



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

MODELO MATEMÁTICO APLICADO AL EFECTO FERRANTI EN SUBESTACIÓN TACTIC

Balfre Ernesto Martínez Villatoro

Asesorado por el Ing. Marvin Marino Hernández Fernández

Guatemala, octubre de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO MATEMÁTICO APLICADO AL EFECTO
FERRANTI EN SUBESTACIÓN TACTIC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

BALFRE ERNESTO MARTÍNEZ VILLATORO

ASESORADO POR EL INGENIERO MARVIN MARINO HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Saúl Alberto Cabezas Rodríguez
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MODELO MATEMÁTICO APLICADO AL EFECTO FERRANTI EN SUBESTACIÓN TACTIC,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, 24 de mayo de 2007.

Balfre Ernesto Martínez Villatoro

Guatemala 31 de Agosto del 2007

Ingeniero
José Guillermo Bedoya Barrios
Coordinador del Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

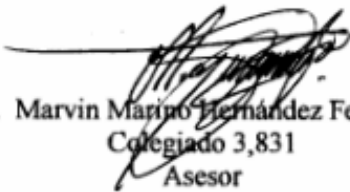
Estimado Ingeniero Bedoya.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **“Modelo matemático aplicado al efecto Ferranti en subestación Tactic”**, del señor **Balfre Ernesto Martínez Villatoro**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,


Ing. Marvín Marino Hernández Fernández
Colegiado 3,831
Asesor

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 9 de octubre 2007.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
Modelo matemático aplicado al efecto Ferranti en subestación Tactic,
desarrollado por el estudiante; Balfre Ernesto Martínez Villatoro, por
considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. José Guillermo Beopya Barrios
Coordinador Área de Potencia

JGBB/sro

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Balfre Ernesto Martínez Villatoro, titulado: **Modelo matemático aplicado al efecto Ferranti en subestación Tactic,,** procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
DIRECTOR

GUATEMALA, 11 DE OCTUBRE 2,007.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 395.2007

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **MODELO MATEMÁTICO APLICADO AL EFECTO FERRANTI EN SUBESTACIÓN TACTIC**, presentado por el estudiante universitario **Balfre Ernesto Martínez Villatoro**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpe Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, octubre de 2007

/gdech

AGRADECIMIENTO A

DIOS	Por culminar este trabajo de graduación, dándome la fuerza y el entendimiento necesario.
MIS PADRES	Rossméri y Héctor, quienes me apoyaron y me dieron el aliento necesario para terminar el presente trabajo de graduación.
FAMILIARES	Con cariño sincero en especial a Ivonne, Bonnie, Mishell, Elizabeth, Rossméri, Edgar Alvarado y Julio Rodas.
ASESOR	Por ser mi guía en la elaboración de éste trabajo de graduación.
FACULTAD DE INGENIERÍA	Por brindar la oportunidad de estudiar una carrera universitaria.
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	Por haberme otorgado la dicha de ser un profesional al servicio de Guatemala.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. SUBESTACIÓN TACTIC	1
1.1 Descripción de la subestación Tactic	1
1.1.1 Tipo de subestación	3
1.1.2 Hexafloruro de azufre	4
1.1.3 Barra de 230 Kv	6
1.1.4 Banco de transformadores	8
1.1.5 Barra de 69 Kv	10
1.2 Recopilación de datos	
1.3 Autorización para la conexión de la subestación Tactic	14
2. MODELO MATEMÁTICO DEL EFECTO FERRANTI	19
2.1 Números imaginarios y fasores	19
2.1.1 Fórmula de Euler	20
2.1.2 Transformada de Laplace	21
2.2 Parámetros pasivos de la línea de transmisión	23
2.2.1 Parámetro de resistencia de la línea de transmisión	23
2.2.2 Parámetro de inductancia de la línea de transmisión	25
2.2.3 Parámetro de capacitancia de la línea de transmisión	26

2.3 Ecuaciones de Maxwell	29
2.3.1 Constante de propagación electromagnética	33
2.3.1.1 Constante de atenuación	34
2.3.1.2 Constante de fase	35
2.3.2 Densidad del medio	35
2.3.3 Interpretación de μ	36
2.3.4 Interpretación de ϵ	38
2.3.5 Interpretación de σ	38
2.3.6 Relación entre campo eléctrico (E) y potencial eléctrico (V)	39
2.3.7 Relación entre campo magnético (H) y corriente eléctrica (I)	39
2.4 Modelo de la línea de transmisión con pérdidas	41
2.4.1 Ecuación de onda de voltaje	44
2.4.2 Ecuación de onda de corriente	44
2.4.3 Constante de propagación	45
2.4.4 Impedancia característica	45
2.4.5 Forma hiperbólica de las ecuaciones de onda de voltaje y onda de corriente	46
2.4.6 Coeficiente de reflexión y transmisión	47
2.4.7 Impedancia de entrada	49
2.5 Ecuaciones influenciadas por el efecto Ferranti	50
2.6 Variación temporal de voltaje con efecto Ferranti	51

3. IMPLEMENTACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO DEL EFECTO FERRANTI EN LA SUBESTACIÓN TACTIC	55
3.1 Campos en 230 Kv	56
3.1.1 Cálculo de parámetros pasivos	56
3.1.1.1 Cálculo de resistencia	56
3.1.1.2 Cálculo de inductancia	56
3.1.1.3 Cálculo de capacitancia	58

3.1.2	Línea Chixoy 1 y 2	60
3.1.2.1	Parámetros intrínsecos	60
3.1.2.2	Variación espacial de voltaje y corriente	61
3.1.2.3	Variación de campo eléctrico y magnético	66
3.1.2.4	Variación temporal de la onda de voltaje	70
3.1.3	Línea Guate Norte 1 y 2	72
3.1.3.1	Parámetros intrínsecos	73
3.1.3.2	Variación espacial de voltaje y corriente	73
3.1.3.3	Variación temporal de la onda de voltaje	75
3.2	Campos en 69 Kv	77
3.2.1	Cálculo de parámetros pasivos	77
3.2.1.1	Cálculo de resistencia	78
3.2.1.2	Cálculo de inductancia	78
3.2.1.3	Cálculo de capacitancia	79
3.2.2	Línea San Julián 1 y 2	80
3.2.2.1	Parámetros intrínsecos	81
3.2.2.2	Variación espacial de voltaje y corriente	82
3.2.2.3	Variación temporal de la onda de voltaje	87
3.2.3	Línea Matanzas	88
3.2.3.1	Parámetros intrínsecos	89
3.2.3.2	Variación espacial de voltaje y corriente	89
3.2.3.3	Variación temporal de la onda de voltaje	93
4.	EQUIPOS DE REGISTRO Y PROTECCIÓN DE FALLAS PARA	
	LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN LA SUBESTACIÓN TACTIC	95
4.1	Rochester TR-2100	95
4.1.1	Características y ventajas del TR-2100	96
4.1.2	Funciones del TR-2100	96
4.1.3	Comunicación del TR-2100	97

4.1.4 Especificaciones del TR-2100	97
4.2 Módulo SEL-421	98
4.2.1 Características SEL-421	98
4.2.2 Comunicación del SEL-421	99
4.2.3 Aplicaciones SEL-421	100
4.3 ABB A 1 7 0 0	101
4.4 Alstom MMLG01	102
4.4.1 Descripción del MMLG01	103
4.4.2 Mantenimiento del MMLG01	104
4.5 Alstom EPAC 3000	105
4.5.1 Funciones del EPAC 3000	105
4.6 Lockout Relay 7PA23	106
4.6.1 Descripción del 7PA23	107
CONCLUSIONES	109
RECOMENDACIONES	111
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXO 1	117
ANEXO 2	119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Parte del SNI al que pertenece S/E Tactic_____	2
2	Torres de entrada/salida de 230 Kv en S/E Tactic_____	4
3	Módulo 8DN9 con barras en 230 Kv_____	6
4	Diagrama unifilar del campo en 230 Kv_____	7
5	Campo de transformadores en S/E Tactic_____	8
6	Elementos alimentados por el terciario de los transformadores_____	9
7	Diagrama unifilar del campo en 69 Kv_____	10
8	Arreglo físico del campo en 69 Kv_____	11
9	Configuración de torres de transmisión en 230 Kv para líneas Chixoy 1 y 2, Guate Norte 1 y 2_____	12
10	Configuración de postes en 69 Kv de las líneas San Julián 1 y 2, Matanzas_____	13
11	Representación de un número complejo en el plano (x,y)_____	20
12	Red R L C_____	22
13	Modelo de la línea de transmisión con pérdidas_____	23
14	Interpretación de μ , ϵ y σ _____	37
15	Parámetros diferenciales distribuidos de la línea de transmisión_____	41
16	Método de superposición_____	52
17	Distancia entre circuitos, en pies, para la torre de 230 Kv_____	57
18	Altura entre fases, real e imagen, en 230 Kv_____	58
19	Atenuación de campo E en gas SF ₆ respecto a la distancia k_1 _____	67

20	Longitud de onda interface Aire - Gas	69
21	Variación de campo E y H , respecto a la distancia	70
22	Voltaje versus tiempo, línea Chixoy 1 y 2	72
23	Voltaje versus tiempo, línea Guate Norte 1 y 2	76
24	Distancia entre circuitos, torre en 69 Kv	78
25	Altura entre fases, real e imagen, en 69 Kv	79
26	Voltaje versus tiempo, línea San Julián 1 y 2	88
27	Voltaje versus tiempo, línea Matanzas	94
28	Rochester TR-2100	95
29	Montaje SEL-421 en el módulo 8DN9	100
30	Medidor Polifásico Programable	102
31	Módulo de prueba MMLG01	103
32	Terminales del Módulo MMLG01	103
33	Montaje del EPAC 3000, en módulo 8DN9	105
34	Montaje del 7PA23	106
35	Conexión del 7PA23	107

TABLAS

I	Especificaciones de Gas SF ₆	5
II	Descripción de la simbología utilizada en S.O.A.L.	7
III	Datos de líneas Chixoy 1 y 2, Guate Norte 1 y 2	12
IV	Datos de líneas San Julián 1 y 2, Matanzas	14
V	Transformada y antitransformada de Laplace	21
VI	Tabulación de datos, línea Chixoy 1 y 2	65
VII	Tabulación de datos, línea San Julián 1 y 2	86
VIII	Tabulación de datos, línea Matanzas	93

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
\mathcal{L}^{-1}	Antitransformada de Laplace
\mathbf{E}	Campo eléctrico
\mathbf{H}	Campo magnético
C	Capacitancia
Γ	Coefficiente de reflexión
σ	Conductividad
α	Constante de atenuación
β	Constante de fase
γ	Constante de propagación
I_s	Corriente de envío
η_0	Densidad del medio
$\nabla \cdot \mathbf{A}$	Divergencia del vector \mathbf{A}
$\cos \varnothing$	Factor de potencia
∇B	Gradiente del escalar B
Z_c	Impedancia característica
Z_s	Impedancia de entrada
L	Inductancia
μ	Permeabilidad
ϵ	Permitividad
R	Resistencia
$\nabla \times \mathbf{A}$	Rotacional del vector \mathbf{A}
V_s	Voltaje de envío

GLOSARIO

A M M	Iniciales en español de Asociación de Mercado Mayorista, este es el ente encargado de regular los precios de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en Guatemala.
C N E E	Iniciales en español de Comisión Nacional de Energía Eléctrica, ente encargado de emitir las leyes que regulan la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en Guatemala.
Efecto Ferranti	Este se genera en la apertura de una línea de transmisión. su efecto es sobrevoltaje en las terminales de remate de la línea.
Efecto Piel	Este se genera por la variación de la frecuencia de la señal electromagnética, y su efecto es el aumento en la resistencia del conductor.
Ethernet	Protocolo de comunicación utilizado en redes LAN, WAN e Internet, por medio de cables UTP CA5.
Fasor	Es una cantidad vectorial que depende del espacio y el tiempo.

Línea de Transmisión	Medio conductor por el cual se desplaza una señal electromagnética.
Maderero	Se les llama así a las fallas ocasionadas por ramas de árboles al momento de hacer contacto con la línea de transmisión.
Módem	Dispositivo electrónico utilizado para la transmisión y distribución de señales, por medio de una línea telefónica.
Onda Electromagnética	Es la energía radiante producida por la oscilación de una carga eléctrica, cuya velocidad depende del medio, siendo en el vacío o el aire, igual a la velocidad de la luz.
SNI	Iniciales en español de Sistema Nacional Interconectado, a este pertenecen todos los dispositivos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica de Guatemala.
Subestación Desatendida	Término utilizado en aquellas subestaciones que no necesitan de un operador humano a tiempo completo, para su funcionamiento.

RESUMEN

Es posible representar por medio de un modelo matemático las sobretensiones que se generan debido al “Efecto Ferranti”, producido en las líneas de alta tensión con un bajo nivel de carga o en vacío. Dicho modelo será tomado como base para ser implementado en un software especializado, como lo es Matlab 6.5, y así graficar los efectos de la señal de voltaje, haciendo un análisis de sus componentes transitorias y permanentes, al igual se podrá saber el valor de voltaje y corriente de envío. En este caso el modelo matemático será aplicado a la subestación Tactic.

El principio de la coordinación del aislamiento en una instalación eléctrica se define, a partir de los niveles de tensiones y sobretensiones susceptibles a presentarse en una instalación.

En lo referente a subestaciones eléctricas, se puede decir que es una de las áreas que ha tenido un desarrollo tecnológico bastante evolucionado, gracias a la implementación de polímeros y gases utilizados en la coordinación de aislamiento.

Siendo este trabajo una forma de representar por medio de un modelo matemático, al efecto Ferranti e implementándose dicho modelo en la subestación Tactic, y a la vez, sirva como un material de apoyo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

OBJETIVOS

- **General**

Contribuir al fortalecimiento del futuro ingeniero electricista, en el área de transmisión de potencia eléctrica, mediante el desarrollo de un modelo matemático que represente al efecto Ferranti, y como éste afecta a la subestación Tactic.

- **Específicos**

1. Analizar la incidencia que tiene el efecto Ferranti en la subestación Tactic de acuerdo al modo de operación, configuración y equipo que la conforma.
2. Generar un modelo matemático que sea capaz de brindar información acerca del efecto Ferranti y el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos en subestaciones del tipo GIS.
3. Implementar el modelo matemático a todos los circuitos que rematan en la subestación Tactic, graficar el comportamiento transitorio de la señal de voltaje y las variaciones que sufren los campos eléctrico y magnético en el Gas SF₆.
4. Dar una descripción de los equipos de protección y registro, existentes en la subestación Tactic incluidos en los módulos GIS y servicios auxiliares.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación tiene por objeto dar a conocer un modelo matemático que represente al efecto Ferranti aplicado en la subestación Tactic, y con la ayuda de MatLab 6.5 servir de guía, ante el fenómeno de sobrevoltaje generado por, bajos niveles de carga ó al momento de generarse una apertura de línea.

El estudio de estas condiciones permite determinar el nivel de sobretensión que podrá solicitar el material durante su utilización. La elección del nivel de aislamiento adoptado permitirá asegurar que, al menos, el nivel de aislamiento no será nunca sobrepasado.

Las sobretensiones en un sistema son peligrosas porque:

- Someten a los aislantes a esfuerzos que los envejecen y pueden llegar a destruirlos .
- En caso de duración prolongada traen como consecuencia daños en los equipos tanto de los usuarios como de generación y transformación.
- En caso de una falla del aislante, traen a su vez como consecuencia inmediata un cortocircuito

Es por ello que se hará una descripción de los diferentes tipos de protecciones existentes en la subestación Tactic, debido a los distintos tipos de fallas que pudiesen generarse en cualquier momento.

1. SUBESTACIÓN TACTIC

Una subestación (S/E) es un conjunto de dispositivos eléctricos, que forman parte del sistema nacional interconectado (SNI), sus funciones principales son: transformar tensiones y derivar circuitos de potencia. En este capítulo se hará una descripción de la S/E Tactic, se mostrará el diagrama unifilar, por medio de un diagrama de bloques se mostrará parte del SNI a la cual forma parte la S/E Tactic, se realizará un detalle de los circuitos que se localizan en la S/E, además de la recopilación de datos como lo son: configuración de líneas, distancias entre fases, distancias entre fases y tierra, entre otros; estos servirán para realizar el modelado del efecto Ferranti en la S/E. Al final se hará mención de la resolución CNEE– 99-2003.

Pero antes se explicará en forma breve ¿qué es el efecto Ferranti?. El efecto Ferranti se genera en la apertura de una línea de transmisión, provocando variaciones en el flujo de potencia de la red. La consecuencia de dicha apertura genera sobretensiones en el punto de recibo –si la apertura se realiza en la subestación Tactic, entonces ésta será el punto de recibo-.

1.1 Descripción de la subestación Tactic

La subestación Tactic tiene una potencia de ciento cincuenta megavoltamperios (150 Mva) y tensiones de doscientos treinta diagonal sesenta y nueve kilovoltios (230 / 69 Kv) debido a estos niveles de potencia y voltajes de transmisión, la convierte en una S/E muy importante en le Norte del país.

Ésta es un subestación aislada en gas –GIS, siglas en inglés de Gas Insólate Substation -, el gas que se utiliza es Hexafloruro de azufre (SF₆). Esta formada por módulos 8DN9 Siemens. Estos módulos trabajan por medio de una Terminal Remota

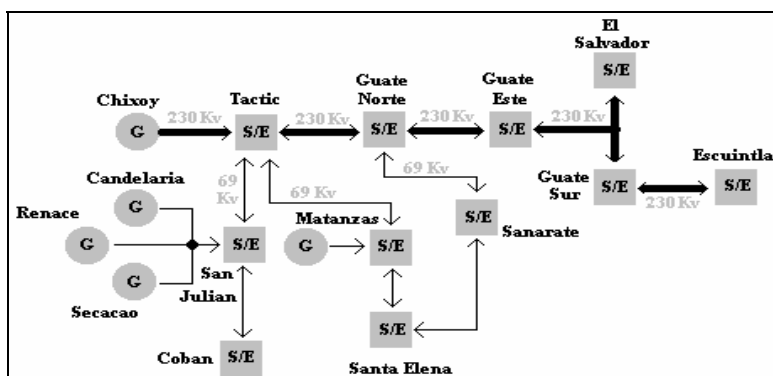
(RTU) que a su vez se conecta a un computador, en donde el operador puede realizar las secuencias de control de las barras.

La secuencia de operación se realiza por medio de un software llamado S.O.A.L. versión 2.1. Este es una interfaz usuario-campo, por el cual un operador puede realizar todas las secuencias de apertura y cierre de las barras. Entre las operaciones que el usuario tiene acceso a este software se pueden mencionar:

- Control y visualización de fallas ocurridas
- Analizador UCI y visualizador UCI
- Cronología de sucesos ocurridos y deslastre de equipo
- Mantenimiento, entre otras.

Esta se ubica sobre el kilómetro 172.8 carretera a Cobán, con un área de una manzana cuadrada (6,400 Mts²). En la figura 1 se muestra parte del diagrama de bloques al cual esta amarrada la S/E Tactic en el SNI.

Figura 1. Parte del SNI al que pertenece la S/E Tactic



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007

En la figura 1 se puede observar que la línea gruesa que conecta a Tactic con Chixoy y Guate Norte –línea resaltada-, representa la línea de 230 Kv, todas las demás – líneas sencillas- son de 69 Kv. La S/E Tactic es suministrada al norte por la generadora Chixoy -con una generación promedio de 210 Mw¹- por medio de una línea de 230 Kv – y las generadoras de San Julián –esta compuesta por 3 generadoras: la primera es Secacao con 15 Mw, la segunda es Renace 60 Mw y la tercera es Candelaria con 5 Mw- por medio de dos líneas de 69 Kv. Suministrando al Sur, al área metropolitana a través de la S/E Guate Norte por medio de una línea de 230 Kv y suministrada por la generadora Matanzas –con una generación promedio de 35 Mw- a través de una línea de 69 Kv, -estos datos fueron proporcionados por la CENADO-.

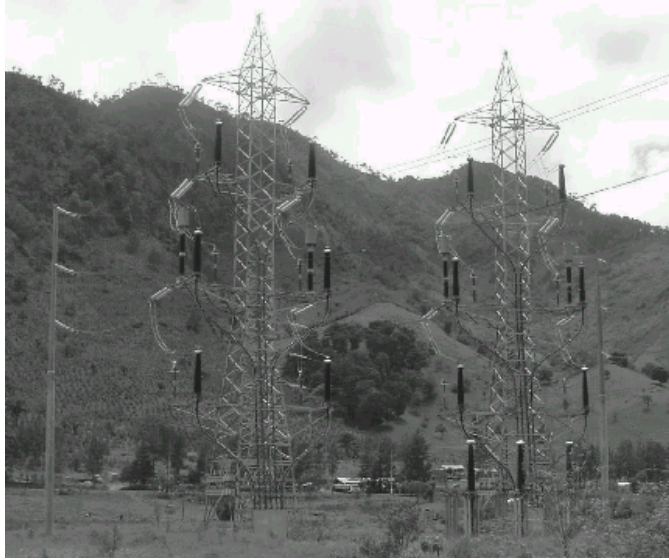
Esta es una S/E desatendida, siendo controlada por la central de despacho ubicada en la S/E Guate Sur –San José villa nueva, Guatemala-. En el mantenimiento, se hacen recorridos de supervisión 3 veces al mes, para revisión visual y cada 3 veces al año se le hace un estudio de termografía en búsqueda de puntos calientes, que puedan generar algún tipo de falla futura.

1.1.1 Tipo de subestación

Como ya se menciona anteriormente, la subestación Tactic es del tipo GIS formada por módulos 8DN9 marca Siemens, por ser una S/E modular, aislada en gas, es bastante compacta, en su entrada de 230 Kv tiene los campos de Entrada: Chixoy 1 y Chixoy 2, estos son campos que provienen de la generadora Chixoy en líneas de doble conductor. Como salida de 230 Kv se tienen los campos de: Guate Norte 1 y Guate Norte 2, estos campos son de distribución.

Las torres de entrada/salida en 230 Kv se pueden observar en la figura 2.

Figura 2. Torres de entrada/salida de 230 Kv en S/E Tactic



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007

En la figura 2 se puede observar la torre de entrada –lado derecho, Chixoy 1 y Chixoy 2- y la torre de salida –lado izquierdo, Guate norte 1 y Guate norte 2- en 230 Kv. Además en la parte superior –Remate de línea-torre- se puede observar dispositivos eléctricos como son: Mufa de entrada, Pararrayos –en derivación de línea y mufa- y trampa de onda, y en la parte inferior se observa la conexión entre el cable de potencia y la mufa de conexión.

1.1.2 Hexafloruro de azufre

El Hexafloruro de Azufre (SF_6) fue descubierto por Henri Moissan, en el año de 1900, este compuesto tiene propiedades inusuales y fascinantes. En 1937 se descubrió que tenía mayor rigidez dieléctrica que el aire, haciéndolo un producto utilizable en la industria eléctrica como un material aislador. Se puede encontrar en forma líquida y en forma de gas. Por la versatilidad del estado gaseoso, se utiliza en la

transmisión de potencia eléctrica a grandes voltajes. Sus propiedades físicas, termodinámicas y eléctricas, se resumen en la tabla I.

Tabla I. Propiedades del SF₆

PROPIEDAD	VALOR	PROPIEDADES TERMODINAMICAS	VALOR
Símbolo Químico	SF ₆	Volumen Especifico	2.5 ft ³ /lb
Peso Molecular	146.05	Calor Especifico	0.1552 Btu/lb
Olor	No	Limitación de Calor Especifico	1.096
Toxicidad	No	Limitación de Calor Especifico	1.0932
Flamable	No	Calor de Formación	-1221.66 kJ/mol
PROPIEDADES FÍSICAS	VALOR	Calor Latente de Vaporización	28.4 Btu
Estado físico	Líquido - Gas	Calor Latente de Sublimación	69.6 Btu/lb
Temperatura de Sublimación	-83 °F	Capacidad de Calor Molar	97.23 J/mol K
Punto de Licuefacción	-59.4 °F/ -50.8 °C	Energía Libre de Formación	-1117.73 kJ/mol
Punto de Ebullición	-83OF/ -6309 °C	Temperatura Crítica	114.2 OF
Gravedad Especifica	5.11	Presión Crítica	544.3 psia
Densidad (vapor)	0.382 lb/ft ³	Volumen Crítico	1.356 mL/g
Densidad (líquido)	86.1 lbs/ft ³	Densidad Crítica	0.737gr/mL
Presión de Vapor	313 psia	Temperatura del Punto Triple	2.23*10 ² K
Tensión Superficial	8.02 dyne/cm	Presión del Punto Triple	2.33*10 ⁶ Pa
Viscosidad (vapor)	0.015 cP	Lb líquidas por Gl líquido	11.5 lb/gal
Viscosidad (líquido)	0.277 cP	Volumen de Expansión Liq - Gas	220/230
PROPIEDADES ELECTRICAS	VALOR	Std ft ³ Gas por Lb líquida	2.64 ft ³ /lb
Constante Dieléctrica	1.002	Conductividad Térmica	3.36*10 ⁻⁵ Cal/se*cm*°C
Pérdida Tangencial	2*10 ⁻⁷	Entalpía	61.95 Btu/lb
Índice de Refracción	2.3	Entropía	0.159 Btu/lb

Fuente: Honeywell. **SF₆ Technical Reference**, Julio 2007.

1.1.3 Barra de 230 Kv

La configuración de esta es, doble barra con acople, incorporado en los módulos 8DN9. Véase la figura 3 y en el anexo 2 se muestra su tabla de especificaciones.

