



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería.

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado.

**"APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A
SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS
PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD
OPERATIVA."**

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Presenta:

ING. BENJAMÍN LUNA LEÓN

Asesores de tesis:

Dr. Alejandro Bautista Hernández

Dr. Ismael Albino Padilla

Puebla, Pue.

Noviembre 2016

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

OFICIO DE AUTORIZACIÓN DE TESIS



OFICIO SIEP No. 2917/2016

ING. BENJAMÍN LUNA LEÓN

Maestría en Ingeniería, opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia
Presente.

El suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de cambio de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **“APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA”**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas eléctricos de potencia. Asignándose como Asesor de tesis al Dr. Alejandro Bautista Hernández y Co-Asesor al M.C. Ismael Albino Padilla.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“Pensar bien, para vivir mejor”

Puebla, Pue., a 04 de Noviembre de 2016

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
Director de la Facultad de Ingeniería

C.c.p. Dr. Alejandro Bautista Hernández. Asesor Tema tesis.

C.c.p. M.C. Ismael albino Padilla. Co-Asesor tema de tesis.

C.c.p. Archivo.

ABH/GCC/dsm.



Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

OFICIO DE AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

Asunto: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

M. I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE
LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
P R E S E N T E

Los suscritos, **Dr. ISMAEL ALBINO PADILLA** Y **Dr. ALEJANDRO BAUTISTA HERNÁNDEZ**, asesores del Tema de Tesis denominado: **"APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA"**, presentado por el **C. BENJAMÍN LUNA LEÓN**, pasante de la Maestría en Ingeniería, opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia, nos permitimos informar a usted que **después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía** de la Tesis, no tenemos inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Así mismo, solicito tenga a bien autorizar el Jurado para su Examen Profesional.

Lo hago de su conocimiento para los efectos legales que haya lugar.

ATENTAMENTE
Puebla, Pue., 26 de Octubre de 2016



Dr. ALEJANDRO BAUTISTA HERNÁNDEZ
ASESOR

C.c.p. –Exámenes Profesionales
Interesado
Archivo
IAP*ABH*bll

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

RESUMEN

A nivel mundial, las organizaciones responsables de la operación de sistemas eléctricos de potencia realizan grandes esfuerzos y aplican los recursos de que disponen para satisfacer la demanda de energía de forma ininterrumpida a los centros de carga conectados al sistema.

En este trabajo de tesis se presenta la aplicación del método de análisis de contingencias a un sistema de pruebas para incrementar la confiabilidad operativa a sistemas eléctricos de potencia. Para medir la confiabilidad, el sistema de pruebas debe cumplir con índices de seguridad y confiabilidad, para lo cual se designan límites de seguridad promulgados por la secretaría de energía y el centro nacional de control de la energía. Se proponen cuatro escenarios de demanda de energía diferentes y se complementa el análisis de contingencias, aplicando acciones de control mediante la administración de los recursos del mismo sistema de pruebas para mejorar sus condiciones operativas. De las simulaciones realizadas con el software de PSS®/E se detectan las debilidades del sistema, lo que contribuye a proponer cambios en la red para incrementar su confiabilidad operativa, la cual se comprueba al final de la tesis.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

ABSTRACT

Worldwide, organizations responsible of the electric power system operation make great efforts and apply available resources in order to meet the energy demand uninterruptedly to the load connected to the system.

This thesis presents the application of the contingency analysis method to a test system to increase the operational reliability of electric power systems. In order to measure reliability, the test system must comply with safety and reliability indexes, for which safety limits are designated by the department of energy and the national energy control center. Four scenarios of different energy demand are proposed and the contingency analysis is complemented, by applying control actions through the administration of resources to improve its operating conditions. From the simulations carried out with the PSS® / E software the weaknesses of the system are detected, which contributes to propose changes in the network to increase its operational reliability, which is verified at the end of the thesis.

**APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE
POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD
OPERATIVA**

DEDICATORIA

A mis padres Alejandro Hipólito Luna y Cira León de Jesús principalmente por darme la vida y por todo su apoyo incondicional.

A mis hermanos César, Daniel, Miguel y Alfredo a quienes amo más que a mi propia vida.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los fundadores de la maestría en sistemas eléctricos de potencia por los esfuerzos y sacrificios realizados, en especial al maestro Carlos Morán Ramírez porque sin su ímpetu y dedicación no hubiera existido la maestría y al maestro Genaro Campos Castillo por habernos apoyado y soportado durante todo el proceso.

Al Doctor Ismael Albino Padilla por las bases sólidas, la información y definir el rumbo sin las cuales no hubiera realizado la presente tesis.

Al Doctor Alejandro Bautista Hernández por permitirme continuar con el proceso y cumplir con los tiempos administrativos.

A todas aquellas personas que me brindaron el apoyo, consejos e información para la realización de esta tesis.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
ABREVIATURAS.....	xii
NOMENCLATURA.....	xiii
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xiv
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Introducción	2
1.1.1 Límite de voltaje	3
1.1.2 Límite de transmisión de potencia	4
1.1.3 Esquemas de acción remedial (EAR).....	5
1.2 Planteamiento del problema	5
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
1.5 Hipótesis.....	7
1.6 Estado del arte	8
1.7 Estructura del trabajo	10
CAPÍTULO 2 FLUJOS DE POTENCIA, DESPACHO ECÓNOMICO Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS	13
2.1 Introducción	13
2.2 Descripción matemática de flujos de potencia	14
2.3 Descripción del método de Newton-Raphson	18
2.4 Descripción del método de flujos de desacoplado rápido	23
2.5 Despacho económico sin pérdidas (DE).....	25
2.6 Descripción del sistema de pruebas,	27
2.6.1 Solución de flujos de potencia del sistema de pruebas	30
CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTOS	40
3.1 Introducción	40
3.2 Procedimiento para realizar el caso base de flujos de potencia del sistema	40

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

3.3	Procedimiento para realizar despacho económico de generación	42
3.4	Procedimiento para realizar análisis de contingencias	44
3.5	Diseño de la investigación	46
CAPÍTULO 4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS.....		49
4.1	Introducción	49
4.2	Demanda mínima	50
4.3	Demanda media	57
4.4	Demanda máxima.....	63
4.5	Demanda de día festivo.....	70
CONCLUSIONES.....		78
	Trabajos futuros y recomendaciones	83
REFERENCIAS.....		85
APÉNDICE		88

**APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE
POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD
OPERATIVA**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Flujos de potencia característicos en un nodo i	16
Figura 2.2. Curva de costo incremental.....	26
Figura 2.3. Diagrama unifilar con la solución de flujos de potencia de la tabla 2.13 del sistema de pruebas	38
Figura A.1. Diagrama unifilar del sistema de pruebas de IEEE-14 nodos.....	89

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Variables de estado designadas en cada tipo de nodo.....	18
Tabla 2.2.	Datos de curva de energía.....	25
Tabla 2.3.	Impedancias, admitancias y capacidades de las líneas del sistema de pruebas.....	28
Tabla 2.4.	Capacidad de generación de las unidades y nivel de ajuste de voltaje para el caso base.....	28
Tabla 2.5.	Cargas conectadas al sistema de pruebas en caso base.....	29
Tabla 2.6.	Capacidad en MVAR del capacitor serie conectado al bus 9.....	29
Tabla 2.7.	Capacidad de los transformadores en MVA de acuerdo a sus tipo de enfriamiento OA/FOA/FOA.....	29
Tabla 2.8.	Código de colores utilizado en el diagrama unifilar del sistema de pruebas.....	30
Tabla 2.9.	Flujos de potencia activa y reactiva de la solución de flujos de potencia.....	31
Tabla 2.10.	Ajuste de generación del caso base.....	33
Tabla 2.11.	Violaciones de voltaje para el caso base.....	33
Tabla 2.12.	Despacho económico sin pérdidas del caso base.....	34
Tabla 2.13.	Nueva solución de flujos de potencia aplicando despacho económico.....	34
Tabla 2.14.	Ajuste de generación en nueva solución de flujos de potencia del caso base.....	36
Tabla 2.15.	Violaciones de voltaje para el caso base con despacho económico...	37
Tabla 4.1.	Demanda conectada al sistema en demanda mínima.....	50
Tabla 4.2.	Despacho económico en demanda mínima.	51
Tabla 4.3.	Flujos de potencia en demanda mínima.....	51
Tabla 4.4.	Acciones de control demanda mínima.....	53
Tabla 4.5.	Análisis de contingencias del sistema en demanda mínima.....	53
Tabla 4.6.	Acciones de control correctivas en demanda mínima.....	55
Tabla 4.7.	Flujos de potencia condiciones después de aplicar acciones correctivas.....	55
Tabla 4.8.	Demanda conectada al sistema en demanda media.....	57
Tabla 4.9.	Despacho económico en demanda media.....	57
Tabla 4.10.	Flujos de potencia en demanda media.....	58
Tabla 4.11.	Análisis de contingencia del sistema en demanda media.....	60
Tabla 4.12.	Acciones de control preventivas/correctivas.....	60
Tabla 4.13.	Flujos de potencia condiciones finales de demanda media.....	60
Tabla 4.14.	Análisis de contingencia del sistema final en demanda media.....	62
Tabla 4.15.	Demanda conectada al sistema en demanda máxima.....	63
Tabla 4.16.	Despacho económico en demanda máxima.....	63
Tabla 4.17.	Flujos de potencia en demanda máxima.....	64
Tabla 4.18.	Acciones de control demanda máxima.....	66
Tabla 4.19.	Análisis de contingencia del sistema en demanda máxima.....	66

**APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE
POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD
OPERATIVA**

Tabla 4.20.	Acciones de control individuales después del análisis de contingencias.....	67
Tabla 4.21.	Flujos de potencia solución ante contingencia de línea entre bus siete y bus nueve.....	68
Tabla 4.22.	Demanda conectada al sistema en día festivo.....	70
Tabla 4.23.	Despacho económico en día festivo.....	71
Tabla 4.24.	Flujos de potencia en demanda día festivo.....	71
Tabla 4.25.	Acciones de control demanda de día festivo.....	73
Tabla 4.26.	Flujos de potencia después de realizar acciones de control.....	74
Tabla 4.27.	Análisis de contingencias del sistema en demanda de día festivo.....	75
Tabla 5.1.	Solución flujos de potencia sistema de pruebas condiciones de demanda máxima con mejoras propuestas.....	80
Tabla 5.2.	Análisis de contingencias sistema mejorado.....	82
Tabla 5.3.	Comparativa de resultados de análisis de contingencias, sistema sin y con mejoras.....	83

**APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE
POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD
OPERATIVA**

ABREVIATURAS

AGC	Control automático de generación (por sus siglas en inglés)
CAISO	Operador independiente del sistema interconectado del estado de california
CENACE	Centro nacional de control de la energía
CFE	Comisión federal de electricidad
DE	Despacho económico sin pérdidas
DERS	Despacho económico con restricciones de seguridad
DlgSILENT®	Sistema integrado de análisis de sistemas de potencia.
DOF	Diario oficial de la federación
EAR	Esquema de acción remedial
EMS	Sistema de administración de energía (por sus siglas en inglés)
IEEE	Instituto de ingeniería eléctrica y electrónica (por sus siglas en inglés)
LODF	Factor de distribución por apertura de línea (por sus siglas en inglés)
MP	Mediano plazo
NxN	Dimensiones de la matriz de admitancias de barras
P	Potencia activa
PJM	Operador independiente del sistema interconectado de los estados de pennsylvania, new jersey, maryland, entre otros.
PSS/E®	Simulador de sistemas de potencia para ingeniería (por sus siglas en inglés)
PTDF	Factor de distribución de transferencia de potencia (por sus siglas en inglés)
PTI	Tecnologías de energía internacional (por sus siglas en inglés)
PU	Magnitudes en por unidad
Q	potencia reactiva
RTO	Organización regional de transmisión (por sus siglas en inglés)
SCADA	Supervisión, control y adquisición de datos (por sus siglas en inglés)
SEN	Sistema eléctrico nacional
SEP	Sistema eléctrico de potencia
TR	Tiempo real
V	Volt
VA	Volt-Amper
VAR	Volt-Amper reactivo
Y	Admitancia en derivación
Z	Impedancia serie
ZOT	Zona de operación de transmisión
ZOTPT	Zona de operación de transmisión Puebla-Tlaxcala

**APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE
POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD
OPERATIVA**

NOMENCLATURA

i, j, n	Subíndices que hacen referencia a los nodos sobre el que se aplican las ecuaciones
C	Constante
P_i	Potencia activa inyectada a la red a través del nodo i
$P_{i,calc}$	Potencia activa calculada en el nodo i
$P_{i,prog}$	Potencia activa programada inyectada en el nodo i
P_{gi}	Potencia activa programada generada en el nodo i
P_{di}	Potencia activa programada demandada en el nodo i
ΔP_i	Error resultante de la diferencia entre $P_{i,prog}$ y $P_{i,calc}$
Q_i	Potencia reactiva inyectada a la red a través del nodo i
$Q_{i,calc}$	Potencia reactiva calculada en el nodo i
$Q_{i,prog}$	Potencia reactiva programada inyectada en el nodo i
Q_{gi}	Potencia reactiva programada generada en el nodo i
Q_{di}	Potencia reactiva programada demandada en el nodo i
ΔQ_i	Error resultante de la diferencia entre $Q_{i,prog}$ y $Q_{i,calc}$
$ V _i$	Valor absoluto del voltaje presente en el nodo i
Y_{ij}	Admitancia medida de la línea de transmisión entre los nodos i y j
Y_{in} o Y_{bus}	Admitancia s de la sumatoria de las ramas del nodo i a n
δ_i	Magnitud del ángulo del voltaje en el nodo i
ε	

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Carga: equipo perteneciente al usuario final que consume energía.

