 ; la tensión de fase y la corriente homopolar. La tensión de fase es de valor conocido. Los

parámetros Z_1 y Z_0 para un caso específico, por ejemplo para el caso A: sistema 3 ϕ con neutro corrido, tiene un valor determinado. Por tanto, con el valor de la corriente homopolar ($3I_0$) registrada en la prueba, mediante dicha expresión (b), es posible determinar el valor de la resistencia de falla.

Como en los Gráfs. N $^{\circ}$ 7 y N $^{\circ}$ 15 (ver Cap. 5) -elaborados tomando como base la expresión (b)- tenemos el valor de corriente homopolar ($3I_0$) en función de la resistencia de falla, para el punto de falla 1 y para el punto de falla 2 respectivamente; se utilizará dichos gráficos, para la determinación de la resistencia de falla en cada punto.

Con los valores de corrientes homopolares ($3I_0$), de 477A para PF1 y 254A para PF2, registradas en las pruebas para el caso A: sistema 3 ϕ con neutro corrido y puesto a tierra (ver cuadro N $^{\circ}$ 12), y mediante las curvas que para éste caso se tienen en los gráficos N $^{\circ}$ 7 y N $^{\circ}$ 15; se ha obtenido un valor de 50 Ω de resistencia de falla en el el PF1 y de 20 Ω en el PF2.

7.2 Comparación entre los valores teóricos y los valores registrados en la prueba

Para efectuar la comparación entre los valores teóricos, y los registrados en condiciones de falla monofásica a tierra, se ha considerado que el valor de la resistencia de falla en un mismo punto es (Aprox.) el

mismo para cada caso simulado (Caso A: Neutro corrido y Puesto a Tierra, caso B: Neutro Puesto a Tierra y caso C: Neutro Aislado) en la línea de Hualmay-Emsal.

Con el valor de 50Ω de resistencia de falla para PF1 y de 20Ω para PF2 obtenidas anteriormente, y mediante los gráficos que se indican en el punto 5.3.3, se ha determinado los valores teóricos de tensiones y corrientes que se obtendrían para los diferentes casos (como es de esperarse, el valor de $3I_0$ para el caso A, tanto para el PF1 como para el PF2 coinciden).

Con los valores de tensiones y corrientes obtenidos teóricamente para los valores de resistencia de falla, 50Ω para PF1 y 20Ω para PF2, se ha efectuado un cuadro comparativo entre éstos valores teóricos y los registrados en la prueba para cada caso (ver cuadro N°14).

7.3 Análisis de resultados

En condiciones normales operación, un sistema trifásico con el neutro aislado y aquél que tiene el punto neutro conectado a tierra (corrido o no corrido), se comportan prácticamente de la misma manera; tal comportamiento puede apreciarse en el cuadro N°14.

La influencia de la conexión del punto neutro se manifiesta sólo durante condiciones anormales de operación, tal como el caso de una falla monofásica tierra. El comportamiento de un sistema con el neutro aislado y el de aquel con el punto neutro conecta-

do a tierra, son muy diferentes frente a tales efectos. Tales diferencias se pueden apreciar en el cuadro N°14.

En base al análisis teórico efectuado para la línea aérea de 20kV Hualmay-Emsal, ante fallas monofásicas a tierra, y tal como se comprobó en las pruebas efectuadas; para los sistemas 3Ø con neutro aislado se tiene el siguiente comportamiento :

Los valores de tensión fase-tierra de las fases sanas se incrementan notablemente desde valores de $V_n/\sqrt{3}$ (en condiciones normales) hasta valores que ligeramente sobrepasan la tensión nominal (V_n). Estos sobrevoltajes son perjudiciales para la vida útil, del dieléctrico de los accesorios y equipos de las redes; disminuyendo la performance de las mismas.

Los valores de la corriente de falla, son de magnitudes mucho menores comparados con los sistemas con el punto neutro conectado a tierra. Estos valores, en la mayoría de casos no podrían ser detectados por los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

Con el neutro aislado, el valor de la corriente homopolar (de valor igual a $I_r+I_s+I_t$) que se obtendría al inicio del alimentador (punto de medición ver Fig.N°6), en el caso de la línea Hualmay-Emsal, tende-

ría a cero. Ello debido a que la corriente de falla retorna por las fases sanas; por consiguiente, al efectuarse la suma fasorial de I_r , I_s y I_t , dicha suma sería cero. Es decir en este caso no aparecerá un valor de corriente homopolar ($3I_o$) al inicio del alimentador. Por lo mencionado dicha magnitud no fue registrada en la prueba. Lógicamente que por la fase fallada (R) circulará corriente hacia tierra por efecto capacitivo.

