



BUAP

||| **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**REGULACION DEL VOLTAJE EN LA SUBESTACION ELECTRICA
EL SALTO**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Facultad de Ingeniería

Presenta:

JULIO ALBERTO ALEGRIA SALAS

Director:

Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez

Co director:

Dr. Benito Zenteno Mateo

H. Puebla de Zaragoza, a 12 Diciembre del 2019

M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería, BUAP
Presente

El suscrito, Ing. Julio Alberto Alegria Salas, Matricula: 218470133, alumno de la Maestría en Ingeniería Opción Terminal Sistemas Eléctricos de Potencia, que se imparte en esta Unidad Académica, le solicita atentamente le autorice realizar el Tema de Tesis denominado **“REGULACIÓN DEL VOLTAJE EN LA SUBESTACION ELECTRICA EL SALTO”** para obtener el grado correspondiente; así mismo solicito de favor que el Dr. Juan Carlos Escamilla Sanchez como nombramiento de asesor interno para dicho tema, para obtener el grado correspondiente.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE



Ing. Julio Alberto Alegria Salas.

C.c.p. M.I. Genaro Campos Castillo, Coordinador de la Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia



Oficio No. 0768/2020

Mtra. María Elena Ruiz Velasco
Directora de Administración Escolar
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Presente

Por medio del presente, hago de su conocimiento que el C. Julio Alberto Alegría Salas, Matrícula: 218470133, pasante de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia, presentará su Examen de Grado con la modalidad en línea para la defensa de su tema de tesis; por lo que se le asigna el siguiente Jurado:

- PRESIDENTE: DR. JUAN CARLOS ESCAMILLA SÁNCHEZ
SECRETARIO: DR. BENITO ZENTENO MATEO
VOCAL: M.I. VÍCTOR GALINDO LÓPEZ
VOCAL: M.C. ISMAEL ALBINO PADILLA

La fecha y hora propuesta por esta Facultad es el día 1º de octubre de 2020, a las 16:00 horas

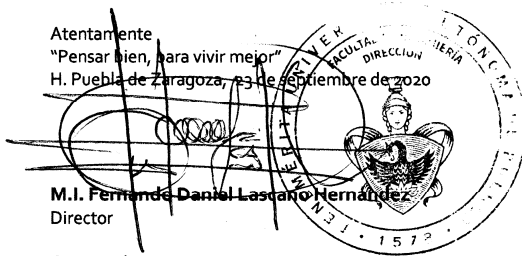
Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, 23 de septiembre de 2020

M.I. Fernando Daniel Lascano Hernández
Director

C.c.p. Archivo

ABH/GCC/sco*



Facultad de
Ingeniería

Bld. Valsequillo Esq. Av. San Claudio S/N
Col. San Manuel Puebla, Pue.
CP. 72570
01(222)2295500
Ext. 7610

Resumen

La transmisión de potencia en corriente alterna presenta principalmente problemas de regulación de voltaje y pérdidas, con necesidades de reactivos al Sistema Eléctrico Nacional. Un ingeniero en sistemas de potencia está interesado en las condiciones normales y anormales del Sistema Eléctrico Nacional [2]. Esto obliga a buscar modos de operación de la red para resolver el problema de altos y bajos voltajes, al igual de su operación cercana del límite de estabilidad en la Red Eléctrica Nacional [7], situaciones que se presentan cuando no se cuenta con los medios de compensación adecuados.

En un esquema de compensación reactiva conectado a la línea de transmisión, como primer objetivo se tiene que lograr una operación que este dentro de los márgenes de regulación de voltaje [1] marcadas en el manual regulatorio de estados operativos del sistema eléctrico nacional.

En el Estado Operativo Normal todas las variables del SEN (tensiones, ángulos, frecuencia, etc.) deben encontrarse dentro de los límites operativos y debe contar con la suficiente capacidad de transmisión y transformación para mantener la seguridad del SEN ante la Contingencia sencilla más severa que se pudiera presentar. En condiciones posteriores a la Contingencia sencilla más severa, el equipo eléctrico debe mantenerse operando dentro de sus límites permisibles tanto operativos como de diseño y no debe presentarse pérdida de carga [7]. De estos datos operativos en subestación el Salto, el punto a estudiar y que no cumple, es el Voltaje ya que rebasa el +5% del voltaje nominal que es 85Kv [11].

En estos capítulos hablaremos de:

- 1) La teoría de potencia reactiva en Transformadores, Reguladores, Reactores y Generadores externos (bus remoto) en una subestación.
- 2) Estudio de las mediciones de potencia y voltaje ante variaciones de carga en la ZOTP.
- 3) Estudio de regulación de tensión en base a la matriz de contingencia EST-025-15 de la ZOTP.
- 4) Simulación de diferentes escenarios para su análisis y comparación; alta carga, baja carga, de la Generación del complejo FENIX.
- 5) Modelado de flujos de potencia en la red de la ZOTP, por medio del Software PSSE; en el cual se verificaron varios escenarios de contingencias, observándose que la mejor solución a la regulación del voltaje es un reactor de potencia en la barra de 85Kv en S.E. El Salto.

Abstract

The transmission of power in alternating current mainly presents problems of voltage regulation and losses, with the need for reagents to the National Electric System. A power systems engineer is interested in the normal and abnormal conditions of the National Electric System [2]. This forces to look for modes of operation of the network to solve the problem of high and low voltages, as well as its operation close to the limit of stability in the National Electricity Network [7], situations that arise when the means are not available. adequate compensation.

In a reactive compensation scheme connected to the transmission line, the first objective must be to achieve an operation that is within the voltage regulation margins [1] established in the regulatory manual of operating states of the national electricity system.

In the Normal Operating State, all the variables of the SEN (voltages, angles, frequency, etc.) must be within the operating limits and must have sufficient transmission and transformation capacity to maintain the safety of the SEN in the face of the most severe simple contingency. that could be presented. In conditions after the most severe single contingency, the electrical equipment must be kept operating within its permissible operating and design limits and there must be no loss of load [7]. From these operating data in the Salto substation, the point to be studied and which is not fulfilled, is the Voltage since it exceeds + 5% of the nominal voltage that is 85Kv [11].

In these chapters we will talk about:

- 1) The theory of reactive power in transformers, regulators, reactors and external generators (remote bus) in a substation.
- 2) Study of the power and voltage measurements in the face of load variations in the ZOTP.
- 3) Study of voltage regulation based on the contingency matrix EST-025-15 of the ZOTP.
- 4) Simulation of different scenarios for analysis and comparison; high load, low load, of the Generation of the FENIX complex.
- 5) Modeling of power flows in the ZOTP network, by means of the PSSE Software; in which several contingency scenarios were verified, observing that the best solution to voltage regulation is a power reactor on the 85Kv bus in S.E. El Salto.



Dedicatorias

Mi Dios Padre, Dios Hijo y Dios Espíritu Santo, gracias por apoyarme y existir, gracias por tu máxima sabiduría de concentración en mi Tesis.

A mis hijos C. Cristel Alegría Díaz y Roberto Maximiliano Alegría Díaz por ser la base de motivación para seguir preparándome para darles un mejor futuro en sus vidas.

A C. Maria de la Luz Cristel Díaz por ser la persona que me dio el tiempo necesario para concluir esta tesis y las materias cursadas, GRACIAS.

A mi madre Porfiria Salas por apoyarme incondicionalmente y motivarme a superarme, para mi mejora profesional.

A mis grandes amigos, futuros líderes de esta Nación, gracias a ti, seguiré superándome para ser un Guía para ustedes en materia de la energía eléctrica.

A mis profesores Dr. Juan Carlos Escamilla Sanchez, al Dr. Benito Zenteno, Dr. Ismael Albino Padilla por su apoyo, al igual que su orientación para lograr esta tesis y a los coordinadores de esta Maestría Dr. Alejandro Bautista y MI Genaro Campos, por hacer posible este curso en la CDMX, el cual es gran aportación para el beneficio mío y para la superación dentro de mí empresa.

A mis compañeros de la Zona de Operación de Transmisión Pachuca, a los compañeros de ZTVMCO y al **MC. Carlos Sanchez Renteria** por apoyarme como **asesor externo**.

¡MUCHAS GRACIAS!



INDICE

Resumen 4

Abstract 5

Dedicatorias..... 6

CAPÍTULO 1 Generalidades. 12

 1.1 Introducción. 12

 1.2 Planteamiento del Problema. 13

 1.3 Objetivo General 15

 1.4 Objetivo Particular..... 15

 1.5 Hipótesis..... 16

 1.6 Justificación. 16

 1.7 Aportaciones 18

 1.8 Estado del Arte. 19

CAPITULO 2..... 20

 2.1 CONCEPTOS BÁSICOS Y MODELADO DE ELEMENTOS 20

 MARCO DE REFERENCIA 20

 2.1.1 Introducción 20

 2.2 Potencia eléctrica activa y reactiva 20

 2.2.1 CARGA RESISTIVA..... 21

 2.3 Potencia compleja..... 25

 2.4 Modelado de transformadores 27

 2.4.1 Circuito equivalente del transformador monofásico 27

 2.4.2 Circuito equivalente del transformador trifásico 33

 2.4.3 Transformador de tres devanados 35

 2.6 Modelado de líneas de transmisión 38

 2.6.1 Conductores Compuestos y el Radio Geométrico 38

 2.6.2 Resistencia Equivalente 40

 2.6.3 Efecto Inductivo..... 41

 2.6.4 Inductancia debida al flujo interno 41

 2.6.5 Inductancia en una línea de dos conductores..... 43

 2.6.6 Efecto Capacitivo 44

 2.7 DIFERENCIA DE POTENCIAL ENTRE DOS PUNTOS DEBIDA A UNA CARGA 46

 2.8 Representación de líneas 46

 2.9 Línea de transmisión de longitud media 47

 2.10 Línea de transmisión larga..... 47

CAPÍTULO 3..... 49



| | |
|--|----|
| 3.1 PROBLEMÁTICA OPERATIVA..... | 49 |
| Introducción | 49 |
| 3.2 ANALISIS DE FLUJOS DE POTENCIA | 51 |
| 3.3 DESARROLLO | 51 |
| 3.4 CONDICIONES ACTUALES | 52 |
| 3.5 PROPUESTA DE RECONFIGURACION..... | 54 |
| 3.6.- ESCENARIO BASE DE LA ZOTP CON SOTFWARE WS500 | 55 |
| CAPITULO 4..... | 62 |
| 4.1 CONCLUSIONES. | 62 |
| APENDICE A “PROGRAMACION EN LENGUAJE Python” | 64 |



Índice de ilustraciones.

Ilustración 1 Variación con respecto al tiempo de v , i y p para una resistencia.14

Ilustración 2 Tipo de variaciones en la Red Eléctrica.15

Ilustración 3 Niveles de Tensión en Estado Operativo Normal.16

Ilustración 4 Variación con respecto al tiempo de V , I y P para una inductancia22

Ilustración 5 Variación de tiempo de v , i y p para una capacitancia23

Ilustración 6 Circuito eléctrico con elementos R , L y C23

Ilustración 7 Variación con respecto al tiempo de v , i y p para un circuito RLC25

Ilustración 8 Circuito Eléctrico Monofásico26

Ilustración 9 Triángulo de Potencias26

Ilustración 10 Representación esquemática de un transformador monofásico27

Ilustración 11 Circuito equivalente de un Transformador Monofásico28

Ilustración 12 Circuito equivalente con la impedancia referida al lado H.....30

Ilustración 13 Representación unifilar del Transformador con Taps en ambos devanados.30

Ilustración 14 Representación del Transformador monofásico31

Ilustración 15 Equivalente del transformador monofásico con taps en ambos devanados.32

Ilustración 16 Equivalente del transformador monofásico con taps en ambos devanados.32

Ilustración 17 Equivalente del transformador monofásico con tap en un devanado.32

Ilustración 18 Conexiones de un transformador en conexión delta-estrella.33

Ilustración 19 Diagrama vectorial de la conexión delta-estrella34

Ilustración 20 Circuito equivalente de secuencia positiva34

Ilustración 21 Circuito Equivalente de un Transformador de tres devanados35

Ilustración 22 Circuito equivalente de un transformador de tres devanados.36

Ilustración 23 Referencia óhmica de impedancias monofásicas de un transformador trifásico37

Ilustración 24 Disposición geométrica de conductores en un haz.38

Ilustración 25 Conductor trenzado 26 AL/7 Fe, en dos capas cada uno.40

Ilustración 26 Sección transversal de un conductor de radio r41

Ilustración 27 Trayectoria de integración entre dos puntos externos a un conductor46

Ilustración 28 Circuito π nominal de una línea de longitud media.47

Ilustración 29 Línea de transmisión con parámetros distribuidos.47

Ilustración 30 Sección elemental de la línea de transmisión.48

Ilustración 31 Dato de placa del Transformador 230/85kV49

Ilustración 32 b) Voltaje 85kV en el año 2020 de S.E. El Salto50

Ilustración 33 Diagrama Unifilar de la Red 85kV S.E. El Salto52

Ilustración 34 Demanda mínima de Generación en S.E. El Salto.53

Ilustración 35 Demanda Máxima de la Zona de Operación Pachuca.55

Ilustración 36 Contingencia aledañas (pérdida de las líneas KMC 93100 SAO y KMC 93130 SAO)56

Ilustración 37 Contingencias aledañas (Pérdida de líneas de php -> kcm (93850 y 93860)56

Ilustración 38 Barrida de bus 2 de 230Kv en S.E. KMC.....57

Ilustración 39 Diagrama de Flujo (programa Python)58

Ilustración 40 Simulación de flujo con -70MVAR.59

Ilustración 41 Simulación de flujo con -80MVAR.60

Ilustración 42 Simulación de flujo con B1 -70MVAR y B2 con -70MVAR.61

Ilustración 43 Simulación de flujo con -130MVAR61



Glosario

ZOTP: Zona de Operación de Transmisión Pachuca.

ZTVMCO: Zona de Transmisión Valle de México Centro Oriente.

CFE: La Comisión Federal de Electricidad

LIE: Ley de Industria Eléctrica.

CRE: Comisión Reguladora de Energía

Distribución: La conducción de energía eléctrica desde los puntos de entrega de la transmisión hasta los puntos de suministro a los usuarios.

Factibilidad: Estudio preliminar para determinar la viabilidad de incorporar a la red del servicio público un proyecto de generación particular.

Generación: La producción de energía eléctrica a partir de fuentes primarias de energía, utilizando los sistemas y equipos correspondientes.

Interconexión: Conexión eléctrica entre dos áreas de control o entre la instalación de un Permisionario y un área de control.

Servicios Conexos: Los servicios vinculados a la operación del Sistema Eléctrico Nacional y que son necesarios para garantizar su Calidad, Confiabilidad, Continuidad y seguridad, entre los que se podrán incluir: las reservas operativas, las reservas rodantes, la regulación de frecuencia, la regulación de voltaje y el arranque de emergencia, entre otros, que se definan en las Reglas del Mercado.

EPS: Empresa Productiva Subsidiaria.

Permisionario: El titular de un permiso de generación, exportación o importación de energía eléctrica.

Punto de interconexión: El sitio en donde el Permisionario entrega al SEN la energía producida por su central de generación.

ELSPEC: Analizador de calidad de energía.

Servicio Público (SP): La prestación del servicio público de energía eléctrica que puede comprender la planeación del sistema eléctrico nacional; la generación, conducción, transformación, distribución y venta de energía eléctrica; y la realización de todas las obras, instalaciones y trabajos que requieran la planeación, ejecución, operación y mantenimiento del sistema eléctrico nacional.

Sistema Eléctrico Nacional (SEN): El conjunto de instalaciones destinadas a la generación, transmisión, transformación, subtransmisión, distribución y venta de energía eléctrica de servicio público en toda la República, estén o no interconectadas.



Transportista: EPS Encargada del transporte eléctrico de una Subestación Eléctrica a otra. Derivado a la transmisión (conducción de energía) eléctrica desde las plantas de generación hasta los puntos de entrega para su distribución.

Suministrador: La Comisión Federal de Electricidad, y en lo conducente las entidades mencionadas en el artículo cuarto transitorio de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.