Confiabilidad: es la habilidad del Sistema Eléctrico para mantenerse integrado y suministrar los requerimientos de energía eléctrica en cantidad y estándares de calidad, tomando en cuenta la probabilidad de ocurrencia de la contingencia sencilla más severa.

Congestión: una característica del sistema de transmisión producida por una restricción vinculante para el despacho económico óptimo para satisfacer la demanda de tal manera que el costo marginal local, exclusivamente el costo marginal de las pérdidas, a diferentes ubicaciones de la red de transporte no es igual.

Contingencia: es la alteración, generalmente breve y peligrosa de las condiciones normales del sistema o de una de sus partes.

Control Automático de Generación CAG (AGC por sus siglas en inglés): equipo de generación que responde automáticamente a señales en tiempo real para el control de la potencia de salida de los generadores eléctricos que participan en el control de la frecuencia del sistema.

Corto plazo: periodo de tiempo en cual se deben realizar los estudios del comportamiento del Sistema Eléctrico de Potencia, menor a tres meses.

Criterio N-1: se refiere a la condición en la cual no se cuenta con un elemento del sistema ya sea por libranza o por contingencia.

Criterios de Seguridad: normas preestablecidas con el objetivo de mantener al sistema eléctrico de potencia en operación normal bajo condiciones de estado estable o contingencia.

Demanda: niveles en los que se suministra energía a la carga y puntos designados en el sistema. Nivel de energía que recibe o requiere una carga

Equipo Primario: componentes principales de un SEP, tales como líneas de transmisión, transformadores, equipos de compensación de potencia reactiva, generadores síncronos, interruptores.

Estabilidad en Estado Estable: un SEP se encuentra en estado estable para una condición particular de operación en estado estable si, después de la ocurrencia de un disturbio pequeño, regresa a una condición de operación en estado estable idéntica o cercana a la condición operativa antes del disturbio.

Estabilidad Transitoria: un SEP se encuentra transitoriamente estable para una condición particular de operación en estado estable y para un disturbio en particular si, después de la ocurrencia de ese disturbio, alcanza una condición de operación de estado estable aceptable.

Mediano plazo: periodo de tiempo en cual se deben realizar los estudios del comportamiento del Sistema Eléctrico de Potencia, mayor a tres meses, pero menor o igual a dos años.

Operador Independiente del Sistema (ISO por sus siglas en inglés): corporación independiente del estado, no lucrativa que controla las instalaciones de transmisión

Propietario de la Red de Transmisión (TO por sus siglas en inglés): entidad propietaria o que cuenta con derechos contractuales para utilizar las

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

instalaciones de transmisión.

Seguridad: Capacidad del sistema de soportar perturbaciones repentinas, por la ocurrencia de contingencias como cortocircuitos o la falla de elementos del sistema.

Sistema Eléctrico de Potencia (SEP): interconexión de unidades generadoras, cargas y líneas de transmisión, incluyendo equipo asociado eléctrico o mecánicamente conectada a la red.

**APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE
POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD
OPERATIVA**

CAPÍTULO 1

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Con la aprobación de la reforma energética el 11 de Diciembre de 2013 y su publicación en el diario oficial de la federación (DOF) el 21 del mismo mes, se dio paso a la formulación de las disposiciones administrativas de carácter general que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red, conforme dispone el artículo 12, fracción XXXVII de la Ley de la Industria Eléctrica. En lo sucesivo se mencionará únicamente como Código de Red, [1]. A través de este documento se definen varios elementos que servirán para definir y delimitar criterios operativos de seguridad que serán aplicadas en el caso de estudio que se desarrolla en este proyecto.

La Comisión Reguladora de Energía designa al Centro Nacional de Control de la Energía (CENACE) como el ente encargado el control operativo del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Para el control físico de las instalaciones eléctricas se designa en lo general a los centros de control del Transportista y participantes del mercado [1], para el caso de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se designa a las Zonas de Operación de Transmisión (ZOT) para el control físico. Tanto en CENACE como en las ZOT se tiene una diaria exposición al análisis continuo de las condiciones de las variables eléctricas de la red de transmisión y el uso de estudios de flujos de potencia cuya utilidad es la de conocer el estado operativo que guarda el sistema eléctrico ante condiciones normales y condiciones especiales derivadas principalmente a la salida o desconexión de elementos (líneas de transmisión, transformadores, etc.) por indisponibilidad de los mismos debido a contingencias, disturbios, al aplicarles los programas de mantenimiento o simplemente por condiciones de demanda o despacho de generación. Estos análisis ayudan al operador, primero para conocer el estado operativo del sistema y segundo prepararse a sí mismo y al sistema para hacer frente y/o soportar la ocurrencia de contingencias, [2] y [3].

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

El análisis de contingencias es una herramienta utilizada principalmente para evaluar las condiciones de seguridad operativa y planeación de crecimiento de los sistemas eléctricos de potencia, donde principalmente se simulan la conexión o desconexión de elementos y se evalúa el impacto que se tiene en la red ante este cambio en la topología de la misma, [4] y [5]. Se define como contingencia a la pérdida o desconexión de un elemento de la red de transmisión por falla en su operación o como consecuencia de la aplicación de trabajos de mantenimiento. En el presente trabajo se simulan contingencias individuales mejor conocido como criterio ($N-1$), [1] y [6].

El PSS/E® (Power System Simulator / Engineering) o Simulador de Sistemas de Potencia, es un paquete de programas para estudios de Sistemas Eléctricos de Potencia y del comportamiento de la generación tanto en estado estable como en estado dinámico que vio la luz por primera vez en 1976. Cuenta con grandes atributos entre los que se encuentran, en su versión completa, solución de flujos de potencia para redes con hasta 200,000 nodos, análisis de contingencia en estado estable, análisis de fallas de corto circuito balanceadas y desbalanceadas, análisis de estabilidad de voltaje a través de las curvas P-V y Q-V, entre otras funciones adicionales [7].

1.1.1 Límite de voltaje

Se definen límites de voltaje para evitar operaciones anormales y daños a equipos y para mantener los niveles de voltaje del sistema en niveles de seguridad, [8]. Se llega a violar este límite de voltaje cuando el nivel de voltaje presente en el sistema se encuentra fuera de un rango predeterminado el cual puede ser designado o acordado por los participantes de la red (clientes y proveedores). En las disposiciones administrativas y de carácter general para el control y operación del Sistema Eléctrico Nacional: código de red, en el apartado del manual regulatorio de estados operativos, se designa que en estado operativo normal del sistema eléctrico, el nivel de tensión en las barras de las subestaciones se mantenga en los rangos de +/- 5% del voltaje nominal del sistema, desde los 13.8 kV hasta los 400 kV de tensión, [1] y [9].

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Mantener el perfil de voltaje dentro de los límites de voltaje establecidos está muy relacionado con los recursos de control con los que cuenta el sistema. El perfil de voltaje se ve afectado principalmente por los incrementos en la demanda de energía o en la transferencia de potencia.

Las acciones de control de tensión para mantenerla dentro de los rangos requeridos se llevan a cabo mediante la regulación de la potencia reactiva que se inyecta o se absorbe del sistema y que se transmite a través de la red. Para tal efecto se hace uso de los recursos y elementos con que cuenta el sistema, a continuación se enuncian algunas de las tareas que ejecutan los operadores del Sistema Eléctrico, [9], [10] y [11]:

- Ajustes en la tensión de excitación de unidades de centrales eléctricas y la conexión o desconexión de condensadores síncronos.
- Ajustes en el punto de control de voltaje de compensadores estáticos de VAR
- Conexión o desconexión de bancos de capacitores y bancos de reactores en paralelo.
- Cambio de posición en cambiador de derivaciones en bancos de transformación.
- Conexión o desconexión de líneas de transmisión.
- Desconexión controlada de carga.

1.1.2 Límite de transmisión de potencia

Existen tres tipos de límites de transferencia de energía, límite térmico de los conductores, límites de cargabilidad de las líneas de transmisión y límite de estabilidad, [4]. El límite térmico del equipo depende principalmente de la máxima temperatura que puede soportar el material que lo compone. Los límites térmicos se asignan para disminuir las pérdidas de las características físicas del material de aislamiento, herrajes y conductores que provoquen la aparición de fallas por esfuerzos mecánicos de forma prematura o la degradación acelerada de los materiales, [12] y [8], así también limitar la elongación excesiva del conductor y que en consecuencia se disminuya la distancia de la catenaria de la línea rompiendo las distancias eléctricas de seguridad al suelo. Para el cálculo de fallas el límite térmico se encuentra muy cercano al punto de fusión del

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

material del conductor. En el estándar IEEE 738-1986 [13] se encuentra un método simplificado para calcular la relación corriente-temperatura para conductores desnudos. Algunas acciones para el control de los límites de transmisión son tomadas de, [9], [12] y [10]:

- Conexión o desconexión de bancos de capacitores en serie.
- Cambio de posición en cambiador de derivaciones en bancos de transformación.
- Conexión o desconexión de líneas de transmisión.
- Ajustes en el despacho de generación.
- Reconexión de equipos.
- Desconexión de demanda.

1.1.3 Esquemas de acción remedial (EAR)

De acuerdo al Código de Red se define como el “conjunto coordinado de controles que al presentarse condiciones de emergencia en la operación del Sistema Eléctrico Nacional, se realiza la desconexión automática y prevista de ciertos elementos de la red eléctrica” [14] cuyo objetivo es el de “llevar al sistema en forma controlada a un nuevo estado operativo donde prevalezca su integridad”, [14].

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad, no existe tecnología de almacenamiento de energía eléctrica en grandes cantidades que satisfagan las demandas de energía de gran escala. La energía eléctrica se genera prácticamente en el mismo instante en que es demandada por una carga. Las condiciones actuales de vida y del comportamiento humano requieren y exigen la disponibilidad y continuidad del suministro de electricidad las 24 horas del día, los 365 días del año de forma ininterrumpida, [15]. Para poder cumplir con tales exigencias es necesario proveer de características de confiabilidad operativa al sistema eléctrico de potencia ya sea mediante la administración adecuada de los recursos de control de voltaje, generación y transmisión de energía con los que dispone o a través de la correcta planeación de crecimiento del mismo sistema. En ambos casos se requiere de conocer las fortalezas y debilidades que presenta el sistema durante su

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

operación diaria, es precisamente donde el análisis de contingencias adquiere importancia ya que a través de su aplicación es como se resuelven estas incógnitas.

1.3 Justificación

La familiarización con el proceso del análisis de condiciones operativas del sistema eléctrico por parte del personal que controla la red de transmisión es principalmente superficial ya que se recibe y revisa únicamente un reporte final del estudio, en el cual se tienen remarcadas aquellas condiciones que comprometen la seguridad y continuidad del servicio de transmisión de energía eléctrica, por lo que se busca aportar herramientas y experiencia para la comprensión del proceso de análisis. La presente tesis trata de profundizar en una metodología a través de la aplicación del método de análisis de contingencias a un sistema de pruebas de 14 nodos basado en una red propuesta por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE por sus siglas en inglés) utilizando el Simulador de Sistemas de Potencia (PSS/E® por sus siglas en inglés).