base al análisis teórico efectuado para la línea aérea de 20kV Hualmay-Emsal, ante fallas monofásicas a tierra; para el sistema 3ϕ con neutro corrido y puesto a tierra y el sistema con neutro puesto tierra (no corrido), se tiene el siguiente comportamiento

Si los valores de resistencias de fallas fueran del orden de 100Ω o más (Ver Figs. N^o6,7,...y12) se tiene:

Los valores de: tensión homopolar ($3V_o$), corriente homopolar ($3I_o$) y tensiones fase-tierra, se aproximarían para ambos sistemas. Esto se comprueba en los gráficos N^o4 y N^o5, obtenidos en base a un análisis teórico del comportamiento de las tensiones y corrientes residuales, en condiciones falla monofásica a tierra, de un sistema 3ϕ en general. En dichos gráficos se aprecia que para valores del factor R_f/Z_1 mayores o iguales a 50, los valores de la tensión y corriente residual para ambos sistemas

son prácticamente los mismos.

Los valores de la corriente homopolar, aproximadamente igual a las que circulan por la fase fallada, son menores a 120 A. Dichos valores no pueden ser detectados por los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

Una alternativa para ambos sistemas, fin conseguir disminuir los elevados valores de resistencia de falla monofásica, que se obtendrían zonas de alta resistividad, es la aplicación de los "franqueadores tierra" (ground cradles). Un apropiado diseño de los mismos, nos permitiría que el conductor roto haga contacto con un camino resistencia a tierra relativamente baja. Ello debería producir en la mayoría de los casos, en el conductor fallado, una magnitud suficiente de corriente, tal que operen los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

Si los valores de resistencias de fallas fueran menores a 100Ω , se tiene :

El valor de la tensión homopolar ($3V_0$), va aumentando, diferenciándose cada vez más en ambos sistemas (ver Fig. N°6 y N°14), conforme va disminuyendo el valor de la resistencia de falla. Para un valor nulo de resistencia de falla, en el caso del sistema 3Ø con neutro corrido el valor de $3V_0$ es de 7.3 kV, y

de 24.3 kV en el caso de un sistema 3Ø con neutro puesto a tierra no corrido (para una falla monofásica a tierra ocurrida en FF1).

El valor de la corriente homopolar $3I_0$, aproximadamente igual a la que debe circular por la fase fallada (fase R), va aumentando para ambos sistemas conforme va disminuyendo el valor de la resistencia de falla. Para un valor nulo de resistencia de falla, en el caso del sistema 3Ø con neutro corrido, el valor de $3I_0$ es de 822 A, y de 558 A en el caso de un sistema 3Ø con neutro puesto a tierra no corrido (para una falla monofásica a tierra ocurrida en FF1). Dichos valores son de una magnitud tal que, pueden ser detectados por los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

De lo mencionado en el punto anterior y, considerando que el análisis técnico efectuado para la línea de Hualmay-Emsal, nos indica el comportamiento general de una red, ante fallas monofásicas a tierra, se concluye que: tener un sistema trifásico con neutro corrido y puesto a tierra, no presenta una ventaja sustancial, para la liberación de fallas monofásicas a tierra en el rango de altas impedancias ($\geq 100 \Omega$ para el caso de la línea Hualmay-Emsal); comparado con un sistema 3Ø con neutro puesto a tierra. En ambos casos, sería propio usar el franqueador a tierra, a fin de disminuir los valores de resistencias de falla, y posibilitar que la

falla sea detectada por los dispositivos de protección contra cortocircuitos correspondientes.

En el caso de la liberación de fallas en el rango bajas impedancias ($\leq 100 \Omega$ para el caso línea Hualmay-Emsal), ambos sistemas presentan magnitudes de corrientes tal que pueden ser detectadas por los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

CAPITULO 8

PROTECCION RECOMENDADA CONTRA FALLAS MONOFASICAS A TIERRA, PARA LOS PROBABLES SISTEMAS DE DISTRIBUCION PRIMARIA

8.1 Introducción

Los dispositivos de protección tienen la función de detectar fallas y despejarlas de la red, en forma rápida y selectiva; consiguiéndose que las consecuencias de la falla sean disminuidas al mínimo posible. Para poder conseguir el objetivo principal de la protección, se deberán conjugar todo aquello que esté relacionado con la misma como: topología de la futura red, potencias de cortocircuito, capacidades de transporte, transformadores utilizados, características de las líneas, tipos de falla, etc.