Subestación Eléctrica (S.E.): Las subestaciones eléctricas son las instalaciones encargadas de realizar transformaciones de la tensión, de la frecuencia, del número de fases o la conexión de dos o más circuitos.

Pueden encontrarse junto a las centrales generadoras y en la periferia de las zonas de consumo, en el exterior o interior de los edificios.

Voltaje (V): La tensión eléctrica o diferencia de potencial es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

Potencia (P): La potencia eléctrica es la proporción por unidad de tiempo, o ritmo, con la cual la energía eléctrica es transferida por un circuito eléctrico. Es decir, la cantidad de energía eléctrica entregada o absorbida por un elemento en un momento determinado.

Armónicos: En sistemas eléctricos de corriente alterna los **armónicos** son frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo.

MEM: Mercado Eléctrico Mayorista.

KMC: Subestacion eléctrica Kilómetro 110.

SAO: Subestacion eléctrica El Salto.

NEC: Subestación eléctrica Necaxa.

PTL: Subestacion eléctrica Patla.

TEP: Subestación eléctrica Tepexi.

XIP: Subestación eléctrica Xicotepec.

PHP: Subestación eléctrica Pachuca Potencia.



CAPÍTULO 1 Generalidades.

1.1 Introducción.

La importancia de las subestaciones eléctricas o nodo de energía es la regulación del voltaje, la cual es aportada al SEN mediante Potencia Reactiva del equipo eléctrico primario. Mientras pasan los años, los mantenimientos preventivos son muy necesarios en las subestaciones eléctricas y estas van agarradas de la mano con las nuevas tecnologías en base a estudios, con la reforma energética busca promover el desarrollo sustentable de la industria eléctrica estableciendo un entorno desregulado, llamado también Ley de la Industria Eléctrica (LEI), en el cual se promueve la competencia en el área de generación eléctrica y redes inteligentes, con el fin de ofrecer al consumidor un servicio de calidad [13], [17].

La subestación el Salto cuenta con una capacidad de 230 MVA y voltajes 230/85/23 kV, la cual se encuentran 2 alimentadores en 230 kV por las LT SAO 93100 KMC y SAO 93130 KMC, y se alimenta en 85 kV por diez Líneas de Subtransmisión, ocho Líneas de generación que se interconectan con el complejo hidroeléctrico NECAXA y las Líneas de Subtransmisión SAO 73Z90 CRM Y SAO 73T60 KMC. El arreglo de la subestación es en anillo en 230 kV y de doble barra con interruptor de amarre en 85 kV, cuenta con dos transformadores de 230/85 kV de 100 MVA cada uno y un banco de 85/23 kV de 30 MVA. Se ubica en zona de conflicto del SME en el poblado de Juan Galindo (Nuevo Necaxa), Puebla. Es atendido por la Zona de Transmisión Valle de México Centro Oriente (ZTVMVCO), perteneciente a la Zona de Operación de Transmisión Pachuca (ZOTP), que es la encargada de estar monitoreando la regulación de la red eléctrica, en la Zona Norte del Estado de México, Hidalgo y parte Norte de Puebla, en el ámbito de la Gerencia Regional de Transmisión Valle de México. [16][18]

El Departamento de Protecciones y Medición, su función, para mantener el suministro eléctrico, es el encargado de realizar, verificar y observar los comportamientos del Sistema Eléctrico Nacional, apoyándose con el analista de la ZOTP, encargado del estudio de flujos, con simulaciones de carga con el software PSSE, por lo cual es de suma importancia el velar por la calidad y cero pérdidas en las subestaciones.

Existen tres tipos de medición en la subestación eléctrica, las cuales pueden ser la generada, la consumida, la transportada o de intercambio [11][13]. El principal de estos tipos de mediciones para reactivos es el generado por el sistema hidroeléctrico de Necaxa, Tepexi,



y Patla; el cual tuvo gran apogeo hasta la década de los años cincuenta, ya que fue la solución a los problemas de abasto eléctrico en el centro del país, pero actualmente estas generadoras hidroeléctricas, siguen operando por parte del permisionario FENIX, sin embargo, el punto de intercambio de reactivos, del cual hablaremos será en la Subestación El Salto, ya que en dicha subestación se manifiesta la Generación, Transmisión, y Distribución de la energía eléctrica [7][16].

1.2 Planteamiento del Problema.

El análisis de estabilidad en Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) siempre ha sido un problema para los analistas y operadores de los sistemas de potencia, debido a su naturaleza compleja y gran dimensionalidad. En especial, cuando se pretende analizar la estabilidad de voltaje y de frecuencia ya que estos dos tipos de análisis constituyen la problemática común en el estudio del fenómeno de estabilidad en un SEP. En este sentido, inferir acerca de la estabilidad de voltaje de sistemas de potencia no es tarea fácil, por lo que se requiere de una herramienta de análisis que permitan determinar el comportamiento de este. A pesar de que la teoría fundamental de la Transmisión de energía describe su propagación en términos de la interacción de campos eléctricos y magnéticos, el ingeniero de sistemas de potencia esta, por lo general, más interesado en la razón del cambio de la energía con respecto al tiempo en términos de voltaje y de la corriente (que es la definición de potencia) [1][2]. La definición de potencia en términos de energía es “la cantidad de energía consumida o generada por unidad de tiempo”. Para el caso particular de potencia eléctrica, se establece la definición: “la potencia eléctrica generada o absorbida por un elemento es el producto del voltaje en sus terminales y la corriente a través de él”, algebraicamente está dada por:[1]

$$p = vi, \quad \text{Watts o Joule/seg} \tag{1.1}$$

Una vez que se ha definido la potencia eléctrica, es interesante analizar cómo es consumida por los elementos pasivos. Por ejemplo, para el caso de una resistencia a la cual se le aplica una señal del tipo alterna, es decir,[1] $P = vi$ watts o Joule/seg, por lo que la respuesta de este elemento ante una señal alterna es $i = I_m \text{sen} \omega t$, por lo tanto, sustituyendo en (1.1) se tiene:

$$P_R = V_m I_m \text{sen}^2 \omega t \tag{1.2}$$

Se observa que la potencia eléctrica consumida por una resistencia es positiva, aunque tenga una variación en el tiempo como lo muestra la expresión (1.2). En la ilustración 1 se tiene gráficamente la variación de la potencia eléctrica consumida por la resistencia al aplicarle una señal de corriente alterna [1][16].

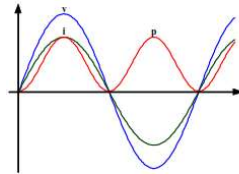


Ilustración 1 Variación con respecto al tiempo de v, i y p para una resistencia.

Se lleva 10 años de la extinción de Luz y Fuerza, la parte operativa ha sido un gran reto y logro por todos nosotros que formamos la CFE, su estudio ha sido muy apresurado y la Ley de la Comisión Federal, Código de Red y Reforma energética, abre la necesidad de hacer las recomendaciones necesarias para la regulación del voltaje en el ámbito de la ZOTP, por lo cual se iniciará con el estudio de la generación del punto de interconexión en la subestación el salto y luego los recursos de potencia reactiva en la Zona de Operación de Transmisión Pachuca, para dar la recomendación y solución de problema a la regulación de tensión ejercida en este nodo eléctrico, ante cualquier contingencia [1][16].

Así mismo, el desarrollo de las herramientas de análisis sirve como plataforma de trabajo para realizar análisis de regulación de tensión a cualquier sistema de potencia, y puede servir de base para la creación a futuro, de herramientas matemáticas que garanticen su buen desempeño para el estudio de la regulación de voltaje en los sistemas de potencia [2][16].

Por ello se debe realizar diversos estudios de simulación con el software PSSE a fin de evaluar los comportamientos de Flujos ante los diferentes casos de simulación de las líneas de transmisión y subtransmisión, con la finalidad de determinar el correcto comportamiento de voltaje de acuerdo con la siguiente figura de tipo de variación [1][3][4].

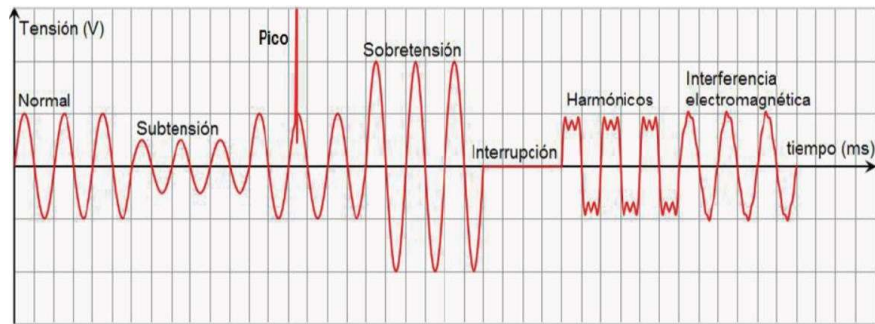


Ilustración 2 Tipo de variaciones en la Red Eléctrica.

1.3 Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar las simulaciones de estudio de Flujos de Potencia en el nodo de Subestación El Salto, con el fin de estudiar la potencia reactiva necesaria, para cumplir los parámetros de voltaje marcados en <<Manual Regulatorio de Estado Operativos del Sistema Eléctrico Nacional>>, del Código de Red.

1.4 Objetivo Particular

- Analizar las mediciones de voltaje de bus de 85kV de subestación El Salto, obtenidas de la maestra de la ZOTP antes y después del cambio de Tap's en los Transformadores de 230/85kV de 100MVA.
- Analizar el flujo de potencia al nivel de voltaje de 230kV de Subestación El Salto obtenidas con el SOTFWARE WS500.
- Comparar el comportamiento dinámico de los tres escenarios de demanda (Demanda Mínima, Media y Máxima) en las barras de 85kV de S.E. El Salto.
- Desarrollar con el software PSSE, simulaciones de la parte reactiva necesaria para la regulación del voltaje, en el nodo eléctrico subestación El Salto, con el cual se mantenga el equilibrio del voltaje de 85kV y 230kV, respetando lo marcado en el manual regulatorio de estados operativos del SEN.

1.5 Hipótesis.

Derivado a que en el 2016 la Comisión Reguladora de energía publica el <<Manual Regulatorio de requerimientos Técnicos para la Interconexión de Centrales Eléctricas al sistema Eléctrico Nacional>>, la ZOTP nota que en las barras de 85kV de S.E. El Salto, no cumplen con el Estado Operativo Normal, de todas las variables del SEN (tensiones, ángulos, frecuencia, etc.), el voltaje en 85kV se encuentran fuera de los límites operativos y no se cuenta con suficiente capacidad de transmisión y transformación para mantener la seguridad del Voltaje, ante una Contingencia sencilla más severa que se pudiera presentar. Pero así mismo, y de acuerdo con manual regulatorio, se debe asegurar que los niveles de tensión en las barras de las subestaciones se mantengan conforme a los rangos establecidos en la Ilustración 3, en condiciones de Estado Operativo Normal.[1][7][18].

| Estado Operativo Normal | | | |
|-------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Tensión Nominal (kV) | Tipo de Sistema | Tensión máxima de operación (kV) | Tensión mínima de operación (kV) |
| 400 | 3 fases 3 hilos | +5% | -5% |
| 230 | 3 fases 3 hilos | +5% | -5% |
| 161 | 3 fases 3 hilos | +5% | -5% |
| 138 | 3 fases 3 hilos | +5% | -5% |
| 115 | 3 fases 3 hilos | +5% | -5% |
| 85 | 3 fases 3 hilos | +5% | -5% |
| 69 | 3 fases 3 hilos | +5% | -5% |
| 34.5 | 3 fases 3 o 4 hilos | +5% | -7% |
| 23 | 3 fases 3 o 4 hilos | +5% | -7% |
| 13.8 | 3 fases 3 o 4 hilos | +5% | -7% |

Ilustración 3 Niveles de Tensión en Estado Operativo Normal.

1.6 Justificación.

Debido a las presiones económicas, los operadores del sistema eléctrico se ven en la necesidad de buscar minimizar los costos y maximizar las ganancias; como consecuencia, se coloca al sistema en condiciones de mayor estrés, elevando los niveles de potencia en las líneas de transmisión y en las centrales eléctricas [13]. Cuando un sistema es sobrecargado corre el riesgo de degradarse por la salida en cascada de elementos como líneas de transmisión o transformadores de potencia [17]. Esta degradación del sistema puede provocar la formación de islas eléctricas, que se caracterizan por grandes desbalances entre las potencias generadas y demandadas [16], [17]. En la actualidad, el proceso de la descomposición de un sistema por la desconexión en cascada de muchos elementos es poco comprendido. Sin embargo, se sabe que, debido a su vastedad y



complejidad, la red eléctrica presenta características propias de sistemas caóticos [12], [13], [14], lo que hace que las interrupciones en el suministro de energía sean impredecibles e intrínsecos a los sistemas de potencia [9], [16]. Es por ello por lo que la mejor estrategia ante éstos no es evitarlos, si no reducir los daños que producen [15].

Para la ampliación y modernización del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) debe proponer ante la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Reguladora de Energía (CRE) un programa de desarrollo en el cual se considere las características técnicas y del mercado eléctrico [11], [17], este programa debe incluir estudios dinámicos ante distintas condiciones operativas [19]. Algunos de los disturbios más severos que deben de ser considerados en estos estudios son la pérdida de bloques de generación y de demanda, ante las cuales se podría presentar inestabilidad en el voltaje [19].

La necesidad de la estabilidad de los parámetros eléctricos es la base para obtener una buena regulación de voltaje en el sistema, para poder transmitir grandes cantidades de energía eléctrica y así mantener en operación el creciente aumento de la transmisión y el consumo de electricidad, esto ha provocado la construcción de nuevos corredores de la red transmisión y el fortalecimiento de otros existentes para así brindar mayor confiabilidad a los usuarios, lo que se traduce en la construcción de circuitos de alimentadores de transmisión, en arreglos de circuitos paralelos y montadas sobre una misma estructura o torre, o la necesidad de la futura construcción de compensadores fijos en la Subestación.[1][18]. La intención de este estudio es documentar el estudio de análisis de flujos de potencia, que puede mantener las condiciones de transferencia de energía y ayudar a mantener la estabilidad del voltaje, así como modificar su estructura en la S.E. El Salto.



1.7 Aportaciones

- Se realiza el estudio de corridas de flujo de potencia en el punto de interconexión (S.E. El Salto), con el SOTFWARE WS500, para verificar los datos voltajes cumplan con lo estipulado en el Código de RED.
- Se realiza simulaciones con el SOTFWARE PSSE, para comparar el comportamiento dinámico de los tres escenarios de Demanda (Demanda Mínima, Media y Máxima) en las barras de 85kv de S.E. El Salto.
- Se desarrollará con el software PSSE, simulaciones de la parte reactiva necesaria para la regulación del voltaje, en el sistema eléctrico (nodo S.E. El Salto), para que mantenga el rango necesario de voltaje marcados en el código de red, mediante un reactor estático en las barras de 85kv de dicha subestación para cumplir el propósito marcado en la ilustración 3 “estado operativo normal”.



1.8 Estado del Arte.

Se realizó una caracterización de los métodos de análisis de estabilidad más utilizados en el Software PSSE y se planteó a partir de ellos indicadores que sean posibles de aplicar y evaluar computacionalmente en el análisis de estabilidad de tensión.

Se seleccionó el sistema de la red del nodo de S.E. El Salto, al cual se le identificaron diferentes condiciones de operatividad, se cuenta con todos sus parámetros y con sus reportes dados en la literatura para analizar estabilidad de tensión. Además, se cuenta con datos para su comparación y validación. Se analizaron las condiciones de equilibrio del sistema, con el fin de hacer el análisis del sistema en estado estable alrededor de tales condiciones de las demandas (Demanda Mínima, Media y Máxima).

Posteriormente, se realizaron simulaciones sobre el Nodo de S.E. EL Salto y sus buses remotos, para caracterizar la dinámica de cada uno de los nodos, con el fin de hacer análisis de sensibilidad de las tensiones ante cambios en la potencia reactiva. Y con los resultados obtenidos de las simulaciones inferir acerca de las condiciones de estabilidad de tensión, las condiciones de transferencia de energía y ayudar a mantener la estabilidad de voltaje del voltaje en la red de 85kv de la ZOTP.