Figura 3. Módulo 8DN9 con barras en 230 Kv

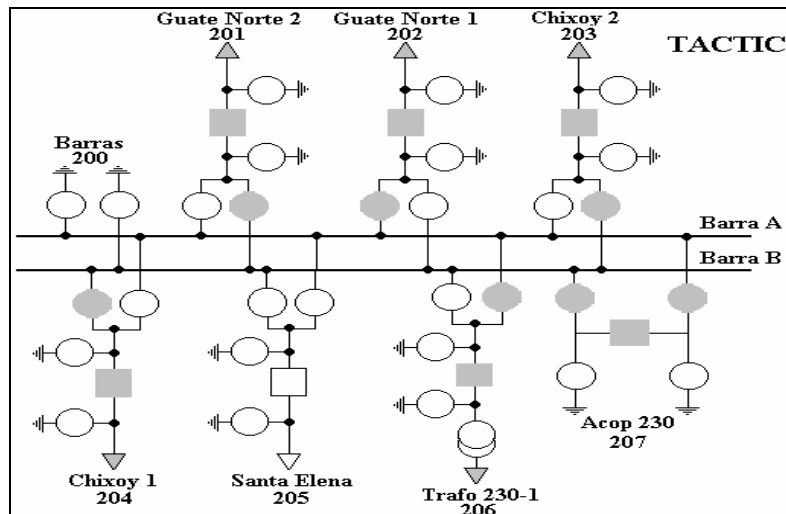


Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007

La figura 3 muestra como son los módulos 8DN9, en ella se pueden observar los cables de potencia de entrada y salida, CT's –este es uno por cada circuito, por lo general se colocan en la fase R-, PT's –es uno por cada fase-, cámara de interrupción, seccionador de barra A y seccionador de barra B. Además se pueden ver los manómetros que miden la presión del SF6 en el módulo y los seccionadores de puesta a tierra.

En la figura 4 se muestra la configuración, doble barra mas acople, en la forma como lo trabaja el software S.O.A.L, de las barras de 230 Kv.

Figura 4. Diagrama unifilar del campo en 230 Kv



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007

La simbología utilizada se explica en la **tabla II** de la siguiente manera:

Tabla II. Descripción de la simbología utilizada en S.O.A.L

Forma	Descripcion
■	Interruptor Cerrado
□	Interruptor Abierto
●	Seccionador Cerrado
○	Seccionador Abierto
▲	Hacia la Carga / Generacion
⊕	Puesta a tierra
⊗	Transformador con terciario

Fuente: Ing. Wilmer Sarceño, **Subestación Tactic**, Junio 2007

La presión de SF₆ que manejan estos módulos son: 9 bar para la cámara de interrupción y 8.5 bar para CT's, PT's, Seccionadores y barras colectoras. Los campos en 230 Kv son el tipo AIS -al remate de línea- y tipo GIS -a la entrada del módulo-.

1.1.4 Bancos de transformadores

Esta S/E esta formada por tres bancos de transformadores monofásicos de 50 Mva (siendo un total de 150 Mva) y un transformador de 50 Mva, de reserva –este se utiliza en el momento de realizar mantenimiento a cualquiera de las tres unidades principales-. Estas unidades monofásicas cuenta con un devanado primario en 230 Kv, un devanado secundario en 69 Kv y un terciario en 13.8 Kv. En la figura 5 se puede observar el banco de transformadores.

Figura 5. Campo de transformadores en S/E Tactic

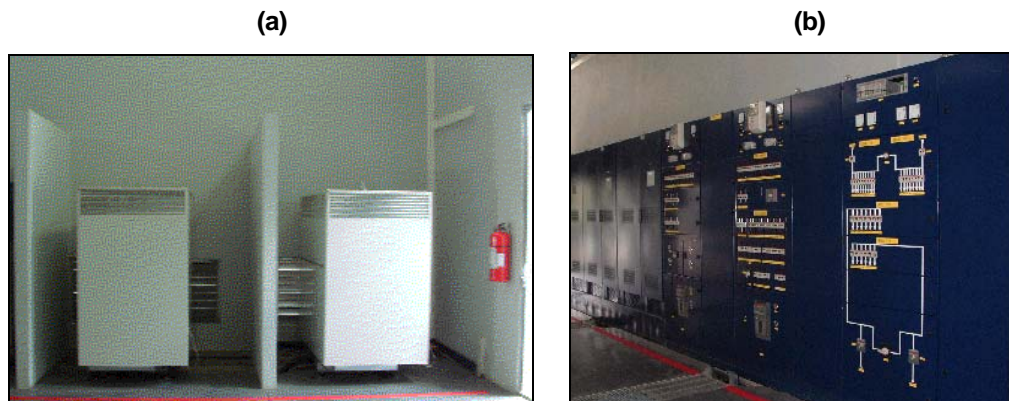


Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007

En la figura 5 se puede observar como esta la conexión de los transformadores, la entrada del cable de potencia que viene de las barras colectoras de 230 Kv a la mufa de entrada del transformador, a su vez este cable se deriva hacia el pararrayos de protección, también se puede observar en la parte superior de los transformadores la barra de conexión auxiliar, esta es la que conecta al transformador auxiliar con la fase del transformador que se encuentre en mantenimiento.

Las barras de 230 Kv son las entradas al primario de cada unidad, el secundario es de 69 Kv, que será la salida hacia los circuitos de 69 Kv. El devanado terciario de 13.8 Kv se conecta a los transformadores de servicios auxiliares de la S/E. En la figura 6a se muestra los transformadores de servicios auxiliares y en la figura 6b se muestra el banco de baterías de la S/E.

Figura 6. Elementos alimentados por el terciario de los transformadores. (a) Transformadores de servicios auxiliares. (b) Banco de baterías



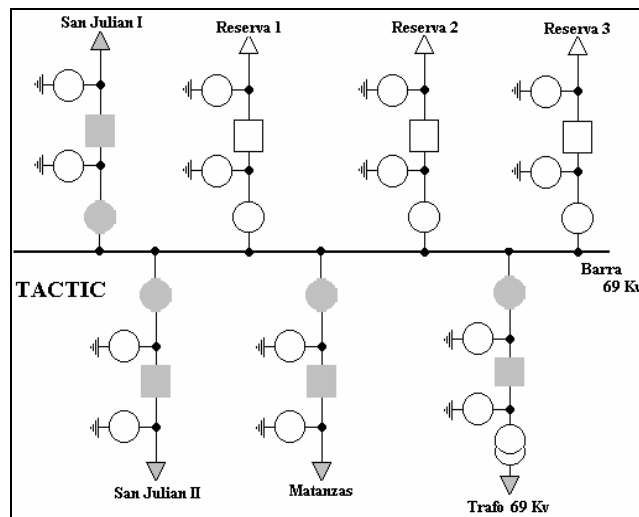
Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007

Los transformadores se utilizan para suministro 110 / 220 Voltios –para iluminación, alimentación de equipo electrónico y para cargar banco de baterías-. En sí todos los servicios internos de la S/E.

1.1.5 Barra de 69 Kv

La barra de 69 Kv es alimentada por el secundario del banco de transformación o bien por la líneas que vienen de San Julián y la línea de Matanzas. Esta tiene una configuración de barra sencilla. Véase figura 7

Figura 7. Diagrama unifilar del campo en 69 Kv



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007

En la figura 7 se puede observar como es la disposición barra sencilla utilizada en Tactic, en ella se ven las líneas de San Julián 1 y San Julián 2, estas provienen de la S/E San Julián como una línea de generación de 80 Mw, al igual se ve la línea de generación de Matanzas con una potencia de 37 Mw y la línea del secundario del transformador de 150 Mva. Las otras 3 líneas son de reserva para la futura ampliación en la barra de 69 Kv. En la figura 8 se puede observar el arreglo físico del campo de 69 Kv.

Figura 8. Arreglo físico del campo en 69 Kv en la S/E Tactic



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007

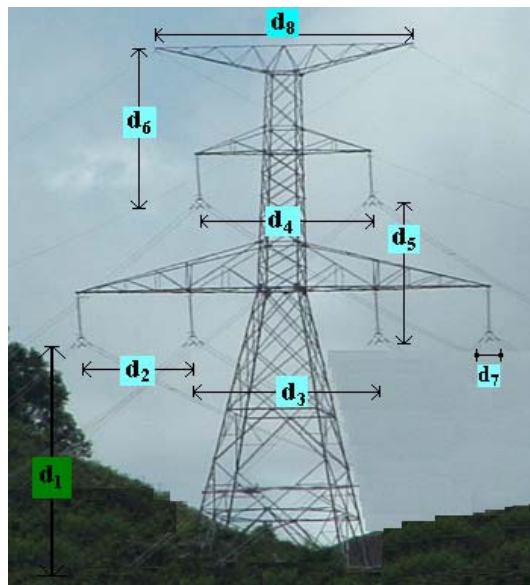
En la figura 8 se pueden observar los 7 circuitos que componen al campo de 69 Kv, el primer circuito –del fondo, hacia fuera de la pagina- corresponde a la línea San Julián 2, el segundo circuito corresponde a la línea San Julián 1, el tercer circuito corresponde al transformador de 69 Kv, el cuarto circuito corresponde a la línea de Matanzas y los últimos tres circuitos son los circuitos de reserva para futura ampliación del campo de 69 Kv. Estos campos en 69 Kv son del tipo AIS.

1.2 Recopilación de datos

Los datos que se utilizarán para modelar el efecto Ferranti serán: configuración de torre predominante en la línea de 230 Kv Chixoy 1, Chixoy 2, Guate Norte 1, Guate Norte 2, configuración predominante en la línea de 69 Kv de Matanzas, San Julián 1 y San Julián 2, distancias entre fase-tierra, fase-fase, distancias entre torres, longitud total de línea, entre otras. La recopilación de datos se resumen en tablas, debidamente identificadas, al igual que la configuración predominante por cada línea de transmisión.

La configuración de las torres en 230 Kv para las líneas Chixoy 1 y 2, Guate Norte 1 y 2, se observa en la figura 9.

Figura 9. Configuración de torre de transmisión en 230 Kv para líneas Chixoy 1 y 2, Guate Norte 1 y 2



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, Junio 2007

En la tabla III se observan los datos de las líneas Chixoy 1 y 2, Guate Norte 1 y 2.

Tabla III. Datos de líneas Chixoy 1 y 2, Guate Norte 1 y 2

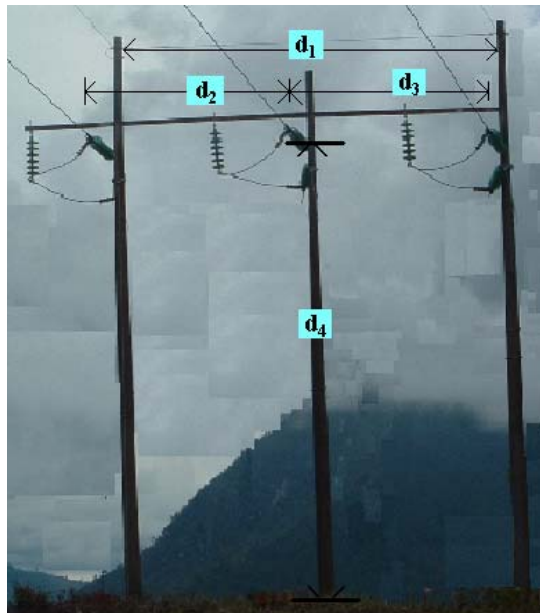
Cód	Descripción	Mts	Pies
d_1	Distancia fase inferior a tierra	12.20	40.0282
d_2	Distancia fase-fase (Horizontal) mismo circuito inferior	5.00	16.405
d_3	Distancia fase-fase (horizontal) circuito paralelo inferior	10.80	35.4348
d_4	Distancia fase-fase (horizontal) circuito paralelo superior	10.05	32.9741

Continúa			
d₅	Distancia fase-fase (vertical) mismo circuito	7.10	23.2951
d₆	Distancia (vertical) fase hilo de guarda	5.80	19.0298
d₇	Distancia entre conductores (doble haz)	0.5	1.6405
d₈	Distancia (horizontal) entre hilos de guarda	10.15	33.3022
d₉	Ancho de base	6.50	21.3265
d₁₀	Longitud total de línea Chixoy 1 y 2	50000	164050
d₁₁	Longitud total de línea Guate Norte 1 y 2	76600	251324.6

Fuente: Ing. Daniel Zapata. **Subestación Guatemala Sur**, Julio 2007

En la figura 10 se puede observar la configuración predominante en 69 Kv de las líneas San Julián 1 y 2, Matanzas.

Figura 10. Configuración de postes en 69 Kv de las líneas San Julián 1 y 2, Matanzas



Fuente: Ing. Víctor Lobos. **INDE**, Julio 2007

En la tabla IV se observan los datos de las líneas San Julián 1 y 2, Matanzas.

Tabla IV. Datos de líneas San Julián 1 y 2, Matanzas

Cód	Descripción	Mts	Pies
d₁	Distancia entre hilos de guarda	7.6	24.9356
d₂	Distancia (horizontal) fase A - fase B	3.8	12.4678
d₃	Distancia (horizontal) fase B - fase C	3.8	12.4678
d₄	Distancia fase-tierra	10.5	34.4505
d₅	Distancia promedio entre Claros	80	262.48
d₆	Longitud total Línea San Julián I y II	8500	27888.5
d₇	Longitud total Línea Matanzas	20000	65620

Fuente: Ing. Víctor Lobos. **INDE**, Julio 2007

1.3 Autorización para la conexión de la subestación Tactic

Según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) ², en la resolución CNEE-99-2003, parte de dicha resolución dice:

“ RESOLUCIÓN CNEE– 99-2003

LA COMISION NACIONAL DE ENERGIA ELÉCTRICA

CONSIDERANDO

Que de conformidad con lo estipulado en las literales b) y f) del Artículo 4, de la Ley General de Electricidad, Decreto 93-96 del Congreso de la República, corresponde a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, entre otras funciones, velar por el cumplimiento de las obligaciones de los adjudicatarios y concesionarios,

proteger los derechos de los usuarios; así como emitir las disposiciones y normativas para garantizar el libre acceso y uso de las líneas de transmisión y redes de distribución de acuerdo a lo dispuesto en la mencionada Ley y su Reglamento.

CONSIDERANDO

Que Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica del INDE, por medio de memorial presentado el veinticinco de agosto de dos mil tres ante esta Comisión Nacional de Energía Eléctrica, solicitó autorización para la ampliación y conexión al Sistema Nacional Interconectado de la **SUBESTACIÓN TACTIC**, con capacidad de ciento cincuenta mega voltamperios (150 MVA) y tensiones de doscientos treinta diagonal sesenta y nueve kilovoltios (230/69 KV).

CONSIDERANDO

Que tanto la Gerencia de Normas y Control como la Gerencia de Asuntos Jurídicos de esta Comisión, con fecha once de noviembre de dos mil tres, emitieron opinión recomendando autorizar a la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica la conexión al Sistema Nacional Interconectado de la ampliación del sistema de transporte, para la subestación Tactic, con capacidad de ciento cincuenta mega voltamperios (150 MVA) y tensiones de doscientos treinta diagonal sesenta y nueve kilovoltios (230/69 Kv), al no haberse identificado por parte del Administrador del Mercado Mayorista ningún efecto adverso al Sistema Nacional Interconectado por la conexión de dichas instalaciones y por haberse cumplido con los requisitos que establecen las disposiciones aplicables, con la salvedad que deberá señalársele a la solicitante el plazo de diez días hábiles para que proceda a entregar al Administrador del Mercado Mayorista el programa definitivo de energización de la subestación y su respectivo protocolo de pruebas con el objeto de coordinar las maniobras operativas correspondientes y presentar al Administrador del Mercado Mayorista la información requerida por la Norma de Coordinación Operativa Número 1 –Base de Datos- y la

Norma de Coordinación Comercial Número 1 –Coordinación de Despacho de Carga-, para el modelado de dicha subestación a efecto de que pueda hacerse la simulación de ésta en los estudios eléctricos y en los procesos de optimización del Despacho.

RESUELVE

1. **AUTORIZAR** a la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica del INDE, la conexión al Sistema Nacional Interconectado, por ampliación del sistema de transporte, de la **Subestación TACTIC**, con capacidad de ciento cincuenta mega voltamperios (150 MVA) y tensiones de doscientos treinta diagonal sesenta y nueve kilovoltios (230/69 Kv), ubicada en el departamento de Alta Verapaz, bajo las siguientes condiciones.

1.1 Dentro del plazo de diez días hábiles, previos a su conexión al Sistema Nacional Interconectado, deberá cumplir con lo siguiente: a) Entregar al Administrador del Mercado Mayorista el programa definitivo de energización de la Subestación y su respectivo protocolo de pruebas con el objeto de coordinar las maniobras operativas correspondientes; b) Presentar al Administrador del Mercado Mayorista, la información requerida por la Norma de Coordinación Operativa Número 1 –Base de Datos- y la Norma de Coordinación Comercial Número 1 –Coordinación de Despacho de Carga-, para el modelado de la subestación identificada para su simulación en los estudios eléctricos y en los procesos de optimización del Despacho.

1.2 Deberá cumplir con las obligaciones que le estipula tanto la Ley General de Electricidad y su Reglamento, así como con el Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista y todas las normas aplicables vigentes, en lo que le corresponda; debiendo además, realizar las inversiones que sean necesarias para la debida conexión eléctrica y durante su operación, con la finalidad de garantizar la confiabilidad, continuidad y calidad del servicio de energía eléctrica.

2. La Comisión Nacional de Energía Eléctrica podrá en cualquier momento fiscalizar la operación y el funcionamiento de las instalaciones autorizadas por medio la presente resolución, incluyendo cualquier imprevisto que amenace la seguridad y la continuidad del servicio de energía eléctrica, el que en su caso deberá ser informado a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica por el Administrador del Mercado Mayorista.

3. La Comisión Nacional de Energía Eléctrica, podrá modificar o revocar lo resuelto, en caso de verificar incumplimiento del marco regulatorio vigente por parte de la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica del INDE.

NOTIFÍQUESE

Dado en la ciudad de Guatemala, el día 12 de noviembre de dos mil tres.”

Por lo tanto, la subestación Tactic fue autorizada a iniciar labores a partir de la fecha 12 de noviembre de dos mil tres.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL EFECTO FERRANTI

Antes de generar un modelo matemático que represente al efecto Ferranti, se realizará un breve resumen de los fundamentos matemáticos utilizados para la deducción y explicación de dicho modelo.

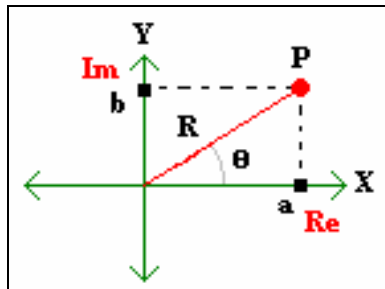
Entre las notaciones del resumen se pueden nombrar lo que son: Números imaginarios y fasores, teorema de Euler, Teorema de Laplace. Al igual se hará una descripción de los parámetros de la línea de transmisión como lo son: Resistencia, inductancia y capacitancia. Se realizará un análisis de las ecuaciones de Maxwell para hallar la Ec. onda de voltaje y corriente, y sus respectivas representaciones de los parámetros intrínsecos de dichas ecuaciones de onda. Al final se realizará un modelo de la línea de transmisión con pérdidas, este se utilizará para encontrar los parámetros que se utilizan en el efecto Ferranti.

2.1 Números imaginarios y fasores

Los números imaginarios comúnmente son llamados números complejos. Estos se pueden representar de la forma $a + bi$, donde a y b son números reales, la unidad imaginaria, es $i^2 = -1$. Si $z = a + bi$, donde la letra a se le llama parte real de z y b es la parte imaginaria de z y se denotan por $\text{Re}\{z\} = a$ e $\text{Im}\{z\} = b$. La letra z , representa cualquier elemento del conjunto de números complejos y es llamada Variable Compleja.

Un fasor es un número complejo en forma polar. La representación polar de un número complejo se realiza por medio de un plano complejo correspondiente al plano (x,y) , véase la figura 11.

Figura 11. Representación de un número complejo en el plano (x,y)



Fuente: Murray R. Spiegel. **Variable Compleja**, página 4

Sea P un punto en el plano complejo (a,b) ó $a + bi$, entonces vemos que, según la figura 11, obtenemos lo siguiente:

$$X = r \cos \theta \quad Y = r \operatorname{sen} \theta$$

$$R = \sqrt{a^2 + b^2} = |a + bi| \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$$

Donde R es llamado módulo o valor absoluto de z y θ , llamado amplitud o argumento de z, siendo el ángulo de la recta OP con el eje positivo en a. Se deduce que:

$$z = a + bi = R(\cos \theta + i \operatorname{sen} \theta)$$

2.1.1 Fórmula de Euler

En el desarrollo de una serie infinita $e^x = 1 + x + (x^2 / 2!) + (x^3 / 3!) + \dots + (x^n / n!)$, del cálculo elemental se aplica cuando $x = i\theta$, se obtiene lo siguiente:

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \operatorname{sen} \theta$$

Esta es la fórmula de Euler, siendo mas conveniente tomar la definición general de:

$$e^Z = e^{a+bi} = e^a e^{ib} = e^a e^{i(\cos \theta + i \sin \theta)}$$

2.1.2 Transformada de Laplace

Esta es muy utilizada para la solución de circuitos eléctricos en los cuales la fuente de energía tenga una variación en el tiempo. La definición de la transformada de Laplace es: sea f una función definida para $t \geq 0$. Entonces la integral:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt$$

Cuando la integral definitoria converge, el resultado es una función de s , ejemplo: $\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$. Ahora si nosotros tenemos una función de s y necesitamos su respuesta en el tiempo –como es en el caso de circuitos eléctricos en AC, cuyos parámetros pasivos de capacitancia e inductancia son en función de s -. Decimos que: $\mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} = f(t)$. En la tabla V se listan algunas funciones de transformada y antitransformada de Laplace comunes para la solución de este tipo de funciones.

Tabla V. Transformada y antitransformada de Laplace.

$\mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} = f(t)$	$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$	$\mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} = f(t)$	$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$
$a \therefore a \text{ es cte}$	$\frac{1}{s}$	$e^{(at)}$	$\frac{1}{s - a}$
$t^n \therefore n \text{ es entero}$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$	$\text{Cos}(kt)$	$\frac{s}{s^2 + k^2}$
$\text{Sen}(kt)$	$\frac{k}{s^2 + k^2}$	$\text{Senh}(kt)$	$\frac{k}{s^2 - k^2}$
		$\text{Cosh}(kt)$	$\frac{s}{s^2 - k^2}$

Fuente: Dennis G. Zill. **Ecuaciones Diferenciales**, página 303.

Las funciones de L^{-1} son muy útiles para la solución de redes eléctricas, ya que nos dan la respuesta en el tiempo de un circuito eléctrico, cuyos componentes tengan una respuesta en la frecuencia, como es el caso de la capacitancia e inductancias de la línea de transmisión.

Para la resistencia, obtenemos la siguiente transformación:

$$\mathcal{L} \{ V_R(t) = I(t) R \} = V_R(s) = I(s) R$$

Para la inductancia, obtenemos la siguiente transformación:

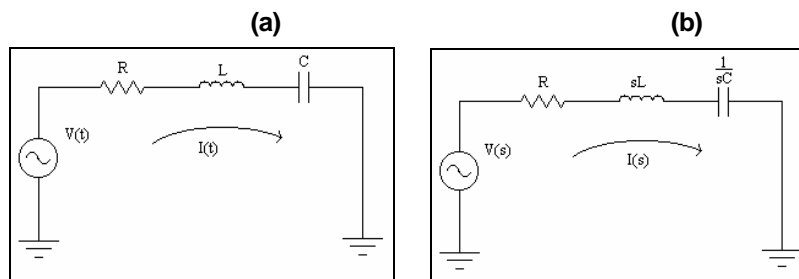
$$\mathcal{L} \{ V_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} \} = V_L(s) = sL I(s)$$

Para la Capacitancia, obtenemos la siguiente transformación:

$$\mathcal{L} \{ V_C(t) = \frac{1}{C} \int I(t) dt \} = V_C(s) = \frac{1}{sC} I(s)$$

En la figura 12a se observa una red RLC –respuesta en el tiempo-, en la figura 12b se observa la misma red RLC transformada –respuesta en la frecuencia-.

Figura 12. Red RLC. (a) Red RLC variante en el tiempo. (b) Red RLC transformada

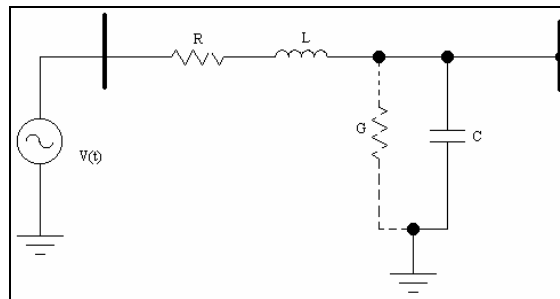


Fuente: Joseph A. Edminister. **Circuitos Eléctricos**, página 203.

2.2 Parámetros pasivos de la línea de transmisión

Una línea de transmisión (L.T) tiene cuatro parámetros que influyen en una onda electromagnética, estos parámetros son: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia. La conductancia entre líneas y tierra cuenta con la corriente de fuga en los aisladores de líneas principales y a través del aislamiento de los cables, debido a estos aisladores dicha corriente es muy pequeña, pudiéndose no tomar en cuenta en los cálculos de redes eléctricas, asumiéndose un valor de cero, -el error introducido por la omisión de este parámetro, es muy pequeño aproximadamente es del 0.4 % del valor total, en condiciones normales-.

Figura 13. Modelo de la línea de transmisión con pérdidas



Fuente: William Stevenson. **Análisis de sistemas de potencia**, página 111.

Según la figura 13, la línea de transmisión se puede modelar por medio de una resistencia en serie con la inductancia de la línea, y en paralelo tenemos los parámetros de capacitancia en derivación con la conductancia –obsérvese que la conductancia esta cortada debido a su omisión en los cálculos que se realizarán, se omitirá puesto que el error que introduce es muy pequeño-.