En lo que respecta a fallas, podemos mencionar que la mayor parte de las mismas en los sistemas eléctricos, son asimétricas, y en forma general se presentan como cortocircuitos y fallas monofásicas a tierra.

Por considerar a las fallas monofásicas a tierra, frecuente y de dificultosa detección, explicaremos en forma breve el principio en que se basará la protección contra dichas fallas. Como premisa, se analizará un sistema 3Ø con neutro aislado en condiciones normales, procediendo a analizar lo que ocurre en caso de una puesta a tierra simple. Este análisis se realizará

para instalaciones con varios alimentadores, tal como lo sería la futura red. Luego se analizará el mismo comportamiento para un sistema 3ϕ con el neutro puesto a tierra (no corrido), y finalmente para un sistema 3ϕ con el neutro corrido y F.T.. En cada análisis, se hará la recomendación sobre el sistema de protección correspondiente.

8.2 Sistema 3ϕ con neutro aislado

En condiciones normales de operación en un sistema 3ϕ con el neutro aislado, el neutro ficticio se encuentra en forma aproximada al potencial de tierra. Se sabe también que existe una capacitancia distribuida entre conductores y entre conductores y tierra; debido a la capacitancia entre conductores y tierra circularán corrientes de carga de tipo capacitivo entre fases y tierra; en estas condiciones, se cumple que la suma de las corrientes de carga de tipo capacitivo respecto tierra es equivalente a cero (ver Fig. N°7).

Ahora en caso de ocurrir una falla a tierra de cualquiera de las fases sanas; por ejemplo la fase R a tierra, las tensiones de las fases sanas toman valores mayores de los normales, después de un periodo transitorio que dura algunas milésimas de segundo, que pueden producirse tensiones mayores que las normales dependiendo su magnitud y duración de los valores y de la distribución de las inductancias y capacitancias del sistema, se establecerá un estado estacion-

nario. El valor de la tensión estacionaria estará determinada por las condiciones de como se produce contacto de la fase con tierra, la tensión de esta fase con respecto a tierra tomaría el valor de cero; en el diagrama vectorial, esto se manifiesta por un desplazamiento del punto neutro hacia la punta del vector que representa la fase en defecto y que en el diagrama es la fase R (ver Fig. N°8).

mencionado originará la aparición de una tensión residual $V_r=3V_o$ equivalente a la suma fasorial de las tensiones de las fases S y T respecto a tierra. También como consecuencia de la falla, aparecerá una corriente de falla (I_f) entre la fase fallada (fase R) y el potencial de tierra, la cual retornará a través de las capacitancias entre las fase sanas y tierra del alimentador fallado (ver Fig. N°8).

conveniente mencionar que, en el caso de instalaciones con un único alimentador, debido a que la corriente de falla retorna sólo por las fases sanas, al efectuarse la suma fasorial de I_r , I_s y I_t , dicha suma sería igual a cero; es decir, no aparecerá una corriente residual ($3I_o$).

En instalaciones con más de un alimentador debido que la mayor parte de la corriente de falla retorna por las fases sanas de los alimentadores no fallados, aparecerá un valor de corriente residual ($3I_o$) al efectuarse la suma fasorial de I_r , I_s e I_t ; el valor de

ésta corriente residual es aproximadamente igual a la corriente de falla (I_f) dada por la suma fasorial de I_{s0} e I_{t0} de todos los alimentadores (ver Fig. N.º 9). En estas instalaciones se podrá determinar la existencia de una falla monofásica a tierra en forma discriminada midiendo el valor de la tensión residual y corriente residual. Es conveniente mencionar que tanto el valor de la tensión residual ($3V_0$) como de la corriente residual ($3I_0$) dependerá del nivel de tensión, número de alimentadores, longitud de la línea en cable y conductor, resistencia de falla, entre otros.

En este sistema para detectar una falla monofásica a tierra, se requerirá del empleo de los relés direccionales de sobrecorriente homopolar, los cuales detectarían los valores de $3V_0$ y $3I_0$. puede manifestar que, eligiendo los apropiados rangos de regulación de los mismos, se consigue la protección contra fallas monofásicas a tierra.

Una de las desventajas de este sistema, que se presentaría ante fallas monofásicas a tierra, es la falta de la selectividad. Esto debido a que, estos relés al ubicarse en las salidas de la subestación de transmisión (SET), siempre sacarían fuera de servicio todo el alimentador troncal, al ocurrir una falla de esta naturaleza, en cualquier punto de la red que pertenezca a dicho alimentador.