Por ultimo los resultados obtenidos en las simulaciones del software PSSE con la red de la ZOTP, nos llevan a que la mejor opción es colocar en las barras de 85kV de la subestación el Salto un reactor fijo de -70MVars, mismo que con esto cumplimos el >5% del voltaje superior a necesitar, en dicho nodo eléctrico, ya que lo máximo en el mismo es de 89.25kV y lo obtenido es 88.94%kV niveles de aceptación marcado en el código de RED. .



CAPITULO 2

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS Y MODELADO DE ELEMENTOS MARCO DE REFERENCIA

2.1.1 Introducción

Para comprender la forma en que interactúan los diferentes elementos de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), es necesario analizar el comportamiento de cada uno de ellos en forma independiente, cada uno de ellos presenta un comportamiento característico que lo distingue de los demás [1]. Puede suponerse que la forma de onda del voltaje en las barras de un sistema de potencia es puramente sinusoidal y de frecuencia constante. La mayor parte del desarrollo teórico, esta representada con las representaciones fasoriales de voltajes y corrientes sinusoidales, y se usaran las letras V e I para indicar estos fasores.[2].

En este primer capítulo se revisan conceptos fundamentales para analizar fenómenos donde interviene de manera relevante la potencia reactiva. En los desarrollos se consideran modelos simplificados, lo que ayuda a la comprensión de las ideas principales. Se modelan los siguientes elementos [1][21]:

- Reactores
- Capacitores
- Transformadores
- Líneas de Transmisión

2.2 Potencia eléctrica activa y reactiva

A pesar de que la teoría fundamental de la transmisión de energía describe su preparación en términos de interacción de campos eléctricos y magnéticos, por lo general el ingeniero en potencia están más interesado en el cambio de la energía con respecto al tiempo [1]. La potencia es la razón de cambio de la energía con respecto al tiempo. La unidad de potencia es un watt. que es igual a un joule por segundo. En lugar de decir que una carga absorbe energía a una Joule dada por la potencia. es común decir que una carga absorbe potencia. La potencia instantánea en watts absorbida por una carga eléctrica es el producto de la tensión instantánea entre los extremos de la carga en volts. y la corriente instantánea hacia la carga en amperes. Suponga que la tensión en la carga es: [19]



$$v(t) = V_{max} \cos(\omega t + \delta) \text{ volts} \tag{1.3}$$

En seguida se investiga la potencia instantánea absorbida por carga puramente resistiva, puramente inductivas, puramente capacitivas y con cargas RLC en general. También se introducen los conceptos de potencia real, factor de potencia y potencia reactiva [10].

2.2.1 CARGA RESISTIVA

Para una carga puramente resistiva, la corriente hacia la carga está en fase con la tensión en la misma, $I=V/R$ y la corriente en la carga resistiva es:

$$i_R(t) = I_{RMAX} \cos(\omega t + \delta) A \tag{1.4}$$

En donde $I_{RMAX}=V_{MAX}/R$. La potencia instantánea es absorbida por el resistor es:

$$\begin{aligned} PR(t) &= v(t)i_R(t) = V_{max}I_{Rmax} \cos^2(\omega t + \delta) \\ &= 1/2V_{max}I_{Rmax} [1 + \cos[2(\omega t + \delta)]] \\ &= VIR [1 + \cos[2(\omega t + \delta)]] \text{ W} \end{aligned} \tag{1.5}$$

Como se indica por medio de (1.4), la potencia instantánea absorbida por el resistor tiene un valor promedio. [19]

$$P_R = VI_R = \frac{V^2}{R} = I_R^2 R, \quad W \tag{1.6}$$

De igual forma se aplica una señal de voltaje de corriente alterna a un inductor de la forma $v = V_m \sin \omega t$, obteniéndose como respuesta una corriente a través del tipo

$i = -I_m \cos \omega t$, recordando que la relación entre voltaje y corriente es $v = L di / dt$, por lo tanto la potencia instantánea a través del elemento se expresa mediante la ecuación se expresa mediante la ecuación (1.4). La Ilustración 4, muestra gráficamente las variables eléctricas de un inductor ante una excitación senoidal. [2]

$$p_L = -V_m I_m \sin \omega t \cos \omega t \tag{1.7}$$

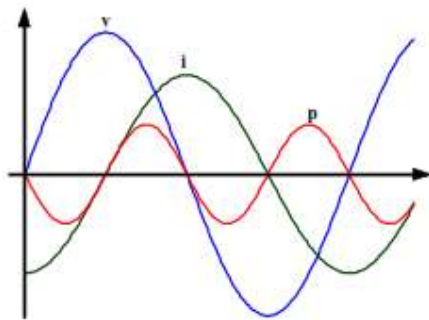


Ilustración 4 Variación con respecto al tiempo de V , I y P para una inductancia

Es interesante observar a partir de la Figura anterior que la potencia instantánea en un inductor varia en el tiempo con una frecuencia igual al doble de la frecuencia del voltaje aplicado. Además, toma valores positivos y negativos con amplitudes máximas iguales lo que lleva a concluir que la onda de potencia instantánea tiene un valor promedio cero.

Caso similar ocurre cuando se le aplica en terminales de un capacitor un voltaje $v = V_m \text{ sen} \omega t$, circulando a través del elemento una corriente de la forma

$i = I_m \text{ cos} \omega t$, la potencia instantánea es el producto de estas dos señales, por lo que se llega a la expresión (1.8), la ilustración 4 presenta en forma gráfica las señales eléctricas en un capacitor.[2]

$$p_L = V_m I_m \text{ sen} \omega t \text{ cos} \omega t$$

(1.8)

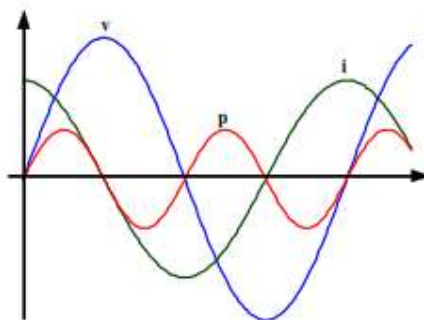


Ilustración 5 Variación de tiempo de v , i y p para una capacitancia

De las gráficas anteriores se observa que la potencia suministrada a un elemento puramente inductivo o capacitivo es absorbida durante un cuarto de la onda de voltaje y devuelta a la fuente durante el siguiente cuarto de la onda. Se puede decir que la potencia en estos dos elementos tiene un comportamiento reactivo, por lo que puede decirse que es una potencia reactiva. A diferencia de la potencia en un elemento puramente resistivo en el cual siempre es positiva, por lo que puede considerarse como una potencia activa.

Si ahora se analiza el comportamiento de la potencia eléctrica instantánea en un circuito más general, es decir, uno que contenga resistencia, inductancia y capacitancia como se muestra en la Ilustración 6, al cual se le energiza con una señal de voltaje alterna del tipo $v = V_m \text{sen} \omega t$, obteniéndose una respuesta también alterna de la forma $i = I_m \text{sen}(\omega t + \phi)$.

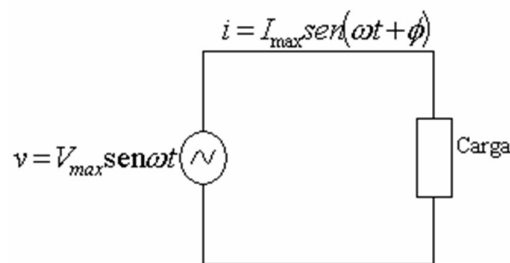


Ilustración 6 Circuito eléctrico con elementos R , L y C .

La potencia eléctrica en el circuito será entonces:

$$p = V_m I_m \text{sen} \omega t \text{sen}(\omega t + \phi)$$

(1.9)

utilizando identidades trigonométricas y manipulando la ecuación anterior puede reescribirse como:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} [\cos \phi (1 - \cos 2\omega t) + \text{sen} \phi \text{sen} 2\omega t]$$

(1.10)

La potencia instantánea se descompone en dos términos; recordando que los valores



máximos pueden ser expresados como valores eficaces utilizando la relación $|V| = V_m/\sqrt{2}$, por lo tanto, se tiene:

$$(P) = |V||I|\cos\phi(1 - \cos 2\omega t) + |V||I|\sin\phi\sin 2\omega t \tag{1.11}$$

En (1.12) se observa que la potencia instantánea oscila alrededor de un valor promedio dado por el primer término de la expresión, con la particularidad de que nunca se hace negativa, mientras que el segundo término tiene un valor promedio cero. Definiendo entonces las siguientes cantidades:

| | |
|----------------------|-------------------|
| $P = V I \cos\phi$ | Potencia Activa |
| $P = V I \sin\phi$ | Potencia Reactiva |

(1.12)

Sustituyendo (1.08) en (1.09) se simplifica la expresión:

$$p = P (1 - \cos 2\omega t) + Q\sin 2\omega t \tag{1.13}$$

En la Ilustración 7, se tiene la variación de la potencia instantánea con respecto al tiempo, así como las variables voltaje y corriente para el circuito de la ilustración 6.

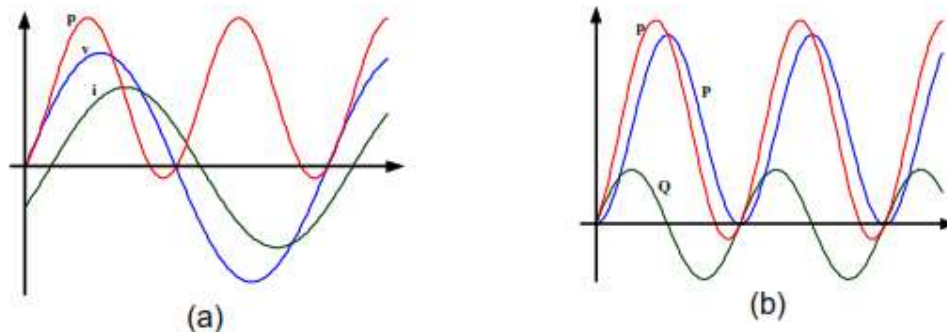


Ilustración 7 Variación con respecto al tiempo de v , i y p para un circuito RLC

En la ilustración 7 (a) y (b) se observa que la potencia instantánea toma valores negativos durante ciertos periodos de tiempo, indicando con esto que la energía fluye en esos momentos de la carga al generador.

De las expresiones y gráficas anteriores se puede concluir que la Potencia Activa se define como el valor promedio alrededor del cual oscila la potencia instantánea, por lo que representa la potencia útil, aquella que es capaz de realizar un trabajo o que se disipa en forma de calor. Mientras que la Potencia Reactiva se define como el valor pico de una de las componentes de la potencia instantánea, cuyo valor promedio es cero y que por lo tanto no es capaz de realizar trabajo útil, pero que se desplaza continuamente del generador a la carga y viceversa. [2]

2.3 Potencia compleja

Se puede hacer el cálculo en forma compleja y de manera conveniente de las potencias real y reactiva, si las expresiones fasoriales del voltaje y de la corriente son conocidas. Para facilitar el análisis de comportamiento de redes eléctricas en régimen permanente, cuando estas son excitadas por señales de tipo alterno, se desarrolló una transformación denominada fasorial, mediante la cual una función del tipo senoidal puede representarse por un número complejo denominado fasor.[1][2]

Considerando el circuito eléctrico elemental mostrado en la siguiente figura:

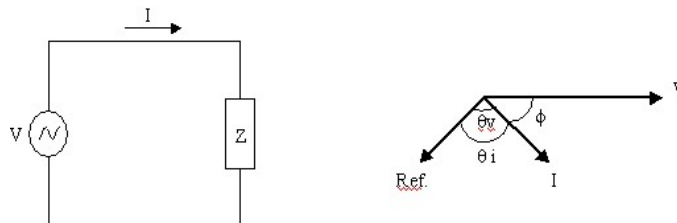


Ilustración 8 Circuito Eléctrico Monofásico

El voltaje y la corriente del circuito se pueden expresar en forma fasorial como:

$$V = |V|e^{j\theta v} = |V|(\cos\theta v + j\text{sen}\theta v)$$

$$I = |I|e^{j\theta i} = |I|(\cos\theta i + j\text{sen}\theta i)$$

(1.14)

De acuerdo con la condición original de potencia instantánea dada por $p=vi$, la potencia compleja se define como:

$$S = VI = |V|e^{j\theta v} * |I|e^{j\theta v} = |V||I|e^{j(\theta v-\theta i)}$$

$$S = |V||I|\cos\phi + j|V||I|\text{sen}\phi$$

$$S = P + jQ$$

(1.15)

La relación que existe entre potencia aparente, reactiva y activa puede ser visto en forma gráfica utilizando lo que se conoce como triángulo de potencia, el cual se muestra en la siguiente Figura: [1][2][21]

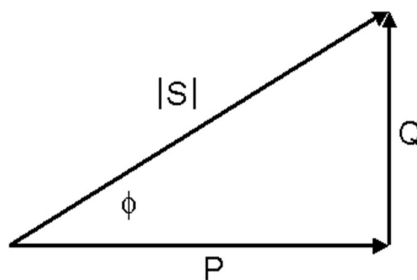


Ilustración 9 Triángulo de Potencias

Del triángulo de potencia se obtienen las expresiones:

$$S = V * I = P + jQ$$

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\cos\phi = \frac{P}{S}$$

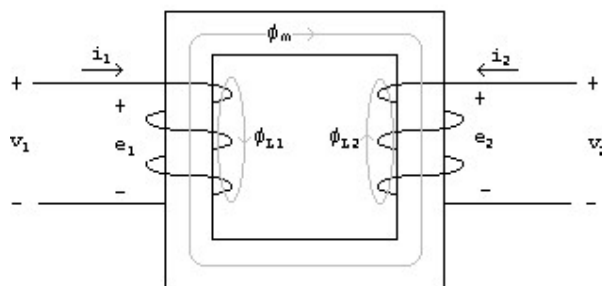
(1.16)

En donde $\cos \phi$ representa una medida de la cantidad de potencia útil que está siendo consumida por el elemento, por lo que al $\cos \phi$, se le conoce como factor de potencia, el cual, al multiplicarlo por la potencia aparente, resulta en la potencia activa que el elemento consume.[1][2]

2.4 Modelado de transformadores

Los transformadores son enlaces entre los generadores del sistema de potencia y las líneas de transmisión y entre líneas de diferentes voltajes. Constituyen los elementos de unión entre redes eléctricas de diferente nivel de tensión. La función primordial que desempeñan consiste en elevar los voltajes de generación a los niveles de transmisión que son requeridos para disminuir pérdidas; y en los puntos de carga disminuir los voltajes de transmisión hasta los niveles adecuados para las redes de distribución. Mediante estos equipos se logra principalmente el control sobre el voltaje y la distribución de potencia reactiva, aun cuando algunos diseños especiales permiten cierto control sobre la potencia activa.[1][2]

De acuerdo con la ley de Faraday, si se enrolla un segundo conductor en el núcleo de material ferromagnético se obtendrá una fuerza electromotriz inducida en las terminales de dicho conductor.