Los siguientes capítulos se aprovechan para acercarse nuevamente a la teoría de solución de flujos de potencia y despacho óptimo de generación, propiciando un panorama general, de conocimiento del comportamiento y operación de un sistema eléctrico de transmisión en condiciones de estado estable, que servirá de elemento básico de ayuda para futuras referencias por parte del personal operativo de nuevo ingreso o para aquellos interesados en la operación de sistemas eléctricos de potencia.

El aporte principal de este trabajo será la integración de ejemplos resueltos, principalmente de la aplicación de análisis de contingencias al sistema de pruebas, simulando condiciones similares a las presentes en un sistema eléctrico de potencia real como lo son las diferentes condiciones de la demanda de energía, [16] y la designación de límites de operación, [1].

El uso de la técnica de análisis de contingencias en tiempo real es de gran utilidad para el operador de sistema para generar consciencia situacional del estado operativo de la red ante las cambiantes condiciones eléctricas de la misma, dependientes del comportamiento dinámico de la demanda conectada y la disponibilidad de capacidad de generación. La limitante de este trabajo es el de no poderse aplicar en tiempo real ya

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

que se requieren de una actualización continua ante las modificaciones constantes de las variables eléctricas de la red, por lo que es únicamente una herramienta para el acercamiento inicial y comprensión básica de la metodología utilizada para el análisis de contingencias.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Aplicar la teoría de análisis de contingencias a un sistema de pruebas de 14 nodos propuesto por IEEE usando el software de PSS/E® y la administración de recursos de control de voltaje y control de flujos de potencia, similares a los aplicados en la operación de la red de transmisión de la Zona de Operación de Transmisión Puebla Tlaxcala, para evaluar y mejorar la confiabilidad operativa de sistemas eléctricos de potencias

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar el uso de la herramienta de análisis de contingencias en el control operativo del sistema de pruebas bajo condiciones similares de demanda en tiempo real y su utilidad para la evaluación de la confiabilidad operativa de sistemas eléctricos de potencia.
- Generar información a través de ejemplos prácticos para la solución de Análisis de Contingencias apoyándose en la plataforma PSS/E® y la aplicación de acciones de control que fortalezcan la confiabilidad operativa de los sistemas de potencia.
- Concentrar información del control y comportamiento de un sistema eléctrico de potencia que sirva de apoyo a futuras referencias tanto para el personal activo como para los de nuevo ingreso por capacitación.

1.5 Hipótesis.

La aplicación de análisis de contingencias a un sistema de pruebas propuesto por IEEE mediante el software especializado para el análisis de sistemas eléctricos de potencias, en diferentes condiciones de demanda de energía, facilita la administración de acciones

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

de control que incrementan la seguridad operativa del sistema bajo prueba, ayudando en la planeación del crecimiento de la red.

1.6 Estado del arte

La importancia del análisis de contingencias se ve fuertemente respaldado por su aplicación diaria en la operación económica de los sistemas de potencia como lo muestran los operadores independientes de sistemas, [17] y [2], donde se describe que el despacho económico de generación con restricciones de seguridad, se realiza basándose en las condiciones operativas del sistema que incluyen los límites operativos de transmisión, evaluadas a través de la estimación de estado y el análisis de contingencias.

La estimación de estado nos da una imagen actual de la condición del sistema al procesar las variables eléctricas de cada nodo a través de las señales de corriente, tensión, potencia, etc., enviadas desde los equipos de medición ubicados en las subestaciones eléctricas. Una vez procesadas la señales, estas se utilizan para la solución de flujos de potencia, ya resuelto el estudio de flujos de potencia se conocen las variables que describen el estado que guarda el sistema.

La obtención de casos base de flujos de potencia es el punto de partida para la ejecución de diversos estudios del comportamiento del sistema, entre ellos, el análisis de contingencias.

Las condiciones de operación de las redes de transmisión deben asegurar la satisfacción de la demanda de energía conectada al sistema de potencia de forma ininterrumpida haciendo el uso eficiente de los elementos que la conforman y planeando el crecimiento de la red ante los pronósticos de incremento de carga. Las organizaciones encargadas de la operación de las redes de transmisión dedican grandes esfuerzos en realizar esta tarea debido a las extensas dimensiones de la red y el vasto número de elementos que la forman, es por eso que se desarrollan modelos simplificados equivalentes de las redes generalmente llamados equivalentes de Ward, [18] y su aplicación en modelos de red en [19], ha demostrado resultados satisfactorios en cuando a manejo reducido de datos, rapidez en las simulaciones y precisión

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

considerable comparándolos directamente con los resultados obtenidos con modelos completos, [19].

Otras mejoras que se han realizado al proceso de análisis de contingencias es la utilización de factores de sensibilidad. Nuevamente las dimensiones del sistema incentivan a los investigadores a proponer modelos que disminuyen los tiempos de simulación, casos como la introducción de los factores de distribución por apertura de línea y el factor de distribución de transferencia de potencia, [20] (LODF y PTDF respectivamente por sus siglas en ingles), ambos definen la sensibilidad del cambio en el flujo de potencia de una línea, el primero ante la pérdida de otro elemento y el segundo cuando se incrementa en 1 MW la potencia inyectada en el nodo al cual se encuentra conectada la misma línea. Al final de [20], el autor compara los métodos de solución de análisis de contingencia utilizando el método de factores de sensibilidad, Newton-Raphson y Newton-Raphson desacoplado verificándose su eficiencia en términos de tiempo.

En [21] se aplica el método de análisis de contingencias con factores de distribución a un sistema de pruebas de 6 nodos para determinar las violaciones en el sistema y finalmente aplica esquemas de acción remedial para eliminar las violaciones de operación.

El análisis de contingencias en sistemas eléctricos de potencia es un tema altamente estudiado como se puede observar en [22], sus bases teóricas han sido sólidas a tal grado que los sistemas de prueba que se utilizan exhiben comportamientos similares a los sistemas de prueba reales, [22].

En la sección de estudios de posgrado de la benemérita universidad autónoma de puebla el análisis de contingencias en el sistema eléctrico de potencia es un tema nuevo, [23]. Como la seguridad operativa del sistema es importante este tipo de estudios es altamente relevante por lo que esta línea de investigación es necesaria para sentar las bases de teoría e implementación en sistemas de prueba y sistemas reales.

En [24], se realiza una programación para el análisis de contingencias utilizando el lenguaje de programación FORTRAN para los sistemas de prueba de IEEE de 14 y 30 barras, para la reducción del número de cálculos se determinan factores de distribución

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

e índices de contribución los cuales clasifican el impacto que tiene el sistema ante la pérdida de algún elemento y una vez calculados estos factores se simulan únicamente las contingencias más severas obteniéndose el ahorro de tiempo de simulación de contingencias.

En [25] se aplican los índices de funcionamiento de voltaje y de potencia activa para realizar también un listado de severidad de contingencias, el índice de funcionamiento de voltaje toma en cuenta la potencia reactiva en el nodo seleccionado, toma en cuenta la variación de voltaje entre las condiciones normales de operación y las condiciones de post-contingencia en el sistema. Los índices son determinados para sistemas de prueba de 17 barras, compara los resultados con el software DIgSILENT®.

En [26] se realiza un análisis de clasificación de contingencias a un sistema de pruebas de IEEE de 24 barras, las contingencias son clasificadas únicamente como severas o no severas utilizando red neuronal multicapas, de acuerdo a las conclusiones el método expuesto puede ser aplicado a grandes redes. Para la toma de decisiones de la red, los datos de entrada son los flujos de potencia resueltos mediante Newton-Raphson, los datos de salida era clasificación de contingencias severa o no severa.

1.7 Estructura del trabajo

Este trabajo se divide en 5 capítulos que se enumeran y describen brevemente a continuación para orientar en la lectura del mismo.

En el capítulo 1 se presenta una breve introducción de las nuevas disposiciones para el control operativo del Sistema Eléctrico Nacional, definiciones de las herramientas y del proceso que sirven para comprender el medio en que se ve envuelto la herramienta de análisis de contingencias.

En el capítulo 2 se describe en forma breve la teoría y el problema de la solución de flujos de potencia de una red eléctrica, el método de Newton-Raphson desacoplado que se ha elegido para la solución y la teoría del despacho económico sin pérdidas. Se aprovecha para introducir la base de datos del sistema de pruebas que se ha elegido

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

junto con un breve análisis del estado operativo y la problemática que guarda el sistema en condiciones de caso base.

En el tercer capítulo se encuentran los procedimientos para ejecutar el proceso y actualización de los casos bases de flujos de potencia, de los análisis del comportamiento del sistema, entre ellos el análisis de contingencias, y finalmente el despacho económico con restricciones de seguridad.

En el capítulo cuarto se presentan los cuatro escenarios que se ajustan a partir del caso base, cada uno con sus respectivas evaluaciones y las acciones de control del sistema propuestas para eliminar las problemáticas correspondientes a cada escenario.

Finalmente se presentaran las conclusiones, fruto del trabajo desarrollado en los capítulos anteriores, se introducen cambios en la capacidades del sistema y se realizan las respectivas comparaciones.

**APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE
POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD
OPERATIVA**

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2

FLUJOS DE POTENCIA, DESPACHO ECÓNOMICO Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS

2.1 Introducción

Las grandes redes de transmisión de los Sistemas Eléctricos de Potencia implican esfuerzos mayores para el conocimiento y comprensión de su comportamiento con el objetivo de mantener condiciones de seguridad, confiabilidad y continuidad del servicio de energía eléctrica, [4] y [27]. He aquí la gran importancia de los estudios de flujos de potencia que describen las condiciones de estado del sistema analizado.

Los estudios de flujos de potencia son una herramienta fundamental para la comprensión del estado operativo de las redes eléctricas actuales y base para la planeación y diseño de futuras expansiones que mejoren y satisfagan las necesidades de la propia red, tanto para que los equipos de las industrias generadoras operen en condiciones favorables como para que las cargas demandantes obtengan energía con las características adecuadas, [14].

Se presenta un breve planteamiento del problema de flujos de potencia y su descripción matemática, las variables de estado inicialmente desconocidas y el método de solución seleccionado para determinar los valores de las variables de estado para todo el sistema a partir de la cuales se calculan todas las cantidades que describen al sistema en su totalidad.

De entre los diferentes métodos para la solución de flujos de potencia, el método de Newton-Raphson presenta mejores características de convergencia y confiabilidad en conjunto con tiempos de cálculo reducidos, [22].

Se toma como modelo de análisis a un sistema de prueba de 14 nodos en el cual se aplicarán el método de solución de flujos de potencia de Newton-Raphson junto con la solución del despacho económico, finalizando con la descripción del *estado* del sistema y el análisis de la problemática del mismo en el llamado caso base.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

2.2 Descripción matemática de flujos de potencia

Se da el nombre de flujos de potencia a la solución para un sistema eléctrico que muestra corrientes, voltajes y flujos de potencias activa y reactiva para cada nodo que conforma al sistema, [22]. Como tal, la solución de flujos de potencia nos da la respuesta eléctrica a las condiciones particulares de conjuntos de cargas y aportaciones de unidades generadoras en un sistema de transmisión. “El problema de flujos de potencia consiste en determinar los valores para todas las variables de estado” según [4] dadas para un sistema eléctrico que cumplan con las condiciones de equilibrio de generación-carga dadas por las características propias del sistema [4], en los siguientes párrafos se plantea a través de ecuaciones que involucran el cálculo de las potencias activa y reactiva inyectadas a la red a través de cada nodo.

De acuerdo a [4], las líneas de transmisión se modelan mediante su equivalente monofásico π y los datos que se ingresan son la impedancia serie \mathbf{Z} y la admitancia en derivación o admitancia total de carga \mathbf{Y} del modelo π de la línea que sirven para formar la matriz de admitancia de barras de $N \times N$ de la que un típico elemento Y_{ij} tiene la forma

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sen \theta_{ij} = G_{ij} + j B_{ij} \quad (2.1)$$

Donde los términos $i - j$ representan los buses a los cuales se conectan los extremos de la línea.

El voltaje en un bus i se representa de la siguiente manera

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \sen \delta_i) \quad (2.2)$$

La siguiente sumatoria representa a la corriente total inyectada al bus i en términos de elementos Y_{in} o Y_{bus}

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{iN}V_N = \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \quad (2.3)$$

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Las potencias activas y reactivas que entran a la red a través del nodo i se representan en forma de su conjugado complejo de la siguiente manera.

$$P_i - Q_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad (2.4)$$

Al expandir la ecuación e igualando las partes real y reactiva, se obtiene

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.5)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

Las ecuaciones P_i y Q_i constituyen la forma polar de las ecuaciones de flujo; proveen el cálculo de los valores de potencias real P_i y potencia reactiva Q_i inyectadas a la red a través del nodo i .