8.3 Sistema 3Ø con neutro puesto a tierra

En condiciones normales de operación en un sistema con neutro puesto a tierra, se cumple que la suma de las corrientes de carga de tipo capacitivo respecto potencial de tierra, es equivalente a cero (ver Fig. Nº9).

En el caso de ocurrir una falla monofásica a tierra de cualquiera de las fases, por ejemplo la fase a tierra, por el hecho de tener el neutro puesto a tierra, las tensiones de las fases sanas respecto al potencial de tierra, tienden a mantenerse sostenidas. En este caso la tensión residual $3V_0$ que aparece, es pequeña para poderla utilizar como referencia y que sirva para polarizar un relé direccional. Como consecuencia de la falla aparecerá una corriente de falla I_f de considerable magnitud, entre la fase fallada (fase R) y el potencial de tierra, la cual retornará a través de :

Las capacitancias entre las fases sanas y tierra del alimentador fallado y de los otros alimentadores (ver Fig. Nº10).

- El neutro puesto a tierra del transformador.

En este sistema debido a que la reactancia homopolar del transformador de potencia, es mucho menor que las reactancias capacitivas de los alimentadores, la mayor parte de la corriente de falla (I_f) retorna a través

del neutro del transformador, como se puede apreciar en la figura N°10. La protección en estos sistemas, posible realizarse con relés de sobrecorriente homopolar, logrando una protección simple y confiable.

8.4 Sistema 3Ø con neutro corrido y P.T.

En lo que respecta al sistema trifásico de cuatro hilos con neutro corrido multiaterrado, en el caso de tener cargas monofásicas conectadas entre las fases y neutro, balanceadas; ante una falla monofásica a tierra se comporta en forma similar al sistema trifásico con neutro puesto a tierra descrito anteriormente. Pudiéndose usar el mismo dispositivo de protección inclusive.

Por otro lado, en caso de tener cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro, desbalanceadas; aparecerán corrientes homopolares que retornarán a través del conductor neutro corrido y el terreno. Esto hace dificultosa la protección contra fallas monofásicas a tierra, mediante relés sobrecorriente homopolar, ya que en estas circunstancias se tienen corrientes homopolares (en el lado de M.T.) que podrían originar falsas aperturas.

CAPITULO 9 COSTOS COMPARATIVOS DE LAS REDES, PARA LOS PROBABLES SISTEMAS DE DISTRIBUCION PRIMARIA

9.1 Introducción

Para entender con mayor claridad, el porqué de la diferencia de costos al optar un sistema ú otro; en presente capítulo, inicialmente se efectuará una comparación de las características principales de los sistemas aislados y puestos a tierra. Luego se procederá a efectuar una comparación de los costos de los sistemas en discusión.

9.2 Comparación de los sistemas aislados y puestos a tierra

9.2.1 Comparación general de los sistemas

En el cuadro N°15 se hace una comparación general, de la características más saltantes entre los sistemas aislados y puestos a tierra.

9.2.2 Consideraciones sobre el nivel de aislamiento

La selección del nivel de aislamiento, depende de la máxima tensión fase-tierra (tensión a la que está sometido el aislamiento) que puede aparecer en cualquiera de las fases sanas, cuando ocurre una falla monofásica a tierra en la otra fase. El valor de esta tensión máxima fase-tierra que puede aparecer en las fases sanas,

depende a su vez, de la condición del neutro del sistema. Esto se puede observar claramente en los gráficos N^o9, N^o10, N^o17 y N^o18 (capítulo 5); y se comprueba en los registros efectuados en la prueba de falla monofásica a tierra realizada, los cuales se indican en el cuadro N^o12 (capítulo 6).⁴

Como podemos apreciar en los gráficos citados, en un sistema 3 ϕ con el neutro aislado aparece un mayor valor de tensión fase-tierra (ante una falla monofásica), en las fases sanas, comparado con un sistema 3 ϕ con el neutro puesto a tierra (corrido o no corrido). Dichos valores, pueden llegar a ser ligeramente mayores que la tensión de línea. Por tanto, un sistema 3 ϕ con neutro aislado necesitará un mayor nivel de aislamiento que un sistema 3 ϕ con el neutro puesto a tierra.

En los mismos gráficos, se puede apreciar que un sistema 3 ϕ con el neutro corrido y puesto a tierra presenta un valor menor y casi constante de tensión fase-tierra, ante fallas monofásicas a tierra, comparado con los otros sistemas. Este es aproximadamente igual a la tensión de fase nominal.