2.4.1 Circuito equivalente del transformador monofásico

En esta sección se presenta el desarrollo del circuito equivalente del transformador monofásico, basado en una formulación matricial. No se modelan los efectos de la corriente de excitación, debido a que no influye sustancialmente en los estudios de flujos y fallas. La

Ilustración 10 Representación esquemática de un transformador monofásico

ilustración 11 muestra el circuito equivalente de un transformador monofásico.[1][2]

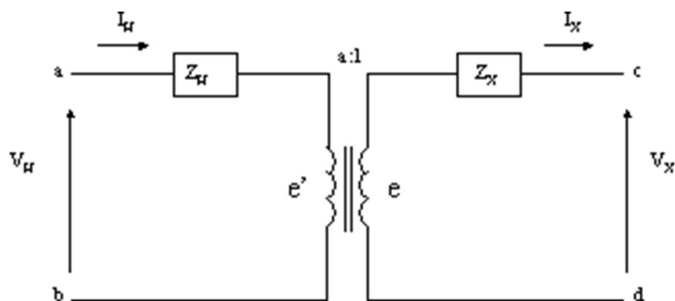


Ilustración 11 Circuito equivalente de un Transformador Monofásico

Donde:

Z_H Impedancia del devanado H

Z_X Impedancia del devanado X

e, e' Voltajes inducidos en los devanados

n_H Número de vueltas del devanado H

n_X Número de vueltas del devanado X

La relación de transformación se define en función del número de vueltas de cada devanado o de los voltajes a circuito abierto como sigue:

$$a = \frac{n_H}{n_X} + \frac{V_H}{V_X} \quad (1.17)$$

Considerando un transformador ideal, en el cual se mantiene el balance de potencia en ambos lados del transformador, es decir, $V_H I_H = V_X I_X$ por lo que la

relación de transformación puede también expresarse como:

$$a = \frac{I_X}{I_H} + \frac{I_X}{I_H} \quad (1.15)$$

De la relación de transformación y del circuito de la ilustración 11, se obtienen las



siguientes relaciones entre las variables de los devanados:[1][2]

$$I_X = a I_H$$

$$e' = ae$$

(1.18)

$$e = I_X Z_X + V_X$$

(1.19)

$$V_H = I_H Z_H + e'$$

(1.20)

Sustituyendo

$$e' = a^2 I_H Z_H + a V_X$$

(1.21)

Sustituyendo (1.18) en (1.20) en (1.19)

$$V_H = I_H Z_H + a^2 I_H Z_H + a V_X$$

$$V_H = (Z_H + a^2 Z_X) I_H + a V_X$$

$$V_H = Z_{HX} I_H + a V_X$$

(1.22)

Donde:

$$Z_{HX} = Z_H + a^2 Z_X$$

(1.23)

La impedancia Z_{HX} es la impedancia total del transformador medida desde el lado H. El circuito equivalente que representa la expresión (1.22) se muestra en la ILUSTRACIÓN 12 , además, si se desea conocer la impedancia del transformador medida desde el lado X, se sigue un procedimiento similar al anterior llegando a: [1][2]

$$Z_{HX} = Z_X + (1/a^2) Z_H$$

(1.24)

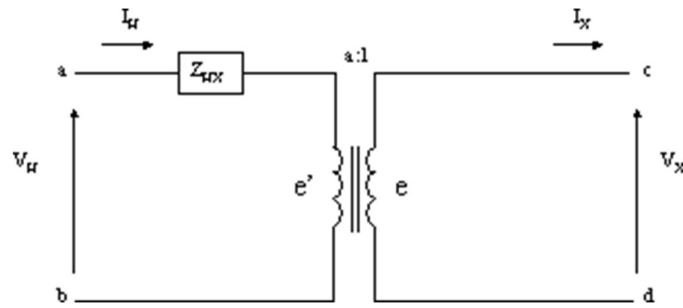


Ilustración 12 Circuito equivalente con la impedancia referida al lado H.

Siempre será posible agrupar la impedancia de los dos devanados en uno sólo de ellos por medio de las ecuaciones. Un caso más general es el que contempla la posibilidad de tener cambio de tap en ambos devanados del transformador, como se muestra en forma reducida en la siguiente Figura:

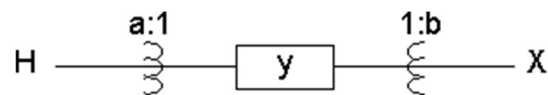


Ilustración 13 Representación unifilar del Transformador con Taps en ambos devanados.

Para este transformador con dos taps, se encontrará un circuito equivalente utilizando la técnica de superposición de efectos, que consiste en alimentar un voltaje en una terminal, aterrizar las restantes y encontrar la inyección de corriente en cada una de las terminales. En la ilustración 14 el valor de impedancia del transformador se ha convertido en admitancia, con el objeto de formar más fácilmente el circuito equivalente del transformador, construyendo la matriz de admitancias correspondiente.:



Alimentando en la terminal *a* del circuito, se tienen las condiciones mostradas a continuación:

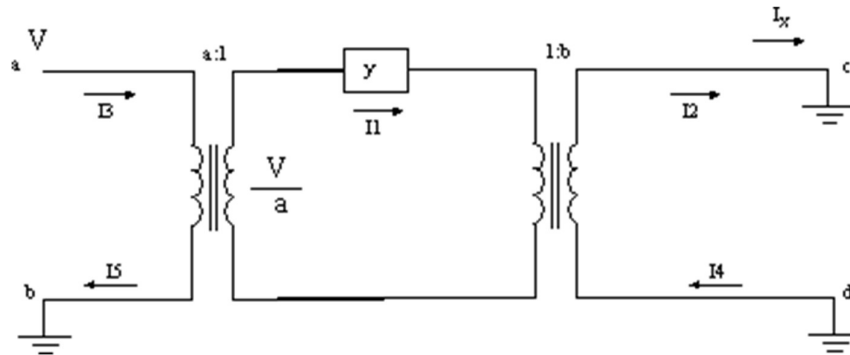


Ilustración 14 Representación del Transformador monofásico

Si para el circuito de la Figura anterior se considera por convención que las corrientes entrando a cada nodo son positivas, se tiene:

$$I_1 = \frac{y}{a} V$$

$$I_4 = I_2 = \frac{I_1}{b} = \frac{y}{ab} V = -I_c = I_d$$

$$I_5 = I_3 = \frac{I_1}{a} = \frac{y}{a^2} V = I_a = -I_b$$

(1.25)

Por inspección de esta matriz de admitancias se construye el circuito equivalente que se muestra en la ilustración 15. Este circuito equivalente resulta adecuado para modelar al transformador monofásico en estudios de flujos y fallas, incluyendo los efectos de taps en ambos devanados.

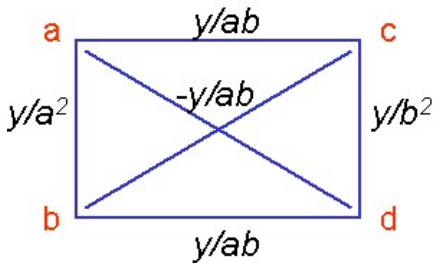


Ilustración 15 Equivalente del transformador monofásico con taps en ambos devanados.

Para el caso particular de que las terminales b y d se encuentran aterrizadas, desaparecen la segunda y cuarta columnas, así como los respectivos renglones de la matriz de admitancias, por lo que se reduce a la forma siguiente:

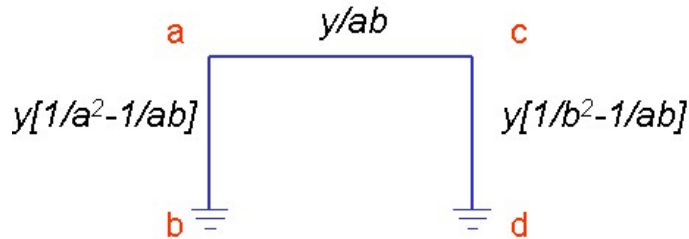


Ilustración 16 Equivalente del transformador monofásico con taps en ambos devanados.

Para analizar el efecto del cambio de tap en uno de los devanados se considera que tap en el otro devanado permanece sin cambio. Si el tap en el lado c-d es unitario, $b=1$, el circuito equivalente la ilustración 16, se simplifica al mostrado a continuación:

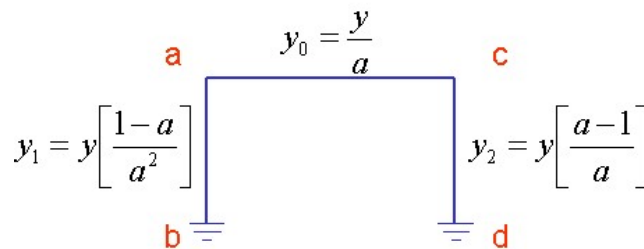


Ilustración 17 Equivalente del transformador monofásico con tap en un devanado.

Analizando las ramas del circuito equivalente de la Ilustración 17 se puede observar que dependiendo de la posición del cambiador de tap se tienen una rama en derivación con comportamiento capacitivo y otra con comportamiento inductivo, o viceversa. En la Tabla 1.1 se muestra la naturaleza de las ramas del circuito equivalente para diferentes valores de la relación de transformación.

Tabla 1.1

| Rama | $a < 1$ | $a > 1$ |
|-------|------------|------------|
| y_0 | Inductiva | Inductiva |
| y_1 | Inductiva | Capacitiva |
| y_2 | Capacitiva | Inductiva |

El flujo de potencia reactiva en el transformador estará gobernado por la posición del cambiador de tap. Cuando la posición del tap sea diferente a la nominal, la tendencia natural del flujo de potencia reactiva será desde la rama capacitiva hacia la rama inductiva, a menos que las condiciones del sistema impongan otra restricción.

2.4.2 Circuito equivalente del transformador trifásico

Un banco trifásico es la interconexión de tres unidades monofásicas para formar la unidad trifásica. Por ejemplo, en la Ilustración 18 se muestra una unidad trifásica con conexión delta-estrella. La conexión del transformador se representa en forma vectorial como se muestra en la ilustración 19.

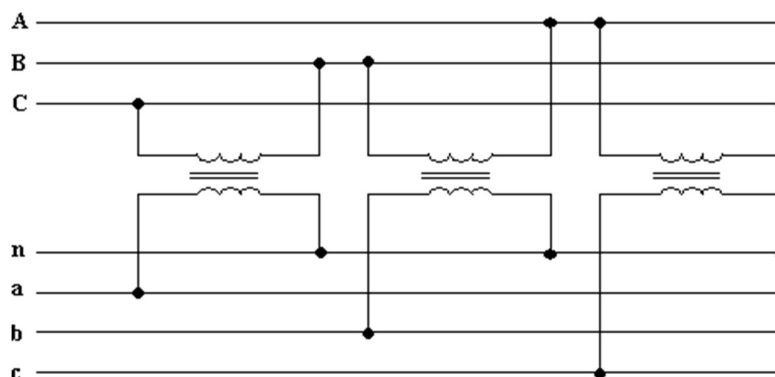


Ilustración 18 Conexiones de un transformador en conexión delta-estrella.

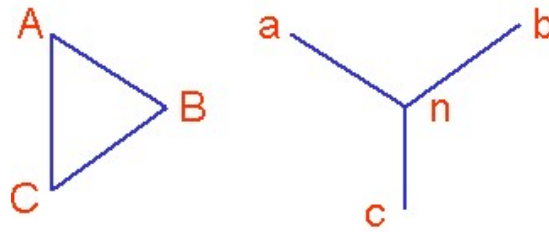


Ilustración 19 Diagrama vectorial de la conexión delta-estrella

Donde las líneas paralelas en el diagrama vectorial indican las conexiones magnéticas entre primario y secundario del transformador trifásico, de tal manera que la fase A-B de la delta está magnéticamente acoplada con la fase a-n de la estrella; B-C con la fase b-n y C-A con c-n; y así, con esta representación, y con el circuito equivalente generalizado de un transformador monofásico se parte para modelar una banco trifásico compuesto de tres unidades monofásicas.

Extrayendo las ecuaciones de secuencia positiva de se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_p^1 \\ I_o^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y/a^2 & -y/ab \\ -y/ab & y/b^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p^1 \\ V_o^1 \end{bmatrix}$$

(1.26)

La matriz de admitancias resulta idéntica a la de un transformador monofásico con dos terminales aterrizadas. El circuito equivalente es el siguiente:

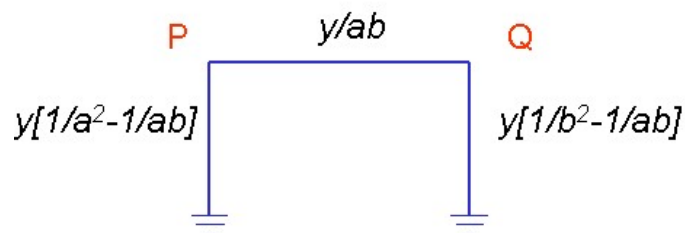


Ilustración 20 Circuito equivalente de secuencia positiva



2.4.3 Transformador de tres devanados

En la Ilustración 21 se muestra un diagrama del circuito equivalente de un transformador de tres devanados que se designan como primario p , secundario s y terciario t . Las tres impedancias se pueden medir mediante las pruebas de corto circuito. Las impedancias son medidas en el lado al cual se le aplica el voltaje y se denominan como:

Z_{ps} Impedancia medida en el primario, con el secundario en corto circuito y el terciario abierto.

Z_{pt} Impedancia medida en el primario, con el terciario en corto circuito y el secundario abierto.

Z_{st} Impedancia medida en el secundario, con el terciario en corto circuito y el primario abierto.

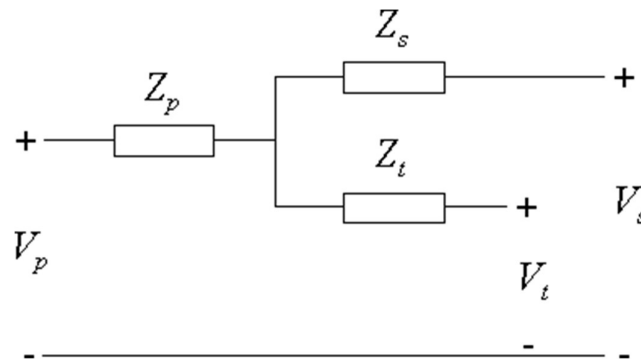


Ilustración 21 Circuito Equivalente de un Transformador de tres devanados

Si las tres impedancias medidas en ohms se refieren al voltaje de uno de los devanados, las impedancias de cada devanado por separado, referidas al mismo devanado, están relacionadas con esas impedancias medidas y referidas como sigue:

$$Z_{ps} = Z_p + Z_s$$

$$Z_{pt} = Z_p + Z_t$$

$$Z_{st} = Z_s + Z_t$$

(1.27)

En donde Z_p , Z_s y Z_t son las impedancias de los devanados primario, secundario y terciario, referidas al circuito primario si Z_{ps} , Z_{pt} y Z_{st} son las impedancias medidas referidas al circuito primario. Resolviendo las ecuaciones, se obtiene:

$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s &= \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t &= \frac{1}{2}(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \end{aligned}$$

(1.28)

Las impedancias de los tres arrollamientos están conectadas en estrella para representar el circuito equivalente monofásico del transformador de tres devanados, despreciando la corriente magnetizaste. [1][2][21]

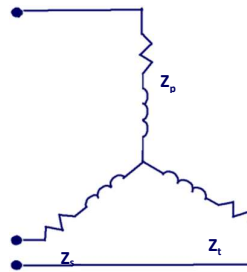


Ilustración 22 Circuito equivalente de un transformador de tres devanados.