En [4] se definen a las variables P_{gi} y P_{di} como la potencia programada generada y demandada respectivamente, entonces la potencia programada total inyectada a la red a través del nodo i esta definida por la expresión (2.6), [4] y [22]:

$$P_{i,prog} = P_{gi} - P_{di} \quad (2.6)$$

Refiriéndose a la figura 2.1 y definiendo a la variable P_i como $P_{i,calc}$ y apoyándose tanto de $P_{i,prog}$ y $P_{i,calc}$ obtiene la definición de error ΔP_i , [4]

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,calc} = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,calc} \quad (2.7)$$

Lo mismo ocurre para la potencia reactiva en el nodo i

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,calc} = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,calc} \quad (2.8)$$

Los errores se presentan durante el desarrollo de la solución de flujos de potencia cuando los valores calculado para $P_{i,calc}$ y $Q_{i,calc}$ no coinciden con los valores de $P_{i,prog}$ y $Q_{i,prog}$, cuando los valores calculados para P_i y Q_i son iguales a los valores programados entonces el *error* ΔP_i y ΔQ_i es igual a cero en el nodo i .

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

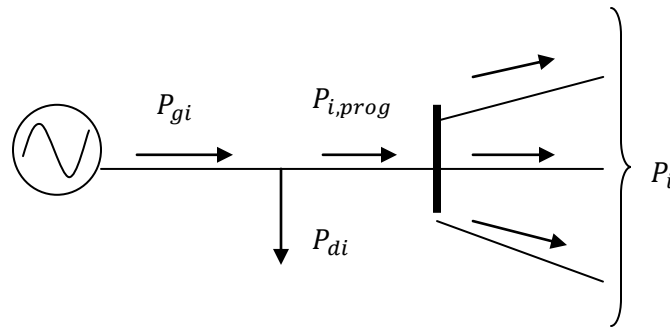


Figura 2.1. Flujos de potencia característicos en un nodo i

A continuación se definen a los nodos que componen a la red del sistema. Existen cuatro variables de estado para cada nodo δ_i , $|V|_i$, P_i y Q_i , también existen tres diferentes tipos de nodo que serán definidos de acuerdo a las variables conocidas y desconocidas, [4] y [22]. Para cada nodo se conocen 2 variables de estado y se desconocen las otras dos, las cuales serán calculadas, los datos ingresados para cada bus pueden tomarse de pronósticos de carga, despachos de generación, recursos de potencia reactiva para el control de voltaje, etcétera, [4] y [22].

- Barras de carga. Se designa barra o nodo de carga a aquella en la cual se conocen los valores para P_{di} y Q_{di} , estos valores pueden ser conocidos a partir de valores calculados o medidos previos a la solución de flujos de potencia, las dos variables desconocidas son δ_i y $|V|_i$. También es conocida como barra P-Q debido a que son estas las dos variables conocidas, [4] y [22].
- Barras de Voltaje Controlado. Este tipo de barras caracterizan por tener capacidad de potencia reactiva instalada o conectada al bus, de tal manera que el voltaje $|V|_i$ puede ser definido como constante ya que es controlado o ajustado gracias a la potencia reactiva disponible en el propio nodo. Generalmente la potencia reactiva es suministrada por una unidad generadora al ajustar la excitación del generador. Puesto que existe un generador conectado a la barra, también se conoce la magnitud de P_{gi} inyectada a través del nodo i , por lo tanto a este tipo de nodos también se les conoce como nodos P-V. Las dos variables que se buscan para este tipo de nodos serán el ángulo del voltaje δ_i y la Potencia reactiva Q_i . Existen elementos dinámicos que también sirven para

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

mantener el voltaje controlado, aún sin contar con unidades generadoras, a este tipo de nodos también entran en la categoría de nodos P-V, en la que se designa un valor para $|V|_i$, y P_{gi} se iguala a cero, [4] y [22].

- Barra compensadora. En todo el sistema existe únicamente un nodo compensador que en la teoría general es aquel nodo que cuenta con suficiente capacidad de generación para poder mantener el balance carga + pérdidas = generación. En la práctica, el nodo compensador se designa en el nodo más alejado a los centros de carga, el objetivo es que la zona de análisis refleje los cambios de flujos de potencias o perfiles de voltaje esperados ante cualquier cambio de generación, carga o voltaje y no sea influenciado por la cercanía con el nodo compensador. El ángulo δ_i , y la magnitud de voltaje $|V|_i$ se definen para este tipo de nodo, [4] y [22].

En el párrafo anterior se hace mención a que el nodo compensador mantiene el balance carga-generación. Como datos iniciales se cuenta con la carga conectada al sistema y el despacho de generación designada para satisfacer dicha demanda, debido a las características de impedancia de la red y los equipos que la componen, el flujo de corriente a través de las líneas de transmisión generan pérdidas de potencia activa y reactiva, mismas que en un principio son desconocidas hasta que se resuelven los valores de magnitud y ángulo del voltaje en cada nodo del sistema y a su vez a las corrientes individuales en las diferentes líneas de transmisión.

Las pérdidas de potencia real P_L se pueden definir a través de la siguiente ecuación, [4].

$$P_L = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N P_{gi} - \sum_{i=1}^N P_{di} \quad (2.9)$$

La diferencia (compensación) entre la P total inyectada al sistema y la P total que sale del mismo, más las pérdidas I^2R , se asignan a la barra de compensación después que se ha resuelto el problema de flujos de potencia, [4]. Lo mismo ocurre con las pérdidas I^2X .

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

$$Q_L = \sum_{i=1}^N Q_i = \sum_{i=1}^N Q_{gi} - \sum_{i=1}^N Q_{di} \quad (2.10)$$

El problema de flujos de potencia consiste en determinar los valores para todas las variables desconocidas que no fueron determinadas en los valores iniciales del estudio de flujos, también llamadas variables de estado o variables dependientes, [4] y [22]. Una vez que se han calculado todas las variables de estado, magnitudes y ángulos de voltaje para todos los nodos del sistema, se pueden calcular las demás variables de estado como son P y Q en el nodo compensador, la potencia requerida Q_i para mantener el voltaje constante en los nodos de voltaje controlado y las pérdidas de potencia P_L del sistema, principalmente se pueden resolver las ecuaciones para P_i y Q_i en cada nodo del sistema, [4] y [22].

A continuación se presenta la tabla 2.1 que resume las variables especificadas para cada tipo de nodo.

Tabla 2.1. Variables de estado designadas en cada tipo de nodo.

NODO TIPO	$ V $	δ	P	Q
CARGA	---	---	X	X
VOLTAJE CONTROLADO	X	---	X	X
COMPENSADOR	X	X	---	---

2.3 Descripción del método de Newton-Raphson

El método de Newton-Raphson es aplicado para encontrar mediante aproximaciones la raíz de una ecuación de la forma de la ecuación (2.11) minimizando a cero el error en el cálculo de la función a través de ajustes a las variables independientes asociadas a la misma, [22].

$$f(x) = C \quad (2.11)$$

La función que se desea satisfacer en flujos de potencia es:

$$P_i - Q_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad (2.12)$$

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

En [4] se desarrollan e igualan las partes real y reactiva teniendo para cada uno de los nodos i

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.13)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \sen (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.14)$$

El valor de la raíz inicialmente se desconoce por lo que se hace una suposición del valor que se cree que satisface la ecuación para que $f(x) = 0$, a este valor inicial se le nombra $x^{(0)}$, donde el superíndice (n) indica el número de iteraciones que se ha llevado a cabo en el proceso de encontrar la raíz de la función. Evidentemente este valor inicial no cumple con la función por lo que se genera el término de *corrección* $\Delta x^{(0)}$ que son los valores que se van sumando a $x^{(0)}$ para poder llegar a la solución correcta, [22].

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} + \Delta x^{(n)} \quad (2.15)$$

La ecuación anterior proporciona una nueva raíz que será introducida en la función (2-11) en el proceso de la nueva iteración hasta que la corrección sea tan pequeña en magnitud que satisface el índice de precisión deseado. Los valores iniciales de las raíces de $f(x)$ en el problema de flujos de potencia serán asignados a los valores estimados de δ_i y $|V|_i$.

$$\delta_i^{(n+1)} = \delta_i^{(n)} + \delta_i^{(n)} \quad (2.16)$$

$$|V|_i^{(n+1)} = |V|_i^{(n)} + |V|_i^{(n)} \quad (2.17)$$

En [4], a la diferencia entre la función $f(x)$ evaluada en la condición inicial $x^{(0)}$, esto es $f(x^0)$, y la constante C se le denomina el error ε y se define en las siguientes ecuaciones

$$f(x^{(n)}) + \Delta \varepsilon^{(n)} = C \quad (2.18)$$

De donde despejando $\Delta \varepsilon^{(n)}$ se obtiene el error

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

$$\Delta \varepsilon^{(n)} = C - f(x^{(n)}) \quad (2.19)$$

Puesto que el método de Newton-Raphson necesita minimizar el error a cero para encontrar la raíz de la ecuación, Grainger hace uso de la expansión de Taylor centrada en la solución supuesta que en este caso será el valor inicial $x^{(0)}$ (conforme se va avanzando en las iteraciones será $x^{(n)}$), por lo que se necesita a la función evaluada en $x^{(0)}$ mas la primera derivada evaluada también en $x^{(0)}$ como lo muestra la siguiente ecuación, [4] y [22]

$$f(x^n) + \frac{\partial f(x^n)}{\partial x} \Delta x + \varepsilon = C \quad (2.20)$$

Ajustando el error $\varepsilon = 0$ y despejando para Δx

$$\Delta x = \left(\frac{\partial f(x^n)}{\partial x} \right)^{-1} [C - f(x^n)] \quad (2.21)$$

Trasladando la ecuación (2.6) en términos de flujos de potencia y dado que para los nodos de carga se han determinado valores de $P_{i,prog}$ y $Q_{i,prog}$, se obtiene el error

$$\Delta P_i^{(n+1)} = P_{i,prog} - P_{i,calc}^n \quad (2.22)$$

$$\Delta Q_i^{(n+1)} = Q_{i,prog} - Q_{i,calc}^n \quad (2.23)$$

En el desarrollo del método, Grainger y Stevenson [4] consideran en esta parte que todos los nodos (excepto el de compensación) son de carga con demandas conocidas P_{di} y Q_{di} , toma en cuenta que los valores estimados δ_i y $|V|_i$ corresponden a los estimados de las raíces x^n , desarrolla las dos ecuaciones correspondientes a cada nodo i , que se simplifica mediante la sumatoria de todos los nodos que componen el sistema desde $n=1$ hasta $n=N$ pasando por i

$$\Delta P_i = \sum_{n=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} \Delta \delta_n + \sum_{n=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial |V|_n} \Delta |V|_n \quad (2.24)$$

$$\Delta Q_i = \sum_{n=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n} \Delta \delta_n + \sum_{n=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_n} \Delta |V|_n \quad (2.25)$$

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Al juntar todas las ecuaciones de error en forma de una matriz vector

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial |V|_1} & \dots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V|_1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta |V|_1 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Donde cada término representa a los errores = Jacobiana X correcciones. Desarrollando la ecuación de error para un nodo de 4 barras (considerando al nodo 1 como el nodo de compensación)

$$\begin{aligned} \Delta P_i = & \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_3} \Delta \delta_3 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_4} \Delta \delta_4 + \frac{\partial P_i}{\partial |V|_2} \Delta |V|_2 + \frac{\partial P_i}{\partial |V|_3} \Delta |V|_3 \\ & + \frac{\partial P_i}{\partial |V|_4} \Delta |V|_4 \end{aligned} \quad (2.27)$$

Los últimos tres términos se multiplican y dividir por sus respectivas magnitudes de voltaje sin alterar sus valores que será de utilidad para reducir el cálculo involucrado en la formación de la matriz Jacobiana. La Matriz Jacobiana **J** está compuesta por las derivadas parciales de las funciones evaluadas.