Asimismo, también puede apreciar que un sistema con el neutro puesto a tierra (no corrido), ante una falla monofásica, y si los

valores de resistencias de falla fueran menores a 100Ω ; presentaría un valor mayor de la tensión fase-tierra en comparación con un sistema 3ϕ con el neutro puesto a tierra y corrido. Mientras que, si los valores de resistencias de falla fueran mayores o iguales a 100Ω , dichos valores aproximarían a la tensión de fase nominal del sistema.

Por lo mencionado, para la selección adecuada del nivel de aislamiento es necesario considerar la condición del neutro del sistema. Sugerencias prácticas recomiendan que la tensión de aislamiento como mínimo, según el caso sea:

Para un sistema 3ϕ con neutro corrido y puesto a tierra : 1.25 veces la tensión nominal fase-tierra.

Para un sistema 3ϕ con neutro puesto a tierra (no corrido): 0.9 veces la tensión máxima del sistema.

Para un sistema 3ϕ con neutro aislado : 1 vez la tensión máxima del sistema.

9.3 Comparación de costos

En este punto se efectuará una valorización de los costos de instalación, de los alimentadores troncales y laterales de las futuras redes de 20kV. Dicha valorización será afectuada considerándose cada uno de

los tres sistemas siguientes: Sistema 3Ø con neutro aislado; sistema 3Ø con neutro puesto a tierra, y sistema 3Ø con neutro puesto a tierra y corrido.

En primer término indicaremos las consideraciones técnicas que se ha tomado en cuenta, para efectuar la valorización en mención:

- Consideraciones para redes subterráneas:

Para evaluar los costos de las redes subterráneas se ha partido de un circuito típico; estimándose la cantidad de cable, empalmes y terminales que se requieren por kilómetro de red, para cada uno de los sistemas en evaluación.

El cable considerado es el N2XSY: cable de energía con conductor de cobre, aislado con polietileno reticulado y con cubierta externa de cloruro de polivinilo (PVC).

Para los sistemas con neutro puesto a tierra (corrido o no corrido), el cable N2XSY seleccionado tiene un grado de aislamiento $E/E_0 = 20/12$ kV (E tensión de línea, E_0 tensión fase-tierra). En mercado nacional, se dispone de cable seco con este grado de aislamiento.

Para el sistema aislado -debido a las sobretensiones que se presentan (ver punto 9.2), las cuales actúan directamente sobre el dieléctrico del cable- cable N2XSY seleccionado tiene un grado de ais-

lamiento E/Eo = 30/18 kV. En el mercado nacional no se dispone de cable seco con éste grado de aislamiento; por tanto, tendría que ser importado.

- Consideraciones para redes aéreas:

En primer lugar se elaboró los diseños de las estructuras (alineamiento, ángulo y extremo de línea) requeridas para el sistema aislado y para los sistemas puestos a tierra.

Para un kilómetro de línea, tanto para troncales como para laterales, y para un vano promedio evaluado; se estimó la cantidad y tipos de estructuras, y cantidad de conductores requeridas para cada uno de los sistemas indicados. En el anexo VI se muestra un resumen de las estructuras de 20 kV utilizadas por kilómetro de línea.

Para los tres sistemas en mención, para las redes troncales se ha considerado dos aisladores de suspensión (de 400mm de línea de fuga c/u) por cada fase; mientras que para las redes laterales un aislador tipo pin clase 54.3 (de 500mm de línea de fuga Mín.) por cada fase.

Para el sistema 3Ø con neutro corrido, adicionalmente a los dos aisladores por fase; ha considerado un aislador tipo pin clase ANSI 55.5 (de 300mm de línea de fuga) para el conductor neutro. Asimismo, la sección del conductor neutro considerado

es de $16\text{mm}^2\text{-Cu}$ (para Cond. de fases de Cu.) y $35\text{mm}^2\text{-AA}$ (para Cond. de fases de AA), cualquiera sea la sección de los conductores de fase.

Bajo las consideraciones anteriores y con el apoyo del sistema de unidades compatibles, se realizó la valorización de costos de instalación de las redes, para cada sistema en mención. Los resultados de dicha valorización se muestran en el cuadro N°16.

Adicionalmente, para el sistema con el neutro puesto a tierra (no corrido) y con el neutro corrido, se evaluado los costos de instalación de las redes considerando la alternativa de usar el franqueador tierra (ground cradle) en cada estructura. Dicho franqueador a tierra (ver anexo IV) como se pudo apreciar en el punto 5.4 (Cap. 5), servirá para disminuir los elevados valores de resistencia falla monofásica a tierra, que se obtendrían en zonas de alta resistividad.