2.2.1 Parámetro de resistencia de la línea de transmisión

La resistencia de los conductores es la causa principal de la pérdida de energía en la línea de transmisión. La distribución uniforme de la corriente en la sección del conductor solamente se presenta en corriente continua, pero a medida que la frecuencia de la corriente aumenta, se hace más pronunciada la diferencia entre las densidades de corriente de las distintas zonas de una sección transversal. A este fenómeno se le llama Efecto Piel, a la resistencia que se ve afectada por efecto piel se le llama resistencia AC.

Los valores de resistencia, los brinda el fabricante – véase anexo 1 -, la fórmula general de la resistencia es:

$$R_0 = \frac{l}{\sigma A}$$

Donde l es la longitud de tramo de cable, A es el área de conductor, σ es la conductividad del material del conductor y R_0 es la resistencia a corriente continua y temperatura ambiente. Además de los anteriores, la resistencia varía también de la temperatura en forma lineal, siendo la ecuación (Ec.):

$$R_T = R_{T_0} \frac{(228 + T_1)}{(228 + T_0)} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde R_{T_0} es la resistencia AC a temperatura ambiente o temperatura indicada en la tabla del conductor, T_1 es la temperatura a la cual se encuentra el conductor –en °C-, T_0 es la temperatura ambiente o temperatura indicada en la tabla del conductor –en °C- y R_T la resistencia total con efecto piel y temperatura. Algunas tablas de conductores dan la resistencia por unidad de longitud, ejemplo: para el cable ACSR Waxwing se tiene una resistencia AC a 60 Hz, a 20 °C de 0.3488 Ω/mi. La resistencia total es el producto de la longitud total del cable por la resistencia R_T . Así:

$$R = R_T * D \quad \text{Ec. 2}$$

2.2.2 Parámetro de inductancia de la línea de transmisión

En una línea de transmisión la inductancia de un conductor es igual al número de enlaces de flujo magnético del conductor por unidad de corriente del mismo. En el sistema SI la inductancia se representa por la letra L, en henrios, es igual a Weber-vuelta por amperio, así: $\lambda = L I$.

A tensiones superiores a los 230 Kv, las pérdidas por efecto corona e interferencia en radiocomunicaciones se intensifican, una forma de reducir al elevado gradiente de voltaje en el conductor es tener dos o más conductores por fase a una distancia que se hace pequeña comparada con el espaciamiento entre fases, a este tipo de arreglo se le llama conductores múltiples.

Otro efecto interesante es, para obtener un valor preciso de la inductancia de la línea es necesario considerar tanto el flujo exterior como el interior, entonces para obtener en consideración el flujo interior, las tablas de conductores nos brindan la DMG que es la distancia media geométrica, la cual por definición es, la distancia desde un punto de un conductor a un grupo de otros puntos en los conductores trenzados.

Y por último, el efecto que se genera en la L.T al encontrarse dos fases paralelas en la misma torre de transmisión, a este efecto se le llama conductores compuestos, y adjunto a estos a la línea se transponen sus fases –esto se hace para obtener un balance de distancia entre fases o sea que la distancia entre fases siempre sea la misma–.

Entonces tomando en cuenta todos los fenómenos anteriormente descritos, la inductancia en la línea de transmisión es:

$$L = 0.7411 \log \frac{D_{eq}}{D_s} \quad \text{Ec. 3}$$

La dimensional de la anterior expresión es de H/mi/fase. Donde D_{eq} y D_s tiene que estar en las mismas dimensionales ya sean pies ó cm y D_{eq} es igual a:

$$D_{eq} = \sqrt{D_{ab} * D_{bc} * D_{ca}} \quad \text{Ec. 4}$$

En esta fórmula D_{ab} , D_{bc} y D_{ca} son las distancias entre centros de las fases a, b y c, y D_s es igual a:

$$D_s = \sqrt[n]{D * d} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde n es el número de conductores por fase, d es la distancia entre conductores al mismo haz y D es la distancia DMG descrita en las tablas de conductores.

A la oposición de una corriente alterna a través de un inductor se le llama Reactancia Inductiva (X_L) –este tipo de reactancia absorbe potencia reactiva (Q) del sistema-, siendo esta:

$$X_L = \omega * L = 2 * \pi * f * L \quad \text{Ec. 6}$$

Donde f es la frecuencia del sistema –en Guatemala es de 60 Hz- y L es al inductancia de la línea de transmisión.

2.2.3 Parámetro de capacitancia de la línea de transmisión

Se define como capacitancia de la línea de transmisión a la carga de los conductores por unidad de diferencia de potencia entre ellos, así : $C = q / v$, siendo la

dimensional en Faradios / metro (F/m). Donde q es la carga de la línea, en Culombios por metro y v es la diferencia de potencial entre fase o bien fase tierra –como se vera mas adelante-.

Los conductores cuyos radios (r) son iguales -por ser el mismo tipo de cable utilizado para las tres fases-, se puede encontrar en la tabla de conductores, por lo general la tabla nos da el diámetro (d) del conductor en pulg ó cm y sabiendo que:

$$r = \frac{d}{2} \quad \text{Ec. 7}$$

Como se indicó anteriormente el gradiente de potencial no solamente se genera entre fases del conductor sino también entre fase y tierra, entonces al generarse dicho gradiente se genera una capacitancia entre línea y tierra, que influye en la capacitancia total de la línea de transmisión, siendo su efecto el aumento en la capacitancia de la línea.

Otro efecto es el que se genera cuando se tiene conductores agrupados en doble haz o doble línea por fase, este toma en cuenta todas las cargas o sea la carga de cada uno de los conductores, la modificación se genera en la DMG de los conductores -en la distancia D_s , de forma análoga a la inductancia-. Y por último el efecto que genera el tener circuitos paralelos en la misma torre de transmisión, este efecto se ve reflejado en la distancia equivalente que se generan en los centros de los conductores.

Entonces teniendo en cuenta los efectos anteriores, se dará paso a la fórmula general de la capacitancia (C) de la línea de transmisión, siendo esta:

$$C = \frac{0.0388}{\text{Log} \left(\frac{D_{eq}}{D_{sc}} \right) - E_T} \quad \text{Ec. 8}$$

La dimensional de C es de microfaradios por milla ($\mu\text{F} / \text{mi}$), donde D_{eq} es la distancia equivalente entre centros de conductores de cada una de las fases, E_T es el efecto tierra en la capacitancia total de la línea, siendo este:

$$E_T = \log \frac{\sqrt[3]{H_{12} * H_{23} * H_{31}}}{\sqrt[3]{H_1 * H_2 * H_3}} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde H_{12}, H_{23} y H_{31} son las distancias entre el conductor y la imagen de la fase reflejada en tierra –suponiendo a la tierra como una superficie superconductor–, H_1, H_2 y H_3 son las altura entre la fase del conductor y tierra. Faltando una sola variable de la fórmula 8, tenemos a D_{sc} que es la distancia DMG del conductor con el efecto de tener un doble conductor por fase, siendo esta:

$$D_{sc} = \left(\frac{n}{\sqrt{r * d}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \text{Ec. 10}$$

Siendo r el radio del conductor, d la distancia entre conductores de la misma fase –distancia del doble haz entre centro de conductores–, n cantidad de conductores por fase y m son la cantidad de fases por circuito instaladas en la torre de transmisión.

A la oposición de una corriente alterna a través de un capacitor se le llama Reactancia Capacitiva (X_C) –este tipo de reactancia genera potencia reactiva (Q) al sistema– siendo esta:

$$X_C = \frac{1}{\omega * C} = \frac{1}{(2 * \pi * f * C)}$$

Donde f es la misma que X_L (60 Hz) y C es la capacitancia de la línea de transmisión.

2.3 Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones básicas del electromagnetismo, se conocen como ecuaciones de Maxwell, en honor del físico escocés James Clerck Maxwell (1831 – 1879), quien fue el primero en hacer que las ecuaciones formara parte de una teoría simétrica y amplia del electromagnetismo. Una onda Electromagnética es la que transporta energía y cantidad de movimiento a través de un medio mediante campos eléctricos y magnéticos.

Estas ecuaciones se pueden representar por medio de su forma vectorial y forma integral, para nuestro propósito se trabajaran en su forma vectorial –resaltándose en negrita todos aquellos campos que sean vectores y sin negrita aquellos que sean escalares-, siendo las siguientes:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial (\mu \mathbf{H})}{\partial t} & \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial (\epsilon \mathbf{E})}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho_v & \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} & \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} & \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned}$$

Si el campo eléctrico \mathbf{E} es una onda desplazante y variante en el tiempo –o sea no es un campo electroestático-, entonces la densidad de carga encerrada $\rho_v = 0$, de esta forma:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v = 0 \Rightarrow \nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \epsilon \nabla \cdot (\mathbf{E}) = 0$$

Del álgebra vectorial tenemos la siguiente operación aplicada al rotor de \mathbf{E} , siendo esta:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \Rightarrow \nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E}$$

Y al operar el laplaciano de \mathbf{E} ($\nabla^2 \mathbf{E}$) en coordenadas rectangulares, obtenemos:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2}$$

Si aplicamos a las ecuaciones de Maxwell el doble rotor al campo $\nabla \times \mathbf{E}$ y sustituyendo la anterior operación obtenemos:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial (\nabla \times \mathbf{H})}{\partial t} \quad \text{Ec. 11}$$

Sabiendo que:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \text{Ec. 12}$$

Al sustituir la Ec. 12 en la Ec.11, se obtiene:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} = \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \text{Ec. 13}$$

El campo eléctrico \mathbf{E} es una variable aleatoria, por variar en tiempo y espacio, entonces, podemos realizar una operación matemática llamada separación de variables, la cual consiste en separar a dicha variable –campo eléctrico \mathbf{E} - en dos, una que dependa del espacio y la otra que dependa del tiempo. Así:

$$\mathbf{E}_{\mathbf{y}}(\mathbf{x},t) = \mathbf{E}(\mathbf{x}) \mathbf{E}(t) \mathbf{U}_{\mathbf{y}} = \mathbf{W}(\mathbf{x}) \mathbf{T}(t) \quad \text{Ec. 14}$$

Los vectores $\mathbf{U}_{\mathbf{x}}$, $\mathbf{U}_{\mathbf{y}}$ y $\mathbf{U}_{\mathbf{z}}$, son la dirección de variación de los campos. Si sustituimos la Ec. 14 en la Ec. 13

$$\mathbf{T}(t) \frac{\partial^2 \mathbf{W}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} = \mathbf{W}(\mathbf{x}) \left(\mu \sigma \frac{\partial \mathbf{T}(t)}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{T}(t)}{\partial t^2} \right)$$

Acomodando las variables, espaciales y temporales, obtenemos:

$$\frac{1}{W(\mathbf{x})} \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} = \frac{1}{T(t)} \left(\mu\sigma \frac{\partial T(t)}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} \right) \quad \text{Ec. 15}$$

Como el eléctrico (E) y magnético (H) son variables aleatoria, que dependen del espacio y tiempo, entonces estos se pueden representar por medio de fasores, $-\mathbf{E}$ y \mathbf{H} son campos fasoriales-, y recordándonos que los campos fasoriales se pueden representar por medio de la fórmula de Euler, decimos que:

$$T(t) = T e^{j\omega t}$$

$$\frac{\partial T(t)}{\partial t} = j\omega T e^{j\omega t} = j\omega T(t)$$

$$\frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} = (-1)\omega^2 T e^{j\omega t} = -\omega^2 T(t)$$

La anterior ecuación se le puede dar el seudónimo de “Concepto de Fasor”, entonces al sustituir lo anterior, en la Ec. 15, se obtiene:

$$\frac{1}{W(\mathbf{x})} \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} = \frac{1}{\cancel{T(t)}} \left(j\mu\omega\sigma \cancel{T(t)} - \omega^2\mu\varepsilon \cancel{T(t)} \right)$$

Sea:

$$\gamma^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon \quad \text{Ec. 16}$$

Al término γ se le llama constante de propagación electromagnética, como se puede observar esta es un número imaginario de la forma $\alpha + i\beta$, donde α se le llama

constante de atenuación y β se le llama constante de fase. Entonces, al operar se obtiene lo siguiente:

$$\frac{1}{W(x)} \frac{\partial^2 W(x)}{\partial x^2} = \gamma^2 \quad \text{Ec. 17}$$

Si retornamos de la variable $W(x) = E(x)$ que es la variación espacial del campo eléctrico, y despejando se $E(x)$ en el reemplazo de la Ec. 17, se obtiene:

$$\frac{1}{E(x)} \frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2} = \gamma^2 \Rightarrow \frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2} = E(x) \gamma^2 \quad \text{Ec. 18}$$

Para resolver esta ecuación diferencial, decimos que:

$$E(x) = k e^{\gamma x} \quad \text{Ec. 19}$$

Al sustituir la Ec. 19 en la Ec. 18 y operamos la ecuación diferencial planteada se obtiene siguiente expresión:

$$E_y(x) = k_1 e^{\gamma x} + k_2 e^{-\gamma x} \quad \text{Ec. 20}$$

La Ec. 20, nos describe la variación espacial del campo eléctrico, la variación temporal se realizará de otra forma –descrita en la sección 2.6 -. Entonces, para el desarrollo del campo magnético recurrimos a la ecuaciones de Maxwell que dice:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial (\mu \mathbf{H})}{\partial t} \quad \text{Ec. 21}$$

Del álgebra vectorial tenemos que:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x}$$

Al aplicar el concepto de fasor al campo magnético y sustituimos todo en la Ec. 21, se obtiene:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \mathbf{U}_z \Rightarrow \frac{\partial E}{\partial x} = -j\omega\mu\mathbf{H}_z \quad \text{Ec. 22}$$

Al resolver la operación -descrita en la Ec. 22- en la Ec. 20, se obtiene:

$$j\omega\mu\mathbf{H} = K_1\gamma e^{\gamma x} - K_2\gamma e^{-\gamma x} \quad \text{Ec. 23}$$

Se decimos que:

$$\eta = j \frac{\omega\mu}{\gamma}$$

A η se le llama densidad del medio. Entonces, simplificando y operando la Ec. 23 se obtiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{H}_z(x) = \frac{K_1}{\eta} e^{\gamma x} - \frac{K_2}{\eta} e^{-\gamma x} \quad \text{Ec. 24}$$

La Ec. 24 nos muestra la variación espacial del campo magnético.

2.3.1 Constante de propagación electromagnética

La constante de propagación electromagnética γ nos brinda la información del medio por el cual se propaga la onda \mathbf{E} y \mathbf{H} . El término γ es un número complejo como se muestra en la Ec. 16, siendo de la forma $\alpha + i\beta$. Expandiendo la interpretación de la Ec. 16 se puede expresar como:

$$\gamma^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon = \alpha + i\beta \quad \text{Ec.16A}$$

Siendo α llamada constante de atenuación, puesto que este muestra como se atenúa la señal electromagnética en un medio dispersivo –como lo es el gas SF6-. Y al término β se le llama constante de fase, esta nos muestra la variación en la longitud de onda y velocidad de propagación de los campos \mathbf{E} y \mathbf{H} de un medio a otro –los medios serán aire y -despreciando la corta longitud del cable de potencia- gas (SF6).

2.3.1.1 Constante de atenuación

Como su nombre lo indica, esta representa la atenuación o decremento en la amplitud de los campos \mathbf{E} y \mathbf{H} . Esta al igual que β dependen de las propiedades eléctricas del medio como lo son: Permitividad, Permeabilidad y Conductividad. Así:

$$\alpha = \frac{k}{\sqrt{2}} * (\sqrt{1 + S^2} - 1)^{\frac{1}{2}}$$

$$S = \frac{1}{\omega * \tau}, \quad \tau' = \frac{\epsilon}{\sigma}$$

$$k = \omega \sqrt{\mu * \epsilon}$$

Ec. 16.B

Como se puede observar en la Ec. 16.B el término α depende de las propiedades eléctricas del medio, si se contaran con ellas, sino, entonces, se puede utilizar la Ec. que toma en cuenta el porcentaje de atenuación que ha sufrido la onda a recorrer cierta distancia, siendo esta:

$$\alpha = -\frac{\text{Ln}(A_1)}{k}$$

Ec. 16.C

Donde A_1 es el porcentaje de atenuación de la onda electromagnética y k es la distancia de separación entre los contactos del interruptor abierto.

2.3.1.2 Constante de fase

Como se indicó con anteriormente, esta indica la variación en la velocidad de propagación de la onda, cuando viaja de un medio a otro distinto -Aire , Gas- y la distorsión en la longitud de onda debida al cambio dieléctrico (del inglés Dielectric Strength) en su índice de refracción (n). La constante β es similar a la Ec. 16.B con la diferencia en:

$$\beta = \frac{k}{\sqrt{2}} * \left(\sqrt{1 + S^2} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 16.D}$$

Todas las demás variables serán iguales a como se muestran en la Ec. 16.B β al igual que α se puede deducir de otra forma, en la cual toma en cuenta el índice de refracción del gas SF6, la velocidad de propagación de la onda , la longitud de onda y la frecuencia de la señal, siendo esta:

$$\beta = \frac{2 * \pi * n * f}{c}$$
$$\lambda = \frac{2 * \pi}{\beta} \quad v = f * \lambda \quad \text{Ec. 16.E}$$

Donde n es el índice de refracción, f es la frecuencia en Hz, λ es la longitud de onda, v es la velocidad de la onda en el medio y c es la velocidad de la luz al vacío siendo igual a 186,451.2 mi/seg.

2.3.2 Densidad del medio

La densidad del medio es la relación que existe entre el campo eléctrico **E** y el campo magnético **H**, así:

$$\eta = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} = \frac{j\omega\mu}{\gamma} \quad \text{Ec. 16.F}$$

De la Ec. 16.F se puede observar que η es un número complejo, lo que significa que siempre existirá un desfase entre los campos \mathbf{E} y \mathbf{H} . Si a la Ec. 16.F se le realiza un poco de álgebra podemos decir que:

$$\eta = \frac{1}{\varepsilon} * \frac{k}{\omega} * \frac{j}{\sqrt{jS-1}}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \varepsilon_r \quad \text{Ec. 16.G}$$

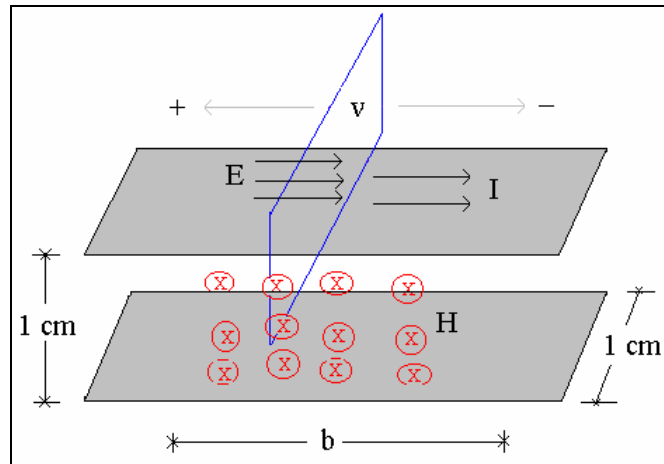
Donde ω es la frecuencia angular cuyo valor es $\omega = 2 * \pi * f$. El término η depende de ε_0 siendo esta la Permitividad del vacío -con un valor de $8.8542 * 10^{-12}$ - y ε_r que es la Permitividad relativa del medio -para el SF6 ε_r tiene un valor de 1.002-. Para hallar los valores de S y k, cuando no se cuenta con los valores de σ y μ , se pueden utilizar las siguientes expresiones:

$$k = \frac{\alpha * \sqrt{2}}{\left(\sqrt{(1+S^2)} - 1\right)^{\frac{1}{2}}} \quad S = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\alpha^2 - \beta^2} \quad \text{Ec. 16.H}$$

2.3.3 Interpretación de μ

La permeabilidad del medio, se puede interpretar como una inductancia distribuida. La demostración se puede realizar a partir de la figura 14. En esta figura se puede observar como es la inductancia que se genera entre dos conductores de placas paralelas con una distancia unitaria. Además la x muestra la dirección del campo magnético H, en este caso entra -en dirección a la página- y se conserva en su gran mayoría entre las fronteras del conductor.

Figura 14. Interpretación de μ , ϵ y σ



Fuente: Ing. Edgar Montufar. **Líneas de Transmisión**, página 18.

Tomando como base la figura 14, tenemos lo siguiente:

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{N \phi}{I_{enc}} = \frac{N \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}}{\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}}$$

Donde N son el total de número de espiras de la bobina, de la gráfica se observa que N=1, entonces operando queda:

$$\begin{aligned} N \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} &= 1 \mu \mathbf{B} (1 * b) = \mu \mathbf{H} b \\ \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= H (1) = H \end{aligned}$$

Reagrupando los términos se obtiene:

$$L = \frac{b\mu \mathbf{H}}{(1) \mathbf{H}} \Rightarrow \frac{L}{b} = \mu$$

La dimensional de la anterior expresión esta dada en Henrios por cm, con lo cual se demuestra que, la permeabilidad del medio (μ), se puede representar por medio de una inductancia distribuida (L / b).

2.3.4 Interpretación de ϵ

La permitividad del medio se puede representar por medio de una Capacitancia distribuida. Para demostrarlo tomemos como base la figura 14, de ella se puede observar que:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\int (\epsilon E) \cdot ds}{\int E \cdot dl}$$

Resolviendo obtenemos:

$$\begin{aligned} \int (\epsilon E) \cdot ds &= \epsilon E (1 * b) \\ \int E \cdot dl &= E (1) \end{aligned}$$

Reagrupando los términos resulta que:

$$C = \frac{\epsilon E (1 * b)}{E (1)} \Rightarrow \frac{C}{b} = \epsilon$$

La dimensional de la anterior expresión esta dada en Faradios por cm, con lo cual se demuestra que, la permitividad del medio (ϵ), se puede representar por medio de una capacitancia distribuida (C / b).

2.3.5 Interpretación de σ

La Conductividad del medio se puede representar por medio de una conductancia distribuida. Para demostrarlo observe la figura 14, de ella se puede decir que:

$$\frac{1}{R} = G = \frac{I}{V} = \frac{\int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}}{\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}}$$

Resolviendo obtenemos lo siguiente:

$$\int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = J (1 * b) = b\sigma E$$

$$\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = E (1) = E$$

Reagrupando los términos resulta que:

$$G = \frac{b\sigma E}{E} \Rightarrow \frac{G}{b} = \sigma$$

La dimensional de la anterior expresión esta dada en Mhos por cm, con lo cual se demuestra que, la conductividad del medio (σ), se puede representar por medio de una conductancia distribuida (G / b). Recordando que:

$$\frac{1}{R} = G \Rightarrow \frac{1}{\sigma} = \rho$$

Se puede demostrar que de forma la análoga que, la resistividad del medio se puede representar por medio de una resistencia distribuida.

2.3.6 Relación entre campo eléctrico (\mathbf{E}) y potencial eléctrico (V)

La Ec. 20 nos muestra la variación espacial del campo eléctrico. Por medio de la relación existente entre \mathbf{E} y V , se puede demostrar que dicha Ec. también representa la variación espacial del potencial eléctrico. La relación entre \mathbf{E} y V es la siguiente:

$$V = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

$$V = E b$$

Tomando en consideración las demostraciones anteriores de los parámetros del medio distribuido y la relación entre \mathbf{E} y V , tenemos las siguientes sustituciones:

$$\begin{aligned} \frac{G}{b} &= \sigma & \frac{C}{b} &= \varepsilon \\ \frac{L}{b} &= \mu & \frac{V}{b} &= E \end{aligned} \quad \text{Ec. 25}$$

Al sustituir el juegos de ecuaciones Ec. 25 en la Ec. 13 y resolver de la misma forma que se hizo de la Ec. 13 a la Ec. 20, se obtiene que:

$$V(x) = K_1 e^{\gamma x} + K_2 e^{-\gamma x} \quad \text{Ec. 26}$$

La anterior ecuación se llama ecuación de Onda de Voltaje muestra y muestra la variación espacial del voltaje en cualquier punto de la línea de transmisión. Las constantes K_1 y K_2 , se deducirán después.

2.3.7 Relación entre campo magnético (\mathbf{H}) y corriente eléctrica (I)

La Ec. 24 nos muestra la variación espacial del campo magnético. Por medio de la relación existente entre \mathbf{H} é I , se puede demostrar que dicha Ec. también representa la variación espacial de la corriente eléctrica. La relación entre \mathbf{H} é I es la siguiente:

$$\begin{aligned} I &= \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \\ I &= H b \end{aligned} \quad \text{Ec. 27}$$

Se debe recordar que la demostración de todos los parámetros distribuidos se realizo por medio de un tramo de conductor unitario, y para conservar la concordancia entre ecuaciones el término b es de mismo tamaño tanto para \mathbf{E} como para \mathbf{H} . La Ec. 27 nos muestra la relación existente entre \mathbf{H} é I . Ahora, si operamos de la misma forma que

se hizo para obtener la Ec. 26, esto significa que sustituimos el juego de ecuaciones Ec. 25 en la Ec. 23, resulta que:

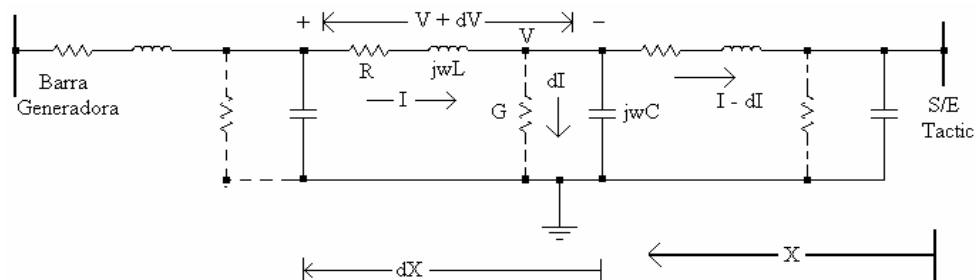
$$I(x) = \frac{K_1}{\eta_0} e^{\gamma x} - \frac{K_2}{\eta_0} e^{-\gamma x} \quad \text{Ec. 28}$$

El término η_0 se llama impedancia característica de la línea de transmisión –ya no es del medio, porque ahora se están viendo parámetros R, L y C–.