El análisis de un transformador lleva a la conclusión de que para referir el valor óhmico de una impedancia de un nivel de voltaje en un lado de un transformador trifásico al nivel de voltaje en el otro lado, el factor de multiplicación es el cuadrado de la relación de los voltajes línea a línea sin importar si la conexión del transformador es Y-Y o Y-D. esto se muestra en la ilustración 23, en la cual se resumen las relaciones para la relación de espiras o vueltas efectivas de diferentes tipos de conexiones de transformadores. Por lo tanto, en los cálculos en por unidad que involucran transformadores en circuitos trifásicos, se requiere que los voltajes base en los dos lados del transformador tengan la misma relación que la de los voltajes línea a línea nominales en ambos lados. La base de kilo-voltamperes es la misma para ambos lados. [1][2][21]

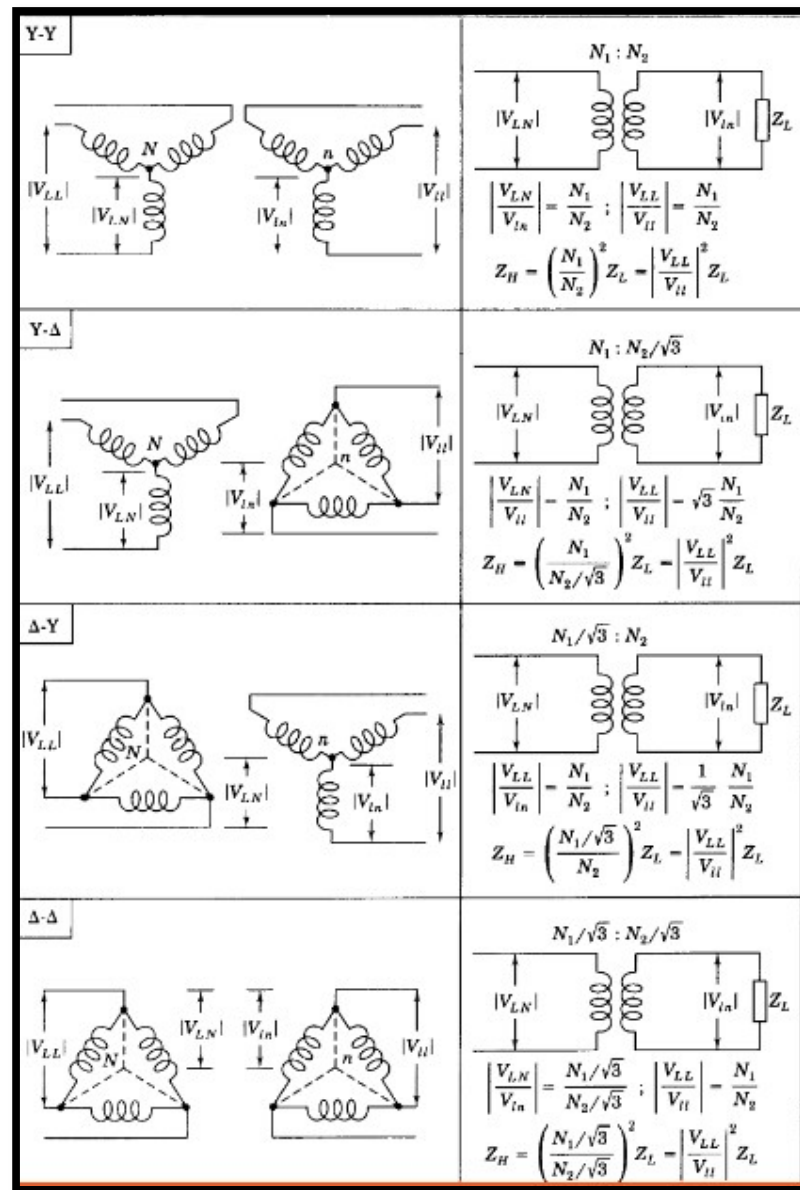


Ilustración 23 Referencia óhmica de impedancias monofásicas de un transformador trifásico.

2.6 Modelado de líneas de transmisión

Las líneas de transmisión ocupan un lugar importante en la operación de una red eléctrica. Tanto por el número, como por la extensión territorial que abarcan, constituyen los elementos del SEP que están sujetos a un mayor riesgo de falla. Por otro lado, aun cuando se conoce de manera práctica el comportamiento de líneas de transmisión típicas, ya sea por medio de curvas de cargabilidad o por experiencia operativa, la gran diversidad de condiciones de operación del SEP exige la obtención de modelos que la representen adecuadamente y que permitan obtener resultados de simulación confiables. Se analizan los cuatro parámetros básicos de la" líneas de transmisión: la resistencia serie, la inductancia serie, la capacitancia en derivación y conductancia en derivación. También se investigan los campos eléctrico y magnético en las líneas de transmisión. La resistencia serie está relacionada con las pérdidas óhmicas (I^2R) en la línea. La impedancia serie, incluyendo la resistencia y la reactancia inductiva, da lugar a las caídas de tensión en serie a lo largo de la línea. La capacitancia en derivación da lugar a las corrientes de carga de la línea. La conductancia en derivación está relacionada con las pérdidas V^2G de la línea debidas a las corrientes de fuga entre los conductores o entre los conductores y tierra. Usualmente se desprecia la conductancia en derivación de las Líneas aéreas.[9]

2.6.1 Conductores Compuestos y el Radio Geométrico

Los conductores compuestos o haces de conductores son utilizados con frecuencia en líneas de transmisión de alto voltaje. Este recurso es más utilizado que el uso de conductores expandidos que utilizan un relleno de papel entre sus diferentes capas de aluminio y acero para incrementar el radio del conductor, reducir de esta manera el gradiente de potencial en la superficie del conductor y a su vez el efecto corona.

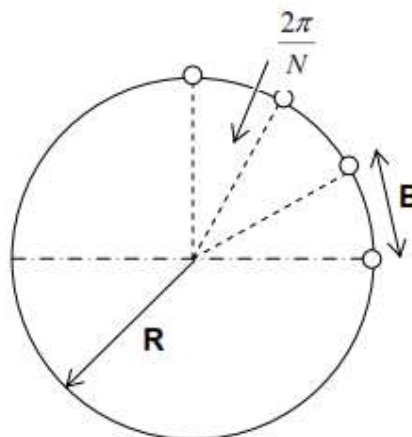


Ilustración 24 Disposición geométrica de conductores en un haz.



B Espaciamiento entre conductores adyacentes

R Radio del haz de conductores

N Número de subconductores en un haz

Para un gran número de aplicaciones y en los cálculos correspondientes a haces formados por N subconductores, se puede reemplazar el arreglo por un conductor único con un radio equivalente. A este radio equivalente se le conoce como radio medio geométrico o simplemente radio equivalente y se calcula de la siguiente manera, como lo indica (1.34).[2][9]

$$r_{eq} = R * \left(N * \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{N}}$$

(1.29)

r Radio de cada subconductor, suponiendo N subconductores iguales

R Radio de la circunferencia de la configuración del haz

La ecuación anterior describe el radio equivalente de una configuración de conductores, se considera que el ordenamiento de los conductores es equidistante de manera que una circunferencia imaginaria pase a través de los N subconductores del haz.

Por ejemplo, para calcular el radio medio geométrico de un haz de conductores de una línea de alto voltaje, 1,000 kV, que tiene seis subconductores de diámetro de 4.6 cm cada uno y una distancia $B = 12 d$, de separación entre subconductores adyacentes, en configuración circular, y cada subconductor separado de conductores adyacentes en 60 grados.

Si se observa en la ilustración 24, se tiene que, para seis subconductores, el radio R es igual a la distancia B , que hay entre conductores adyacentes, de modo que el radio equivalente se calcula por:

$$r_{eq} = \sqrt[6]{6 r R^5} = \sqrt[6]{6 \left(\frac{0.046}{2}\right) [(12)(0.046)]^5} = 0.4381 \text{ mts.}$$

(1.30)

A medida que el número de subconductores se incrementa, el radio equivalente también aumenta, acercándose al radio R de la configuración del haz de conductores.[1][2]

2.6.2 Resistencia Equivalente

La resistencia de los conductores de las líneas de transmisión es la causa más importante de pérdida de potencia de los conductores. Las líneas de alto voltaje son siempre conductores trenzados y generalmente los conductores más utilizados son de aluminio con refuerzo de acero (ACSR) o conductor de aluminio con refuerzo de aluminio (ACAR). Si se utiliza refuerzo de acero, debido a su alta permeabilidad e inductancia, la corriente tiende a circular por los hilos de aluminio externos, de modo que en los conductores tipo ACAR la sección transversal es mejor utilizada.[1][2]

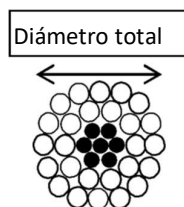


Ilustración 25 Conductor trenzado 26 AL/7 Fe, en dos capas cada uno.

La resistencia de los conductores de las líneas de transmisión es la causa más importante de pérdida de potencia en ella. El término “resistencia”, a menos que sea calificado específicamente, se refiere a resistencia efectiva. La resistencia efectiva de un conductor es:

$$R = \frac{\text{pérdida de potencia en el conductor}}{I^2} \text{ ohm}$$

(1.31)

De un conductor trenzado por cada kilómetro puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$R = \rho_a * \frac{1.05 * 10^3}{\pi * d_s^2 * \frac{n_s}{4}}$$

(1.32)

ρ_a Resistencia específica del aluminio, en ohms-km a una temperatura T

d_s Diámetro de cada hilo en metros

n_s Número de hilos de aluminio

El factor de valor 1.05 toma en cuenta el incremento en la longitud del hilo debido al trenzado, considerando así un 5 % de aumento en la longitud efectiva.

Los efectos de la resistencia en conductores de alto voltaje se pueden listar como:

- Pérdidas en la transmisión por calentamiento $I^2 R$.
- Reducción de la capacidad de conducción de corriente en regiones geográficas con altas temperaturas ambientales.
- Afecta la atenuación de la onda viajera debida a descargas atmosféricas y operaciones de maniobra. [1][2].

2.6.3 Efecto Inductivo

La inductancia de una línea de transmisión se calcula como enlaces de flujo por ampere. Si la permeabilidad μ es constante, la corriente sinusoidal procede flujos que varían sinusoidalmente en fase con la corriente. Entonces los enlaces de flujo resultantes se pueden expresar como el fasor λ , y

$$L = \frac{\lambda}{I} [2]$$

(1.33)

El efecto inductivo de conductores que llevan una corriente alterna se puede dividir en un efecto interno al conductor y otra porción debida al flujo magnético exterior que se establece por la corriente que lleva el conductor.

2.6.4 Inductancia debida al flujo interno

La inductancia debida al flujo interno es la inductancia resultante al considerar el efecto piel del conductor.

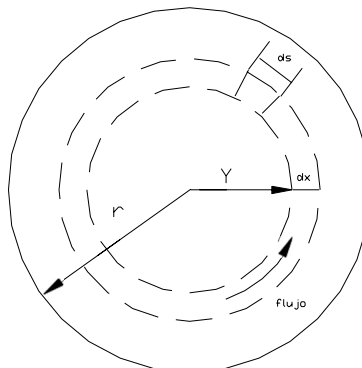


Ilustración 26 Sección transversal de un conductor de radio r.



A una distancia Y del centro de conductor de radio r , donde $Y < r$, como lo muestra la ilustración 26, la Ley circuital de Ampere está dada por:

$$\oint H \cdot dL = I_{encerrada}$$

(1.34)

donde:

H es la intensidad del campo magnético

Considerando una densidad de corriente uniforme J , la corriente encerrada hasta la distancia Y es:

$$I_Y = \frac{Y^2 I}{r^2}$$

(1.35)

Entonces:

$$\oint H \cdot dL = H_Y 2\pi Y = \frac{Y^2 I}{r^2}$$

(1.36)



La densidad de energía almacenada en el campo magnético es:

$$w_Y = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r H_Y^2 = \frac{I^2 \mu_0 \mu_r}{8 \pi^2 r^4} Y^2 \quad \text{Joules / m}^3 \quad (1.37)$$

Además, la energía total almacenada en el campo magnético, hasta el radio r , se puede calcular como:

$$\frac{1}{2} L_i I^2 = \int_0^r dW = \int_0^r 2 \pi Y w_Y dY = \frac{\mu_0 \mu_r}{16 \pi} I^2 \quad (1.38)$$

Consecuentemente:

$$L_i = \frac{\mu_0 \mu_r}{8 \pi} \quad H / m \quad (1.39)$$

2.6.5 Inductancia en una línea de dos conductores.

Si se considera dos conductores, cada uno de radio r y con una separación entre centros dada por D , conduciendo una corriente I y $-I$, se obtiene la expresión de los enlaces de flujo e inductancia.

Se puede considerar que el mismo efecto se puede obtener con un conductor único a una altura $H = D/2$ sobre el plano de tierra. Observando que una línea de flujo, externa a ambos conductores enlaza una corriente total cero, de modo que la intensidad de campo magnético es cero. Por lo tanto, todo el flujo existe entre los dos conductores, desde r hasta $D - r$.

Los enlaces de flujo del conductor 1, tiene dos componentes, la primera debida a la corriente I , sin considerar el flujo interno.

$$\psi_{11} = \int_r^{D-r} d\psi_{11} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} I \int_r^{D-r} \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} I \ln \left(\frac{D-r}{r} \right) \quad (1.40)$$



Al tomar en cuenta el efecto de la corriente en el segundo conductor y por la regla de Fleming, la cual muestra que el flujo debido a la corriente en el segundo conductor está en la misma dirección que el establecido por la corriente en el primer conductor. Entonces se encuentra que el flujo que enlaza al primer conductor, debido al segundo conductor, está dado por:

$$\psi_{12} = \int_r^{D-r} d\psi_{12} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \ln\left(\frac{D-r}{r}\right)$$

(1.41)

El flujo total que enlaza al primer conductor debido a las dos corrientes está dado por:

$$\psi_{11} + \psi_{12} = \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} I \ln\left(\frac{D-r}{r}\right) \approx \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} I \ln\left(\frac{D}{r}\right)$$

(1.42)

Entonces, la inductancia de cualquiera de los conductores se encuentra por medio de:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad H/m$$

(1.43)

Para incluir el efecto completo de los haces de conductores se sustituye al radio r por el valor del radio geométrico medio, RMG.

2.6.6 Efecto Capacitivo

Bajo la consideración de dos conductores separados una distancia $D = 2H$, con una carga de Q Coulombs/m y de polaridad opuesta, la fuerza ejercida sobre una carga de prueba positiva de valor unitario, colocada en un punto F a una distancia x del conductor 1, se tiene dada por:

$$E_F = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2H-x} \right) \text{ Newtons}$$

(1.44)

La capacitancia de una línea de transmisión es el resultado de la diferencia de potencial entre los conductores y origina que ellos se carguen de la misma forma que las placas de un



capacitor cuando hay una diferencia de potencial entre ellas. La capacitancia entre conductores paralelos es una constante que depende del tamaño y el espacio entre ellos. El efecto de la capacitancia puede ser pequeño y muchas veces se desprecia en líneas de potencia que tienen menos de 80km (50millas) de largo. Para la línea de alto voltaje más largas, la capacitancia crece en importancia.

Un voltaje alterno en una línea de transmisión tiene como consecuencia que la carga en los conductores en un punto dado aumente o disminuya con el aumento o disminución del valor instantáneo de voltaje entre los conductores en ese punto. La corriente es el flujo de carga, y la corriente que se origina por la carga y descarga alternas de una línea debidas al voltaje alterno, se conoce como corriente de carga de la línea. Como la capacitancia es una derivación entre conductores, la corriente de carga fluye en la línea de transmisión aun cuando este en circuito abierto. La capacitancia afecta tanto la caída de voltaje a lo largo de la línea, como la eficiencia, el factor de potencia de la línea y la estabilidad del sistema del cual la línea forma parte.

2.7 DIFERENCIA DE POTENCIAL ENTRE DOS PUNTOS DEBIDA A UNA CARGA

La diferencia de potencial entre dos puntos en volts es numéricamente igual al trabajo en Joules por coulomb es necesario para mover un coulomb de carga entre los dos puntos. La intensidad del campo eléctrico es una medida de la fuerza sobre una carga que esta en el campo. La intensidad del campo eléctrico en volts por metro es igual a la fuerza en newtons por coulomb sobre un coulomb de carga en el punto considerado. La integral de línea, entre los dos puntos, de la fuerza en newtons que actúa sobre un coulomb de carga positiva, es el trabajo hecho para mover la carga desde el punto de mas bajo al de mas alto potencial y es numéricamente igual a la diferencia de potencial entre los dos puntos.

Considere, como se muestra en la ilustración 27, un conductor largo y recto que lleva una carga positiva de q C/m. Los puntos P_1 y P_2 se localizan a las distancias D_1 Y D_2 metros desde el centro del conductor, respectivamente.

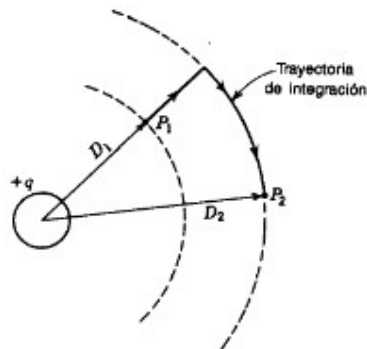


Ilustración 27 Trayectoria de integración entre dos puntos externos a un conductor cilíndrico que tiene una carga positiva distribuida uniformemente.

2.8 Representación de líneas

Las líneas de transmisión pueden ser modeladas por un sencillo circuito cuando su longitud no es demasiado larga, para lo cual es suficiente conocer R , L y C como parámetros concentrados logrando suficiente exactitud en el modelo. Sin embargo, para líneas con una longitud considerable, requieren de cálculos en términos de constantes distribuidas para lograr un alto grado de exactitud.