Complementariamente en base a los planes pilotos de 20 kV (para 20 años), se ha evaluado los costos las redes correspondientes a las futuras subestaciones de transmisión Zavala, Chorrillos y Canto Grande. Ello para cada uno de las sistemas mencionados anteriormente. Los resultados de dicha evaluación se muestran en el cuadro N°17.

Como se puede apreciar en los cuadros N°16 y N°17 las

redes más económicas corresponden al sistema 3Ø con neutro puesto a tierra (no corrido).

Según se aprecia el cuadro N°16, los costos unitarios por kilómetro de las redes aéreas de un sistema 3Ø con neutro corrido y puesto a tierra, aproximadamente entre un 6 y 12% más costoso que los de un sistema 3Ø con neutro puesto a tierra (no corrido).

Según el cuadro N°17, los costos de la redes de las futuras SET (Zavala, Chorrillos y Canto Grande) para un sistema 3Ø con neutro corrido y puesto a tierra es aproximadamente entre un 3 a 6% más costoso que los de un sistema 3Ø con neutro P.T. (no corrido).

Según el cuadro N°17, adicionar el Ground Cradle (franqueador a tierra) en todas las estructuras, a un sistema 3Ø con neutro puesto a tierra (no corrido), representaría un costo adicional de 2 a 3 % para las redes de las futuras SET mencionadas. Dicho costo adicional, podría disminuir si se rediseña y optimiza el franqueador a tierra recomendado por la consultoría canadiense.

Las redes más costosas para las futuras SET mencionadas, corresponden al sistema con neutro aislado. Dichos costos superan entre un 17 y 19% costo del sistema 3Ø con neutro P.T. (no corrido), tal como se puede apreciar en el cuadro N°17.

CUADRO N°- 15

COMPARACION ENTRE LOS SISTEMAS AISLADOS Y PUESTOS A TIERRA

ELEMENTOS DE COMPARACION	SISTEMA 3 Ø CON NEUTRO AISLADO	SISTEMA 3 Ø CON NEUTRO PUESTO A TIERRA (NO CORRIDO)	SISTEMA 3 Ø CON NEUTRO CORRIDO Y PUESTO A TIERRA
PUESTAS A TIERRA (DE SERVICIO)	EN LAS SUBESTACIONES	EN LAS SUBESTACIONES	EN LAS S.E. Y MULTIPLE EN LINEA
AISLAMIENTO INTERNO Y EXTERNO DE LOS EQUIPOS Y MATERIALES	PLENO	REDUCIDO	REDUCIDO
CORRIENTE DE FALLA A TIERRA	USUALMENTE BAJA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA POR EFECTO CAPACITIVO	VALOR VARIABLE (DEPENDIENDO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA) AREA VEZ MAYOR QUE LA CORRIENTE DE CORRIENTE TRIFASICO	
RELES CONTRA FALLAS MONOFASICAS A TIERRA	RELES DIRECCIONALES DE SOBRECORRIENTE NO	RELES DE SOBRECORRIENTE HOMOPOLAR	RELES DE SOBRECORRIENTE HOMOPOLAR
PROTECCION VIA RELES DE FALLAS MONOFASICAS A TIERRA	NO CONFIABLE	SIMPLE Y SATISFACTORIO	SIMPLE Y SATISFACTORIO (CONSIDERANDO CARGAS MONOF. EN M.T. BALANCEADAS)
SOBRETENSIONES: AUMENTO DE TENSIONES EN TODA LA RED	SI	NO	NO
RIESGO DE DOBLE FALLA A TIERRA	SI	NO	NO
DANO DE LOS EQUIPOS Y ACCESOR. ANTE FALLAS A TIERRA	APRECIABLE	PUEDEN SER SERIOS SI NO SE TOMA EN CUENTA LA MAGNITUD DE LA CORRIENTE DE FALLA	
SEGURIDAD CONTRA LOS GRADIENTES DE POTENCIAL POR FALLA A TIERRA	USUALMENTE BUENA	REQUIERE UN APROPIADO SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	USUALMENTE NO ES PROBLEMA CUANDO EL NEUTRO CORRIENTE P.T.
CONTINUIDAD DE SERVICIO	USUALMENTE BUENA	MEJOR	MEJOR
COSTO DE LOS RELES DE PROTECC. CONTRA FALLAS 1 Ø 1	\$ 1,817.6	\$ 1,487.2	1,487.2