2.4 Modelo de la línea de transmisión con pérdidas

Las ecuaciones Ec. 26 y Ec. 28 muestran la relación entre V é I representándose por medio de un circuito equivalente similar al que aparece en la figura 13, tomándose ahora a las variables R, L y C, como parámetros distribuidos de la línea de transmisión. Véase la figura 15, en ella no se toma en cuenta al cable de potencia, ya que este es muy corto generándose un error menor del 0.1 % del valor real registrado por el I.N.D.E .

Figura 15. Parámetros diferenciales distribuidos de la línea de transmisión



Fuente: Ing. Edgar Montufar. **Líneas de Transmisión**, página 36.

De la figura 15 se puede decir lo siguiente:

- R representa la resistencia distribuida del conductor
- $j\omega L$ representa la reactancia inductiva del conductor
- G representa la conductancia en derivación del conductor, como se puede observar, este parámetro se encuentra con líneas discontinuas, esto es porque los valores de G son muy pequeños y la omisión de este parámetro genera un error muy pequeño –alrededor del 0.4% del valor total- en condiciones normales.
- $1 / j\omega C$ representa la reactancia capacitiva del conductor.
- X es la variable asignada para representar a la distancia, que se tomará a partir del punto de recibo –en este caso será la S/E Tactic-
- dX son los diferenciales de distancia recorrida en el tramo del conductor
- $V + dV$ representa la cantidad diferencial de voltaje
- dI esta pequeña porción es la que contribuye a la corriente de carga de la línea
- $I - dI$ representa la cantidad de corriente que llegara al punto de recibo

Ahora que ya se definió cada una de las partes del modelo de la línea de transmisión con pérdidas, se pasara a la deducción de las fórmulas que mostrarán el comportamiento de esta. Primero empezaremos tomando lo siguiente:

$$Z = R + j\omega L$$

$$Y = G + j\omega C$$

Donde Z es la impedancia serie distribuida la línea de transmisión y Y es la admitancia en paralelo distribuida de la línea de transmisión.

De la figura 15 se deduce lo siguiente:

$$dV = I Z dx \qquad dI = V Y dx$$

$$\frac{dV}{dx} = I Z \qquad \frac{dI}{dx} = V Y$$

Si al juegos de ecuaciones anteriores le sacamos la segunda derivada, obtenemos:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = Z \frac{dI}{dx} \Rightarrow \frac{d^2 V}{dx^2} = Z Y V$$

Ec. 29

Sea:

$$\gamma^2 = Z Y$$

$$V(x) = K e^{\gamma x}$$

Ec. 30

Si resolvemos la ecuación diferencial Ec. 29 con la sustitución de $V(x)$ de la Ec. 30, obtenemos:

$$V(x) = K_1 e^{\gamma x} + K_2 e^{-\gamma x}$$

Ec. 31

Que es similar a la Ec. 26 deducida de la relación E y V . Ahora en el caso de la corriente, tenemos:

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = Z \frac{dV}{dx} \Rightarrow \frac{d^2 I}{dx^2} = Z Y I$$

Vemos que es de la misma forma que antes resultaba, con la diferencia que:

$$\gamma^2 = Z Y$$

$$I(x) = K e^{\gamma x}$$

Resolviendo, resulta:

$$I(x) = \frac{K_1}{Z_0} e^{\gamma x} - \frac{K_2}{Z_0} e^{-\gamma x}$$

Ec. 32

Como se puede observar la Ec. 32 es similar a la Ec. 28, la única diferencia es que ahora el término Z_0 reemplazo al término η_0 , llamándose al término Z_0 como “Impedancia Característica de la línea de transmisión”

2.4.1 Ecuación de onda de voltaje

La ecuación de onda de voltaje fue deducida con anterioridad y se muestra en la Ec. 31, pero no esta aun terminada. Las constantes K_1 y K_2 se hallan teniendo en cuenta el extremo receptor de la línea de transmisión, es decir, $x = 0$, $V(0) = V_R$ –donde V_R se llama voltaje de recibo, y es el voltaje Línea a Neutro de la L.T-, e $I(0) = I_R$ –donde I_R es la corriente de recibo, esta es la corriente de línea-. Sustituyendo estas condiciones en las ecuaciones Ec. 31 y Ec. 32, se obtiene:

$$K_1 = \frac{V_R + I_R Z_0}{2}$$

$$K_2 = \frac{V_R - I_R Z_0}{2} \quad \text{Ec. 33}$$

Donde K_1 es llamada “onda incidente” y K_2 es llamada “onda reflejada”. Ya con las constantes K_1 y K_2 , damos paso a la ecuación de onda de voltaje, siendo esta:

$$V(x) = \frac{V_R + I_R Z_0}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - I_R Z_0}{2} e^{-\gamma x} \quad \text{Ec. 34}$$

Siendo esta la ecuación de onda de voltaje, y nos muestra la variación espacial del voltaje en cualquier punto de la línea de transmisión.

2.4.2 Ecuación de onda de corriente

La ecuación de onda de corriente fue deducida con anterioridad en la Ec. 32, con las mismas condiciones que fueron aplicadas al voltaje, la corriente se hallara en el punto

de recibo, y aplicando las constantes K_1 y K_2 de la fórmula Ec. 33, se obtiene la siguiente expresión para la onda de corriente:

$$I(x) = \frac{V_R + I_R Z_o}{2Z_o} e^{\gamma x} - \frac{V_R - I_R Z_o}{2Z_o} e^{-\gamma x} \quad \text{Ec. 35}$$

Siendo la Ec. 35 la ecuación de onda de corriente. Esta no muestra la variación espacial de la corriente en cualquier punto de la línea de transmisión.

2.4.3 Constante de propagación

Hasta ahora se han estado resolviendo las ecuaciones diferenciales sin asignarles nombres específicos a las constantes que de ellas han ido surgiendo. Una de ellas es la constante de propagación (γ), esta es la raíz cuadrada del producto de la Impedancia en serie distribuida con la Admitancia en paralelo distribuida, así:

$$\gamma = \sqrt{ZY}$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) * (G + j\omega C)} \quad \text{Ec. 36}$$

Este parámetro es un número complejo. La parte real (α) de la constante de propagación se llama constante de amortiguación y la parte imaginaria (β) se llama constante de fase.

2.4.4 Impedancia característica

La impedancia característica de la línea de transmisión ($Z_o = Z_c$, para enmarcar Impedancia Característica) –descrita en la Ec. 28-, esta es la raíz cuadrada de la impedancia en serie distribuida entre la admitancia en paralelo distribuida, así:

$$Z_o = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad \text{Ec. 37}$$

Este parámetro es el responsable de generar la corriente de carga de la línea de transmisión.

2.4.5 Forma hiperbólica de las ecuaciones de onda de voltaje y onda de corriente

Las ecuaciones hiperbólicas son aquellas que involucran las operaciones de seno hiperbólico y coseno hiperbólico., este tipo de operaciones son de la forma exponencial, siendo estas:

$$\text{Sen } h\varnothing = \frac{e^{\varnothing} - e^{-\varnothing}}{2}$$

$$\text{Cos } h\varnothing = \frac{e^{\varnothing} + e^{-\varnothing}}{2}$$

Si reagrupamos los términos de la Ec. 34 de manera que se vea de la forma hiperbólica, se obtiene la siguiente expresión:

$$V(x) = V_R \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) + I_R Z_o \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right)$$

De manera análoga trabajamos la Ec.35, resultando:

$$I(x) = I_R \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) + \frac{V_R}{Z_o} \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right)$$

Entonces, de esta forma se puede visualizar de mejor manera que $V(x)$ e $I(x)$, son funciones hiperbólicas, quedando de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} V(x) &= V_R \text{Cosh } \gamma x + I_R Z_0 \text{Senh } \gamma x \\ I(x) &= I_R \text{Cosh } \gamma x + \frac{V_R}{Z_0} \text{Senh } \gamma x \end{aligned} \quad \text{Ec. 38}$$

En la Ec. 38 se puede observar que la constante de propagación (γ) es un número complejo, entonces una forma fácil de resolver una ecuación hiperbólica es, descomponer a γ en su parte real y parte imaginaria, así:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad \text{Ec. 39}$$

Entonces al sustituir este término en una operación hiperbólica, obtenemos:

$$\begin{aligned} \text{Cosh } (\gamma x) &= \text{Cosh } ((\alpha + j\beta)x) = \cosh \alpha x \cos \beta x + j \sinh \alpha x \sin \beta x \\ \text{Senh } (\gamma x) &= \text{Senh } ((\alpha + j\beta)x) = \sinh \alpha x \cos \beta x + j \cosh \alpha x \sin \beta x \end{aligned} \quad \text{Ec. 40}$$

Como se puede observar en la Ec. 39, la resolución de una función hiperbólica imaginaria, queda en términos de seno, coseno, seno hiperbólico y coseno hiperbólico de números reales.

2.4.6 Coeficientes de reflexión y transmisión

Por definición el coeficiente de reflexión es la relación que existe del voltaje reflejado (V_r) entre el voltaje incidente (V_i), ó bien la relación que existe de la corriente reflejada (I_r) entre la corriente incidente (I_i). Así:

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{I_r}{I_i} \quad \text{Ec. 41}$$

Este parámetro se utiliza para ver que tanto se refleja la onda incidente respecto a la carga del sistema, la mejor situación es cuando este valor Γ es igual a cero y esto sucede cuando la carga Z_L es igual Z_0 , lo que significa que todo el voltaje incidente esta siendo aprovechado por la carga y no se refleja hacia la fuente.

Para dejarlo de una forma que se puede operar fácilmente, se tomarán los valores de K_1 y K_2 de la Ec. 33, y se dirá que:

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{V_R - I_R Z_0}{2} & I_r &= \frac{V_R - I_R Z_0}{2 Z_0} \\ V_i &= \frac{V_R + I_R Z_0}{2} & I_i &= \frac{V_R + I_R Z_0}{2 Z_0} \end{aligned} \quad \text{Ec. 42}$$

Además se dará un nuevos parámetro que es muy útil para la solución del coeficiente de reflexión es, la impedancia de carga (Z_L), por definición es la relación entre el voltaje de recibo (V_R) y la corriente de recibo (I_R), esta impedancia se localiza en el extremo receptor, o sea $V(x)$ é $I(x)$ en $x = 0$, -como su nombre lo indica, es la carga que conecta la línea de transmisión-. Esta se calcula en base de la potencia demandada por la carga, voltaje de recibo, corriente de recibo y factor de potencia con el cual la carga opera. De la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Z_L &= \frac{V_R}{I_R} \\ V_R &= \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} & I_R &= \frac{P}{V_R * \text{Cos } \theta * \sqrt{3}} \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} & \text{Cos } \theta &= \frac{P}{S} \end{aligned} \quad \text{Ec. 43}$$

La ecuaciones de la fórmula (Ec. 43), son mas bien un repaso de potencia en circuitos eléctricos trifásicos, las variables que en ella aparecen se describen a continuación:

- V_{LL} es el voltaje de línea-línea en la L.T
- S es la potencia aparente del sistema, en volt-amperios (VA)
- P es la potencia real del sistema, en Watts (W)
- Q es la potencia reactiva del sistema, en Vars (Var)
- $\cos \Theta$ es el factor de potencia al cual opera la carga

Una vez demostrado todos los parámetros que incluyen al coeficiente de reflexión, damos paso a su resolución. Para saber como el coeficiente de reflexión depende de valores de impedancia, sustituimos V_r y V_i de la Ec. 42 en la Ec. 41, y realizando un poco de álgebra, resulta:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad \text{Ec. 44}$$

Siendo esta la expresión que se utilizará para el coeficiente de reflexión y su variación respecto a las impedancias de todo el sistema. Lo opuesto al coeficiente de reflexión es el coeficiente de transmisión (τ). Este nos indica que porción de la onda – voltaje o corriente- se logra transmitir –o ser aprovechado- por la carga. Siendo este:

$$\tau = 1 - \Gamma \quad \text{Ec. 45}$$

Un dato interesante es que el Γ varia en el intervalo de -1 a 1 y el τ varia en el intervalo de 0 a 2 , siendo el dato óptimo para $\Gamma = 0$ ($Z_L = Z_0$) y $\tau = 1$.

2.4.7 Impedancia de entrada

La impedancia de entrada ($Z_{e(x)}$), por definición es, la relación que existe entre la ecuación de onda de voltaje $V(x)$ y la ecuación de onda de corriente $I(x)$, así:

$$Z_{e(x)} = \frac{V(x)}{I(x)} \quad \text{Ec. 46}$$

Este parámetro indica la variación de impedancia del sistema, viéndola del punto de recibo a cualquier punto en dirección al punto de envío. Para saber como es la $Z_{e(x)}$ recurrimos a la fórmula (Ec. 38), que no da las ondas de voltaje $V(x)$ y corriente $I(x)$ en su forma hiperbólica, realizando la operación indicada en la Ec. 46 sobre la fórmula (Ec. 38) y realizar un poco de álgebra, obtenemos la siguiente expresión:

$$Z_{e(x)} = Z_0 \left(\frac{Z_L + Z_0 \operatorname{Tanh} \gamma x}{Z_0 + Z_L \operatorname{Tanh} \gamma x} \right) \quad \text{Ec. 47}$$

Esta expresión es muy útil, ya que ha partir de ella se hará la demostración matemática de la corriente de carga –corriente que se genera por la carga y descarga alternativa de una línea, debida a la tensión alterna-, siendo esta la mayor responsable del efecto Ferranti en la línea de transmisión y su efecto en la Subestación Tactic –sobretensiones en los equipos de la Subestación-.

2.5 Ecuaciones influenciadas por el efecto Ferranti

El efecto Ferranti como bien se ha dicho, es el que se genera en la apertura total de la carga, y se hace vidente poco a poco mientras se reduce la carga conectada a la línea de transmisión. Al abrirse por completo la carga conectada, circula en ella una corriente que es llamada corriente de carga de la línea, esta se genera primordialmente en el punto de envío y se atenúa conforme se avanza al punto de recibo.

El efecto de disparo de un interruptor y la apertura de las cuchillas del seccionador hace que la corriente de recibo sea igual a cero y la impedancia de carga sea infinita ($I_R = 0$, $Z_L = \infty$), entonces la Ec. de onda de voltaje $-V(x)$ y la Ec. de onda de corriente $-I(x)$, siendo esta la Ec. 38, se convierten en:

$$\begin{aligned}
 V_S &= V_R \text{Cosh } \gamma l \\
 I_S &= \frac{V_R}{Z_C} \text{Senh } \gamma l
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 48}$$

De la Ec. 44 si $Z_L = \infty$ entonces el coeficiente de Reflexión (Γ) se hace igual uno y el coeficiente de transmisión (τ) se hará igual a cero, lo que significa que la onda incidente será igual en magnitud y fase a la onda reflejada y al punto de apertura no pasara nada –o muy poco, como se vera en el capítulo 3- al otro extremo de la línea.

La impedancia de entrada es cuando $Z_{(X)}$ se resuelve en el punto de envío ubicada a la distancia $X = l$, y de la Ec. 47, si hacemos $Z_L = \infty$ entonces, operando por medio de H'Lopital, se obtiene la siguiente expresión:

$$Z_{(1)} = \frac{Z_C}{\text{Tanh } \gamma l}
 \tag{Ec. 49}$$

Lo cual concuerda con lo dicho al inicio, respecto a la corriente de carga, ¿por qué?, la respuesta es: si se dividen los términos V_S entre I_S de la Ec. 48 se llegara al mismo término de la Ec. 49, o sea que el término I_S de la Ec. 48 será la corriente de carga de la línea –aquí se demuestra analíticamente y en capítulo 3 se vera el valor fasorial de dicha corriente-. Así:

$$Z_{(1)} = \frac{V_S}{I_S} \Rightarrow I_S = \frac{V_S}{Z_{(1)}}
 \tag{Ec. 50}$$

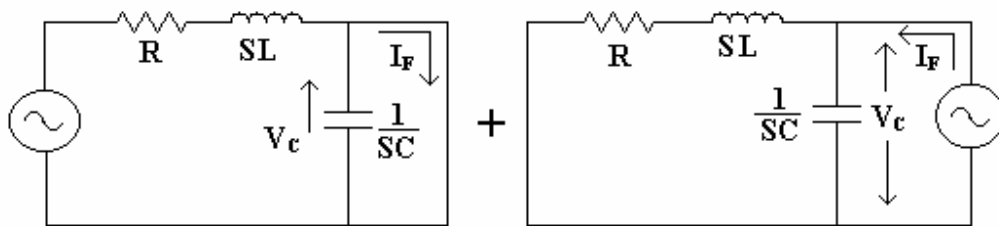
2.6 Variación temporal del voltaje con efecto Ferranti

La variación temporal del voltaje se realizará de por medio del método de transformada de Laplace, debido a que este procedimiento matemático nos muestra el

comportamiento de Voltaje versus Tiempo, al antitransformar el circuito equivalente de la línea de transmisión con pérdidas –figura 15-.

La resolución de este circuito se hará por el método de superposición, transformándose la figura 15, en la figura 16, la cual muestra las fuentes equivalentes resultantes al aplicar el método de superposición, con la línea abierta.

Figura 16. Método de superposición



Fuente: Ing. José Bedolla. **Notas sobre Transitorios Electromagnéticos**, página 85.

De la figura 16 se obtiene la siguiente expresión para la impedancia (Z_s) vista desde el punto de apertura hacia la fuente de envío, siendo:

$$Z(s) = \frac{SL + R}{S^2LC + SRC + 1}$$

La corriente I_F , es la que se genera con la línea abierta, siendo esta:

$$I_F = \frac{V}{SL + R} * \frac{\omega}{(S^2 + \omega^2)}$$

Entonces el producto de I_F con Z_s , será el voltaje resultante en la apertura de la carga, este se genera en las terminales del capacitor $V_{C(S)}$ –siendo el voltaje resultante en la subestación-, entonces este será el voltaje con efecto Ferranti ($V_{F(S)}$) en la subestación Tactic. Después de realizar un poco de álgebra, sustitución de variables y factorización, resulta la siguiente expresión para el voltaje Ferranti con respuesta en la frecuencia, así:

$$V_{C(S)} = V_{F(S)} = I_F * Z_{C(S)}$$

$$V_{F(S)} = \frac{1}{C} * \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} * \frac{\omega}{S^2 + \omega^2} * \left(\frac{(S+B)}{(S+B)^2 + A} + \frac{B}{(S+B)^2 + A} \right)$$

$$B = \frac{R}{2L} \quad A = \frac{1}{LC} - B^2$$

Ec. 51

La Ec. 51 nos brinda información acerca del comportamiento del voltaje en la subestación con respuesta en la frecuencia, a B se le llamara coeficiente de amortiguación y al término \sqrt{A} se le llamara velocidad angular resonante de la línea, recordando que ω es la velocidad angular del sistema. Si aplicamos la transformada inversa de Laplace a la Ec. 51 encontraremos la función que define el comportamiento del voltaje Ferranti en la S/E Tactic versus Tiempo, $L^{-1}\{V_{F(S)}\} = V_{f(t)}$.

La resolución de dicha transformada, es bastante trabajosa, se resumirá diciendo que para la resolución de dicha Ec. laplaciana se utilizó el método de convolución de la antitransformada de Laplace, siendo el resultado:

$$V_{f(t)} = U * ((M * \text{Cos}(\sqrt{A}t) + N * \text{Sen}(\sqrt{A}t)) * e^{-Bt}) + \tilde{N} * \text{Cos}(\omega t) + O * \text{Sen}(\omega t)$$

Ec. 52

Los valores de los coeficientes U , M , N , \tilde{N} y O , son los siguientes:

$$U = \frac{1}{C} * V * \frac{\omega}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$$r = (\omega + \sqrt{A}) \quad s = (\omega - \sqrt{A})$$

$$t = \left(\frac{B}{r}\right)^2 + 1 \quad v = \left(\frac{B}{s}\right)^2 + 1$$

$$M = \frac{1}{(2 * r * t)} + \frac{1}{(2 * s * v)} + \frac{B^2}{(2 * \sqrt{A} * s^2 * v)} - \frac{B^2}{(2 * \sqrt{A} * r^2 * t)}$$

$$N = \frac{B}{(2 * \sqrt{A} * r * t)} + \frac{B}{(2 * \sqrt{A} * s * v)} - \frac{B}{(2 * s^2 * v)} + \frac{B}{(2 * r^2 * t)}$$

$$\tilde{N} = \frac{B^2}{(2 * \sqrt{A} * r^2 * t)} - \frac{B^2}{(2 * \sqrt{A} * s^2 * v)} - \frac{1}{(2 * s * v)} - \frac{1}{(2 * r * t)}$$

$$O = \frac{B}{(2 * \sqrt{A} * r * t)} - \frac{B}{(2 * \sqrt{A} * s * v)} + \frac{B}{(2 * s^2 * v)} + \frac{B}{(2 * r^2 * t)}$$

Ec. 53

El juego de ecuaciones que representa la Ec. 53, nos muestran los valores exactos de los coeficientes en la variación del voltaje con efecto Ferranti, en la línea de remate de la Subestación Tactic.

3. IMPLEMENTACIÓN DE MÓDELO MATEMÁTICO DEL EFECTO FERRANTI EN LA SUBESTACIÓN TACTIC

La subestación Tactic opera con voltajes de 69 Kv y 230 Kv, por lo tanto, la resolución del modelo matemático aplicado al efecto Ferranti, deducido en el capítulo 2, se realizará dividiendo en dos campos a la subestación Tactic, el primero a 230 Kv y el segundo a 69 Kv. Se iniciara deduciendo los parámetros pasivos –resistencia, inductancia y capacitancia- de cada una de las líneas que rematan en la subestación – recordando que las líneas que rematan en la subestación Tactic son: Chixoy 1 y 2, Guate Norte 1 y 2, ambas en 230 Kv; San Julián 1 y 2, Matanzas, ambas líneas en 69 Kv-.

Seguido se realizará la deducción de los parámetros intrínsecos de las líneas para deducir las ecuaciones de onda de voltaje y corriente de cada una de las ellas, en el caso de las líneas en 230 Kv se mostrará la variación de los campos eléctricos y magnéticos en la interface aire-gas, ya que el módulo 8DN9 esta aislado con gas SF₆ y opera a 230 Kv.

Por último se vera el gráfica que muestra el comportamiento de voltaje versus tiempo, con la línea abierta. Para la resolución de dicho modelo se utilizará las ecuaciones deducidas en el capítulo 2 describiendo que ecuación se utilizará, y para las gráficas se implementara el Software MatLab 6.5.

3.1 Campos en 230 Kv

Las líneas que pertenecen al campo en 230 Kv son: Chixoy 1 y 2, Guate Norte 1 y 2.

Para la deducción de todos los parámetros de estas líneas nos basaremos en la figura 9, con la suposición que esta configuración de torre es la predominante en la transmisión.

El tipo de cable utilizado es ASCR 477 HAWK, cuyos datos se pueden obtener en el anexo 1.

3.1.1 Cálculo de parámetros pasivos

Los parámetros pasivos del campo en 230 Kv son los mismos para las líneas de Chixoy y Guate Norte, ya que se darán en forma distribuida, para luego separarlos a la línea que pertenezcan –haciendo la separación en los parámetros intrínsecos de cada una de las líneas-.

3.1.1.1 Cálculo de resistencia

Para el valor de resistencia vemos que para el cable 477 Hawk -anexo 1-, tiene un valor 0.1931 Ω /mi a 60 Hz y 20 °C.

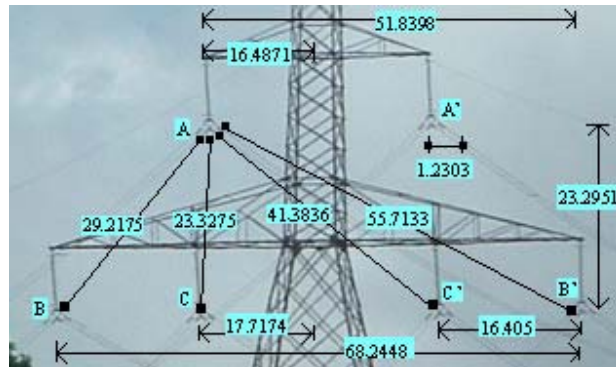
Tactic tiene una temperatura promedio de 22 °C, entonces utilizando la Ec. 1, se obtiene un valor de:

$$R_o = 0.1931 \left(\frac{228 + 22}{228 + 20} \right) = 0.1947 \Omega/\text{mi}$$

3.1.1.2 Cálculo de inductancia

Para la inductancia nos basaremos en la figura 17

Figura 17. Distancias entre circuitos, en pies, para la torre de 230 Kv



Fuente: Ing. Daniel Zapata. **INDE**, julio 2007

Esta figura muestra una parte de la figura 9 que es el tipo de configuración de la torre en 230 Kv utilizada en la transmisión, las fases A, B y C, son el primer circuito, y las fases A', B' y C', son las fases del circuito paralelo, además se pueden observar las distancias entre ellas y la configuración del doble haz.