$$\begin{aligned} \Delta P_i = & \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_3} \Delta \delta_3 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_4} \Delta \delta_4 + |V|_2 \frac{\partial P_i}{\partial |V|_2} \frac{\Delta |V|_2}{|V|_2} + |V|_3 \frac{\partial P_i}{\partial |V|_3} \frac{\Delta |V|_3}{|V|_3} \\ & + |V|_4 \frac{\partial P_i}{\partial |V|_4} \frac{\Delta |V|_4}{|V|_4} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i = & \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_3} \Delta \delta_3 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_4} \Delta \delta_4 + |V|_2 \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_2} \frac{\Delta |V|_2}{|V|_2} + |V|_3 \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_3} \frac{\Delta |V|_3}{|V|_3} \\ & + |V|_4 \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_4} \frac{\Delta |V|_4}{|V|_4} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Donde:

$$|V|_j \frac{\partial P_i}{\partial |V|_j} \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad (2.31)$$

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Forman parte de la matriz Jacobiana como el elemento J_{ij} cuando n toma el valor particular de j , y

$$\frac{\Delta|V|_i}{|V|_j} \quad (2.32)$$

$$\Delta\delta_4 \quad (2.33)$$

Son la corrección planteada en la ecuación (2.6) en términos de $|V|_i$ y δ_i . Se desarrollan las ecuaciones (2.18) y (2.19) y arreglan en forma matricial, para un sistema de 4 nodos, obteniendo

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & |V|_2 \frac{\partial P_2}{\partial |V|_2} & \dots & |V|_4 \frac{\partial P_2}{\partial |V|_4} \\ \vdots & J_{11} & \vdots & \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} & |V|_2 \frac{\partial P_4}{\partial |V|_2} & \dots & |V|_4 \frac{\partial P_4}{\partial |V|_4} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} & |V|_2 \frac{\partial Q_2}{\partial |V|_2} & \dots & |V|_4 \frac{\partial Q_2}{\partial |V|_4} \\ \vdots & J_{12} & \vdots & \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_4} & |V|_2 \frac{\partial Q_4}{\partial |V|_2} & \dots & |V|_4 \frac{\partial Q_4}{\partial |V|_4} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \Delta\delta_4 \\ \vdots \\ \Delta\delta_4 \\ \frac{\Delta|V|_2}{|V|_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta|V|_2}{|V|_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Hasta aquí, [4] ha considerado que todos los nodos i son de carga. Para introducir las condiciones de los buses de voltaje controlado en las ecuaciones considera al nodo 2 como tal, entonces $|V|_2$ tiene un valor constante especificado y la corrección de voltaje $\Delta|V|_2/|V|_2$ es igual a cero, por lo que la columna dentro de la Jacobiana que multiplique a la corrección $\Delta|V|_2/|V|_2$, cuyo valor es cero, da como resultado un valor igual a cero y así, puede ser eliminada. Además, como la $Q_{2,prog}$ no se especifica, no se puede definir el error en la ecuación (2.12) y entonces queda eliminada su fila, correspondiente a Q_2 , [4] y [22].

Al final de la solución de flujos, ya contando con las variables de estado se puede hacer uso de las ecuaciones (2.4) y (2.5) y así determinar el valor de Q_2 necesario para mantener el voltaje controlado en el propio nodo designado como de voltaje controlado, también se podrán determinar las demás incógnitas tanto de potencia inyectas en el

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

nodo compensador como de las magnitudes de los flujos de potencia a través de las líneas, [4] y [22].

2.4 Descripción del método de flujos de desacoplado rápido

El objetivo del método de desacoplado rápido de Newton-Raphson es el de mejorar la eficiencia computacional y reducir los requisitos de memoria, principalmente en los cálculos de los términos que forman la matriz Jacobiana que se tienen que recalcular en cada nueva iteración, lo que hace más tardado el proceso de solución, [4] y [22].

La modificación del método de Newton-Raphson se basa en dos principales simplificaciones a los términos de la matriz Jacobiana, [4] y [22].

En [22], los términos de P evaluados en V $|V|_j \frac{\partial P_i}{\partial |V|_j}$ se consideran igual a cero ya que se ha observado que los cambios en $|V|$ no afecta significativamente cambios en el flujo de potencia activa en las líneas de transmisión por lo que se determina igual a cero en este método. El mismo trato se tiene con el término $\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j}$ de la Jacobiana, donde también se observa que existe poca influencia en la relación entre δ y Q , por lo que también se estima igual a cero. Si se desarrolla la matriz Jacobiana, teniendo las consideraciones anteriores, se podrá observar que los elementos en J_{12} y J_{21} en la ecuación (2.20) se pueden eliminar de la matriz, ahorrándose los cálculos correspondientes, [4] y [22].

$$\Delta P_i = \sum_{n=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} \Delta \delta_n \quad (2.35)$$

$$\Delta Q_i = \sum_{n=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_n} \Delta |V|_n \quad (2.36)$$

Para seguir reduciendo el número de cálculos y agilizar el resultado de Flujos de Potencia se realizan nuevas consideraciones, [4] y [22].

- $\cos(\delta_i - \delta_j) = 1$; se puede hacer esta conjetura puesto que la diferencia angular entre δ_i y δ_j , por lo general es pequeña. Además $\sin(\delta_i - \delta_j) \approx (\delta_i - \delta_j)$.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

- $G_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) \ll B_{ij} \text{cos}(\delta_i - \delta_j)$
- $Q_i \ll |V_i|^2 B_{ii}$

En [22] se aplican las simplificaciones obteniéndose a los elementos de la Jacobiana. Para los elementos fuera de la diagonal ($n = j$), ($n \neq i$)

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_j| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} \cong -|V_i V_j| B_{ij} \quad (2.37)$$

Y para los elementos dentro de la diagonal ($n = i$)

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = |V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} \cong -|V_i|^2 B_{ij} \quad (2.38)$$

Aplicándose las modificaciones en la ecuación (2.21)

$$\Delta P_i = \sum_{n=1}^N -|V_i V_n| B_{in} \Delta \delta_n \quad (2.39)$$

$$\Delta Q_i = \sum_{n=1}^N -|V_i V_n| B_{in} \Delta |V|_n \quad (2.40)$$

Se divide entre $|V_i|$ y se considera que $|V_n| = 0$

$$\frac{\Delta P_i}{|V_i|} = \sum_{n=1}^N -B_{in} \Delta \delta_n \quad (2.41)$$

$$\frac{\Delta Q_i}{|V_i|} = \sum_{n=1}^N -B_{in} \Delta |V|_n \quad (2.42)$$

Ahora todos los elementos en la matriz de coeficientes son constantes iguales al negativo de las susceptancias de $Y_{barrera}$ de cada nodo i , por lo que ya no se requiere sean recalculados en cada iteración. Desarrollando para el nodo $i = 3$

$$\frac{\Delta P_3}{|V_3|} = -B_{33} \Delta \delta_3 - B_{34} \Delta \delta_4 \quad (2.43)$$

$$\frac{\Delta Q_3}{|V_3|} = -B_{33} \Delta |V|_3 - B_{34} \Delta |V|_4 \quad (2.44)$$

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Como se puede observar, se sigue considerando al nodo 2 como nodo de voltaje controlado, lo que quiere decir que Q_2 no se especifica y que $\Delta|V|_2 = 0$, por ser $|V|_2 = constante$, por lo que se eliminan la fila y columna 2.

2.5 Despacho económico sin pérdidas (DE)

En un sistema eléctrico de potencia se busca siempre el balance de carga-generación minimizando el costo de producción de la energía generada, [28]. Para determinar la distribución económica de las cargas se toma en consideración la eficiencia de combustible que es el recíproco de la proporción de la cantidad de gasto energético suministrado a las unidades generadoras necesario para la obtención de energía eléctrica, [4]. Esta relación se observa en las curvas de entrada-salida la cual muestra la potencia de salida en MW con respecto a la entrada de combustible en Btu/h como lo muestra la tabla 2.2 y la figura 2.2 de valores que la genera.

Tabla 2.2. Datos de curva de energía

U 01		U 02		U 03		U 04		U 05		U 06	
MW	Btu/h	MW	Btu/h	MW	Btu/h	MW	Btu/h	MW	Btu/h	MW	Btu/h
0	4000	0	6000	300	8200	200	8000	0	5000	0	5500
250	7500	250	7500	450	9100	400	9000	250	6000	50	7000
500	9000	500	8500	600	10000	600	10000	500	9000	75	9000
750	11000	750	10700	700	11000	650	11250	750	13200	95	11000
800	13000	800	15000	800	12000	675	12500	850	17250	110	13000
850	17250	850	17250	900	13000	700	15000	950	18600	125	17250

En [4], Grainger y Stevenson describen que el despacho de generación entre las unidades conectadas al sistema se basa en la proporción que existe entre el incremento y decremento del costo total de generación al aumentar la carga de una unidad generadora en la misma proporción que se disminuye la carga en otra unidad.

El costo incremental de combustible de una unidad se puede expresar en términos de la pendiente de la curva de entrada-salida como

$$\lambda_i = \frac{df_i}{dP_{gi}} = a_i P_{gi} + b_i \quad (2.45)$$

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

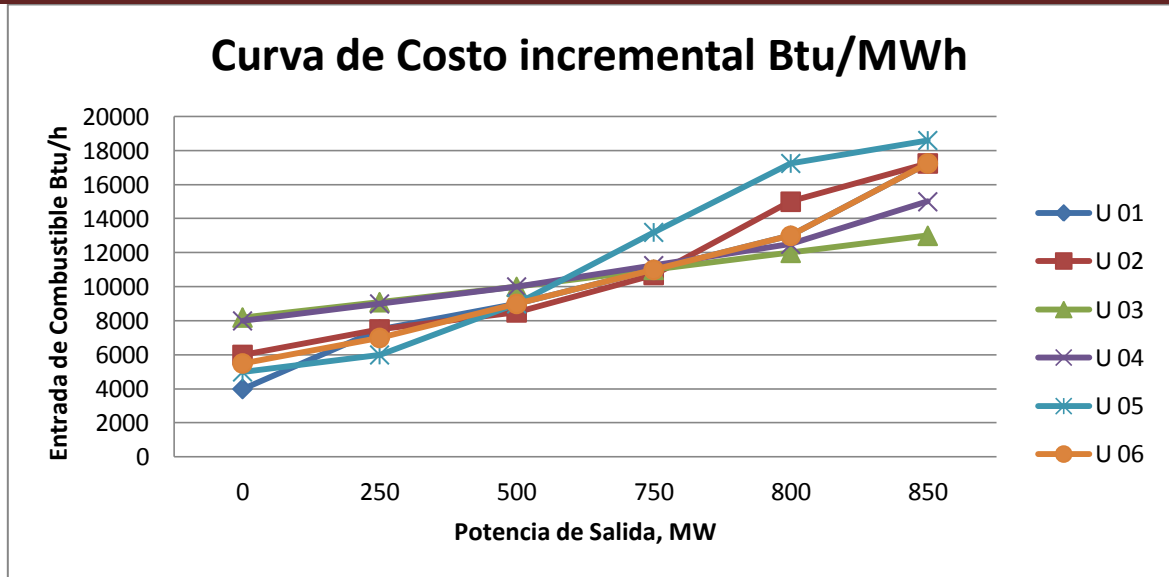


Figura 2.2. Curva de costo incremental

Donde f_i = entrada a la unidad i , P_{gi} = salida de la unidad i y a_i y b_i son constantes. El costo incremental de combustible aproximado, es el costo adicional en dólares por hora para incrementar la salida en 1 MW, [22].

Suponiendo una planta con n unidades el costo incremental está dado por

$$\lambda = a_T P_T + b_T \quad (2.46)$$

Donde λ es el costo incremental total calculado de la planta

$$a_T = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i} \right)^{-1} \quad (2.47)$$

$$b_T = a_T \left(\sum_{i=1}^n \frac{b_T}{a_i} \right)^{-1} \quad (2.48)$$

$$P_{gT} = \sum_{i=1}^n P_{gi} \quad (2.49)$$

El costo incremental total λ calculado de la planta al suponer varios valores de salida total de la planta P_{gT} se sustituye en la ecuación de costo incremental de

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

combustible de cada unidad para calcular su salida al resolver la ecuación en términos de P_{gi} como sigue, [4] y [22]

$$P_{gi} = \frac{\lambda - b_i}{a_i} \quad (2 - 50)$$

Si la carga asignada viola el límite máximo de generación de una unidad, esta aportará el máximo designado, se calcula un nuevo costo incremental de la ecuación para la carga restante y el valor obtenido se sustituye en la ecuación que designará el despacho económico para las unidades disponibles, [4].