CUADRO No 16

COSTOS UNITARIOS DE INSTALACION DE LAS PROBABLES REDES DE 20 KV

es de dólares /

i	Seccion (m ²)	Sistema N.A.	Sistema N.P.	Sistema N.C.	Sistema NF+SC	Sistema NF+GC	Relación N/A/NP	Relación NF/NP	Relación NF+SC/NP	Relación NF+GC/NP	Relación NP+SC/NP	Relación NP+GC/NP
SUBTERRANEA	35	173.10	109.50	109.50	109.50	109.50	1.58	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	70	204.30	147.50	147.50	147.50	147.50	1.38	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	120	236.10	170.50	170.50	170.50	170.50	1.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AEREA	35	296.20	212.40	212.40	212.40	212.40	1.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	70	36.60	35.60	40.60	39.20	42.20	1.00	1.11	1.07	1.07	1.07	1.13
	120	48.40	43.30	47.20	45.50	47.80	1.00	1.09	1.06	1.06	1.06	1.12
Trn	35	35.20	35.20	39.40	37.50	41.50	1.00	1.12	1.07	1.07	1.07	1.19
	70	36.60	36.60	39.00	38.40	40.90	1.00	1.07	1.05	1.05	1.05	1.12
	120	48.40	48.40	51.50	50.20	53.20	1.00	1.06	1.04	1.04	1.04	1.10
20 AA	35	28.20	28.20	31.50	29.50	32.10	1.00	1.12	1.06	1.06	1.06	1.17
	70	34.00	34.00	37.10	35.50	38.10	1.00	1.09	1.05	1.05	1.05	1.14

N.A. : Sistema trifasico con neutro aislado
 N.P. : Sistema trifasico con neutro P.T. (no corri
 N.C. : Sistema trifasico con neutro corrido y P.T.
 S.C. : Sistema trifasico con neutro corrido y tierra

CUADRO No 17

COMPARACION ENTRE LOS COSTOS DE LAS PROBABLES REDES DE 20 KV, DE FUTURAS SET

(en miles de dólares)

FUTURA SET 60/20 KV	LONGIT. REDES (km)	COSTO		COSTO		COSTO		COSTO		COSTO		COSTO		COSTO		COSTO	
		SISTEMA N.A.	SISTEMA N.P.	SISTEMA N.C.	SISTEMA NP+6C	SISTEMA NC+6C	SISTEMA NA/NP	SISTEMA NC/NP	SISTEMA NP+6C/RP	SISTEMA NC+6C/NP	RELACION COSTOS NP+6C/RP	RELACION COSTOS NC/NP	RELACION COSTOS NP+6C/RP	RELACION COSTOS NC+6C/NP			
ZAVALLA	75,120	4,398	3,762	3,973	3,866	4,077	1.17	1.06	1.03	1.03	1.03	1.03					
CHORRILLOS	66,458	5,738	4,824	4,979	4,925	5,079	1.19	1.03	1.02	1.02	1.05	1.05					
CANTO GRANDE	70,840	4,543	3,833	4,027	3,929	4,124	1.19	1.05	1.03	1.03	1.08	1.08					

N.A. : Sistema trifásico con neutro aislado
 N.P. : Sistema trifásico con neutro P.T. (no corrido)
 N.C. : Sistema trifásico con neutro corrido y P.T.
 S.C. : Ground cradle (franquedor a tierra)

CONCLUSIONES

1.- En condiciones normales de operación, un sistema trifásico con el neutro aislado y aquél que tiene el punto neutro conectado a tierra (corrido o no corrido), se comportan prácticamente de la misma manera.

La influencia de la conexión del punto neutro se manifiesta sólo durante condiciones anormales de operación, tal como el caso de una falla monofásica a tierra. El comportamiento de un sistema con el neutro aislado y el de aquél con el punto neutro conectado a tierra, son muy diferentes frente a tales efectos.

2.- En base al análisis teórico efectuado para la línea aérea de 20kV Hualmay-Emsal, ante fallas monofásicas a tierra, y tal como comprobó en las pruebas efectuadas; para los sistemas 3Ø con neutro aislado se tiene el siguiente comportamiento :

Los valores de tensión fase-tierra de las fases sanas se incrementan notablemente desde valores de $V_n/\sqrt{3}$ (en condiciones normales) hasta valores que ligeramente sobrepasan la tensión nominal (V_n). Estos sobrevoltajes son perjudiciales para la vida útil del dieléctrico de los accesorios y equipos de las redes; disminuyendo la performance de las

mismas.