La distancia equivalente –en pies- de la Ec. 4 es:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{(40.3461) \cdot (29.1621) \cdot (31.0704)} = 33.1886$$

Los valores correspondientes –en pies- a fases iguales pero diferente circuito tomando en consideración el doble haz es igual a:

$$A-A' = \sqrt{(\sqrt{(0.0289) \cdot (1.6405)}) \cdot (32.9741)} = 2.6795$$

$$B-B' = \sqrt{(\sqrt{(0.0289) \cdot (1.6405)}) \cdot (68.2448)} = 3.8542$$

$$C-C' = \sqrt{(\sqrt{(0.0289) \cdot (1.6405)}) \cdot (35.4348)} = 2.7776$$

Entonces la RMG –en pies- corregida de la Ec. 5 es:

$$D_s^n = \sqrt[3]{(2.6795) \cdot (3.8542) \cdot (2.7776)} = 3.0612$$

Ya con los valores de D_{eq} y D_s^n , obtenemos de la Ec. 5 la inductancia, que es:

$$L = 0.7411 \cdot \text{Log} \left(\frac{33.1886}{3.0612} \right) = 0.76711 \text{ mH/mi}$$

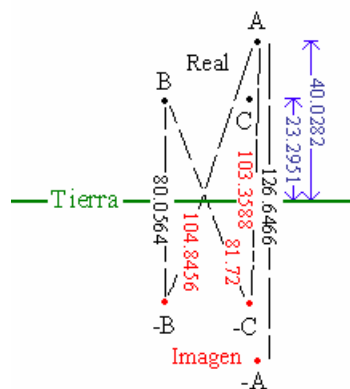
3.1.1.3 Cálculo de capacitancia

El radio del cable 477 Hawk, se obtiene a partir del diámetro cuyo valor es 0.858 plg –véase anexo 1-, como lo indica la Ec. 7, será:

$$r = \frac{0.858 \text{ plg}}{2} * \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ plg}} = 0.0358 \text{ pie}$$

Para el cálculo de la capacitancia se toman en consideración las alturas de cada una de las fases de la línea de transmisión -, como se ven en la figura 18.

Figura 18. Alturas entre fases, real e imagen, en 230 Kv



Fuente: Ing. Daniel Zapata. **INDE**, julio 2007

En la figura 18 se observan las alturas de cada una de las fases de un circuito estos valores sirven para encontrar el efecto de la tierra en la capacitancia total de la línea. De la Ec. 9 y tomando valores que aparecen indicados en la figura 18, se obtienen los valores de los parámetros H_{ij} –cuya dimensional es pie- de E_T son:

$$A \rightarrow -B = H_{1,2} = \sqrt{(23.2951+40.0282+40.0282)^2 + (16.405+1.20303)^2} = 104.8453$$

$$B \rightarrow -C = H_{2,3} = \sqrt{(40.0282+40.0282)^2 + (16.405)^2} = 81.72$$

$$A \rightarrow -C = H_{3,1} = \sqrt{(23.2951+40.0282+40.0282)^2 + (1.2303)^2} = 103.3588$$

$$H_1 = 126.6466$$

$$H_2 = H_3 = 80.0564$$

El efecto que genera el doble circuito en la capacitancia con efecto tierra se simplificara haciendo que el factor E_T –sin dimensional- sea el doble, así:

$$2 * E_T = \frac{\sqrt[3]{(104.8453)*(81.72)*(103.3588)}}{\sqrt[3]{(80.0564)*(126.6466)*(80.0564)}} = 2.5326 * 10^{-2}$$

El valor de D_{eq} es el mismo al encontrado para la inductancia cuyo valor es de: 33.1886 pies. Las distancias -en pies- entre fases iguales de circuitos paralelos, con la corrección del radio generado por el doble haz se muestra a continuación:

$$A - A' = \sqrt{(\sqrt{(0.0358*1.64505)} * 32.9741)} = 2.8268$$

$$B - B' = \sqrt{(\sqrt{(0.0358*1.6405)} * 68.2484)} = 4.0667$$

$$C - C' = \sqrt{(\sqrt{(0.0358*1.6405)} * 3504348)} = 2.9304$$

Entonces la distancia D_s^b de la Ec. 10, resulta:

$$D_s^b = \sqrt[3]{(2.8268*4.0667*2.9304)} = 3.2296 \text{ pies}$$

Siendo el valor de la capacitancia distribuida igual a:

$$C = \frac{0.0388}{\text{Log}\left(\frac{33.1886}{3.2296}\right) - 2.5326*10^{-2}} = 3.9326*10^{-2} \text{ } \mu\text{f/mi}$$

3.1.2 Línea Chixoy 1 y 2

La resolución de la línea Chixoy 1 y 2, se hará partiendo en cuatro, la primera será la obtención de los parámetros intrínsecos, variación espacial voltaje y corriente, variación de campo eléctricos-magnético y variación del voltaje respecto al tiempo.

3.1.2.1 Parámetros intrínsecos

Los parámetros intrínsecos son aquellos que son propios que dependen de las características físicas de la línea de transmisión y longitud de la línea ($l = 31.0752\text{mi}$). Entre ellos podemos mencionar: constante de propagación e impedancia característica .

La constante de propagación γ , según la Ec. 36 depende de la impedancia en serie distribuida (Z) y la admitancia en paralelo distribuida (Y), siendo esta igual a:

$$Z = 0.1947 + j 2*\pi*60*0.76711*10^{-3} = 0.3486 \angle 56.05^\circ \Omega/\text{mi}$$

$$Y = 0 + j 2*\pi*60*39.3264*10^{-9} = 1.4826*10^{-5} \angle 90^\circ \text{ } \square /\text{mi}$$

$$\gamma l = 31.0752 \sqrt{(0.3486 \angle 56.05^\circ)*(1.4825*10^{-5} \angle 90^\circ)} = 7.0644*10^{-2} \angle 73.03^\circ$$

Según la Ec. 37, la impedancia característica es igual a:

$$Z_c = \sqrt{\frac{0.3486}{1.4826*10^{-5}}} \angle \frac{56.05^\circ - 90^\circ}{2} = 153.34 \angle -16.98^\circ \Omega$$

3.1.2.2 Variación espacial de voltaje y corriente

La variación espacial del voltaje ($V_{(x)}$) y la corriente ($I_{(x)}$) se restringirá a la longitud total de la línea o sea $X = 1 = 31.0752$ mi. Se realizará por medio de intervalos porcentuales de carga (210 Mw promedio), estos porcentajes serán debidamente identificados, además a cada porcentaje de carga se darán los valores de impedancia de entrada ($Z_{(x)}$) y coeficiente de reflexión (Γ).

Los valores hiperbólicos serán iguales a:

$$\text{Cosh } \gamma l = \cosh(0.0206) \cdot \cos(0.0675) + j \sinh(0.0206) \cdot \sin(0.0675) = 0.99772 \angle 0.08^\circ$$

$$\text{Senh } \gamma l = \sinh(0.0206) \cdot \cos(0.0675) + j \cosh(0.0206) \cdot \sin(0.0675) = 0.0705 \angle 73.05^\circ$$

0% de carga. Este es el valor porcentual de carga que representa al **efecto Ferranti**, debido a que no hay carga conectada al sistema, entonces, $I_R = 0 \Rightarrow Z_L = \infty$, $\Gamma = 1$ –Ec. 44, con $Z_L = \infty$ - y obteniendo todos ellos en la entrada de la línea siendo esta $X = 1$, resulta lo siguiente:

$$I_R = 0 \text{ amp}$$

$$V_R = \frac{230}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 132.8 \text{ Kv} \angle 0^\circ$$

$$V_S = (132.8 \text{ Kv} \angle 0^\circ) \cdot (0.99772 \angle 0.08^\circ) = 132.48 \angle 0.08^\circ \text{ Kv}$$

$$I_S = \frac{(132800 \angle 0^\circ) \cdot (0.0728 \angle 73.05^\circ)}{153.34 \angle -16.98^\circ} = 61.12 \angle 90.03^\circ \text{ amps}$$

El valor de impedancia de entrada ($Z_{e(l)} = Z_s$) –Ec. 50- es igual a:

$$Z_s = \frac{132480 \angle 0.08^\circ}{61.12 \angle 90.03^\circ} = 2167.554 \angle -89.95^\circ \Omega$$

Aquí se observan situaciones muy interesantes, siendo estas:

- El voltaje de recibo es de mayor amplitud que el voltaje de envío, lo que significa que para obtener 230 Kv en Tactic, la generadora Chixoy debe de enviar 229.4 Kv. O sea que al momento de una apertura, en condiciones normales de operación -100% ú 80% de la carga-, el voltaje de Tactic superara los 230 Kv nominales de operación.
- Aunque la corriente de recibo I_R sea igual a cero, la corriente de envío tiene un valor de 61.12 amps –esta corriente ocurre en la generadora Chixoy-, con un desfásé de 90° aproximados, este valor los genera la impedancia de entrada, siendo esta proporcional a la impedancia característica de la línea –como lo demuestra la Ec. 49-, por lo tanto se pudo demostrar numéricamente que la corriente de envío I_S es igual a la corriente de carga de la línea de transmisión.

100% de carga. Este valor es igual a 210 Mw, trabajando el sistema a un factor de potencia de 0.98 -valor drástico, ya que este tiene que estar lo mas cercano a la unidad- en atraso. Los valores de voltaje de recibo –este será constante- y corriente de recibo, Ec. 43, son iguales a:

$$V_R = \frac{230}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 132.8 \text{ Kv} \angle 0^\circ$$

$$\theta = \cos^{-1}(0.98) = 11.5^\circ$$

$$I_R = \frac{210 * 10^6}{\sqrt{3} * 0.98 * 230000} = 537.9 \angle -11.5^\circ \text{ amp}$$

El voltaje de envío (V_S) y la corriente de envío (I_S)-Ec. 38-, serán:

$$V_S = (132.8 * 10^3 \angle 0^\circ) * (0.99772 \angle 0.08^\circ) + (537.9 \angle -11.5^\circ) * (153.33867 \angle -16.98^\circ) * (0.0705 \angle 73.05^\circ)$$

$$V_S = 136701.6 \angle 1.8^\circ \text{ volts}$$

$$I_S = (537.9 \angle -11.5^\circ) * (0.99772 \angle 0.08^\circ) + \left(\frac{230 * 10^3}{\sqrt{3} * 153.34} \angle 0^\circ \right) * (0.0705 \angle 73.05^\circ)$$

$$I_S = 527.95 \angle -4.91^\circ \text{ amps}$$

Los valores de impedancia de entrada (Z_s) y coeficiente de reflexión (Γ) serán:

$$Z_s = \frac{136701.6 \angle 1.8^\circ}{527.95 \angle -4.91^\circ} = 258.93 \angle 6.7^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{(427.6 \angle -11.5^\circ) - (153.34 \angle -16.98^\circ)}{(427.6 \angle -11.5^\circ) + (153.34 \angle -16.98^\circ)} = 0.5321 \angle 21.43^\circ$$

80% de carga. Con un valor igual a 168 Mw, y factor de 0.98 en atraso, con un valor de V_R y θ constante se obtiene una I_R de:

$$I_R = \frac{168 * 10^6}{(\sqrt{3}) * 0.98 * (230 * 10^3)} = 430.3 \angle -11.5^\circ \text{ amps}$$

Los valores de voltaje y corriente de envío –Ec. 38- serán:

$$V_s = (132487.7 + j 184.99) + (4657.4 \angle 44.57^\circ) = 136100.9 \angle 1.45^\circ \text{ Volts}$$

$$I_s = (429.34 \angle -11.42^\circ) * (0.99772 \angle 0.08^\circ) - 0.032 + j 61.12 = 421.5 \angle -3.25^\circ \text{ amps}$$

Los valores de Z_s –Ec. 47- y Γ -Ec. 44- son:

$$Z_s = \frac{136100.9 \angle 1.45^\circ}{421.5 \angle -3.25^\circ} = 322.9 \angle 4.7^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{406.32 \angle 21.86^\circ}{673.25 \angle 5.27^\circ} = 0.6035 \angle 16.6^\circ$$

50% de carga. Con un valor igual a 105 Mw, y factor de 0.98 en atraso, con un valor de V_R y θ constante se obtiene una I_R de:

$$I_R = \frac{105 * 10^6}{(\sqrt{3}) * 0.98 * (230 * 10^3)} = 268.97 \angle -11.5^\circ \text{ amps}$$

Los valores de voltaje y corriente de envío –Ec. 38- serán:

$$V_s = (132487.7 + j 184.99) + (2911.12 \angle 44.57^\circ) = 134580 \angle 0.95^\circ \text{ Volts}$$

$$I_s = (268.36 \angle -11.42^\circ) * (0.99772 \angle 0.08^\circ) - 0.032 + j 61.12 = 263.14 \angle +1.74^\circ \text{ amps}$$

Los valores de Z_s -Ec. 47- y Γ -Ec. 44- son:

$$Z_s = \frac{134580 \angle 0.95^\circ}{263.14 \angle 1.74^\circ} = 511.42 \angle -0.79^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{723.98 \angle 17.3^\circ}{922.55 \angle 7.27^\circ} = 0.7294 \angle 10.03^\circ$$

5% de carga. Con un valor igual a 10.5 Mw, y factor de 0.98 en atraso, con un valor de V_R y θ constante se obtiene una I_R de:

$$I_R = \frac{10.5 * 10^6}{(\sqrt{3}) * 0.98 * (230 * 10^3)} = 26.9 \angle -11.5^\circ \text{ amps}$$

Los valores de voltaje y corriente de envío serán:

$$V_s = (132487.7 + j 184.99) + (291.12 \angle 44.57^\circ) = 132898.9 \angle 0.17^\circ \text{ Volts}$$

$$I_s = (26.83 \angle -11.42^\circ) * (0.99772 \angle 0.08^\circ) - 0.032 + j 61.12 = 61.7 \angle 67.8^\circ \text{ amps}$$

Los valores de Z_s -Ec. 47- y Γ -Ec. 44- son:

$$Z_s = \frac{132898.9 \angle 0.17^\circ}{61.7 \angle 64.8^\circ} = 2153.95 \angle -64.63^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{8416.37 \angle 11.99^\circ}{8686.93 \angle 00.01^\circ} = 0.9689 \angle 0.98^\circ$$

Tomando en cuenta que el voltaje de recibo (V_R) es $132.8 \angle 0^\circ$ Kv y el factor de potencia es 0.98 en atraso, todos los datos anteriormente descritos, se pueden resumir en la tabla VI.

Tabla VI. Tabulación de datos, línea Chixoy 1 y 2

%	Carga (Mw)	I_R amps $\angle -11.5^\circ$	V_S volt	I_S amp	$Z_L \Omega$ $\angle +11.5^\circ$	$Z_S \Omega$	Γ
0	Efecto Ferranti	0	132480$\angle 0.08^\circ$	61.1$\angle 90.03^\circ$	∞	2167.6$\angle -89.95^\circ$	1
5	10.5	26.9	132899 $\angle 0.17^\circ$	61.7 $\angle 64.8^\circ$	2849.5	2154 $\angle -64.63^\circ$	0.97 $\angle 0.98^\circ$
50	105	269	134580 $\angle 0.95^\circ$	263.1 $\angle 1.74^\circ$	855.1	511.4 $\angle -0.8^\circ$	0.73 $\angle 10.03^\circ$
80	168	430.3	135782 $\angle 0.03^\circ$	421.5 $\angle -3.25^\circ$	534.5	322.9 $\angle 4.7^\circ$	0.60 $\angle 16.6^\circ$
100	210	537.9	136702 $\angle 1.8^\circ$	528 $\angle -4.9^\circ$	427.6	258.9 $\angle 6.71^\circ$	0.53 $\angle 21.43^\circ$

Si vamos desde el efecto Ferranti (0%) hasta carga completa (100%), de la tabla VI se puede decir lo siguiente:

- La corriente de recibo crece desde 0 hasta 538 amp, y por ser un factor de potencia de 0.98 en atraso, esta siempre estará 11.5° atrasada del voltaje de recibo.
- El voltaje de envío crece de 132480 –menor al voltaje de recibo- hasta 136702, se puede decir que, el efecto Ferranti genera un sobre voltaje en la S/E Tactic, ya que al momento de abrirse la carga, si esta estuviera al 80% ó 100% -sin alterarse el voltaje de envío de estas condiciones-, se generaría un voltaje mayor a los 230Kv nominales de operación – si 100% de carga se abre el circuito y no se altera el voltaje de envío, el V_R sería de 237.316 Kv-.
- La corriente de envío crece desde su mínimo valor de 61.1 hasta 528 amps, lo curioso es el desfase que ella sufre, siendo este 90° en adelante hasta 4.9° en atraso, o sea, a menor carga la L.T tiene un efecto capacitivo, lo que genera el sobre voltaje en el punto de recibo.
- La impedancia de carga, siempre tendrá un desfase de 11.5° debido al factor de potencia del sistema.
- La corrección que sufre el ángulo de la impedancia de entrada, siendo al principio de -89.95° hasta un valor de 6.71°, esto se debe a que la carga va corrigiendo el flujo de potencia de la L.T.

- El coeficiente de reflexión decrece desde 1 hasta 0.53 –el óptimo valor de Γ es igual a cero, y esto sucede cuando $Z_L = Z_c$, el desfase de la onda reflejada respecto a la onda incidente, varía desde 0° hasta 21.83° .

3.1.2.3 Variación de campo eléctrico y magnético

Las barras en 230 Kv son las que contiene el módulo 8DN9, por ende, son estas únicas barras las que se encuentra rodeadas de Gas SF₆, y los circuitos que comprenden a esta barra son Chixoy y Guate Norte. Además existen realmente dos interfaces las cuales son: Aire (L.T)–Cable de potencia y Cable de potencia–Gas, pero la longitud del cable de potencia es muy pequeña comparada con la longitud de la L.T, por lo tanto, en el análisis del comportamiento de los campos **E** y **H** se despreciará la interface del cable de potencia y solamente se verá el cambio entre Aire (L.T) – Gas (SF₆).

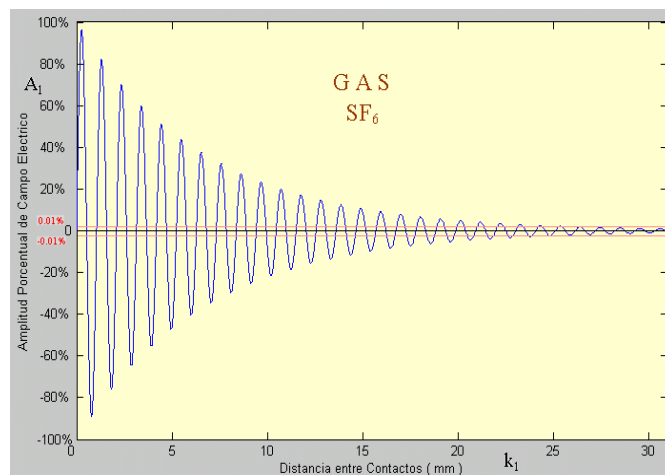
Para el comportamiento de los campos **E** y **H**, se analizarán las variaciones de los siguientes parámetros: velocidad de propagación, longitud de onda, constante de propagación, atenuación, fase y densidad del medio. Y por último se hace la observación que tanto la línea de Chixoy como la línea de Guate Norte tendrán los mismos valores en los parámetros anteriormente descritos.

Campo Eléctrico. Los datos que se utilizarán para la deducción de **E** serán extraídos de la tabla I, siendo estos: Índice de refracción $n = 2.3$ y constante dieléctrica $\epsilon_r = 1.002$. Sabiendo que la velocidad de la luz en vacío es de $c = 186,451.2$ mi/seg, daremos paso a realizar los cálculos de los parámetros que influyen en el campo eléctrico, haciendo comparaciones entre las interfaces de Aire – Gas de cada uno de ellos.

Para hallar la constante de propagación, primero se hallarán sus componentes real e imaginaria. Para hallar la constante de atenuación α , se sabe que la “separación entre contactos del interruptor en su apertura total tiene una distancia aproximada de $k_1 = 3\text{cm}$ ”

¹, con la suposición, que el porcentaje de atenuación de la onda electromagnética en el extremo abierto será $A_1 = 0.01\%$ -este porcentaje es tan pequeño y hace que la influencia de E no genere V en el extremo abierto-, como se ve en la figura 19.

Figura 19. Atenuación de campo E en Gas SF₆ respecto a la distancia k₁



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. I N D E, junio 2007.

Entonces aplicando la Ec. 16.C, se obtiene:

$$\alpha = - \frac{\text{Ln}(0.01/100)}{0.03} = 307.01 \cong 307 \text{ Neper}$$

La constante de fase β , se halla por medio de β de la línea de transmisión, velocidad de la luz en el vacío (c), longitud de línea ($l = 31.0752 \text{ mi}$) y la frecuencia del sistema ($f = 60 \text{ Hz}$). Para el medio aire (L.T) tenemos lo siguiente:

$$\beta_1 = 0.0675 \text{ rad/mt } \{ \text{Linea Chizoy y Guate Norte} \}$$

$$\beta = \frac{0.0675}{31.0752} = 0.002174 \text{ rad}$$

$$\lambda_1 = \frac{2 * \pi}{0.002174} = 2889.7 \text{ mi}$$

$$v_1 = (60) * (28889.7) = 173382.0 \text{ mi/seg}$$

$$n_{LT} = \frac{186451.2}{173382.0} = 1.0754$$

Ahora con un índice de difracción –de la tabla I, $n = 2.3$ para el SF_6 –, la velocidad de la luz en vacío (c) y la frecuencia del sistema ($f = 60 \text{ Hz}$), obtendremos la constante de fase β del SF_6 –Ec. 16.E–, siendo esta igual a:

$$n_{GAS} = 2.3$$

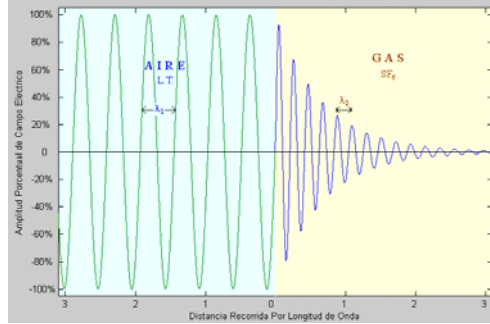
$$v_2 = \frac{186451.2}{2.3} = 81065.74 \text{ mi/seg}$$

$$\lambda_2 = \frac{81065.74}{60} = 1351.1 \text{ mi}$$

$$\beta = \frac{2 * \pi}{1351.1} = 0.00465 \text{ rad } \{ SF_6 \}$$

Del proceso anterior se puede observar que la longitud de onda del Aire (λ_1) es mayor que la longitud de onda del Gas (λ_2), como se puede observar en la figura 20.

Figura 20. Longitud de onda interface Aire-Gas



La constante de propagación γ -Ec. 16.A-, es la suma de la constante de atenuación (α) más la constante de fase (β), será:

$$\gamma = 307 + i 4.65044 \cdot 10^{-3}$$

Una vez hallada la constante de propagación, se puede dar paso a la resolución al campo magnético por medio de la densidad del medio η , implementando las ecuaciones 16.H y 16.G y con $\epsilon_r = 1.002$, se obtiene:

$$S = \frac{(307)^2 + (4.65 \cdot 10^{-3})^2}{(307)^2 - (4.65 \cdot 10^{-3})^2} = 4.6 \cdot 10^{-10}$$

$$k = \frac{(307) \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{(1 + (4.6 \cdot 10^{-10})^2) - 1}} = 1.335 \cdot 10^{12}$$

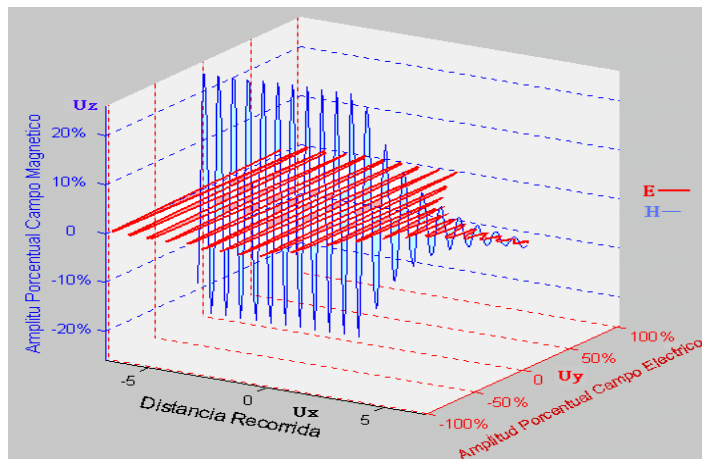
$$\eta = \frac{1}{(1.002 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12})} \cdot \frac{(1.335 \cdot 10^{12})}{(377)} \cdot \frac{j}{(\sqrt{(j 4.6 \cdot 10^{-10} - 1)})}$$

$$\eta = 4 \angle 90^\circ = j 4 \frac{(\text{volt})(\text{vuelta})}{(\text{mt})(\text{amp})}$$

Con este valor respecto a los campos **E** y **H**, en SF₆, se puede decir lo siguiente:
El campo magnético es cuatro veces menor en amplitud al campo eléctrico.

El campo magnético se retrasa 90° respecto al campo eléctrico, esto se puede visualizar en la figura 21.

Figura 21. Variación de campos E y H respecto la distancia



3.1.2.4 Variación temporal de la onda de voltaje

Para resolver la variación temporal de la onda de voltaje, haremos uso de las ecuaciones 51 y 53, indicando cada uno de los coeficientes, para luego sustituirlos en la Ec. 52, la cual describe la variación del voltaje respecto al tiempo, de la línea de transmisión.