2.9 Línea de transmisión de longitud media

En los cálculos de una línea de longitud media se incluye la admitancia paralela. Si se divide en dos partes iguales la admitancia paralelo total de la línea y cada una se coloca en los extremos, se obtiene el llamado **circuito π nominal**, como se muestra en la ilustración 28.

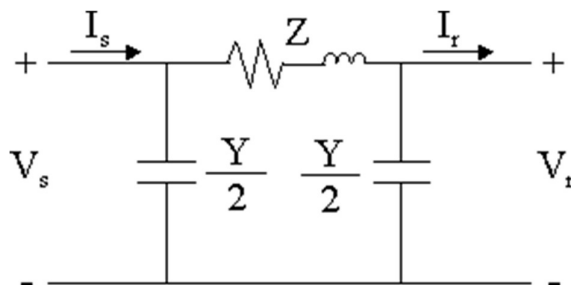


Ilustración 28 Circuito π nominal de una línea de longitud media.

$$V_s = \left(V_r \frac{Y}{2} + I_r \right) Z + V_r = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_r + ZI_r$$

$$I_s = V_s \frac{Y}{2} + V_r \frac{Y}{2} + I_r$$

(1.45)

Al sustituir V_s , se obtiene:

$$I_s = V_r Y \left(\frac{ZY}{4} + 1 \right) + \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) I_r$$

(1.46)

La ecuación (1.47) puede escribirse entonces como:

$$V_S = AV_r + BI_r$$

$$I_S = CV_r + DI_r$$

(1.47)

en donde:

$$A = D = \frac{ZY}{2} + 1, \quad B = Z, \quad C = \left(\frac{ZY}{4} + 1 \right) Y$$

(1.48)

Las constantes A, B, C y D son las constantes generalizadas de circuito de la línea de transmisión.

2.10 Línea de transmisión larga

Para una mejor representación de una línea de transmisión, es necesario tomar en cuenta que los parámetros de la línea están distribuidos uniformemente en toda su longitud. Una forma comúnmente utilizada es la suposición de que la línea está compuesta por n circuitos π equivalentes conectados en cascada; como lo muestra la Ilustración 29. El análisis se efectúa a través de un elemento diferencial de la línea, a una distancia x del extremo de recepción.

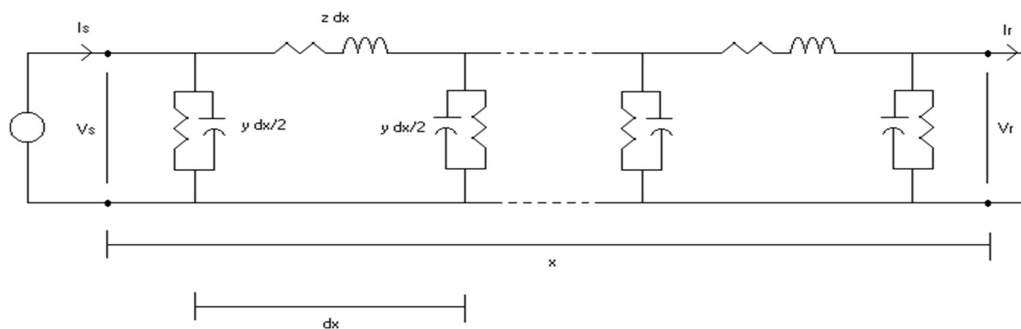


Ilustración 29 Línea de transmisión con parámetros distribuidos.

Con este procedimiento, el modelo del elemento diferencial de la línea tendrá como parámetros a $z dx$ e $y dx$, elementos serie y en derivación respectivamente. V e I son los fasores de voltaje y corriente que varían con x . En la ilustración 30, se muestra una sección

elemental para la línea de transmisión que se modela con parámetros distribuidos. El objetivo es escribir las ecuaciones del circuito equivalente

$$dV = z \, dx \left(I + \frac{dI}{2} \right) = z \, dx \, I + z \frac{dx \, dI}{2} \approx z \, dx \, I$$

$$\frac{dI}{2} = \frac{y}{2} \, dx (V + dV) = y \frac{dx}{2} V + y \frac{dx \, dV}{2} \approx y \frac{dx}{2} V$$

(1.49)

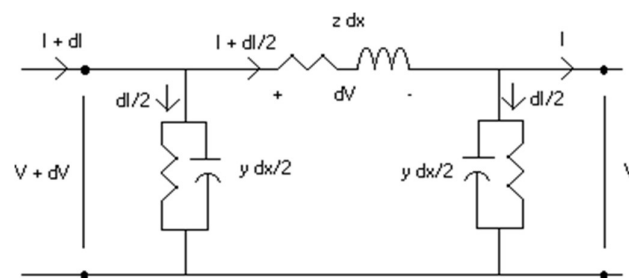


Ilustración 30 Sección elemental de la línea de transmisión.

CAPÍTULO 3

3.1 PROBLEMÁTICA OPERATIVA.

Introducción

En este capítulo hablaremos del análisis de flujos de potencia, de la estadística del voltaje de 85kV y determinación de un reactor en las barras de 85kV en S.E. El salto mediante el software PSS@E LineProp Versión 3, SIEMENS PTI. También se analizará las mediciones de voltaje de bus de 85kV de subestación el Salto, obtenidas de la maestra de la ZOTP antes y después del cambio de Tap’s en los Transformadores de 230/85kV en el mes de mayo 2020.

El 20 y 21 de abril de 2020, se realizan los cambios de Tap en el banco de Transformación SAO T01 y SAO T02, Transformadores de 230/85kV de 100MVA, a solicitud del CENACE. El Tap máximo de los trasformadores antes citado es de Tap 5 sin carga, el cual en la ilustración 31 se observa las conexiones de dicho Transformadores obteniendo un voltaje de 90.47Kv en su devanado X1 y X2, rebasando un 6.3% del voltaje de 85Kv.

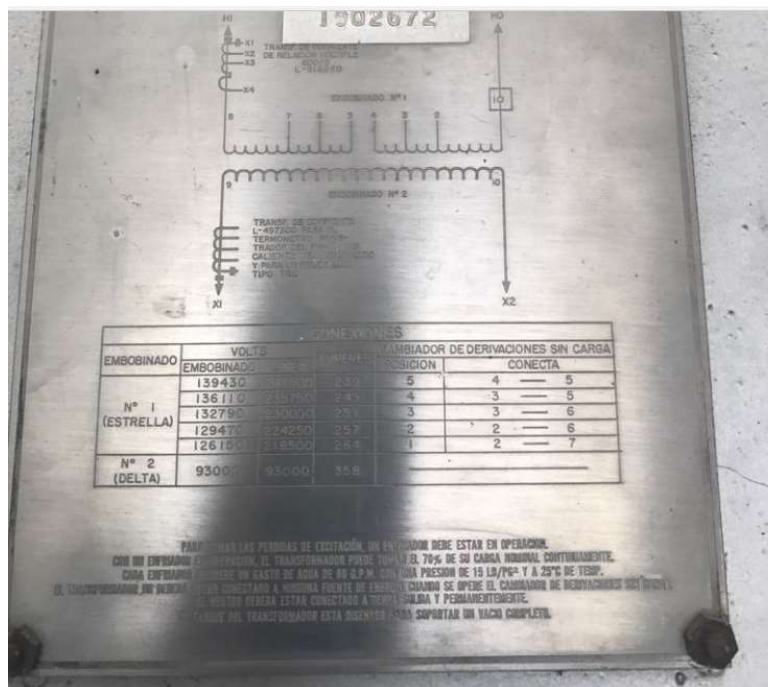
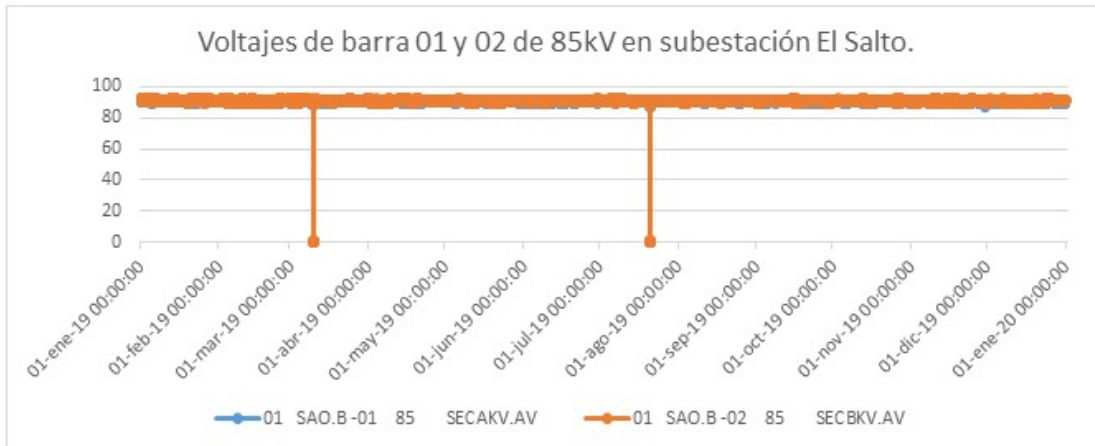


Ilustración 31 Dato de placa del Transformador 230/85kV

En la siguiente ilustración 32. Se observa en voltaje a) Voltaje en las barras de 85kV antes del cambio de Taps y b) Voltaje en las barras de 85kV después del cambio de Tap en 5.



a) Voltaje de 85kV de S.E. El Salto monitoreado de la Maestra de la ZOTP.

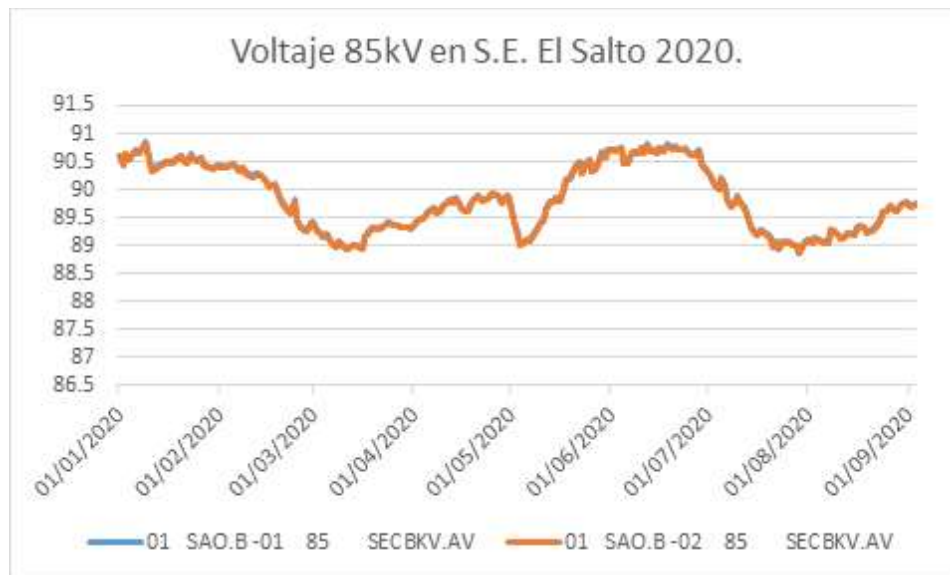


Ilustración 32 b) Voltaje 85kV en el año 2020 de S.E. El Salto

Como se puede observar en las ilustraciones de graficas anteriores el voltaje en el 2019 y en este año 2020, no se cumple con una estabilidad con el voltaje, como este marcado en el manual regulatorio de Estados Operativos del Sistema Eléctrico Nacional, Código de Red de 89.25Volts. Por lo cual es necesario este estudio de análisis de flujos de potencia en el nodo eléctrico S.E. El Salto.



3.2 ANALISIS DE FLUJOS DE POTENCIA

Los estudios de flujos de potencia son de gran importancia en la planeación y diseño de la expansión futura de los sistemas de potencia, así como también en la determinación de las mejores condiciones de operación de los sistemas existentes. La información principal que se obtiene de un estudio de flujos de potencia es la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada barra y la potencia real y reactiva que fluyen en cada línea. [2]

Para analizar el comportamiento del sistema eléctrico de potencia bajo las consideraciones anteriores, se plantea lo siguiente: dadas las inyecciones de potencia real y reactiva en los nodos de la red, encontrar las condiciones eléctricas en estado estable del sistema eléctrico de potencia. Este análisis es conocido como Análisis de Flujos de Potencia. De estos estudios se puede obtener gran cantidad de información adicional que es valiosa, a través de la salida impresa de los programas de computadora que usan las compañías eléctricas. La mayoría de estos aspectos se irán haciendo evidentes en el análisis de los estudios de flujos de potencia que se hace en este capítulo.[1]

Para tener una la solución de flujos de potencia en estado permanente balanceado se requiere lo siguiente:

1. La potencia consumida por los centros de carga más las pérdidas en las líneas.
2. Las magnitudes de voltaje en las barras permanecen cercanas a sus valores nominales.
3. Los generadores operan dentro de límites de su curva de capacidad.
4. Las líneas de transmisión y los transformadores no estén sobrecargados.[9]

3.3 DESARROLLO

Llevar a cabo una propuesta de estudio de flujo de potencias para la ZOTP, para normalizar

los voltajes en las barras de S.E. El Salto para cumplir lo marcado en el Manual Regulatorio de coordinación Operativa, Código de Red, **ilustración 3**, las cuales se comprenden tres actividades:

1. Reconfiguración de la distribución de las Líneas de Transmisión y los Bancos de Transformación actualmente conectados a las barras de la S.E. El Salto en Software PSSE, para revisar las condiciones del voltaje en 85Kv.
2. Evaluación contingencias sencillas aplicando el criterio N-1 tomando en cuenta la distribución de equipos actuales y la propuesta elaborada para llevar a cabo una propuesta final en los voltajes de 230/85kV de este nodo eléctrico.
3. Se programó un archivo en lenguaje Python con el fin de automatizar el proceso de solución de flujos y de incremento de la magnitud del rector para simular un CEV.

3.4 CONDICIONES ACTUALES

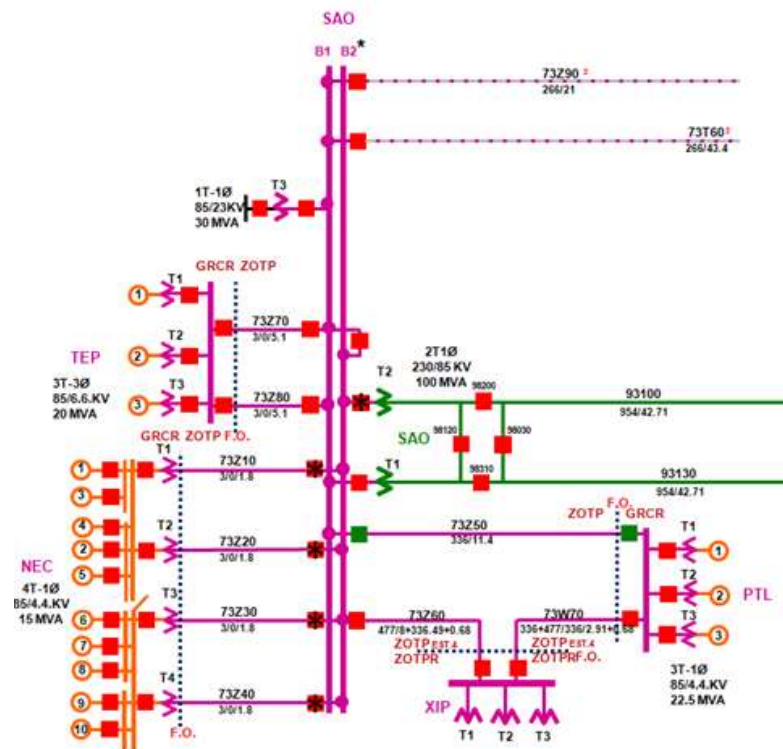


Ilustración 33 Diagrama Unifilar de la Red 85kV S.E. El Salto

De acuerdo con la ilustración 33 los equipos conectados a la Barras B1 de 85 kV de la S.E.SAO se distribuye de la siguiente manera:



- LT SAO 73Z50 PTL.
- LT SAO 73Z60 XIP.
- LT SAO 73Z70 TEP.
- LT SAO 73Z80 TEP.
- LT SAO 73Z90 CRM.
- LT SAO 73T60 KMC.
- Banco SAO T1 (T28A 230/85 kV)
- Banco SAO T3 (T82A 85/23 kV).