2.6 Descripción del sistema de pruebas,

Los cálculos y análisis desarrollados se ejecutan en un sistema de pruebas de 14 nodos de IEEE cuyo diagrama unifilar se anexa en el apéndice. Este sistema de pruebas cuenta con las siguientes características:

- 14 nodos o buses en tensiones de 1 kV, 13.2 kV, 115 kV y 230 kV.
- 16 líneas de transmisión de las cuales la mitad se encuentra conectada en un nivel de tensión de 230 kV y la otra mitad en una tensión de 115 kV. Las características de impedancia Z y admitancia Y se pueden consultar a detalle en la tabla 2.4 al igual que sus límites de capacidad en términos de MVA.
- 5 unidades generadoras, de las cuales 3 se encuentran conectadas en un nivel de tensión de 230 kV, una en 115 kV y la última en el nivel de tensión de 13.8 kV que finalmente se interconecta al sistema a través de un transformador de tres devanados. Los datos generales se pueden observar en la tabla 2.4. El sistema de pruebas designa al generador número uno como la unidad que compensará el balance de energía del sistema.
- 11 cargas distribuidas en los 2 niveles de tensión superiores y caracterizadas por sus demandas en potencia activa y reactiva. El total de carga es de 259 MW y 73.5 MVAR. Ver tabla 2.5.
- Tres transformadores de los cuales existe un transformador de 3 devanados, del cual, cada devanado es modelado como un transformador donde se designa al

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

bus 7 como el nodo común con 1 kV de tensión nominal. Los transformadores se encuentran conectados entre los niveles de tensión de 13.8 kV, 115 kV y 230 kV. Los datos generales se encuentran en la tabla 2.7.

- 1 capacitor conectado en paralelo en el Bus 9 con una capacidad de 19 MVAR tabla 2.6.

Es importante mencionar que para el caso base no se modifica la base de datos y ajustes preestablecidos cuyos datos e información se puede consultar a detalle en [29].

Tabla 2.3. Impedancias, admitancias y capacidades de las líneas del sistema de pruebas.

		R	X	Cargabilidad B	Limite 1	Limite 2	Limite 3
De Bus	A Bus	(pu)			MVA		
BUS 1	BUS 2	0.03876	0.11834	0.0264	67.5	74.3	81
BUS 1	BUS 2	0.03876	0.11834	0.0264	67.5	74.3	81
BUS 1	BUS 5	0.05403	0.22304	0.0492	150	160	170
BUS 2	BUS 3	0.04699	0.19797	0.0438	90	99	108
BUS 2	BUS 4	0.05811	0.17632	0.034	67.5	74.3	81
BUS 2	BUS 5	0.05695	0.17388	0.0346	67.5	74.3	81
BUS 3	BUS 4	0.06701	0.17103	0.0128	37.5	41.3	45
BUS 4	BUS 5	0.01335	0.04211	0	90	99	108
BUS 6	BUS 11	0.09498	0.1989	0	75	82.5	90
BUS 6	BUS 12	0.12291	0.25581	0	90	99	108
BUS 6	BUS 13	0.06615	0.13027	0	90	99	108
BUS 9	BUS 10	0.03181	0.0845	0	45	49.5	54
BUS 9	BUS 14	0.12711	0.27038	0	90	99	108
BUS 10	BUS 11	0.08205	0.19207	0	60	66	72
BUS 12	BUS 13	0.22092	0.19988	0	90	99	108
BUS 13	BUS 14	0.17093	0.34802	0	52.5	57.8	63

Tabla 2.4. Capacidad de generación de las unidades y nivel de ajuste de voltaje para el caso base

Bus	Vprogramado	PGen	PMax	PMin	QGen	QMax	QMin	Mbase		
Código	(pu)	(MW)			(MVAR)		(MVA)			
BUS 1	230.00	3	1.06	232.393	9999	-9999	0	100	-20	100
BUS 2	230.00	2	1.045	40	9999	-9999	0	50	-40	100
BUS 3	230.00	2	1.01	0	9999	-9999	0	40	0	100
BUS 6	115.00	2	1.07	0	9999	-9999	0	24	-6	100
BUS 8	13.200	2	1.09	0	9999	-9999	0	24	-6	100

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Tabla 2.5. Cargas conectadas al sistema de pruebas en caso base.

Bus		Pcarga (MW)	Qcarga (MVAR)	Bus		Pcarga (MW)	Qcarga (MVAR)
BUS 2	230.00	21.7	12.7	BUS 10	115.00	9	5.8
BUS 3	230.00	94.2	19	BUS 11	115.00	3.5	1.8
BUS 4	230.00	47.8	-3.9	BUS 12	115.00	6.1	1.6
BUS 5	230.00	7.6	1.6	BUS 13	115.00	13.5	5.8
BUS 6	115.00	11.2	7.5	BUS 14	115.00	14.9	5
BUS 9	115.00	29.5	16.6				

Tabla 2.6. Capacidad en MVAR del capacitor serie conectado al bus 9.

Bus		G-Derivación (MW)	B-Derivación (MVAR)
BUS 9	115.00	0	19

Tabla 2.7. Capacidad de los transformadores en MVA de acuerdo a su tipo de enfriamiento OA/FOA/FOA

			R	X	Limite 1	Limite 2	Limite 3
De Bus	A Bus	Posiciones de Tap	(pu)		(MVA)		
BUS 4 230.00	BUS 7 1.0000	33	0	0.20912	75	82.5	90
BUS 4 230.00	BUS 9 115.00	33	0	0.55618	75	82.5	90
BUS 5 230.00	BUS 6 115.00	33	0	0.25202	75	82.5	90
BUS 7 1.0000	BUS 8 13.200	33	0	0.17615	30	32.5	35
BUS 7 1.0000	BUS 9 115.00	33	0	0.11001	75	82.5	90

La herramienta utilizada para realizar el análisis de contingencias es el software en versión básica de PSS/E® que se ha descrito en el capítulo uno.

Como primer paso se introduce la base de datos del sistema de pruebas de catorce nodos IEEE-14 disponible en el sitio web [29], para fines de ayuda en la captura manual se utiliza la guía de apoyo del libro de Simulación de Sistemas Eléctricos [30] introduciendo los valores requeridos para cada elemento divididos en las diferentes pestañas de la hoja de datos. La carga del sistema se reparte únicamente entre las unidades conectadas al bus uno y al bus dos, ya que el mismo sistema de pruebas asigna al bus uno como nodo compensador.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Tabla 2.8. Código de colores utilizado en el diagrama unifilar del sistema de pruebas

Nivel de Tensión	Color	Elemento Fuera de Límites	Color
230 kV	Amarillo	Línea	Azul
115 kV	Morado Magenta	Bus límite alto	Azul
13.2 kV	Negro	Bus límite bajo	Verde
1 kV	Naranja		

Se puede observar en la tabla 2.7 los tres rangos de capacidad de transformación de acuerdo al paso o tipo de enfriamiento utilizado OA/FOA/FOA que indican que el Transformador está sumergido en líquido aislante con enfriamiento propio/aceite forzado–aire forzado/aceite forzado-aire forzado, estos valores los proporciona el fabricante.

2.6.1 Solución de flujos de potencia del sistema de pruebas

A continuación en las siguientes tablas 2.9, 2.10 y 2.11, se muestran los valores obtenidos para las variables de estado de la solución de flujos de potencia del sistema de pruebas utilizando el método de desacoplado rápido de Newton-Raphson. En lo consecuente se considerará como caso base para siguientes referencias o demanda media para el capítulo cuatro, que hace referencia a la misma condición operativa.

Analizando las “condiciones de estado” del caso base a partir de la solución de flujos de potencia se observa lo siguiente:

- La totalidad de generación se asigna a las unidades conectadas al Bus 1 (B01) y Bus 2 (B02), con un total de 272.4 MW, lo cual satisface a los 259 MW de demanda de las cargas conectadas al sistema más las pérdidas de potencia activa del sistema.
- Se satisfacen los voltajes ajustados para cada nodo P-V, Bus1 (B01), Bus 2 (B02), Bus 3 (B03), Bus 6 (B06) y Bus 8 (B08) (nodos con unidades generadoras), una vez obtenida la solución de flujos de potencia, las necesidades de potencia reactiva se actualizan en la pestaña de datos de

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

generadores. La unidad uno requiere absorber potencia reactiva para cumplir con el ajuste de voltaje.

- Se obtienen el perfil de voltaje y las diferencias angulares para cada Bus del sistema, actualizado de forma automática en la pestaña de datos de buses. Una vez obtenidas las variables de estado se calculan los flujos de potencia activa y reactiva que se desplazan a través de las líneas de transmisión y que se describen en la tabla 9 y en el diagrama unifilar al final de este capítulo.

Tabla 2.9. Flujos de potencia activa y reactiva de la solución de flujos de potencia.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E WED, JUL 20 2016 1:14											
IEEE 14 BUS TEST CASE					%MVA PARA TRANSFORMERS						
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA					% I PARA RAMALES						
<<< DE BUS >>>					<<< A BUS >>>						
NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL	VOLTAJE	ÁNGULO	GEN	NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL				CARGA	
	kV	PU/ kV		MW/ MVAR		kV	MW	MVAR	AMPS	%	LIMITE 1
BUS 1	230	1.06	0	232.4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		243.8		-16.5R	BUS 2	230	78.4	-10.2	187	111	169A
					BUS 2	230	78.4	-10.2	187	111	169A
					BUS 5	230	75.5	3.9	179	48	377A
BUS 2	230	1.045	-5	40	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		240.35		43.6R	BUS 1	230	-76.3	13.8	186	110	169A
					BUS 1	230	-76.3	13.8	186	110	169A
					BUS 3	230	73.2	3.6	176	78	226A
					BUS 4	230	56.1	-1.5	135	80	169A
					BUS 5	230	41.5	1.2	100	59	169A
BUS 3	230	1.01	-12.7	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		232.3		25.1R	BUS 2	230	-70.9	1.6	176	78	226A
					BUS 4	230	-23.3	4.5	59	63	94A
BUS 4	230	1.0177	-10.3	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		234.06		0	BUS 2	230	-54.5	3	135	79	169A
					BUS 3	230	23.7	-4.8	60	63	94A
					BUS 5	230	-61.2	15.8	156	69	226A
					BUS 7	1	28.1	-9.7	73	40	75M
					BUS 9	115	16.1	-0.4	40	21	75M
BUS 5	230	1.0195	-8.8	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		234.49		0	BUS 1	230	-72.7	2.2	179	48	377A
					BUS 2	230	-40.6	-2.1	100	59	169A
					BUS 4	230	61.7	-14.2	156	69	226A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 2.9 flujos de potencia activa y reactiva de la solución de flujos de potencia.