Al resolver las ecuaciones 51 y 53, resulta lo siguiente:

$$l = 31.0752 \text{ mi} \quad R = 6.0503 \, \Omega \quad C = 1.22 \, \mu\text{f} \quad L = 23.84 \text{ mH}$$

$$\sqrt{A} = 5857.5 \quad B = 126.9 \quad \omega = 377 \text{ rad/seg} \quad V = 230 \cdot 10^3 \text{ Volt}$$

$$U = 17372137170.1 \quad r = \omega + \sqrt{A} = 6234.5 \quad s = \omega - \sqrt{A} = -5480.5$$

$$t = 1.0004$$

$$v = 1.0005$$

$$M = 8.0198 \cdot 10^{-5} - 9.1232 \cdot 10^{-5} + 4.5765 \cdot 10^{-8} - 3.5365 \cdot 10^{-8}$$

$$M = -1.102326 \cdot 10^{-5}$$

$$N = 1.7374 \cdot 10^{-6} - 1.9765 \cdot 10^{-6} - 2.1124 \cdot 10^{-6} + 1.6324 \cdot 10^{-6}$$

$$N = -7 \cdot 10^{-7}$$

$$\tilde{N} = 3.5665 \cdot 10^{-8} - 4.5765 \cdot 10^{-8} + 9.1232 \cdot 10^{-5} - 8.0198 \cdot 10^{-5}$$

$$\tilde{N} = 1.102326 \cdot 10^{-5}$$

$$O = 1.7374 \cdot 10^{-6} + 1.9765 \cdot 10^{-6} + 2.1124 \cdot 10^{-6} + 1.6324 \cdot 10^{-6}$$

$$O = 7.458864 \cdot 10^{-6}$$

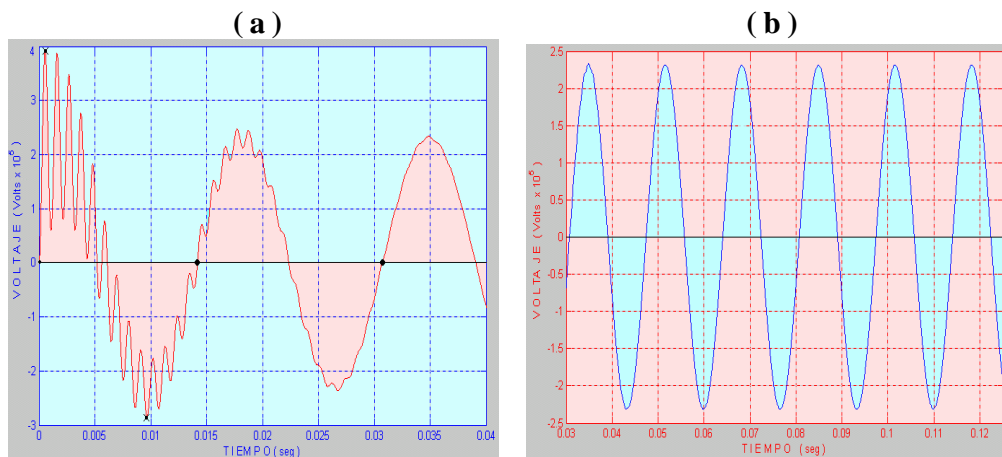
Al sustituir los coeficiente U, M, N, \tilde{N} y O, en la Ec. 52, resulta:

$$V_{q(t)} = 129576.4 \text{ Sen}(377 t) + 191498 \text{ Cos}(377 t) - e^{-(126.9 t)} * [12144.95 \text{ Sen}(5857.5 t) + 191498 \text{ Cos}(5857.5 t)]$$

De la anterior respuesta, se puede decir lo siguiente:

- La respuesta del voltaje respecto al tiempo, no es mas que la suma de dos fasores de distintas frecuencia, del cual, el fador de mayor frecuencia ($f = 5857.5 / (2 * \pi) = 932.25$ Hz, 15.5 veces mayor a la frecuencia del sistema que es 60 Hz), se amortigua en forma exponencial.
- El fador de mayor frecuencia depende de los parámetros pasivos de la línea de transmisión de Chixoy, al igual que la componente de amortiguación (B). Estos términos son los que se generan al tomar en cuenta las pérdidas resistivas de la L.T. Véase la figura 22.

**Figura 22. Voltaje versus Tiempo, línea Chixoy 1 y 2. a) Régimen transitorio
b) Régimen permanente**



En la figura 22.a se puede observar como es la influencia de la señal de alta frecuencia y su rápida atenuación –ocurriendo esto en sus primeros 2.5 ciclos ó 40 mseg de la señal, siendo esta parte el régimen transitorio de la señal en el momento de la apertura de la línea-, con un valor máximo de 393 Kv.

En la figura 22.b se muestra el régimen permanente –a partir del tercer ciclo ó 30 mseg- de la señal con un valor de 232 Kv.

3.1.3 Línea Guate Norte 1 y 2

La resolución de la línea Guate Norte 1 y 2, se hará de una forma distinta, debido a que esta línea parte de S/E Tactic hacia la S/E Guate Norte como una línea de carga y no de generación –Chixoy, San Julián y Matanzas-. Para el análisis se tomará en consideración a sus parámetros intrínsecos, variación espacial de voltaje y corriente y por último se elaborara la variación temporal de voltaje. La variación de los campos **E** y **H**, no se realizarán, las gráficas de comportamiento y parámetros, son los mismos a los elaborados en la sección 3.1.2.3.

3.1.3.1 Parámetros intrínsecos

La línea Guate Norte es un caso especial a la otras líneas, ya que esta es una línea de carga, o sea, una vez abierta –en la S/E Tactic- no se transmite potencia de Tactic a Guate Norte -excepto aquella que se encuentra en la barra de la S/E Guate Norte, fluyendo potencia, si y solo si, las barras de Tactic representaran algún tipo de carga ante la línea Guate Norte-. La línea que parte de Tactic a Guate Norte tiene una longitud de 76.6 Km ($l = 47.6072$ mi), tomando como torre predominante, la que aparece en la figura 9. La constante de propagación γ , según la Ec. 36 depende de la impedancia en serie distribuida (Z) y la admitancia en paralelo distribuida (Y), respecto a $l_1 = 47.6072$ – distancia entre Tactic y Guate Norte- y $l_T = 78.6824$ mi –distancia entre generadora Chixoy y S/E Guate Norte- siendo estas iguales a:

$$Z = 0.1947 + j 2\pi \cdot 60 \cdot 0.76711 \cdot 10^{-3} = 0.3486 \angle 56.05^\circ \Omega/\text{mi}$$

$$Y = 0 + j 2\pi \cdot 60 \cdot 39.3264 \cdot 10^{-9} = 1.4826 \cdot 10^{-5} \angle 90^\circ \text{ S}/\text{mi}$$

$$\gamma_{l_1} = 47.6072 \sqrt{(0.3486 \angle 56.05^\circ) \cdot (1.4826 \cdot 10^{-5} \angle 90^\circ)} = 10.823 \cdot 10^{-2} \angle 73.025^\circ$$

$$\gamma_{l_T} = 78.6824 \sqrt{(0.3486 \angle 56.05^\circ) \cdot (1.4826 \cdot 10^{-5} \angle 90^\circ)} = 17.888 \cdot 10^{-2} \angle 73.025^\circ$$

Según la Ec. 37, la impedancia característica es igual a:

$$Z_c = \sqrt{\frac{0.3486}{1.4826 \cdot 10^{-5}}} \angle \frac{56.05^\circ - 90^\circ}{2} = 153.34 \angle -16.98^\circ \Omega$$

3.1.3.2 Variación espacial de voltaje y corriente

La variación espacial del voltaje ($V_{(x)}$) y la corriente ($I_{(x)}$) se hará tomando en cuenta la distancia de la generadora Chixoy ($l_2 = 31.0752$ mi) y la longitud de la línea de Guate Norte ($l_1 = 47.6072$ mi) –tomando como punto de referencia a la S/E Tactic-, ya que para la resolución de esta línea se tomará en cuenta al efecto Ferranti que se genera en Tactic tomando como fuente de envío a la generadora Chixoy (210 Mw

promedio), además se darán los valores de impedancia de entrada ($Z_{(x)}$) y coeficiente de reflexión (Γ).

0% de carga. Este es el valor porcentual de carga que representa al **Efecto Ferranti**, debido a que no hay carga conectada al sistema, entonces, $I_R = 0 \Rightarrow Z_L = \infty$, $\Gamma = 1$ –Ec. 44, con $Z_L = \infty$. Con una L longitud total de línea ($l_T = l_1 + l_2 = 78.6824$ mi), los valores hiperbólicos son los siguientes:

$$\text{Cosh } \gamma l_T = \cosh(0.0522) \cdot \cos(0.0171) + j \sinh(0.0522) \cdot \sin(0.0171)$$

$$\text{Cosh } \gamma l_T = 0.98678 \angle 0.52^\circ$$

$$\text{Senh } \gamma l_T = \sinh(0.0522) \cdot \cos(0.171) + j \cosh(0.0522) \cdot \sin(0.0171)$$

$$\text{Senh } \gamma l_T = 0.17809 \angle 73.2^\circ$$

El voltaje y corriente de envío, serán iguales a:

$$I_R = 0 \text{ amps}$$

$$V_R = \frac{230}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 132.8 \text{ Kv} \angle 0^\circ$$

$$V_S = (132.8 \text{ Kv} \angle 0^\circ) \cdot (0.98678 \angle 0.52^\circ) = 131035 \angle 0.52^\circ \text{ volts}$$

$$I_S = \frac{(132800 \angle 0^\circ) \cdot (0.17809 \angle 73.2^\circ)}{153.34 \angle -16.98^\circ} = 154.22 \angle 90.18^\circ \text{ amps}$$

El valor de impedancia de entrada Z_s –Ec. 50- es igual a:

$$Z_s = \frac{131035 \angle 0.52^\circ}{154.22 \angle 90.18^\circ} = 849.66 \angle -89.66^\circ \Omega$$

Los valores de carga porcentual no se realizarán, debido a que la carga genera un voltaje de envío de mayor amplitud al voltaje de recibo –como se puede observar en la tabla VI-, además para obtener un voltaje de recibo de 230 Kv en S/E Guate Norte, la generadora Chixoy debería de enviar 226.95 Kv –representando un -1.34% de

regulación, el signo negativo se obtiene debido a que el efecto Ferranti genera un factor de potencia en adelanto-, si se observa bien, el voltaje de envío de Chixoy a Tactic era de 229.4 Kv –representando un -0.26 de regulación- para obtener un voltaje de recibo en Tactic de 230 Kv, entonces con este voltaje de 229.4 Kv se generara un sobrevoltaje en la S/E Guate Norte de 232.47 Kv.

3.1.3.3 Variación temporal de la onda de voltaje

Para resolver la variación temporal de la onda de voltaje, se tomará como punto de referencia a la S/E Tactic, partiendo de ella en derivación, la línea de Chixoy y la línea Guate Norte, además haremos uso de las ecuaciones 51 y 53, indicando cada uno de los coeficientes, para luego sustituirlos en la Ec. 52, la cual describe la variación del voltaje respecto al tiempo, de la línea de transmisión. Al resolver las ecuaciones 51 y 53, resulta lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 l &= (\text{Línea Chixoy 1 y 2}) // (\text{Línea Guate Norte 1 y 2}) \\
 R &= 3.66079\Omega \quad L = 14.3104 \text{ mH} \quad C = 3.0943 \mu\text{f} \\
 \sqrt{A} &= 4750.4 \quad B = 127.91 \quad \omega = 377 \text{ rad/seg} \quad V = 230 \cdot 10^3 \text{ Volt} \\
 U &= 11400821785.3 \quad r = \omega + \sqrt{A} = 5127.4 \quad s = \omega - \sqrt{A} = -4373.4 \\
 t &= 1.00062 \quad v = 1.00085 \\
 M &= 8.99496 \cdot 10^{-8} - 6.54564 \cdot 10^{-8} - 1.142281 \cdot 10^{-4} + 9.745404 \cdot 10^{-5} \\
 M &= -1.6749567 \cdot 10^{-5} \\
 N &= 2.623972 \cdot 10^{-6} - 3.075653 \cdot 10^{-6} - 3340734 \cdot 10^{-6} + 2.431042 \cdot 10^{-6} \\
 N &= -1.361373 \cdot 10^{-6} \\
 \tilde{N} &= 6.54564 \cdot 10^{-8} - 8.99496 \cdot 10^{-8} + 1.142281 \cdot 10^{-4} - 9.755404 \cdot 10^{-5} \\
 \tilde{N} &= +1.6749567 \cdot 10^{-5} \\
 O &= 2.623972 \cdot 10^{-6} + 3.075653 \cdot 10^{-6} + 3.340734 \cdot 10^{-6} + 2.431042 \cdot 10^{-6} \\
 O &= +1.14714 \cdot 10^{-5}
 \end{aligned}$$

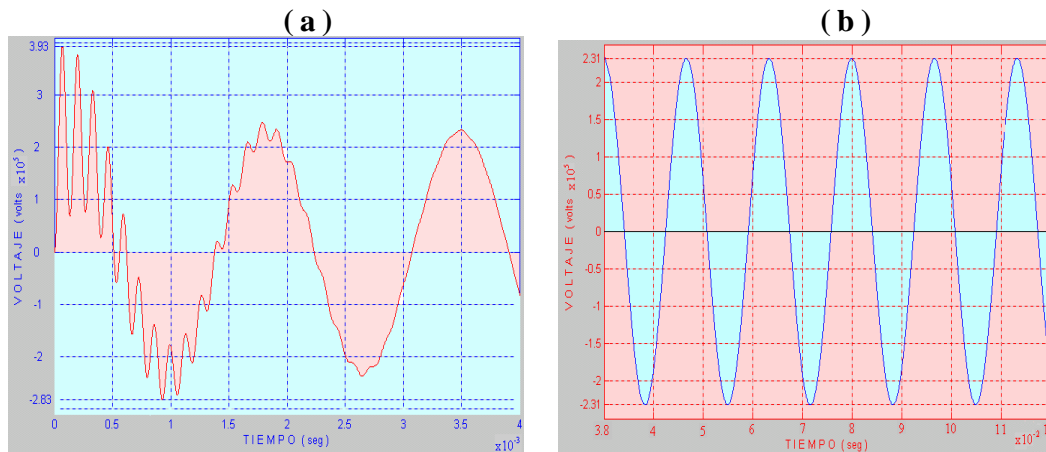
Al sustituir los coeficiente U, M, N, \tilde{N} y O, en la Ec. 52, resulta:

$$V_{f(t)} = 190958.8 \cos(377t) + 130783.4 \sin(377t) - e^{-127.91t} * [190958.8 \cos(4750.4t) + 15520.8 \sin(4750.4t)]$$

De la anterior respuesta, se puede decir lo siguiente:

- La respuesta del voltaje respecto al tiempo, no es mas que la suma de dos fasores de distintas frecuencia, del cual, el fador de mayor frecuencia ($f = 4750.4 / (2 * \pi) = 756.05$ Hz, 12.6 veces mayor a la frecuencia del sistema que es 60 Hz), se amortigua en forma exponencial, además se puede decir que esta línea derivada es la que posee la menor transitoria. Véase la figura 23.

Figura 23. Voltaje versus Tiempo, línea Guate Norte 1 y 2. a) Régimen transitorio b) Régimen permanente



En la figura 23.a se puede observar como es la influencia de la señal de alta frecuencia y su rápida atenuación –ocurriendo esto en sus primeros 2 ciclos ó 30 mseg de la señal, siendo esta parte el régimen transitorio de la señal en el momento de la apertura de la línea-, con un valor máximo de 393.5 Kv. En la figura 23.b se muestra el régimen permanente –a partir del tercer ciclo ó 38 mseg- de la señal con un valor de 231.65 Kv.

3.2 Campos en 69 Kv

Las líneas que pertenecen al campo en 69 Kv –estos campos son del tipo AIS-son: San Julián 1, San Julián 2 y Matanzas. Para la deducción de todos los parámetros de estas líneas nos basaremos en la figura 10, con la suposición que esta configuración de torre es la predominante en la transmisión. El tipo de cable utilizado es ASCR 477 HAWK, cuyos datos se pueden obtener en el anexo 1.

Se hace la aclaración que la línea de San Julián 1 y 2, realmente son dos circuitos separados⁴. El primer circuito –San Julián 1- es una línea que tiene 8 Km (4.972 mi) de longitud conformada por 35 estructuras. El segundo circuito –San Julián 2-, es otra línea con 9 Km (5.5935 mi) de longitud conformada por 76 estructuras. Cada una de ellas parte de tres generadoras las cuales son: Renace (60 Mw), Candelaria (5 Mw) y Secacao (15 Mw), y rematan en la S/E San Julián. Entonces, se hará la suposición que la líneas de San Julián 1 y 2, son dos líneas de 8.5 Km (5.2827 mi promedio), circuito simple o sea que por cada estructura solo ira un circuito y no circuitos paralelos, y compuesta por un solo conductor por fase. Por lo tanto, se trabajara una sola vez esta línea, con las siguiente condiciones:

- Es una línea trifásica con una longitud de 5.2828 mi.
- La potencia de 80 Mw se distribuye en las dos líneas, haciendo la suposición que esta se reparten en partes iguales, entonces la potencia de cada línea será de 40 Mw.
- La separación entre los circuitos San Julián 1 y San Julián 2, es grande, por lo cual estos no infieren uno al otro, trabajándose como una línea de circuito simple.

3.2.1 Cálculo de parámetros pasivos

Los parámetros pasivos del campo en 69 Kv son los mismos para las líneas de San Julián 1, San Julián 2 y Matanzas, ya que se darán en forma distribuida, para luego

separarlos a la línea que pertenezcan –haciendo la separación en los parámetros intrínsecos de cada una de las líneas-.

3.2.1.1 Cálculo de resistencia

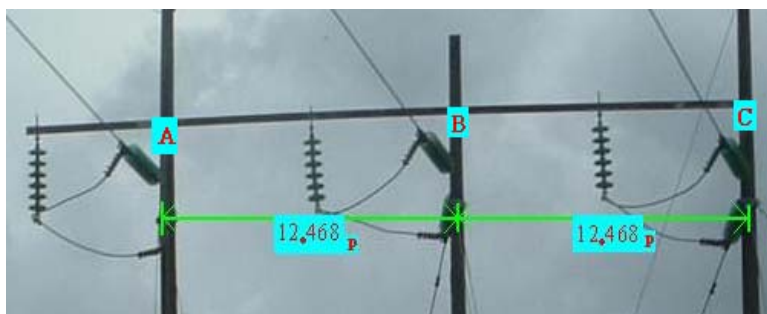
Para el valor de resistencia vemos que para el cable 477 Hawk -anexo 1-, tiene un valor $0.1931 \Omega/\text{mi}$ a 60 Hz y $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Tactic tiene una temperatura promedio de $22 \text{ }^\circ\text{C}$, entonces utilizando la Ec. 1, se obtiene un valor de:

$$R_o = 0.1931 \left(\frac{228 + 22}{228 + 20} \right) = 0.1947 \Omega/\text{mi}$$

3.2.1.2 Cálculo de inductancia

Para la inductancia consideraremos la configuración de las líneas que se muestra en la figura 24.

Figura 24. Distancias entre circuitos, para la torre de 69 Kv



Fuente: Ing. Víctor Lobos. INDE, julio 2007

En la figura 24 se muestra una parte de la figura 10 que es el tipo de configuración de la torre en 69 Kv utilizada en la transmisión, las fases A, B y C. La distancia equivalente –en pies- de la Ec. 4 es:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{(12.468) * (12.468) * (12.468)} = 15.709$$

Entonces la RMG –en pies- de la tabla de conductores es:

$$D_s = 0.0289 \text{ p}$$

Ya con los valores de D_{eq} y D_s , obtenemos de la Ec. 5 la inductancia, es:

$$L = 0.7411 * \text{Log} \left(\frac{15.709}{0.0289} \right) = 2.027 \text{ mH/mi}$$

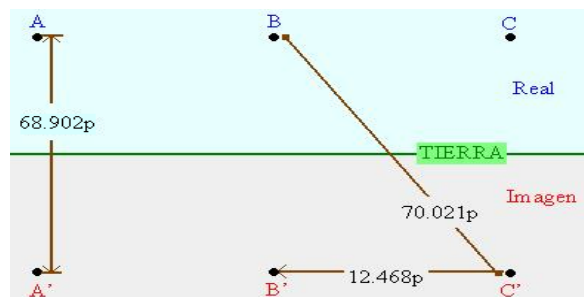
3.2.1.3 Cálculo de capacitancia

El radio del cable 477 Hawk, se obtiene a partir del diámetro cuyo valor es 0.858 plg –véase anexo 1-, como lo indica la Ec. 7, será:

$$r = \frac{0.858 \text{ plg}}{2} * \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ plg}} = 0.0358 \text{ pie}$$

Para el cálculo de la capacitancia se toman en consideración las alturas de cada una de las fases de la línea de transmisión, como se ven en la figura 25.

Figura 25. Alturas entre fases, real e imagen, en 69 Kv



Fuente: Ing. Víctor Lobos. INDE, julio 2007

En la figura 25 se observan las alturas de cada una de las fases de un circuito estos valores sirven para encontrar el efecto de la tierra en la capacitancia total de la línea. De la Ec. 9 y tomando valores que aparecen indicados en la figura 25, se obtienen los valores de los parámetros H_{ij} –cuya dimensional es pie- de E_T son:

$$H_1 = 2 * 34.451 = 68.902 \text{ p}$$

$$H_1 = H_2 = H_3$$

$$H_{12} = \sqrt{(12.468)^2 + (68.902)^2} = 70.021 \text{ p}$$

$$H_{12} = H_{23}$$

$$H_{13} = \sqrt{(12.648)^2 + (68.902)^2} = 73.275 \text{ p}$$

El efecto que genera el doble circuito en la capacitancia con efecto tierra se simplificara haciendo que el factor E_T –sin dimensional- sea el doble, así:

$$E_T = \text{Log} \left(\frac{\sqrt[3]{70.021 * 70.021 * 73.275}}{\sqrt[3]{(68.902)^3}} \right) = 1.357 * 10^{-2}$$

El valor de D_{eq} es el mismo al encontrado para la inductancia cuyo valor es de: 15.709 pies. Siendo el valor de la capacitancia distribuida igual a:

$$C = \frac{0.0388}{\text{Log} \left(\frac{15.709}{0.0358} \right) - 1.357 * 10^{-2}} = 1.477 * 10^{-2} \text{ } \mu\text{f/mi}$$

3.2.2 Línea San Julián 1 y 2

La resolución de la línea San Julián 1 y 2, se hará tomando en consideración las condiciones establecidas en la sección 3.2 y partiendo en tres partes a sus variables, siendo: la primera será la obtención de los parámetros intrínsecos, la segunda será la

variación espacial voltaje y corriente, y por último se vera la variación del voltaje respecto al tiempo.

Una observación importante es, a los campos en 69 Kv, no se vera la variación de **E** y **H**, debido a que ellos son del tipo AIS, o sea el único medio aislante es aire, por lo tanto la variación será en la constante de propagación γ y no en las amplitudes –como sucedió en la interface Aire-Gas de los campos en 230 Kv-.

3.2.2.1 Parámetros intrínsecos

Los parámetros intrínsecos son aquellos que son propios que dependen de las características físicas de la línea de transmisión y longitud de la línea ($l = 5.2828\text{mi}$). Entre ellos podemos mencionar: constante de propagación e impedancia característica .

La constante de propagación γ , según la Ec. 36 depende de la impedancia en serie distribuida (Z) y la admitancia en paralelo distribuida (Y), siendo esta igual a:

$$Z = 0.1947 + j 2*\pi*60*2.027*10^{-3} = 0.7886\angle 75.71^\circ \Omega/\text{mi}$$

$$Y = 0 + j 2*\pi*60*14.77*10^{-9} = 5.5668*10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S}/\text{mi}$$

$$\gamma l = 5.2828 \sqrt{(0.7886\angle 75.71^\circ) * (5.5668*10^{-6} \angle 90^\circ)} = 1.107*10^{-2} \angle 82.86^\circ$$

Recordando la notación de la Ec. 16.A, se obtiene que:

$$\gamma = \alpha + j\beta = 2.60453*10^{-4} + j2.079204*10^{-3}$$

Con los datos anteriores e implementando la Ec. 16.E, se obtiene:

$$\lambda = \frac{2 * \pi}{2.079204*10^{-3}} = 3021.92 \text{ mi}$$

$$v = 60 * 3021.92 = 181315.12 \text{ mi/seg}$$

Los datos anteriores representan, a la constante de atenuación α , constante de fase β , longitud de onda λ y velocidad de propagación de la señal v , todos estos serán iguales para los campos \mathbf{E} y \mathbf{H} en la barra de 69 Kv por ser solamente uno el medio de propagación (Aire). La gráfica del comportamiento de \mathbf{E} es similar a la figura 19, en el medio Aire, la única variante es que $\lambda_{69\text{Kv Aire}}$ es mayor a $\lambda_{230\text{Kv Aire}}$.

Según la Ec. 37, la impedancia característica Z_c es igual a:

$$Z_c = \sqrt{\frac{0.7886}{5.568 \cdot 10^{-6}}} \angle \frac{75.71^\circ - 90^\circ}{2} = 376.34 \angle -7.15^\circ \Omega$$

3.2.2.2 Variación espacial de voltaje y corriente

La variación espacial del voltaje ($V_{(x)}$) y la corriente ($I_{(x)}$) se restringirá a la longitud total de la línea o sea $X = l = 5.288$ mi. Se realizará por medio de intervalos porcentuales de carga (40 Mw promedio), estos porcentajes serán debidamente identificados, además a cada porcentaje de carga se darán los valores de impedancia de entrada ($Z_{(x)}$) y coeficiente de reflexión (Γ).