Equipos conectados a Barras B2 de 85 kV de la S.E. SAO:

- LT SAO 73Z10 NEC.
- LT SAO 73Z20 NEC.
- LT SAO 73Z30 NEC.
- LT SAO 73Z40 NEC.
- Banco SAO T2 (T28B 230/85 kV).

Se realiza la corrida de Flujos en condiciones de distribución de circuitos normales y con la demanda media que normalmente se tiene en S.E. El Salto, la cual obtenemos el valor de 89.9 Kv en las barras de 85kV S.E El Salto, parámetro que rebasa lo marcado en el Código de Red ya que el valor limite es de 89.25KV.

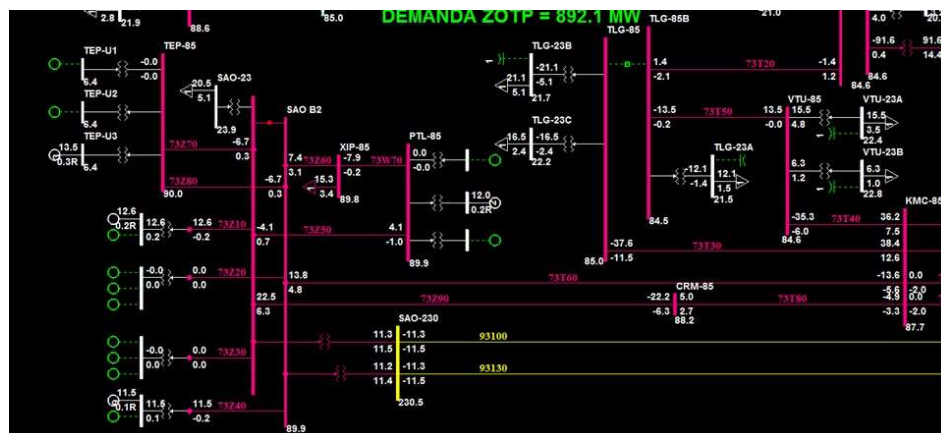


Ilustración 34 Demanda mínima de Generación en S.E. El Salto.

3.6.- ESCENARIO BASE DE LA ZOTP CON SOFTWARE WS500

En la Zona de Operación de Transmisión Pachuca su demanda es +940.23MW de los cuales el complejo hidroeléctrico FENIX abastece con generación en sus líneas de 85kV transformando dicha generación a la red de 230kV por las líneas SAO 93100 KMC y SAO 93130 KMC, en el cual con el Software W500, podemos adquirir información almacenada del flujo de potencias, transcurrido en una fecha que veamos como demanda Máxima, media y mínima, así mismo simular las posibles contingencias como se describen en las siguientes ilustraciones.

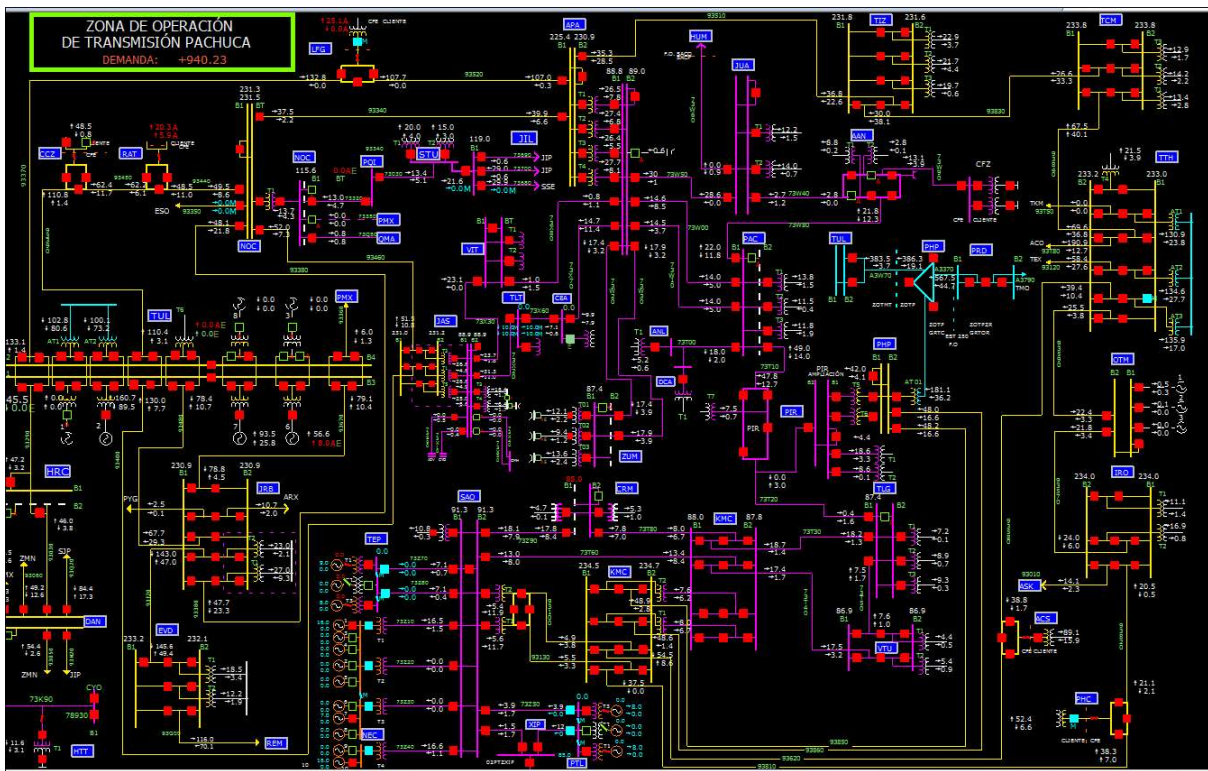


Ilustración 35 Demanda Máxima de la Zona de Operación Pachuca.

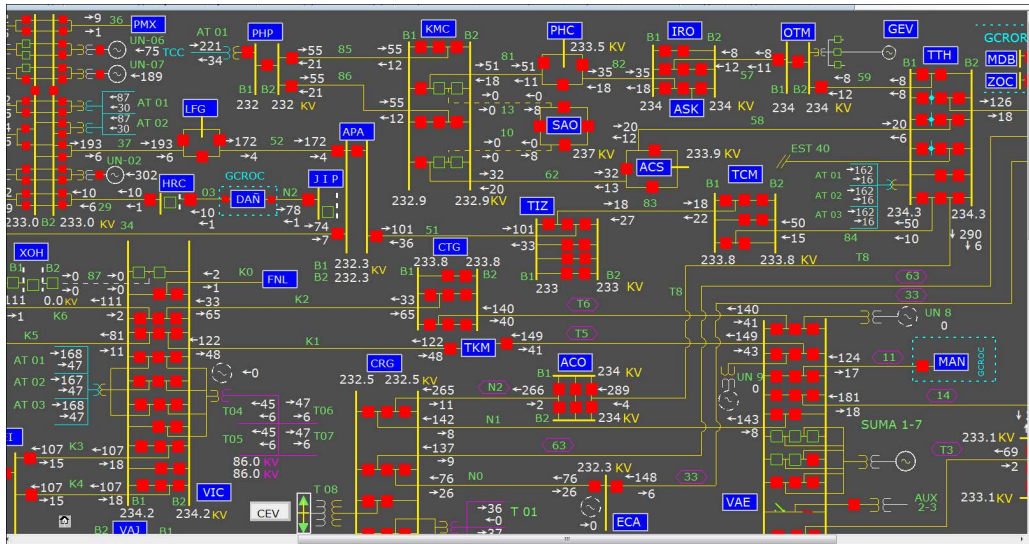


Ilustración 36 Contingencia aledañas (perdida de las líneas KMC 93100 SAO y KMC 93130 SAO)

En la ilustración 36 nos percatamos con esta simulación de contingencia que se mantiene el voltaje de 230Kv en condiciones permitidas en el manual regulatorio, código de RED. Por lo cual se continua con las siguientes simulaciones.

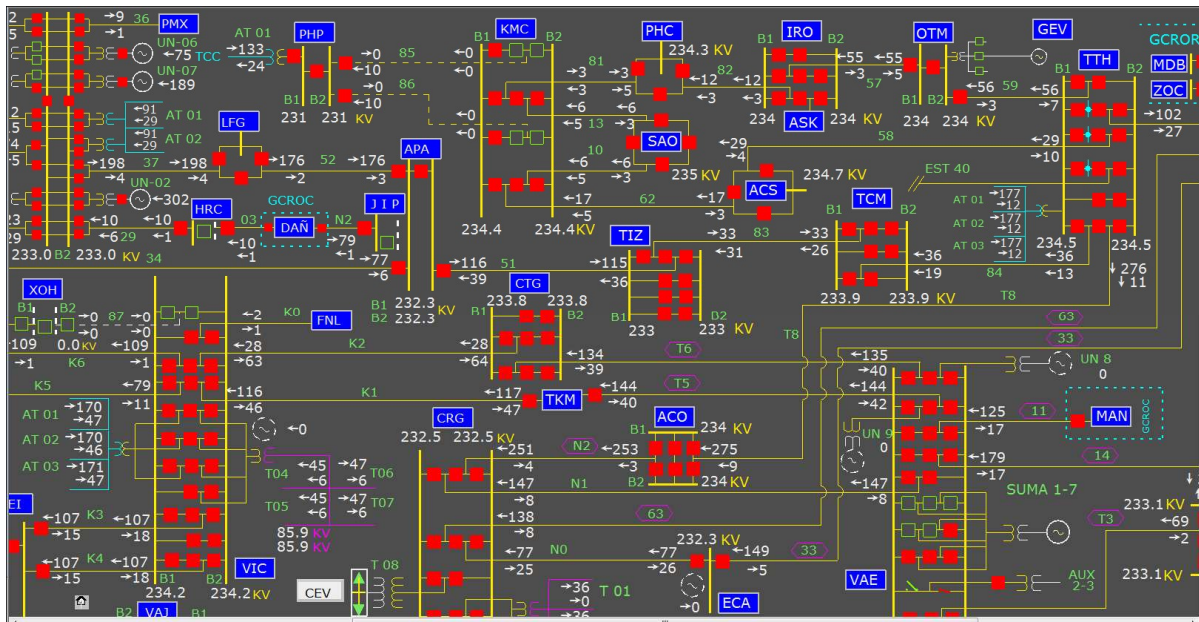


Ilustración 37 Contingencias aledañas (Perdida de líneas de php -> kcm (93850 y 93860)

En la ilustración 37 nos percatamos con esta simulación de contingencia aledaña que al perder las 2 líneas de PHP a KMC, se mantiene el voltaje de 235Kv debajo a lo marcado y

permitidas en el manual regulatorio, código de RED. Por lo cual se continua con las siguientes simulaciones.

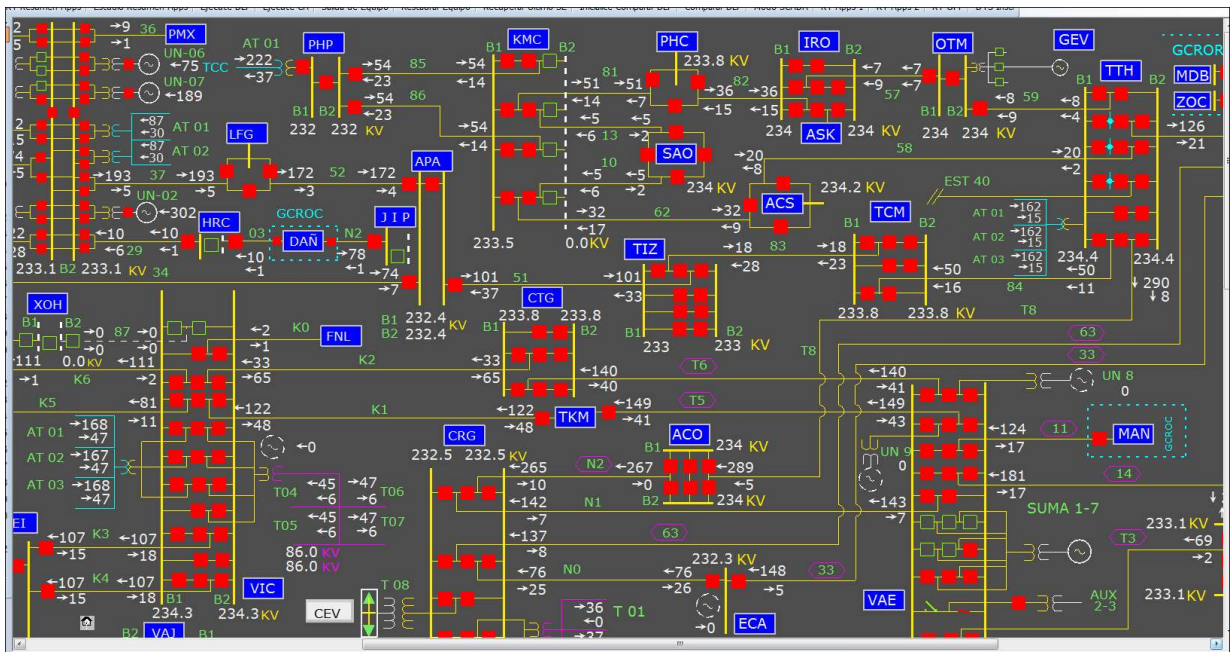


Ilustración 38 Barrida de bus 2 de 230Kv en S.E. KMC.

En la ilustración 38, de la barrida de bus 2 de subestación Kilómetro 110, el estudio de flujos de potencia revisado y sus diferentes casos, para normalizar los voltajes en las barras de 85Kv en S.E. El Salto, se puede observar que los flujos del anillo de 230kv permanecen dentro del rango establecido en el código de red, cuyo límite superior es de 241Kv, por lo cual para mantener la regulación de voltaje en subestación el Salto se tiene que seguir trabajando en simulaciones con el software PSSE.

Debido al gran número de cargas en el sistema de potencia, es común que se modele la demanda de forma simplificada, realizando una sintonización fina únicamente en un pequeño número de cargas.

La operación en estado estable del sistema eléctrico de potencia depende de la capacidad de igualar en todo momento la demanda eléctrica con la generación. La demanda de energía varía dependiendo de distintos factores cómo el día, la hora, la estación del año e incluso la economía.

Debido a que el voltaje de la S.E. El Salto está directamente relacionado con la generación del complejo Necaxa; para encontrar la magnitud de los reactores que conectados a barras de 85 kV de S.E. El Salto regulen el voltaje dentro de los rangos considerados en el Código de Red se sintonizó el caso de simulación en el PSS-E de forma coincidente a la generación máxima histórica del complejo Necaxa la cual se encontró el 2019/02/28 a las 13:23hrs.

Para encontrar la magnitud del reactor, se programó un archivo en lenguaje Python con el fin de automatizar el proceso de solución de flujos y de incremento de la magnitud del rector, de tal manera que se observa el efecto del reactor sobre el voltaje de S.E. El Salto, desde una magnitud de -2MVAR hasta -140MVAR a incrementos de 1MVAR. (APENDICE A). El cual el programa Python se basa en el siguiente diagrama de flujos automatizado.