<<< DE BUS >>>					<<< A BUS >>>						
NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL	VOLTAJE	ÁNGULO	GEN	NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL				CARGA	
	kV	PU/ kV		MW/ MVAR		kV	MW	MVAR	AMPS	%	LÍMITE 1
					BUS 6	115	44.1	12.5	113	61	75M
BUS 6	115	1.07	-14.2	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		123.05		12.7R	BUS 5	230	-44.1	-8	210	60	75M
					BUS 11	115	7.4	3.6	38	10	377A
					BUS 12	115	7.8	2.5	38	8	452A
					BUS 13	115	17.8	7.2	90	20	452A
BUS 7	1	1.0615	-13.4	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		1.0615		0	BUS 4	230	-28.1	11.4	16489	40	75M
BUS 7					-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
					BUS 8	13.2	0	-17.2	9338	57	30M
					BUS 9	115	28.1	5.8	15606	38	75M
BUS 8	13.2	1.09	-13.4	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		14.388		17.6R	BUS 7	1	0	17.6	707	59	30M
BUS 9	115	1.0559	-14.9	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		121.43		0	BUS 4	230	-16.1	1.7	77	22	75M
					BUS 7	1	-28.1	-5	136	38	75M
					BUS 10	115	5.2	4.2	32	14	226A
					BUS 14	115	9.4	3.6	48	11	452A
BUS 10	115	1.051	-15.1	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		120.86		0	BUS 9	115	-5.2	-4.2	32	14	226A
					BUS 11	115	-3.8	-1.6	20	7	301A
BUS 11	115	1.0569	-14.8	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		121.54		0	BUS 6	115	-7.3	-3.4	38	10	377A
					BUS 10	115	3.8	1.6	20	7	301A
BUS 12	115	1.0552	-15.1	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		121.35		0	BUS 6	115	-7.7	-2.4	38	8	452A
					BUS 13	115	1.6	0.8	9	2	452A
BUS 13	115	1.0504	-15.2	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		120.79		0	BUS 6	115	-17.5	-6.8	90	20	452A
					BUS 12	115	-1.6	-0.7	9	2	452A
					BUS 14	115	5.7	1.7	28	11	264A
BUS 14	115	1.0355	-16	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		119.08		0	BUS 9	115	-9.3	-3.4	48	11	452A
					BUS 13	115	-5.6	-1.6	28	11	264A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Tabla 2.10. Ajuste de generación del caso base.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E SUN, OCT 09 2016 1:53						
IEEE 14 BUS TEST CASE						
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA						
RESUMEN DE UNIDADES:						
NOMBRE	VNOMkV	MW	MVAR	ETERM	CORRIENTE	PF
BUS 1	230	232.4	-16.5	1.06	219.8*	0.9975
BUS 2	230	40	43.6	1.045	56.6	0.6764
BUS 3	230	0	25.1	1.01	24.8	0
BUS 6	115	0	12.7	1.07	11.9	0
BUS 8	13.2	0	17.6	1.09	16.2	0
	TOTALES	272.4	82.4			

Tabla 2.11. Violaciones de voltaje para el caso base

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E WED, JUL 20 2016 1:14									
IEEE 14 BUS TEST CASE									
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA									
BUSES CON VOLTAJE MAYOR A 1.0500:									
BUS	VNOMkV	AREA	V(PU)	V(kV)	BUS	VNOMkV	AREA	V(PU)	V(kV)
1	230	1	1.06	243.8	6	115	1	1.07	123.05
7	1	1	1.0615	1.062	8	13.2	1	1.09	14.388
9	115	1	1.0559	121.43	10	115	1	1.051	120.86
11	115	1	1.0569	121.54	12	115	1	1.0552	121.35
13	115	1	1.0504	120.79					
BUSES CON VOLTAJE MENOR A 0.9500:									
* NONE *									

Se presentan las siguientes problemáticas operativas del sistema del caso base.

- Violaciones de límite alto de voltaje (1.05 pu) en los buses de voltaje controlado B01, B06 y B08 y los demás buses que indica la tabla 2.11,
- Violaciones de límite de transferencia en las líneas que conectan a los buses 1 y 2 (LT1-2), operando por arriba del límite térmico.

A continuación se aplica el despacho económico de generación sin pérdidas y se analizan los cambios que se producen en el sistema. La siguiente tabla 2.12 muestra la designación de carga a cada unidad generadora, junto con el costo de producción y el costo incremental.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Tabla 2.12. Despacho económico sin pérdidas del caso base

Production cost is 3649.72 \$/hour						
Incremental cost is 6.29 \$/MW-hour						
PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E SUN, SEP 18 2016 16:23						
IEEE 14 BUS TEST CASE						
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA						
RESUMEN DE UNIDADES:						
NOMBRE	VNOMkV	MW	MVAR	ETERM	CORRIENTE	PF
BUS 1	230	56.4	-16.5	1.06	55.4	0.9595
BUS 2	230	108.9	43.6	1.045	112.2*	0.9285
BUS 3	230	28.9	25.1	1.01	37.9	0.7553
BUS 6	115	24.1	12.7	1.07	25.5	0.8841
BUS 8	13.2	40.8	17.6	1.09	40.7	0.9178
	TOTALES	259	82.4			

La tabla 2.13. contiene la solución de flujos de potencia con el despacho económico sin pérdidas obtenido en la tabla 2.12. La figura 2.3 contiene la información contenida en el diagrama unifilar del sistema de pruebas.

Tabla 2.13. Nueva solución de flujos de potencia aplicando despacho económico

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E SUN, SEP 18 2016 16:36											
IEEE 14 BUS TEST CASE						%MVA PARA TRANSFORMADORES					
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA						% I PARA RAMALES					
<<< DE BUS >>>					<<< A BUS >>>						
NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL	VOLTAJE		GEN	NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL				CARGA	
	kV	PU/kV	ÁNGULO	MW/MVAR		KV	MW	MVAR	AMPS	%	LÍMITE 1
BUS 1	230	1.06	0	60.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		243.8		20.0R	BUS 2	230	14.5	7.3	38	23	169A
					BUS 2	230	14.5	7.3	38	23	169A
					BUS 5	230	31.2	5.4	75	20	377A
BUS 2	230	1.045	-0.7	108.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		240.35		-4.2R	BUS 1	230	-14.4	-9.9	42	25	169A
					BUS 1	230	-14.4	-9.9	42	25	169A
					BUS 3	230	49.1	6.5	119	53	226A
					BUS 4	230	37.4	-2.5	90	53	169A
					BUS 5	230	29.6	-1.1	71	42	169A
BUS 3	230	1.01	-5.8	28.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		232.3		8.5R	BUS 2	230	-48	-6.6	120	53	226A
					BUS 4	230	-17.3	-3.9	44	47	94A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 2.13 nueva solución de flujos de potencia aplicando despacho económico

<<< DE BUS >>>					<<< A BUS >>>						
NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL	VOLTAJE	ÁNGULO	GEN	NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL				CARGA	
	kV	PU/kV		MW/MVAR		kV	MW	MVAR	AMPS	%	LÍMITE 1
BUS 4	230	1.0273	-4.3	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		236.27		0	BUS 2	230	-36.6	1.1	90	53	169A
					BUS 3	230	17.5	3.1	43	46	94A
					BUS 5	230	-33.7	7.3	84	37	226A
					BUS 7	1	-1.9	-7.70	19	11	75M
					BUS 9	115	6.9	0.00	17	9	75M
BUS 5	230	1.0288	-3.4	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		236.62		0	BUS 1	230	-30.7	-8.7	78	21	377A
					BUS 2	230	-29.1	-1.2	71	42	169A
					BUS 4	230	33.9	-6.9	84	37	226A
					BUS 6	115	18.3	15.20	58	32	75M
BUS 6	115	1.07	-5.7	24.1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		123.05		5.8R	BUS 5	230	-18.3	-14.0	108	31	75M
					BUS 11	115	6.4	2.9	33	9	377A
					BUS 12	115	7.6	2.4	37	8	452A
					BUS 13	115	17.3	6.9	87	19	452A
BUS 7	1	1.0656	-4	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		1.0656		0	BUS 4	230	1.9	7.81	4336	11	75M
					BUS 8	13.2	-40.8	-13.51	23255	143	30M
					BUS 9	115	38.9	5.7 1	21276	52	75M
BUS 8	13.2	1.09	-0.5	40.8	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		14.388		16.3R	BUS 7	1	40.8	16.3 1	1762	146	30M
BUS 9	115	1.0605	-6.2	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		121.96		0	BUS 4	230	-6.9	0.2 1	33	9	75M
					BUS 7	1	-38.9	-4.2 1	185	52	75M
					BUS 10	115	6.2	4.8	37	16	226A
					BUS 14	115	10.1	4	51	11	452A
BUS 10	115	1.0548	-6.4	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		121.31		0	BUS 9	115	-6.2	-4.8	37	16	226A
					BUS 11	115	-2.8	-1	14	5	301A
BUS 11	115	1.0589	-6.2	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		121.78		0	BUS 6	115	-6.3	-2.9	33	9	377A
					BUS 10	115	2.8	1.1	14	5	301A
BUS 12	115	1.0556	-6.5	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 2.13 nueva solución de flujos de potencia aplicando despacho económico

<<< DE BUS >>>					<<< A BUS >>>						
NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL	VOLTAJE	ÁNGULO	GEN	NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL				CARGA	
	kV	PU/kV		MW/MVAR		kV	MW	MVAR	AMPS	%	LÍMITE 1
		121.39		0	BUS 6	115	-7.5	-2.3	37	8	452A
					BUS 13	115	1.5	0.7	8	2	452A
BUS 13	115	1.0511	-6.6	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		120.87		0	BUS 6	115	-17.1	-6.5	87	19	452A
					BUS 12	115	-1.5	-0.7	8	2	452A
					BUS 14	115	5	1.4	25	9	264A
BUS 14	115	1.0385	-7.4	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		119.43		0	BUS 9	115	-10	-3.7	51	11	452A
					BUS 13	115	-4.9	-1.3	25	9	264A

El reparto de generación a cada una de las unidades obtenido de la solución de flujos de potencia queda como se designa en la tabla 2.14.

Tabla 2.14. Ajuste de generación en nueva solución de flujos de potencia del caso base.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E MON, SEP 19 2016 10:03						
IEEE 14 BUS TEST CASE						
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA						
RESUMEN DE UNIDADES:						
NOMBRE	VNOMkV	MW	MVAR	ETERM	CORRIENTE	PF
BUS 1	230	60.2	20	1.06	59.8	0.9492
BUS 2	230	108.9	-4.2	1.045	104.3*	0.9993
BUS 3	230	28.9	8.5	1.01	29.8	0.9593
BUS 6	115	24.1	5.8	1.07	23.1	0.9725
BUS 8	13.2	40.8	16.3	1.09	40.3	0.9282
	TOTALES	262.8	46.3			

En la última solución de flujos de potencia se observa lo siguiente:

- Se eliminan las sobrecargas en las líneas de transmisión como resultado del reparto de generación a todas las unidades participantes.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

- Se reducen las pérdidas del sistema al ejecutar el despacho económico, en consecuencia se disminuye en -10 MW el total de generación inyectada al sistema.
- Se mantienen las violaciones por alto voltaje en el sistema, debido principalmente al voltaje programado en los nodos de voltaje controlado.

Los perfiles de voltaje fuera de los límites operativos con los siguientes valores mostrados en la tabla 2.15.

Tabla 2.15. Violaciones de voltaje para el caso base con despacho económico

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R E SUN, OCT 09 2016 18:44									
IEEE 14 BUS TEST CASE									
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA									
BUSES CON VOLTAJE MAYOR A 1.0500:									
BUS	VNOMkV	AREA	V(PU)	V(kV)	BUS	VNOMkV	AREA	V(PU)	V(kV)
1	230	1	1.06	243.8	6	115	1	1.07	123.05
7	1	1	1.0656	1.066	8	13.2	1	1.09	14.388
9	115	1	1.0605	121.96	10	115	1	1.0548	121.31
11	115	1	1.0589	121.78	12	115	1	1.0556	121.39
13	115	1	1.0511	120.87					
BUSES CON VOLTAJE MENOR A 0.9500:									
* NONE *									

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTOS

3.1 Introducción

El presente capítulo realiza un breve recorrido sobre una pequeña porción de los procedimientos y protocolos que realizan tres operadores independientes de sistemas eléctricos de potencia para el control y la operación eficiente de sus sistemas. Uno de ellos es el Centro Nacional de Control de la Energía, entidad que tiene bajo su responsabilidad el control operativo de Sistema Eléctrico Nacional, como lo indica el Código de Red, [1]. Los otros dos operadores independientes son PJM y CAISO. PJM resguarda la operación del Sistema Interconectado de los estados de Penssylvania, New Jersey, Maryland entre otros más, [31]. CAISO se encarga de la operación del Sistema Eléctrico del 80% del Estado de California y parte de Nevada, [32].

El protocolo para realizar la actualización de casos bases de flujos de potencia se considera una base fundamental para realizar un gran número de análisis y estudios realizados sobre el sistema eléctrico de los cuales se obtiene información sumamente relevante para la operación de los sistemas de potencia, [33], [34] y [9].

Una vez obtenida la actualización de los casos bases estos pasan a formar parte de los datos de entrada para la elaboración de estudios del comportamiento del sistema eléctrico dentro de los que se encuentran los análisis de contingencias, [6].

La procuración de energía suficiente para satisfacer la carga demandada al sistema forma parte fundamental para la operación de sistemas eléctricos de potencia, actividad en la cual se busca la mayor eficiencia económica impulsada principalmente por los mercados eléctricos mayoristas, [35] y [28]. En el presente trabajo se compila de manera muy resumida el proceso por el que se ejecuta el despacho económico de generación llevado a cabo por los tres operadores independientes mencionados anteriormente.

3.2 Procedimiento para realizar el caso base de flujos de potencia del sistema

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Regresando a la definición de la solución del problema del flujo de potencias, el cual se entiende como la determinación de las variables de estado que describen las condiciones que comportamiento del sistema eléctrico que se analiza, [4] y [22], y puesto que el encargado del control operativo y físico del sistema tiene la necesidad de conocer el estado que guarda la red que controla es necesario realizar análisis de flujos cada vez que se lleve a cabo una cambio en la topología de la red, se modifiquen las demandas de potencia de las cargas conectadas, o el despacho de generación. Todas las actividades realizadas están relacionadas con la confiabilidad y economía en la operación del sistema eléctrico de potencia.