Los valores hiperbólicos respecto al punto de envío serán iguales a:

$$\begin{aligned} \text{Cosh } \gamma l &= \cosh(0.0014) \cdot \cos(0.011) + \sinh(0.0014) \cdot \sin(0.011) \\ \text{Cosh } \gamma l &= 0.9999 \angle 8.7 \cdot 10^{-4} \circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Senh } \gamma l &= \sinh(0.0014) \cdot \cos(0.011) + j \cosh(0.0014) \cdot \sin(0.011) \\ \text{Senh } \gamma l &= 1.1066 \cdot 10^{-2} \angle 82.86^\circ \end{aligned}$$

0% de carga. Este es el valor porcentual de carga que representa al **Efecto Ferranti**, debido a que no hay carga conectada al sistema, entonces, $I_R = 0 \Rightarrow Z_L = \infty$, $\Gamma = 1$ -Ec. 44, con $Z_L = \infty$ - y obteniendo todos ellos en la entrada de la línea siendo esta $X = l$, resulta lo siguiente:

$$I_R = 0 \text{ amps}$$

$$V_R = \frac{69}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 39.84 \text{ Kv} \angle 0^\circ$$

$$V_S = (39.84 \angle 0^\circ) * (0.9999 \angle 8.7 * 10^{-4}^\circ) = 39.83318 \angle 8.4 * 10^{-4}^\circ \text{ Kv}$$

$$I_S = \frac{(39.84 \angle 0^\circ) * (1.066 * 10^{-2} \angle 82.86^\circ)}{(376.34 \angle -7.15^\circ)} = 1.1714 \angle 90.01^\circ \text{ amp}$$

Los valores de impedancia de entrada Z_S –Ec. 50- es igual a:

$$Z_S = \frac{39.83318 \angle 8.4 * 10^{-4}^\circ}{1.1714 \angle 90.01^\circ} = 34005.2 \angle -90.0091^\circ \Omega$$

100% de carga. Este valor es igual a 40 Mw, trabajando el sistema a un factor de potencia de 0.98 -valor drástico, ya que este tiene que estar lo mas cercano a la unidad- en atraso. Los valores de voltaje de recibo –este será constante- y corriente de recibo, Ec. 43, son iguales a:

$$V_R = \frac{69}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 39.84 \text{ Kv} \angle 0^\circ$$

$$\theta = \cos^{-1}(0.98) = 11.5^\circ$$

$$I_R = \frac{40 * 10^6}{\sqrt{3} * 0.98 * 69000} = 341.5 \angle -11.5^\circ \text{ amp}$$

El voltaje de envío (V_S) y la corriente de envío (I_S) -Ec. 38-, serán:

$$V_S = (39833 \angle 8.7 * 10^{-4}^\circ) + (1422.3 \angle 64.21^\circ)$$

$$V_S = 40472.3 \angle 1.81^\circ \text{ Volts}$$

$$I_S = (341.5 \angle -11.4991^\circ) + (1.171 \angle 90.01^\circ)$$

$$I_S = 341.26 \angle -11.31^\circ \text{ amps}$$

Los valores de impedancia de entrada (Z_S) y coeficiente de reflexión (Γ) serán:

$$Z_s = \frac{40472.3 \angle 1.81^\circ}{341.26 \angle -11.31^\circ} = 118.6 \angle 13.12^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{268.4 \angle 164.86^\circ}{488.28 \angle -2.77^\circ} = 0.5497 \angle 167.63^\circ$$

80% de carga. Con un valor igual a 32 Mw, y factor de 0.98 en atraso, con un valor de V_R y θ constante se obtiene una I_R de:

$$I_R = \frac{32 * 10^6}{\sqrt{3} * 0.98 * 69000} = 273.22 \angle -11.5^\circ \text{ amp}$$

Los valores de voltaje y corriente de envío –Ec. 38- serán:

$$V_s = (39833 \angle 8.7 * 10^{-4}^\circ) + (1137.84 \angle 64.21^\circ)$$

$$V_s = 40341.3 \angle 1.46^\circ \text{ Volts}$$

$$I_s = (273.193 \angle -11.4991^\circ) + (1.171 \angle 90.01^\circ)$$

$$I_s = 281.77 \angle -10.9^\circ \text{ amps}$$

Los valores de Z_s –Ec. 47- y Γ -Ec. 44- son:

$$Z_s = \frac{40341.3 \angle 1.46^\circ}{281.77 \angle -10.9^\circ} = 143.17 \angle 12.36^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{242.7063 \angle 161.77^\circ}{516.6007 \angle -1.97^\circ} = 0.4698 \angle 163.74^\circ$$

50% de carga. Con un valor igual a 20 Mw, y factor de 0.98 en atraso, con un valor de V_R y θ constante se obtiene una I_R de:

$$I_R = \frac{20 * 10^6}{\sqrt{3} * 0.98 * 69000} = 170.76 \angle -11.5^\circ \text{ amp}$$

Los valores de voltaje y corriente de envío –Ec. 38- serán:

$$V_s = (39833 \angle 8.7 \cdot 10^{-4}^\circ) + (711.141 \angle 64.21^\circ)$$

$$V_s = 40147.72 \angle 0.91^\circ \text{ Volts}$$

$$I_s = (170.423 \angle -11.4991^\circ) + (1.171 \angle 90.01^\circ)$$

$$I_s = 170.5 \angle -11.11^\circ \text{ amp}$$

Los valores de Z_s -Ec. 47- y Γ -Ec. 44- son:

$$Z_s = \frac{40147.72 \angle 0.91^\circ}{170.5 \angle -11.11^\circ} = 235.47 \angle 12.02^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{172.2853 \angle 147.19^\circ}{602.0222 \angle -3.16^\circ} = 0.2862 \angle 150.35^\circ$$

5% de carga. Con un valor igual a 2 Mw, y factor de 0.98 en atraso, con un valor de V_R y θ constante se obtiene una I_R de:

$$I_R = \frac{2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 0.98 \cdot 69000} = 17.08 \angle -11.5^\circ \text{ amp}$$

Los valores de voltaje y corriente de envío serán:

$$V_s = (39833 \angle 8.7 \cdot 10^{-4}^\circ) + (71.13 \angle 64.21^\circ)$$

$$V_s = 39864.15 \angle 0.01^\circ \text{ Volts}$$

$$I_s = (17.0783 \angle -11.4991^\circ) + (1.171 \angle 90.01^\circ)$$

$$I_s = 16.86 \angle -7.58^\circ \text{ amp}$$

Los valores de Z_s -Ec. 47- y Γ -Ec. 44- son:

$$Z_s = \frac{39864.15 \angle 0.01^\circ}{16.86 \angle -7.58^\circ} = 2364.42 \angle 7.59^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{1979.5 \angle 14.99^\circ}{2691.65 \angle 8.94^\circ} = 0.7354 \angle 6.05^\circ$$

Tomando en cuenta que el voltaje de recibo (V_R) es $39.84\angle 0^\circ$ Kv y el factor de potencia es 0.98 en atraso, todos los datos anteriormente descritos, se pueden resumir en la tabla VII.

Tabla VII. Tabulación de datos, línea San Julián 1 y 2

%	Carga (Mw)	I_R amps $\angle -5.11^\circ$	V_S volt	I_S amp	$Z_L \Omega$ $\angle +5.11^\circ$	$Z_S \Omega$	Γ
0	Efecto Ferranti	0	$39833.1\angle 0.0008^\circ$	$1.14\angle 90.01^\circ$	∞	$34005.1\angle -90.0091^\circ$	1
5	2	17.08	$39864.1\angle 0.01^\circ$	$16.86\angle -7.58^\circ$	2332.4	$2364.4\angle 7.59^\circ$	$0.73\angle 6.05^\circ$
50	20	170.76	$40147.7\angle 0.91^\circ$	$170.5\angle -11.1^\circ$	233.3	$235.5\angle 12.02^\circ$	$0.28\angle 150.35^\circ$
80	32	273.2	$40341.3\angle 1.46^\circ$	$281.7\angle -10.9^\circ$	145.8	$143.17\angle 12.36^\circ$	$0.47\angle 163.7^\circ$
100	40	341.53	$40472.3\angle 1.81^\circ$	$341.26\angle -11.31^\circ$	116.64	$118.6\angle 13.12^\circ$	$0.55\angle 167.63^\circ$

Si vamos desde el efecto Ferranti (0%) hasta carga completa (100%), de la tabla VII se puede decir lo siguiente:

- Lo interesante de esta tabla es el coeficiente de reflexión, obsérvese como varia su amplitud de 0.55 al 100% pasando por 0.28 al 50% y subiendo después a 0.73 al 5 %, la interface de cambio se encuentra al 30% aproximado de carga, por ejemplo al 32% de carga (12.8Mw) la reflexión tiene un valor de $0.1649\angle 95.75^\circ$ y a un valor de 28% de carga (11.2 Mw) la reflexión será de $0.1681\angle 72.01^\circ$, ya que la carga es mayor a la impedancia de entrada el coeficiente de reflexión estará casi 180° desfasado (167.63°) por esa razón inicia en decremento –si $\Gamma = 0$, significa que $Z_s = Z_c$, lo cual es la condición optima acople-, una vez pasada la frontera de carga (30% aproximado), la reflexión comienza a crecer hasta su valor máximo de 1.

3.2.2.3 Variación temporal de la onda de voltaje

Por medio de las ecuaciones 51 y 53, resulta lo siguiente:

$$l = 5.2828 \text{ mi} \quad R = 1.0286 \Omega \quad C = 78.027 \text{ nf} \quad L = 10.7082 \text{ mH}$$

$$\sqrt{A} = 34595.5 \quad B = 48.03 \quad \omega = 377 \text{ rad/seg} \quad V = 69 \cdot 10^3 \text{ Volt}$$

$$U = 212274343895 \quad r = \omega + \sqrt{A} = 34972.5 \quad s = \omega - \sqrt{A} = -34218.5$$

$$t = 1.0000101 \quad v = 1.0000112$$

$$M = 2.85 \cdot 10^{-11} - 2.73 \cdot 10^{-11} - 1.46 \cdot 10^{-5} + 1.4303 \cdot 10^{-5}$$

$$M = -3.15 \cdot 10^{-7}$$

$$N = 1.98 \cdot 10^{-8} - 2.03 \cdot 10^{-8} - 2.05 \cdot 10^{-8} + 1.96 \cdot 10^{-8}$$

$$N = -1.4 \cdot 10^{-9}$$

$$\tilde{N} = 2.73 \cdot 10^{-11} - 2.85 \cdot 10^{-11} + 1.4618 \cdot 10^{-5} - 1.4303 \cdot 10^{-5}$$

$$\tilde{N} = +3.15 \cdot 10^{-7}$$

$$O = 1.98 \cdot 10^{-8} + 2.03 \cdot 10^{-8} + 2.05 \cdot 10^{-8} + 1.96 \cdot 10^{-8}$$

$$O = 8.02 \cdot 10^{-8}$$

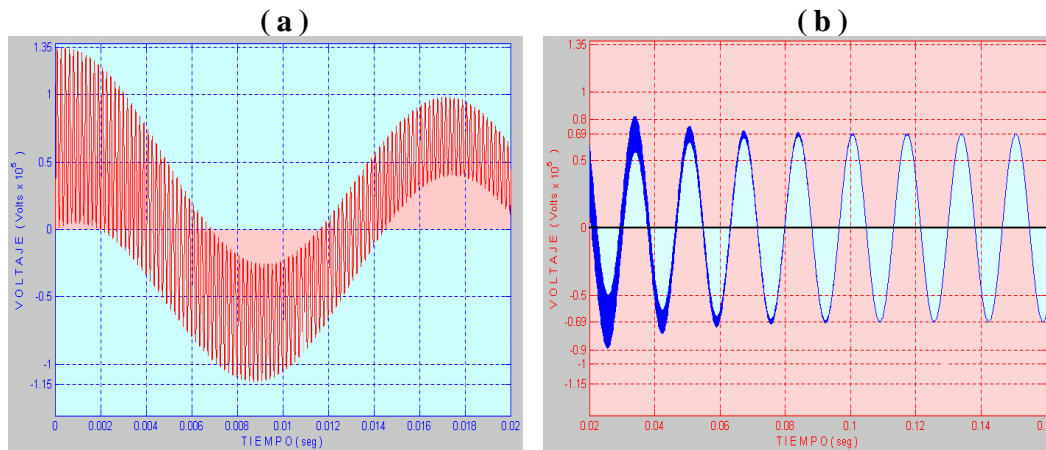
Al sustituir los coeficiente U, M, N, \tilde{N} y O, en la Ec. 52, resulta:

$$V_{f(t)} = 66865.5 \cos(377 t) + 17024 \sin(377 t) - e^{-48.03 t} * [66865.5 \cos(34595.5 t) + 297.2 \sin(34595.5 t)]$$

De lo anterior, se puede decir lo siguiente:

- La respuesta del voltaje respecto al tiempo, no es mas que la suma de dos fasores de distintas frecuencia, del cual, el fasor de mayor frecuencia ($f = 34595.5/(2*\pi) = 5506.04$ Hz, 91.6 veces mayor a la frecuencia del sistema que es 60 Hz), siendo esta la componente de mayor frecuencia todas las líneas que rematan en Tactic. Y un fasor que oscila a la frecuencia del sistema. Véase la figura 26.

Figura 26. Voltaje versus Tiempo, línea San Julián 1 y 2. a) Régimen transitorio b) Régimen permanente



De la figura 26.a se observa que las componentes de alta frecuencia son muy agudas, atenuándose al quinto ciclo de la señal, aproximadamente 83 mseg una vez abierta la línea. La amplitud máxima alcanzada por esta señal 134.25 Kv y un valor en régimen permanente –figura 27.b- de 69.047 Kv.

3.2.3 Línea Matanzas

La resolución de la línea Matanzas se hará de la misma forma que se resolvió la línea San Julián 1 y 2. Sin aplicar las condiciones de la sección 3.2 y trabajándose como una línea de circuito simple.

3.2.3.1 Parámetros intrínsecos

Tomando en consideración que la longitud de la línea Matanzas es de 20 Km (l = 12.43mi). resolviendo la constante de propagación γ , según la Ec. 36 depende de la impedancia en serie distribuida (Z) y la admitancia en paralelo distribuida (Y), siendo esta igual a:

$$Z = 0.1947 + j 2 * \pi * 60 * 2.027 * 10^{-3} = 0.7886 \angle 75.71^\circ \Omega / \text{mi}$$

$$Y = 0 + j 2 * \pi * 60 * 14.77 * 10^{-9} = 5.568 * 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S} / \text{mi}$$

$$\gamma l = 12.43 \sqrt{(0.7886 \angle 75.71^\circ) * (5.568 * 10^{-6} \angle 90^\circ)} = 2.605 * 10^{-2} \angle 82.85^\circ$$

Según la Ec. 37, la impedancia característica Z_c es igual a:

$$Z_c = \sqrt{\frac{0.7886}{5.568 * 10^{-6}}} \angle \frac{75.71^\circ - 90^\circ}{2} = 376.34 \angle -7.15^\circ \Omega$$

3.2.3.2 Variación espacial de voltaje y corriente

La variación espacial del voltaje ($V_{(x)}$) y la corriente ($I_{(x)}$) se restringirá a la longitud total de la línea o sea $X = l = 12.43$ mi. Se realizará por medio de intervalos porcentuales de carga (37 Mw promedio), estos porcentajes serán debidamente identificados, además a cada porcentaje de carga se darán los valores de impedancia de entrada ($Z_{(x)}$) y coeficiente de reflexión (Γ).

Los valores hiperbólicos serán iguales a:

$$\text{Cosh } \gamma l = \cosh(0.032) * \cos(0.026) + j \sinh(0.0032) * \sen(0.026)$$

$$\text{Cosh } \gamma l = 0.99966 \angle 0.0048^\circ$$

$$\text{Senh } \gamma l = \sinh(0.0032) * \cos(0.026) + j \cosh(0.0032) * \sen(0.026)$$

$$\text{Senh } \gamma l = 2.6046 * 10^{-2} \angle 82.85^\circ$$

0% de carga. Este es el valor porcentual de carga que representa al **efecto Ferranti**, debido a que no hay carga conectada al sistema, entonces, $I_R = 0 \Rightarrow Z_L = \infty$, $\Gamma = 1$ -Ec. 44, con $Z_L = \infty$ - y obteniendo todos ellos en la entrada de la línea siendo esta $X = 1$, resulta lo siguiente:

$$I_R = 0 \text{ amps}$$

$$V_R = \frac{69}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 39.84 \text{ Kv} \angle 0^\circ$$

$$V_S = (39.84 \angle 0^\circ) * (0.99966 \angle 4.8 * 10^{-3} \text{ }^\circ) = 39823.6 \angle 4.80 * 10^{-3} \text{ }^\circ \text{ volts}$$

$$I_S = \frac{(39.84 \angle 0^\circ) * (2.6046 * 10^{-2} \angle 82.85^\circ)}{(376.34 \angle -7.15^\circ)} = 2.757 \angle 90^\circ \text{ amp}$$

Los valores de impedancia de entrada Z_s -Ec. 50- es igual a:

$$Z_s = \frac{39823.6 \angle 4.8 * 10^{-3} \text{ }^\circ}{2.757 \angle 90^\circ} = 14444.5 \angle -89.98^\circ \Omega$$

100% de carga. Este valor es igual a 37 Mw, trabajando el sistema a un factor de potencia de 0.98 -valor drástico, ya que este tiene que estar lo mas cercano a la unidad- en atraso. Los valores de voltaje de recibo -este será constante- y corriente de recibo, Ec. 43, son iguales a:

$$V_R = \frac{69}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 39.84 \text{ Kv} \angle 0^\circ$$

$$\theta = \cos^{-1}(0.98) = 11.5^\circ$$

$$I_R = \frac{37 * 10^6}{\sqrt{3} * 0.98 * 69000} = 315.9 \angle -11.5^\circ \text{ amp}$$

El voltaje de envío (V_s) y la corriente de envío (I_s)-Ec. 38-, serán:

$$V_s = (39823 + j3.3362) + (385.43 + j3072.6) = 40397.7 \angle 4.37^\circ \text{ volts}$$

$$I_s = (309.51 - j60.2) + (0 + j2.757) = 315.37 \angle -11^\circ \text{ amps}$$

Los valores de impedancia de entrada (Z_s) y coeficiente de reflexión (Γ) serán:

$$Z_s = \frac{40397.7 \angle 4.37^\circ}{315.37 \angle -11^\circ} = 128.1 \angle 15.37^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{260 \angle 163.92^\circ}{496.47 \angle -2.5^\circ} = 0.5237 \angle 166.42^\circ$$

80% de carga. Con un valor igual a 29.6 Mw, y factor de 0.98 en atraso, con un valor de V_R y θ constante se obtiene una I_R de:

$$I_R = \frac{29.6 * 10^6}{\sqrt{3} * 0.98 * 69000} = 252.73 \angle -11.5^\circ \text{ amp}$$

Los valores de voltaje y corriente de envío –Ec. 38- serán:

$$V_s = (39823 + j3.3362) + (2477.3 \angle 64.2^\circ) = 40962.15 \angle 3.13^\circ \text{ volts}$$

$$I_s = (252.64 \angle -11.4952^\circ) + (0 + j2.757) = 252.11 \angle -10.88^\circ \text{ amps}$$

Los valores de Z_s –Ec. 47- y Γ -Ec. 44- son:

$$Z_s = \frac{40962.15 \angle 3.13^\circ}{252.11 \angle -10.88^\circ} = 162.48 \angle 14.01^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{232.51 \angle 160.32^\circ}{528.11 \angle -1.67^\circ} = 0.4403 \angle 162^\circ$$

50% de carga. Con un valor igual a 18.7 Mw, y factor de 0.98 en atraso, con un valor de V_R y θ constante se obtiene una I_R de:

$$I_R = \frac{18.5 * 10^6}{\sqrt{3} * 0.98 * 69000} = 157.95 \angle -11.5^\circ \text{ amp}$$

Los valores de voltaje y corriente de envío –Ec. 38- serán:

$$V_s = (39823+j3.3362) + (1548.25\angle 64.2^\circ) = 40520.95\angle 1.98^\circ \text{ volts}$$

$$I_s = (157.9\angle -11.4952) + (0+j2.757) = 157.37\angle -10.51^\circ \text{ amps}$$

Los valores de Z_s -Ec. 47- y Γ -Ec. 44- son:

$$Z_s = \frac{40520.95\angle 1.98^\circ}{157.37\angle -10.51^\circ} = 257.5\angle 12.49^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{159.3\angle 142.3^\circ}{620.57\angle 0.32^\circ} = 0.2567\angle 142.11^\circ$$

5% de carga. Con un valor igual a 1.85 Mw, y factor de 0.98 en atraso, con un valor de V_R y θ constante se obtiene una I_R de:

$$I_R = \frac{1.85 * 10^6}{\sqrt{3} * 0.98 * 69000} = 15.8\angle -11.5^\circ \text{ amp}$$

Los valores de voltaje y corriente de envío serán:

$$V_s = (39823+j3.3362) + (154.87\angle 64.2^\circ) = 38890.66\angle 0.21^\circ \text{ volts}$$

$$I_s = (15.79\angle -11.4952) + (0+j2.757) = 15.483\angle -1.45^\circ \text{ amps}$$

Los valores de Z_s -Ec. 47- y Γ -Ec. 44- son:

$$Z_s = \frac{39890.66\angle 0.21^\circ}{15.483\angle -1.45^\circ} = 2576.42\angle 1.66^\circ \Omega$$

$$\Gamma = \frac{2168.1\angle 14.68^\circ}{2880.43\angle 9.11^\circ} = 0.7527\angle 5.57^\circ$$

Tomando en cuenta que el voltaje de recibo (V_R) es $39.84\angle 0^\circ$ Kv y el factor de potencia es 0.98 en atraso, todos los datos anteriormente descritos, se pueden resumir en la tabla VIII.

Tabla VIII. Tabulación de datos, línea Matanzas

%	Carga (Mw)	I_R amps $\angle -11.5^\circ$	V_s volt	I_s amp	$Z_L \Omega$ $\angle +11.5^\circ$	$Z_s \Omega$	Γ
0	Efecto Ferranti	0	39823.6\angle0.005°	2.757\angle90°	∞	14444.5\angle-89.95°	1
5	1.85	15.8	39890.7 \angle 0.21°	15.5 \angle -1.45°	2521.3	2576.4 \angle 1.66°	0.75 \angle 5.57°
50	18.5	157.95	40520.95 \angle 1.98°	157.37 \angle -10.51°	252.2	257.5 \angle 12.49°	0.26 \angle 142.11°
80	29.6	252.7	40962.15 \angle 3.13°	252.11 \angle -10.88°	157.63	162.48 \angle 14.01°	0.44 \angle 162°
100	37	315.9	40397.7 \angle 4.37°	315.4 \angle -11°	126.1	128.1 \angle 15.37°	0.52 \angle 166.42°

Si vamos desde el efecto Ferranti (0%) hasta carga completa (100%), de la tabla VIII, se puede decir lo mismo a lo dicho ante la línea de San Julián 1 y 2, debido a que ambas líneas poseen la misma impedancia característica Z_c .

3.2.3.3 Variación temporal de la onda de voltaje

Para resolver la variación temporal de la onda de voltaje, haremos uso de las ecuaciones 51 y 53, indicando cada uno de los coeficientes, para luego sustituirlos en la Ec. 52, la cual describe la variación del voltaje respecto al tiempo, de la línea de transmisión. Al resolver las ecuaciones 51 y 53, resulta lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 l &= 12.43 \text{ mi} & R &= 2.4201 \Omega & C &= 183.6 \text{ nf} & L &= 25.2 \text{ mH} \\
 \sqrt{A} &= 14701.5 & B &= 48.02 & \omega &= 377 \text{ rad/seg} & V &= 69 \cdot 10^3 \text{ Volt} \\
 U &= 38334658796.1 & r &= \omega + \sqrt{A} = 15078.5 & s &= \omega - \sqrt{A} = -14324.5 \\
 t &= 1.0000101 & v &= 1.00000112 \\
 M &= 3.8 \cdot 10^{-10} - 3.5 \cdot 10^{-10} - 3.49 \cdot 10^{-5} + 3.3159 \cdot 10^{-5} \\
 M &= -1.75 \cdot 10^{-6} \\
 N &= 1.08 \cdot 10^{-7} - 1.14 \cdot 10^{-7} - 1.17 \cdot 10^{-7} + 1.06 \cdot 10^{-7} \\
 N &= -1.7 \cdot 10^{-8} \\
 \tilde{N} &= 3.5 \cdot 10^{-10} + 3.8 \cdot 10^{-10} + 3.49 \cdot 10^{-5} - 3.3159 \cdot 10^{-5} \\
 \tilde{N} &= 1.75 \cdot 10^{-6} \\
 O &= 1.08 \cdot 10^{-7} + 1.14 \cdot 10^{-7} + 1.17 \cdot 10^{-7} + 1.06 \cdot 10^{-7} \\
 O &= 4.45 \cdot 10^{-7}
 \end{aligned}$$

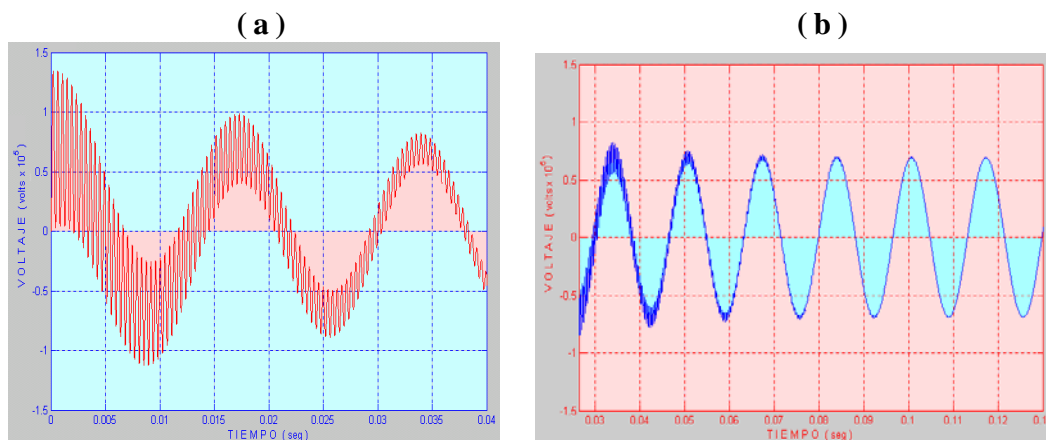
Al sustituir los coeficiente U, M, N, \tilde{N} y O, en la Ec. 52, resulta:

$$V_{\tilde{a}t} = 17058.8 \text{sen}(377t) + 67055.7 \text{cos}(377t) - e^{-48.02t} * [651.7 \text{sen}(14701.5t) + 67055.7 \text{cos}(14701.5t)]$$

La de la anterior respuesta, se puede decir lo siguiente:

- La respuesta del voltaje respecto al tiempo, no es mas que la suma de dos fasores de distintas frecuencia, del cual, el fesor de mayor frecuencia ($f = 14701.5 / (2 * \pi) = 2339.82$ Hz, 40 veces mayor a la frecuencia del sistema que es 60 Hz), se amortigua en forma exponencial. Véase la figura 27.