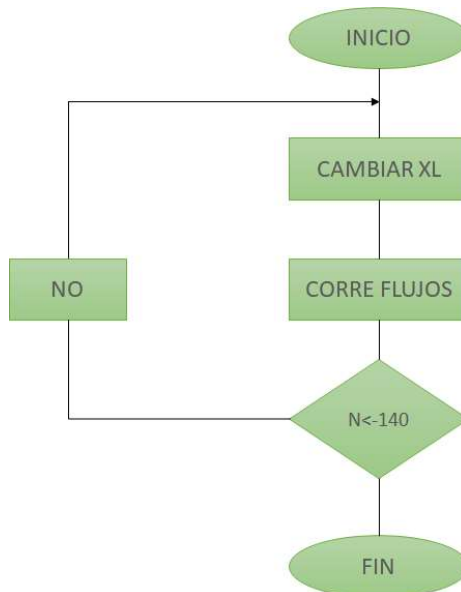
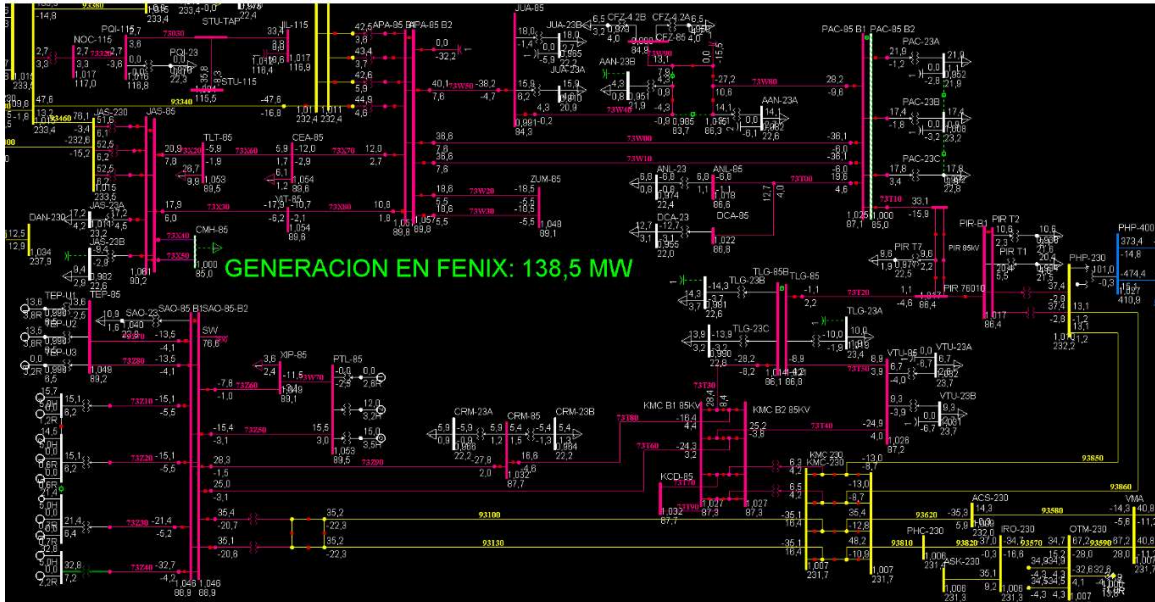


Ilustración 39 Diagrama de Flujo (programa Python)



p

Ilustración 40 Simulación de flujo con -70MVAR.

La cual en las siguientes simulaciones se muestra el estudio de este.

Se demuestra que el voltaje llega a 88.9Kv, voltaje que llega al 4% del voltaje Nominal, no afectando al voltaje de 230Kv, manteniéndose en los rangos marcados en el manual regulatorio.

Sin embargo, dicha simulación es con demanda máxima, la cual, en condiciones de demanda media y baja, esta se regula obteniendo un mejor Voltaje en la Barra de 85Kv, sin afectar a los demás voltajes en dicha subestación.

El escoger dicha capacidad de Reactores, de seguir aumentando dicha capacidad reactiva, puede aumentar costos futuros en su diseño, y en la vida real de una subestación (ya que, en esta tesis, no se hablará de costos del equipo eléctrico primario).

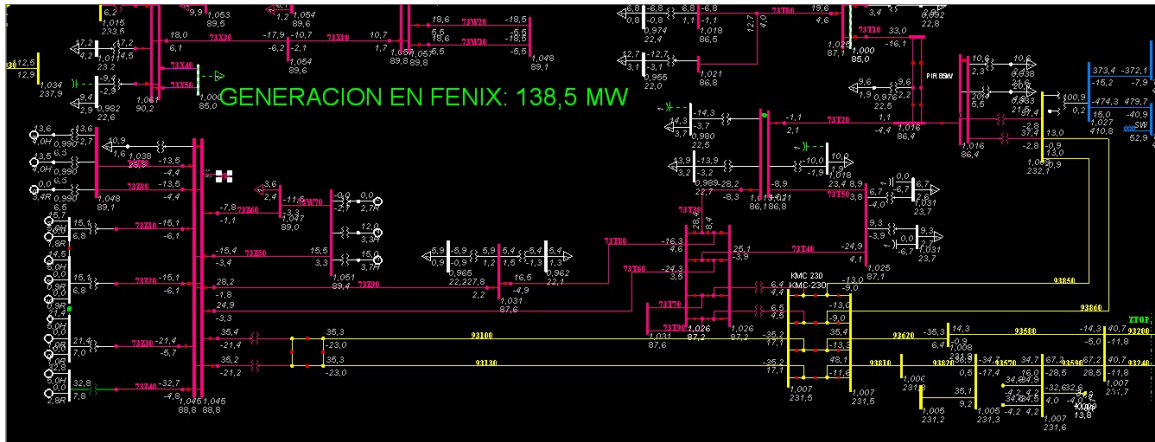
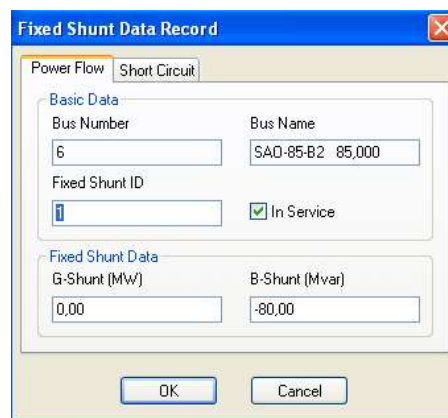


Ilustración 41 Simulación de flujo con -80MVAR.



Efectivamente, realizamos pruebas con un Reactor Fijo de -80Mvar’s, el cual al momento de generar la corrida de flujos no baja más que .01 Kv, debido a que solamente se queda conectado en serie un reactor a una barra (barra 2) aportando pocos reactivos negativos al mismo. Sin embargo, cuando se abre el interruptor de amarre, propicia una inestabilidad, en el voltaje de la barra que no tiene reactor, lo cual lo ideal es realizar otro caso de estudio.

Analizando el estudio de la propuesta de reactores en las barras de 85Kv en S.E. El Salto, se observa que al colocar un reactor de -70Mvar en Barra 1 y otro Reactor en Barra 2 en 85Kv en S.E. El Salto, con esto obtenemos un voltaje ideal en S.E. El Salto de 85Kv, cumpliendo con lo marcado en el manual regulatorio +/- 5[13], solamente afectando al voltaje de 230kV dentro de su subestación con el -.009 % (227.8Kv) del voltaje nominal del anillo de 230Kv en S.E. El Salto.

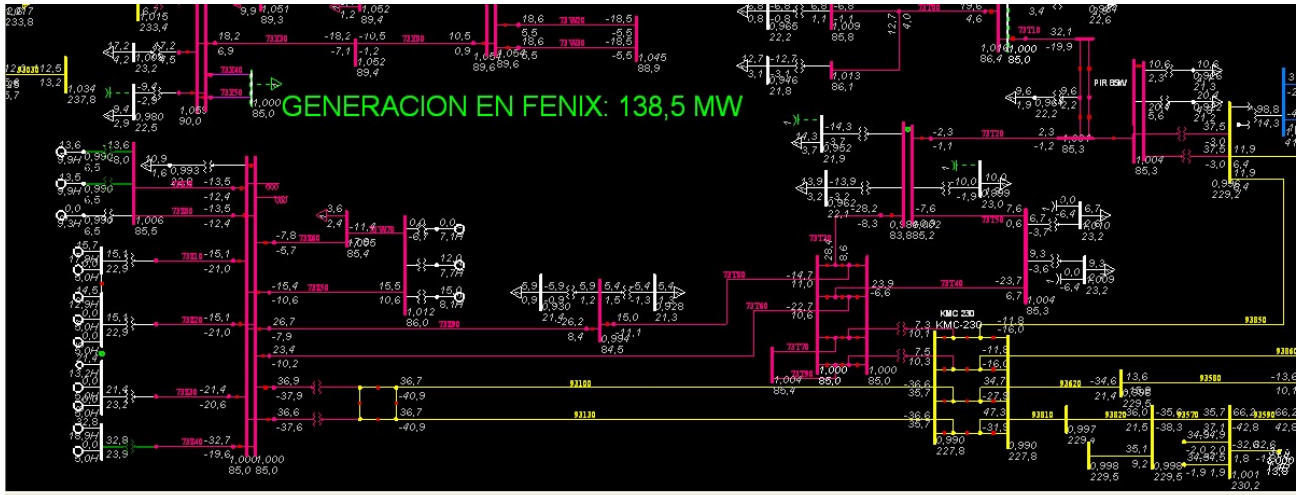


Ilustración 42 Simulación de flujo con B1 -70MVAR y B2 con -70MVAR.

Así mismo al momento de colocar un reactor de -130MVAR’s en el Bus 2 de 85KV en S.E. El Salto, podemos percatar que el voltaje alcanza 85.1Kv siendo este voltaje satisfactorio para la Red de 85Kv con sus buses remotos y aledaños, así como no afecta al voltaje en 230KV de dicha subestación.

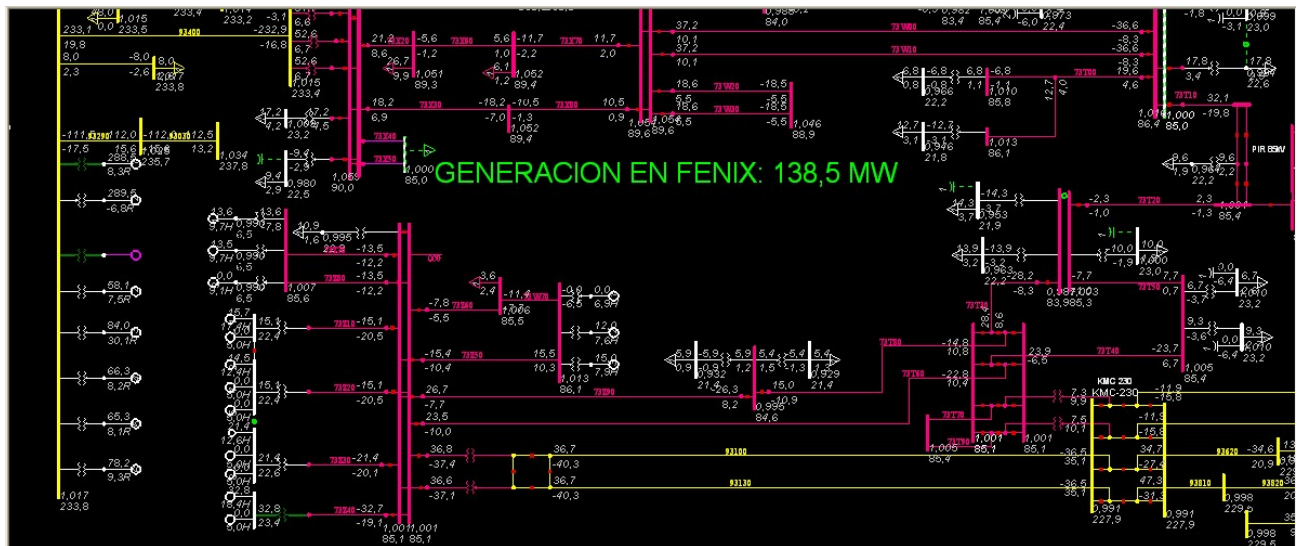


Ilustración 43 Simulación de flujo con -130MVAR

Por ultimo los resultados obtenidos en las simulaciones del software PSS-E con la red de la ZOTP, nos llevan a que la mejor opción es colocar en las barras de 85kv de la subestación el Salto, un reactor fijo de -70MVAR’S, con el cual cumplimos a lo marcado en el manual regulatorio de requerimientos técnicos para la interconexión de Centrales al sistema eléctrico nacional, así como dejar propuesto este estudio de reactivos, para una futura solución del real con el equipo eléctrico primario que genere menos gastos.



CAPITULO 4

4.1 CONCLUSIONES.

Derivado a que en el 2016 la Comisión Reguladora de Energía (CRE) publica el “Manual Regulatorio de requerimientos Técnicos para la Interconexión de Centrales Eléctricas al Sistema Eléctrico Nacional”, la ZOTP nota que en las barras de 85kV de S.E. El Salto, no cumplen con una de las variables del sistema operativo nacional (tensiones, ángulos, frecuencia, etc.), de las cuales el voltaje en 85kv se encuentran fuera de los límites operativos y de acuerdo con las estadísticas realizadas en tiempo real en esta tesis, pudimos observar que no se cuenta con suficiente capacidad reactiva de las líneas de transmisión y transformación (PTL, NEC, TEP), ni con la generación, para mantener la seguridad en la regulación de voltaje en el nodo eléctrico de 85kv en S.E. El Salto, ante una contingencia sencilla más severa que se pudiera presentar.

Al llegar a las simulaciones con el programa realizado en lenguaje Python con el fin de automatizar el proceso de solución de flujos y de incremento de la magnitud del reactor, se observa que el efecto del reactor sobre el voltaje de S.E. El Salto, desde una magnitud de -2MVAR's hasta -140MVAR's, se concluye que el reactor de -70 MVAR's, con el voltaje con su máxima capacidad de generación en el complejo FENIX y la mayor confiabilidad de las líneas de subtransmisión y transmisión interconectadas al SEN, se mantiene al 4 % arriba del voltaje nominal, por lo cual se concluye que dicho reactor es la mejor opción a futuro para la regulación de voltaje de dicho nodo operativo, no afectando al voltaje de 230kV.



BLIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.

- [1] CFE, Subdirección del CENACE, Área de Control Oriental, Manual del Participante noviembre 2010.
- [2] William D. Stevenson Jr. Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia, Segunda Edición
- [3] ASPEN Line constants construction editor V3.3, Hasp Key ID 460A-0-63C89569
- [4] PSS@E LineProp Version 3, SIEMENS PTI
- [5] SEL Applications Guide, volume 1. AG95-29, 20031105
- [6] Criterios de ajuste y coordinación de protecciones para líneas de transmisión, subtransmisión y cables de potencia; DR/PROT/LT-REV-2014.
- [7] Comisión Reguladora de Energía, «Manual Regulatorio de Estados Operativos del Sistema Eléctrico Nacional,» de Código de Red, Ciudad de México, Diario Oficial de la Federación, 2016, pp. 76-80.
- [8] Secretaría de Energía, Bases del Mercado Eléctrico, P. Joaquin Coldwell, Ed., Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2015.
- [9] Autor J. Duncan Glover, Mutuka S. Sarma. Sistemas de Potencia, “Análisis y diseño”; Tercera edición.
- [10] Autor Hasi Saat, Power System Analysis_1999.
- [11] Comisión Reguladora de Energía <<Ley de Industria Eléctrica>> Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 2014.
- [12] P. Hernandez, "A Review of the Mexican Power System Market Policies for competitiveness and a more diverse generation portfolio," in IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2016.
- [13] Manual Regulatorio de Coordinación Operativa, CFE, 2018.
- [14] V. Vittal, "Consequence and Impact of Electric Utility Industry Restructuring on Transient Stability and Small Signal Stability Analysis," Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 2, pp. 196-207, 2 February 2000.
- [15] G. Anderson, R. P. Donaldson, I. N. Hatzargyriou, N. P. Kundur, J. N. Martins, P. Pourbeik, R. J. Sánchez-Gasca, A. R. Schulz, A. Stankovic, C. Taylor and V. Vittal, "Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance," IEEE Transactions on Power System, vol. 20, no. 4, pp. 1922-1928, 8 June 2004.
- [16] Gaceta del Senado /Documento/81162
- [17] Comisión Reguladora de Energía, «Reglamento de la Industria Eléctrica Nacional,» Diario Oficial de la Nación, Ciudad de México, 2014.
- [18] Comisión Reguladora de Energía, «Manual Regulatorio de Planeación del Sistema Eléctrico Nacional,» de Código de Red, Ciudad de México, Diario Oficial de la Federación, 2016, p. 179.
- [19] Power System Analysis _ Autor Haidi Saadat_1999.