- Los valores de la corriente falla, son de magnitudes mucho menores comparados con los sistemas con el punto neutro conectado tierra. Estos valores, en la mayoría de casos no podrían ser detectados por los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

3.- Considerando que el análisis técnico efectuado para la línea de Hualmay-Emsal, nos indica el comportamiento general de una red, ante fallas monofásicas a tierra, se concluye que: tener un sistema trifásico con neutro corrido y puesto a tierra, no presenta una ventaja sustancial, para la liberación de fallas monofásicas a tierra en el rango de altas impedancias (2100 para el caso de la línea Hualmay-Emsal); comparado con un sistema 3Ø con neutro puesto a tierra. En ambos casos, sería propio usar el franqueador a tierra a fin de disminuir los valores de resistencias de falla, y posibilitar que la falla sea detectada por los dispositivos de protección contra cortocircuitos correspondientes.

La alternativa para ambos sistemas, a fin de conseguir disminuir los elevados valores de resistencia de falla monofásica, que se obtendrían en zonas de alta resistividad, como ya se indicó es la aplicación de los franqueadores a tierra. Un apropiado diseño de los mismos, nos permitiría que el conductor roto haga

contacto con un camino de resistencia tierra relativamente baja. Ello debería producir en la mayoría de los casos, en el conductor fallado, una magnitud suficiente de corriente, tal que operen los dispositivos de protección contra cortocircuitos. Por lo expuesto, de usarse el franqueador a tierra -con un diseño apropiado- no requeriría de los relés especiales contra fallas a tierra que se indica en el Cap. B.

Por otro lado, es conveniente tener en cuenta que de operar los dispositivos de protección contra cortocircuitos, ante fallas monofásicas a tierra; se conseguiría una selectividad en la protección. Selectividad que no se consigue en caso de usar relés especiales contra fallas monofásicas a tierra, puesto que estos irían instalados al inicio del alimentador troncal; y por consiguiente, de operar estos relés ante una falla tierra cualquier punto del alimentador, pondría fuera de servicio todo el alimentador.

el caso de la liberación de fallas en el rango de bajas impedancias ($\leq 100 \Omega$ para el caso de línea Hualmay-Emsal), ambos sistemas presentan magnitudes de corrientes tal que pueden ser detectadas por los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

4.- Las redes más económicas corresponden al sistema 3Ø con neutro puesto a tierra. Las redes más costosas

corresponden al sistema 3Ø con neutro aislado, dichos costos superan entre un 17% y 19% al sistema con neutro puesto a tierra.

- 5.- Con la finalidad de conseguir una mejor performance en la futura red de 20kV, comparada con la actual de 10kV; y por todo lo expuesto, el sistema 3Ø con neutro puesto a tierra ha sido considerado aceptable y es recomendable se normalize dicho sistema para la futura red de media tensión en 20 kV, a implementarse en Lima Metropolitana. Asimismo, en las futuras L.A. de 20kV, es recomendable normalizar el uso de los franqueadores a tierra, cuyo diseño debe ser definido convenientemente.

RECOMENDACIONES

- 1.- Para definir el adecuado diseño del sistema de puesta a tierra, se debe analizar previamente los gradientes de tensión que se podrían presentar en cada caso, como consecuencia de que ocurra una falla monofásica a tierra.
- 2.- Considerando que para el sistema con el neutro puesto a tierra, los franqueadores a tierra nos permitirían disminuir los valores de resistencias de falla, especialmente en zonas de alta resistividad; recomendamos, se evalúe en forma práctica y se optimice las bondades de dicho elemento, con miras a una normalización para las futuras líneas aéreas de 20 kV.
- 3.- Una vez iniciado el proceso de implantación del nuevo sistema de distribución con el neutro puesto a tierra y los franqueadores a tierra, en el área urbana de Lima Metropolitana; recomendamos continuar efectuando pruebas de fallas monofásicas a tierra. Dichas pruebas servirán para corroborar los resultados, las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

REFERENCIAS

- 1.- Manual Sistema de Estadística Cier para Distribución (Falla de Componentes 1989).
- 2.- Conveniencia de puesta a tierra del neutro del Sistema de Media Tensión (Montreal Engineering Company Limited).
- 3.- Performance Testing of the Ratio Ground Relay on Four Wire Distribution Feeder (IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.pas-102, N29, Sep. 1983)
- 4.- Protective relays aplicacion guide (The General Electric Company Limited of England).
- 5.- Líneas y Redes Eléctricas (P. Marcelic).
- 6.- Informe DN-I-309 "Estudio del Sistema de Proteccion en la Red de Media Tensión".
- 7.- Protección de Fallas a Tierra con Alta Resistencia en las Redes de 10 kV de la S.E. Villa el Salvador (SFT-005).
- 8.- Neutral Grounding in High Voltage Transmission (R. Willheim, M. Waters).
- 9.- Manual del Ingeniero Electricista (Harol Pender).