Figura 27. Voltaje versus Tiempo, línea Matanzas. a) Régimen transitorio b) Régimen permanente



De la figura 27.a se observa que las componentes de alta frecuencia son muy agudas, aun sobrepasando al segundo ciclo de la señal, esta señal de alta frecuencia se atenúa de forma considerable hasta el 4.5 ciclo de la señal, aproximadamente 75 msec una vez abierta la línea. La amplitud máxima alcanzada por esta señal 134.42 Kv y un valor en régimen permanente –figura 27.b- de 69.2 Kv.

4. EQUIPOS DE REGISTRO Y PROTECCIÓN DE FALLAS PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN LA SUBESTACIÓN TACTIC

En este capítulo se hará una breve descripción de los equipos, más importantes, utilizados en la subestación Tactic, contra el efecto Ferranti o bien cualquier otro tipo de fenómeno que se genera por un suceso de falla. Estos equipos se localizan dentro del módulo 8DN9, pudiéndose mencionar a los siguientes: SEL-421, ABB a1700, EPAC 3000, TR-2100, entre otros.

4.1 Rochester TR-2100

Este equipo fue instalado por la Asociación de Mercado Mayorista (AMM) y funciona para todos los tipos de acontecimientos del sistema de energía, además este proporciona toda la información que se necesita capturar en un cuadro completo. Realiza simultáneamente: grabación transitoria, grabación del disturbio, medidas del fasor, análisis de la calidad de la energía, y secuencia de evento. Véase la figura 28.

Figura 28. Rochester TR-2100



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007.

4.1.1 Característica y ventajas del TR-2100

Entre ellas podemos mencionar las siguientes:

- Grabadora de transientes de muy alta velocidad, registra las conmutaciones generadas en el suicheo y golpes de relámpagos.
- Registrador de averías transitorias, este verifica las operaciones de protección del interruptor y el tiempo para la liberación de la falla.
- El registrador de disturbios generados por ramas de árboles, analiza la estabilidad del sistema, registrando: la secuencias del reclose, las oscilaciones en la energía y frecuencia.
- La tendencia de grabación, verifica la regulación y balance del voltaje. El monitor de la calidad de la energía, proporciona la calidad del voltaje y la frecuencia del sistema, las inmersiones y las oleadas del voltaje, pérdida de fuente, contenido armónico, parpadeo y desequilibrio en el voltaje actual.
- La unidad de medida del fasor, sincroniza las medidas del fasor, de acuerdo con la norma IEEE STD 1344-1995.
- El localizador de falla en la línea de transmisión, este calcula la distancia que existe entre la falla y el punto de recibo basado en el modelo de la línea de transmisión.
- Monitor en tiempo real, este visualiza una señal análoga por medio de entradas digitales computando en tiempo real los datos obtenidos.
- Registrador de secuencia de evento, este tiene una resolución menor a 1 milisegundo en contactos digitales.

4.1.2 Funciones del TR-2100

- Registrador de avería a 23kHz en 60s.
Con un disparo tradicional y medida de evento.
- Registrador dinámico del disturbio a 20Hz, 30 minutos.

Con disparadores dedicados a energía / frecuencia de oscilación.

Maderero continuo a 30Hz cada 2 semanas no necesita disparadores.

- Secuencia de datos del PMU
Al estándar recientemente aprobado C37.118.
Común a otros apps/PDC o 2 unidades para el accionador.
- Madereros en estado continuo
RMS en todos los canales a 2Hz.
Opera hasta la 63ava armónica, energía y parpadeo.

4.1.3 Comunicación del TR-2100

- RS-232 local a 115Kbaud.
- Módem interno y externo.
- Sincronofasor.
- Ethernet (opcional) .
- Llamada Autopoll estándar.

4.1.4 Especificaciones del TR-2100

- Canal de 24 bits, con una memoria de almacenamiento de 16 bits y un convertidor análogo/digital.
- Exactitud del 0.1%.
Cálculos corregidos por el sistema real en Hz.
- Aislamiento óptico.
- Filtro verdadero del anti-aliasing.
Atado para muestrear en cada ciclo.
- Con 4 rangos por entrada a 300 Voltio pico (Vp), 2 Vp usados para set.

4.2 Módulo SEL - 421

Este es un equipo de protección de línea de alta velocidad, automatización y control. Protege líneas de transmisión con funciones de distancia y direccionales de alta velocidad, por medio de un relé 21, que incluye además las un relé 51.

Este equipo se encuentra localizado dentro del panel de control del módulo 8DN9, formando parte de los sistemas de protección para la línea de transmisión contra los efectos de sobre corriente y alteraciones en los parámetros de la misma.

4.2.1 Características SEL-421

Entre ellas podemos mencionar:

- Protección completa de línea, con características de operación en menos de un ciclo. Este equipo se aplica en esquemas de disparo monopolar y tripolar, líneas compensadas con capacitores en serie o líneas no compensadas.
- Protege a la líneas de transmisión con cinco zonas de elementos de distancias entre fase y tierra.
- Esquemas asistidos por comunicaciones, con protección de respaldo de sobre corriente direccional.
- Se pueden implementar elementos opcionales de alta velocidad para conseguir un tiempo de operación menor a un ciclo de la señal para la mayor cantidad fallas y relaciones de impedancia de la fuente al ajuste.
- Reportes de eventos con etiqueta de tiempo, Comtrade binario con una precisión en tiempo real de 10 μ seg.
- Visualización del sistema al momento de ocurrir una falla ú otra condición programada .

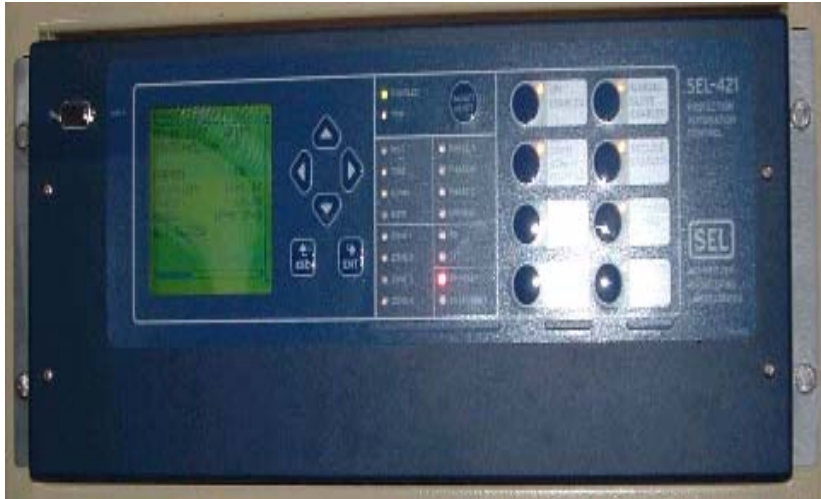
- Con la información obtenida puede validar modelos, mejorar los límites de transferencia y estabilidad del sistema.
- Este proporciona una protección completa de interruptor, totalmente integrada, y control para dos interruptores. Utiliza una lógicas de recierre, protección de falla de interruptor, y monitoreo completo para integrar protección y control de bahía para uno o dos interruptores.
- Combina la confiabilidad de los relés con la funcionalidad de un DFR (Digital Fault Recorder).
- El muestreo de alta velocidad (8 Khz.) genera un reporte en formato COMTRADE, proporcionando una oscilografía avanzada.
- Por medio de la interface gráfica ACSELERATOR® proporciona un análisis de armónicas y una fácil generación de reportes.
- Descarga reportes de eventos en segundos en lugar de minutos.
- Con su Software ACSELERATOR, ayuda en aplicación del relé permitiendo el desarrollo de ajustes fuera de línea, programa Ecuaciones de Control SELOGIC® y analiza reportes de eventos post-falla.
- Dimensiona valores analógicos que retienen en estados momentáneos de entradas para su recuperación con SCADA

4.2.2 Comunicación del SEL-421

Su comunicación es vía Ethernet Processor con protocolos opcionales de Telnet, FTP y UCA2. Visualiza datos y reportes de ambos extremos de línea a través de un relé usando Virtual Terminal sobre canales de comunicaciones Mirrored Bits.

Disponibilidad de instalación en panel o en rack de forma horizontal o vertical, en la figura 29 se puede observar que esta instalado en el panel de forma horizontal.

Figura 29. Montaje SEL-421 en el módulo 8DN9



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007.

Procesador Ethernet SEL-2701. Protocolo de comunicaciones DNP 3.00
Esclavo Nivel 2.

Dos tarjetas adicionales de entrada/salida con salidas estándar, alta velocidad de interrupción. Etiquetas configurables por el usuario para controles del operador e indicadores LED.

4.2.3 Aplicaciones SEL-421

Se pueden mencionar las siguientes:

- Protección completa, primaria o de respaldo con teleprotección y esquemas de disparo monopolar o tripolar en líneas de transmisión y sub-transmisión.

- Realiza ajustes para cuatro operaciones de recierre automático, para uno o dos interruptores con chequeo de sincronismo y tensión para optimizar la restauración del sistema.
- Localización de falla para despachar eficientemente al personal de inspección y reparación.
- Opera sistemas de potencia a máxima carga estable usando sincrofasores en tiempo real, de tensión y corriente, desde cualquier ubicación.
- Implementación de lógicas para fallas de uno o dos interruptores
- Programa, según se necesite, el mantenimiento del interruptor y envía alarmas cuando el monitor del mismo detecta un desgaste excesivo de contactos a partir del número de operaciones y magnitud de la corriente interrumpida.
- Realiza un promedio del tiempo de operación del interruptor, con alarma al detectar una operación lenta
- Alarma para condiciones de baja tensión en uno o dos bancos de baterías.
- Use Analytic Assistant Software para desplegar oscilogramas, diagramas de vectores y analizar reportes de eventos.

Su precio oscila entre \$6,600 (julio 2007).

4.3 ABB A 1700

Este es un dispositivo polifásico programable, que se puede programar para visualizar consumo total (tarifa 1) al igual que otros datos de consumición (tarifa 2, tarifa 3, tarifa 4, etc) de acuerdo con las varias opciones de tarifas en la facturación del distribuido de electricidad.

En la figura 30 se puede observar el montaje de este dispositivo.

Figura 30. Medidor Polifásico Programable. ABB A 1700



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007

Los costes de distribución pueden variar con la hora, el mes y la estación, durante la cual se este consumiendo la electricidad.

Este dispositivo tiene una visualización por medio de una pantalla de cristal líquido definida al cliente (LCD - hasta 16 caracteres) y puede exhibir hora y fecha. Además puede formar parte de un sistema de colección de datos de medidores alejados agregando un módem al dispositivo y conectarlo por medio de una línea telefónica. Además este dispositivo cumple con la norma IEC 1107.

4.4 Alstom MMLG01

Este es un módulo de prueba (Test Block Module), contenido dentro de un recinto Epsilon, ofreciendo a las instalaciones eléctricas una supervisión y prueba secundaria en los esquemas de protección del sistema de energía por medio de un enchufe multi-fingered. En la figura 31 se puede observar el montaje del módulo MMLG01.

Figura 31. Módulo de prueba MMLG01



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007.

4.4.1 Descripción del MMLG01

El bloque de prueba MMLG01 tiene 14 pares de contactos, ligándose a un bloque de terminales colocado en la parte posterior del recinto. Véase la figura 32.

Figura 32. Terminales del módulo MMLG01



Fuente: Alstom Corp. www.alstom.com, consulta en línea agosto 2007

Cada par de contactos son del tipo normalmente cerrado para circular a través del bloque de prueba cuando la protección asociada al equipo este funcionando. La fuente principal ó auxiliar de C.C. se pueden conectar al esquema de protección ó de relees, para prevenir el disparo de algunos de los circuitos de protección durante la prueba

Cuando se quita la cubierta se revela una faja amarilla la cuál se une al bloque de prueba ésta da una representación visual, indicando una advertencia, que el esquema o el relees de protección no están en servicio. El MMLG01 tiene 28 puntos de prueba cada uno identificado al número que le corresponda a la terminal del dispositivo.

4.4.2 Mantenimiento del MMLG01

Para prevenir algún tipo de accidente o daño al equipo, el fabricante recomienda los siguientes puntos:

- El mantenimiento de este equipo se debe realizar solamente por el personal experto entrenado en la operación protectora del relees, siendo capaz de observar todas las medidas de seguridad necesarias y regulaciones apropiadas al equipo y también planta primaria asociada.
- El equipo se debe aislar de fuentes auxiliares y del circuito de interrupción, antes de comenzar a trabajar en el.
- Antes de insertar una punta de prueba, deberá de chequear el zócalo de prueba de los circuitos secundarios del transformador corriente.
- Asegúrese que antes de conectar las puntas de pruebas, el transformador de corriente debe de estar en corto circuito.
- Antes de insertar una prueba mida la corriente.
- Asegúrese que el amperímetro esté en el rango correcta y que está conectado con sus puntas de prueba.

4.5 Alstom EPAC 3000

Este dispositivo se encuentra localizado dentro del panel del módulo 8DN9 y se utiliza como una protección de distancia de la L.T. En la figura 33 se muestra el montaje del EPAC 3000 en el módulo 8DN9.

Figura 33. Montaje del EPAC 3000, en módulo 8DN9



Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, Junio 2007

4.5.1 Funciones del EPAC 3000

Entre las funciones aprobadas por el EPAC 3000, se pueden mencionar:

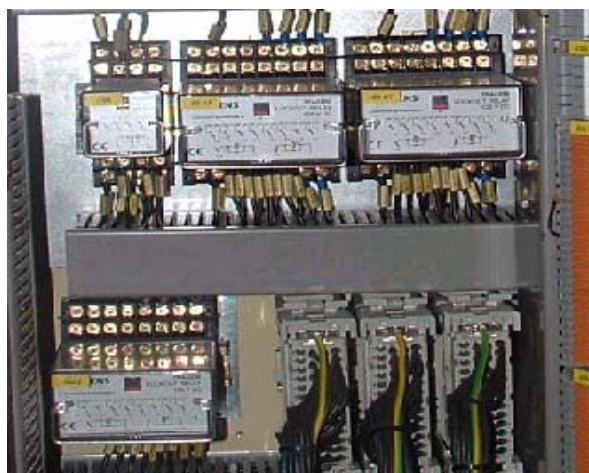
- Protección de la distancia.
- Comunicación en esquema lógico.
- Detección de oscilación de la energía.
- Autorecloser y verificador de sincronismo.
- Detección de falta del fusible .
- Protección contra sobretensiones.
- Protección contra caídas de voltaje.

- Protección contra sobrecarga .
- Entrada de eco débil al final (reflexión de la señal).
- Protección direccional de falla a tierra.
- Detección de la corriente del inrush del transformador .
- Detección del ciclo monofásico en progreso.
- Grabación del acontecimiento.
- Localización de falla (con una compensación de acople mutuo).
- Registro de fallas.

4.6 Lockout Relay 7PA23

Relevador de cierre de acción rápida, estos pertenecen a la serie 7PA22 y 7PA23. El relevador 7PA23 es del tipo biestable con 8 contactos de cambio y esta montado sobre una base del tipo 7XP9010 con las conexiones en la parte posterior. En la figura 34 se muestra su montaje en el módulo GIS.

Figura 34. Montaje del 7PA23

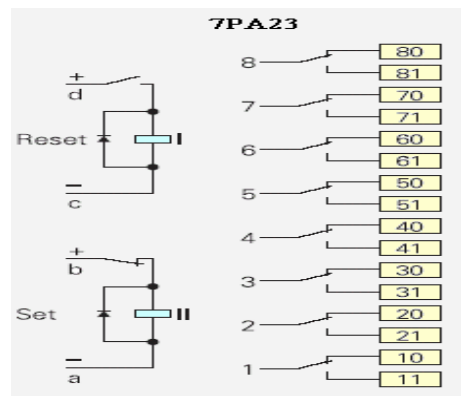


Fuente: Ing. Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, junio 2007-08-14

4.6.1 Descripción del 7PA23

- No ofrece ninguna consumición de permanencia.
- Indicación delantera en la placa con una memoria en la posición abierta / cerrada.
- Bobina con diodo paralelo, con un tiempo menor a 10ms, como se observa en la figura 35.

Figura 35. Conexión del 7PA23



Fuente: Siemens. www.siemens.com, consulta en línea agosto 2007

- Botón mecánico del reajuste
- Estos relevadores se conforman con las normas IEC, EN, estándares de IEEE (tipo y prueba de la rutina) y llevan la marca del CE.
- Los contactos robustos del interruptor ayudan a la capacidad de la sobrecarga e intensidad de la corriente continua; obteniéndose así el aislamiento perfecto.
- Es posible el control directo del dispositivo para la distribución del alto y medio voltaje.
- Absolutamente confiable para el uso en atmósferas saladas, tropicales, y en general todas aquellas que necesitan de protección de cubierta transparente.

CONCLUSIONES

1. Las GIS son unos de los avances tecnológicos más importantes generados en el área de transmisión de potencia eléctrica, debido a que este tipo de subestaciones ahorran espacio y son muy seguras para los operarios. La subestación Tactic es del tipo GIS y opera por medio de RTU's, desde la S/E Guatemala Sur. Se hizo una descripción de los campos que la conforman, al igual se hizo mención de la resolución CNEE 99-2003.
2. Por medio de las ecuaciones de Maxwell se pudo generar un modelo matemático que muestra la variación de los campo eléctricos y magnéticos en el gas SF₆, además se utilizó el modelo de la línea de transmisión con pérdidas para mostrar las variaciones espaciales en la onda de voltaje y corriente. Y, por la antitransformada de Laplace, se llegó a una ecuación matemática que muestra la variación temporal de la onda de voltaje, y mostrar de que manera el efecto Ferranti influye en ellas.
3. Por medio de los datos obtenidos en la S/E Tactic, siendo ellos: configuración de torres de transmisión y características de la L.T; se pudo obtener los parámetros pasivos de las líneas: Chixoy, Guate Norte, San Julián y Matanzas. Dichos parámetros fueron implementados en el modelo matemático deducido, y con la ayuda de MatLab 6.5, se pudo observar por medio de gráficas cómo eran las variaciones de los campos eléctricos y magnéticos, al igual que la variación temporal de la onda de voltaje.
4. Los equipos de protección de mayor relevancia se encuentra localizados en el módulo 8DN9, siendo ellos: TR-2100, SEL-421, A1700, Alstom MMLG01,

7PA23, EPAC 3000, entre otros. Se trató de realizar un análisis de costos, pero debido a la falta de información, no se realizó.

5. De acuerdo a los resultados obtenidos en la implementación del modelo matemático y tomando las especificaciones del módulo 8DN9, que aparecen en el anexo 2, se observa que no se exceden los 460 Kv nominales soportables en corriente alterna del aislamiento del módulo, siendo este capaz de soportar los niveles de sobrevoltaje suscitados en una falla o bien a los 393 Kv generados durante los transitorios al momento de abrirse la línea de transmisión, con la salvedad que este valor se atenúa un 69 % al cumplirse $\frac{1}{4}$ del primer ciclo de la señal alterna.
6. Al comparar los valores reales registrados por el I.N.D.E en la subestación Guatemala Sur y los resultados obtenidos en el capítulo tres, se puede observar que hubo un error del 0.8 % en las picos de sobrevoltaje suscitados durante el transitorio de la señal y un error del 0.09 % en los valores del voltaje en régimen permanente.
7. Al ser el efecto Ferranti un suceso que ocurre por la apertura de la línea de transmisión y siendo ella de una longitud mayor a la longitud del cable de potencia, se pudo simplificar el análisis con la omisión del cable de potencia, ya que el error generado fue menor al 0.1 % del valor real registrado por el I.N.D.E en régimen permanente.
8. El modelo matemático del efecto Ferranti toma en consideración dos parámetros, los cuales son: distancia recorrida (variación espacial) y tiempo transcurrido (variación temporal). La variación espacial se modela por medio de la ecuación Ec. 48 (localizada en la página 51) y la variación temporal se modela por medio de la ecuación Ec. 52 (localizada en la página 53).

RECOMENDACIONES

1. Incentivar al estudiante de ingeniería a conocer el desarrollo tecnológico que se ha alcanzado, respecto a nuevas formas de construcción y aislamiento de las subestaciones eléctricas, y sobre todo, el aporte que como profesional se puede brindar al área de transmisión de potencia eléctrica.
2. Se debe promover el estudio científico de fenómenos físicos transitorios en la línea de transmisión, para que el estudiante de ingeniería eléctrica sea capaz de simular y así prever posibles fallas en los equipos de una subestación eléctrica.
3. Para lograr una mayor exactitud en los parámetros pasivos de la línea de transmisión, es indispensable tener datos exactos de cada una de las torres de transmisión y distancias entre ellas. Ya que al comparar los resultados del modelo y los registrados por el I.N.D.E se generó un error del 0.8 % entre ellos.
4. Promover a todo nivel estudiante y profesional, el desarrollo de equipos eléctrico de protección y registro, de fabricación nacional para así ofrecer a las empresas de transporte de energía eléctrica de Guatemala, asistencia técnica y mantenimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.

Ingeniero Wilmer Sarceño. **Subestación Tactic**, Junio 2007

2.

Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Resolución CNEE 99-2003**

3.

Ingeniero Daniel Zapata. **INDE**, julio 2007.

4.

Ingeniero Víctor Lobos. **INDE**, julio 2007.

BIBLIOGRAFÍA

1. **ABB**, <http://www.abb.com>, consulta en línea Julio 2007.
2. **Alstom**, <http://www.alstom.com>, consulta en línea julio 2007.
3. Dennis G. Zill. **Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones de Modelado**, Transformada de Laplace, Loyola Marymount University, 1997. 296-329pp.
4. José Raúl Martín. **Diseño de Subestaciones Eléctricas**, subestaciones eléctricas, Universidad Autónoma de México, 1992. 1pp.
5. Joseph A. Edmister. **Circuitos eléctricos**, señales y formas de onda, McGraw-Hill, España 1997. 117pp.
6. Murray R. Spiegel. **Variable Compleja**, números complejos, McGraw-Hill México, 1991.4pp.
7. **Rochester Technology**, <http://www.rochester.com>, consulta en línea Julio 2007.
8. **Siemens Corporation**, <http://www.siemens.com>, consulta en línea julio 2007.
9. William D, Stevenson. **Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia**, Cálculo de los parámetros pasivos de la línea de transmisión, McGraw-Hill, México, 1988,32-100pp.

ANEXO 1

Anexo 1. Características eléctricas de los conductores ASCR.

Tipo	Área C mil	Diámetro plg	Resistencia			DMG * 10 ⁻² pies
			Dc	Ac, 60 Hz		
			20 °C * 10 ⁻² Ω / 1000 pies	20 °C * 10 ⁻² Ω / mi	50 °C * 10 ⁻² Ω / mi	
Waxing	266,800	0.609	6.46	34.88	38.31	1.98
Partridge	266,800	0.642	6.4	34.52	37.92	2.17
Ostrich	300,000	0.680	5.69	30.7	33.72	2.29
Merlin	336,400	0.684	5.12	27.67	30.37	2.22
Linnet	336,400	0.721	5.07	27.37	30.06	2.43
Oriole	336,400	0.741	5.04	27.19	29.87	2.55
Chickadee	397,500	0.743	4.33	23.42	25.72	2.41
Ibis	397,500	0.783	4.3	23.23	25.51	2.64
Pelican	477,000	0.814	3.61	19.57	21.48	2.64
Flicker	477,000	0.846	3.59	19.43	21.34	2.84
Hawk	477,000	0.858	3.57	19.31	21.2	2.89
Hen	477,000	0.883	3.55	19.19	21.07	3.04
Osprey	556,500	0.879	3.09	16.79	18.43	2.84
Parakeet	556,500	0.914	3.08	16.69	18.32	3.06
Dove	556,500	0.927	3.07	16.63	18.26	3.14
Rook	636,000	0.977	2.69	14.61	16.03	3.27
Grosbeak	636,000	0.990	2.68	14.54	15.96	3.35
Drake	795,000	1.108	2.15	11.72	12.84	3.73
Tern	795,000	1.063	2.17	11.88	13.02	3.52
Rail	954,000	1.165	1.81	9.97	10.92	3.86
Cardinal	954,000	1.196	1.8	9.88	10.82	4.02
Ortolan	1,033,500	1.213	1.67	9.24	10.11	4.02
Bluejay	1,113,000	1.259	1.55	8.61	9.41	4.15
Finch	1,113,00	1.293	1.55	8.56	9.37	4.36
Bittern	1,272,000	1.345	1.36	7.62	8.32	4.44
Bluebird	2,156,000	1.762	0.8	4.76	5.15	3.44

Fuente: William D. Stevenson. **Análisis de Sistemas de Potencia**, 369pp.

ANEXO 2

Anexo 2. Placa características del modulo 8DN9.

Año de construcción / N°	2001 / K31246836	
Tipo	8DN9	
Tensión nominal	245 Kv	
Tensión nominal soportable de choque por rayo	1050 Kv	
Tensión nominal soportable en corriente alterna	460 Kv	
Frecuencia nominal	60 Hz	
Intensidad nominal	Acoplamiento	2000 A
	Barras colectoras	2000 A
Intensidad nominal de corta duración	40 KA	
Duración nominal del corto circuito	1 s	
Interrupción de potencia	Intensidad nominal de ruptura	40 KA
	Factor de tensión polar	1.5
	Ciclo nominal de maniobra	0-0,3s-CO-3min-CO
	Intensidad nominal de ruptura de fase	10 KA

Fuente: Subestación Tactic. **Placa del modulo 8DN9**, junio 2007.