Para la operación en tiempo real se requiere de la actualización continua de los parámetros eléctricos, entre perfiles de voltaje en buses y flujos de potencia sobre las líneas de transmisión, que describen al sistema a través de sistemas de adquisición de datos (SCADA por sus siglas en inglés) y la visualización de la red y sus parámetros mediante sistemas de administración de energía (EMS por sus siglas en inglés), [27].

Para la solución de flujos de potencia fuera de línea se requiere de la actualización del modelo de red ante cualquier modificación de la topología del sistema, ya sea por modernización de equipos, entrada en servicio de subestaciones, retiro de unidades, etcétera, en conjunto con pronósticos de demanda de carga, entre otros requerimientos propios de las necesidades que se presenten, [36] y [34].

A continuación se describen algunas de las necesidades de adquisición de datos e información necesaria para mantener actualizado el modelo de red que servirá como Caso Base de Flujos de Potencia para los análisis correspondientes de planeación y confiabilidad del sistema evaluados tanto para el corto plazo como para el mediano plazo (de acuerdo a las necesidades del encargado de la operación del sistema). La información requerida que conformará al modelo de red corresponderá al escenario esperado al momento del plazo a analizar.

- Modelo de red del caso base más reciente del propio sistema de transmisión y de las sistemas aledaños, [37].
- Obtener relación de ejecución de obras programadas para puesta en servicio de nuevos equipos, [34], [36] y [37].

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

- Obtener la relación de obras de modernización, recalibración de líneas de transmisión y repotenciación de transformadores, reactores, interruptores, etcétera, [36] y [37].
- Cálculo de parámetros correspondientes del elemento a modelar, [34].
- Actualización del modelo de red con los cambios en la topología esperada en el sistema, ya sea por la entrada o salida de servicio en la red de un elemento o por la posición del número de espiras en transformadores, [34].
- Actualizar demandas de carga de potencia activa y reactiva de la red de acuerdo a los pronósticos de demanda para el escenario a evaluar (demanda máxima, media y mínima), [34].
- Ajustar condiciones de despacho de generación de acuerdo a la capacidad de generación disponible basados en los programas de mantenimiento de las centrales generadoras, [37].
- Ajustar condiciones para nodos de voltaje controlado

La Organización Regional de Transmisión de PJM (RTO por sus siglas en inglés) realiza dos modelos del Caso Base uno para el horario de verano y otro para el horario de invierno y únicamente para los periodos de demanda máxima, [36], además de diferentes atributos en el pronóstico de carga-generación. El Operador Independiente del Sistema de California CAISO, realiza la actualización del Caso Base de Flujos de Potencia de su sistema de forma anual, durante los meses de Enero a Marzo adquiere y valida toda la información requerida y en Abril expide la revisión final, [33].

Al final de la solución de flujos de potencia se verifica que el sistema del Caso Base se encuentre en condiciones normales de operación cumpliendo con los criterios de seguridad, asegurando que el flujo de potencia a través de las líneas de transmisión no excede a sus capacidades, que los perfiles de voltaje en cada nodo corresponden a los niveles adecuados y que la capacidad de generación disponible cubre la demanda conectada y las pérdidas del sistema asegurando la continuidad en el suministro de energía.

3.3 Procedimiento para realizar despacho económico de generación

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Una mejora a la solución de (DE) es el Despacho Económico con Restricciones de Seguridad (DERS) el cual tiene como fin calcular la potencia de salida en MW de cada unidad generadora conectada al sistema tomando en consideración las restricciones recursos de generación y de transmisión al calcular el costo incremental λ al que cada unidad debe operar, [28] y [35].

El DE de Mediano Plazo (MP-DE) se ejecuta a intervalos de 15 minutos hasta cumplir los 120 minutos en adelanto. El DE en tiempo real (TR-DE) se ejecuta cada 5 minutos durante los cuales se producen las instrucciones de despacho para los 5 minutos siguientes inmediatos, [35]. La solución de cada ejecución previa del DE forma parte de la información de entrada de la ejecución de DE “actual”. Los datos de entrada para la solución de DE son entre otros, [28], [35] y [12]:

- Pronósticos de carga.
- Potencia de salida de las unidades conectadas al sistema.
- Intercambios programados de energía entre zonas.
- Ofertas de generación de un día en adelanto.
- Parámetros de las unidades: Curvas de costo incremental, velocidad de rampa, límites de generación.
- Restricciones del sistema. (incluye análisis de comportamiento del sistema)
- Asignación de unidades. (basado en ofertas de generación, ofertas de demanda, horarios de transacción)

La solución del despacho económico de generación da la distribución de carga del sistema entre el total de unidades de generación disponibles incluyendo las reservas de generación del sistema, [28] y [12]. Para el mercado eléctrico mayorista de México y el de California el algoritmo de DERS calcula el precio marginal de la energía en cada nodo donde se modela la inyección o retiro físico de energía, que incluye el costo marginal de la energía, el costo marginal de pérdidas y el costo marginal de congestión, [28] y [35]. El modelo de DE de PJM además incluye apoyos para el operador de mercado: listas de restricciones activas del sistema y unidades destinadas para el control de las restricciones, [12].

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Las soluciones de ambos despachos económicos, MP-DERS y TR-DERS, se incluyen en la operación del control automático de generación a través del cual se envían las señales de ajuste de generación deseada a las unidades que participan en el control de frecuencia e intercambio de energía, [28] y [12].

3.4 Procedimiento para realizar análisis de contingencias

El método de análisis de contingencias identifica debilidades en sistemas de potencia, simula contingencias predefinidas, encuentra la solución de flujos de potencia ante esta condición, y evalúa los resultados post contingencia para identificar a aquellos elementos que se encuentran en la posibilidad de operar cercanos o sobrepasando sus límites de operación, [21] y [20].

En general, el encargado de la operación de un sistema de potencia debe garantizar la operación segura de la red bajo su cargo ante la pérdida de un elemento de su red, principalmente que modifiquen las capacidades de transmisión y/o generación. Para cumplir con el objetivo anterior, el CENACE y los operadores independientes, CAISO y PJM, ejecutan procesos de análisis del comportamiento de Sistemas de Potencia entre los que se encuentran los diferentes estudios de estabilidad, en estado estable y en estado transitorio.

La RTO de PJM de entre varios de los análisis del sistema realiza una evaluación de capacidad de suministro de acuerdo a sus estándares de confiabilidad, en la cual se certifica que la capacidad del sistema de transmisión es adecuada para la entrega de la energía disponible al total de la carga, lo cual implica que la energía generada incluso en redes de transmisión vecinas puede ser entregada en cualquier punto que sea necesario dentro del área de PJM en condiciones de emergencia, [36].

El CENACE tiene como protocolo realizar estudios del comportamiento del sistema eléctrico cuando, [6]:

- Exista la indisponibilidad de algún equipo que comprometa la seguridad operativa del sistema.
- Cambios en la topología de la red temporal o permanente.
- Análisis de disturbios que se hayan presentado en la red eléctrica.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

- Requerimientos o ajustes de EAR.
- Límites de operación en la red eléctrica.
- Por requerimiento del Departamento de turnos de Operación.

Dentro de los insumos necesarios para la realización de los estudios se requieren: casos base actualizados de flujos de potencia, diagramas unifilares, reportes de disturbio, lógicas de operación de EAR involucrados, entre otros.

Para realizar estudio del comportamiento de acuerdo a los requerimientos se realizan las siguientes actividades, [6]:

- Ajustar el Caso Base de acuerdo a los requisitos especificados de acuerdo a las condiciones de la red o al elemento a analizar.
- Para estudios con equipos bajo licencia o cálculo de límites de transmisión se realizan simulaciones aplicando los criterios N-1 o N-1-1 según se requiera.
- En caso de análisis de disturbios ocurridos, reproducir la secuencia de eventos para analizar el comportamiento del sistema.
- Definir las condiciones operativas bajo las cuales las contingencias más severas son soportables.
- Para ajustes de EAR se simulan las contingencias en conjunto con las acciones controladas necesarias para lograr una condición operativa segura con la menor afectación posible.

La RTO de PJM realiza análisis de comportamiento del sistema en periodos de largo y mediano plazo, en un día en adelante y en tiempo real, bajo condiciones de demanda máxima, en los cuales se simulan una lista de posibles contingencias incluyendo los elementos con capacidades limitadas, [12]. El operador independiente de California publica los resultados preliminares de los estudios y las propuestas de mejora en su página de internet como parte del proceso de planeación de su sistema para su revisión y comentarios por parte de los participantes del sistema antes de la implementación de mejoras, [38].

En conclusión, los resultados de los estudios técnicos, entre los que se encuentra el de análisis de contingencias, identifican las necesidades y propuestas de soluciones

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

entre procuración de reservas y despachos de generación, esquemas de acción remedial y acciones de control para satisfacer los criterios de confiabilidad aplicables.

3.5 Diseño de la investigación

La principal aportación del siguiente estudio es la es la introducción de diferentes escenarios de demanda en el sistema de pruebas para simular las condiciones más representativas bajo las que opera la red de transmisión de la ZOT de Puebla-Tlaxcala.

- Demanda mínima
- Demanda media (caso base)
- Demanda máxima
- Demanda día festivo

La descripción de cada condición de carga se realiza en profundidad en el siguiente capítulo.

Las modificaciones se basan principalmente a la asignación de características de carga de tipo industrial, domestica y de servicios conforme a la experiencia del comportamiento de las mismas desarrollada durante la operación del sistema eléctrico y a la base de datos de la propia ZOTPT de cargas por subestaciones, [16].

Generalmente la carga industrial reduce su consumo regular a servicios propios o procesos base de bajo consumo principalmente por el incremento de la tarifa que se aplica durante los periodos de demanda máxima como se aprecia claramente en, [39].

Se aplica el criterio (N-1) para el análisis de contingencias. Dentro del criterio (N-1) se incluye la desconexión o pérdida de: unidad de central eléctrica, línea de transmisión, transformador, compensador estático de VAR, gran usuario de demanda, [1] y [36]. Quedan excluidas la desconexión de elementos de una barra (“barrida de bus”) [descripción], doble circuito de transmisión que compartan estructura(s), centrales generadoras de ciclo combinado (dos unidades de vapor por una de gas, etcétera), [1].

La banda de límites de voltaje se define entre el +/- 5 por ciento del voltaje nominal, [1] y [9]. Se considera al límite de carga #1 de los equipos modelados en el sistema de pruebas como el límite térmico de la red de transmisión, [8].

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Para las propuestas de control en el análisis del capítulo cuatro se sigue la siguiente jerarquía apoyándose en lo indicado en el manual de operación del programa de PSS/E®, [11].

1. Ajuste de generación.
2. Ajuste en el voltaje programado en los buses de voltaje controlado.
3. Conexión/desconexión de recursos de potencia reactiva.
4. Ajuste de cambiadores de derivación de transformadores (taps).
5. Corte de carga.

La metodología de estudio lleva la siguiente secuencia:

1. Descargar en la plataforma de PSS/E® la base de datos correspondiente a cada caso de demanda.
2. Elaborar el Despacho Económico
3. Ejecutar la solución de flujos de potencia.
4. Verificar que el sistema bajo análisis opere sin violación de criterios.
5. Realizar el análisis de contingencias e identificar las contingencias sencillas más severas.
6. Proponer acciones de control que hagan que el sistema vuelva a condiciones normales de operación.
7. Verificar la efectividad de las acciones de control a través de la solución de flujos de potencia del sistema.

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS

4.1 Introducción

La finalidad de realizar análisis de contingencias es la de identificar aquellos elementos que presentan violaciones de operación de acuerdo a los criterios de seguridad especificados por los operadores de los Sistemas Eléctricos de Potencia, [9], [1] y [37] con el fin de ejecutar acciones de control que restablezcan la operación del sistema a condiciones dentro de límites operativos adecuados. La condición operativa que se busca es aquella en la cual el sistema cuenta con los recursos suficientes o que se encuentran disponibles y que se pueden obtener de manera inmediata (de transmisión de potencia, recursos de potencia reactiva, recursos de generación, etc.), de manera que ante la ocurrencia de una contingencia sencilla (N-1) el sistema puede regresar a condiciones normales y que todas las limitantes eléctricas se cumplen sin poner en riesgo la operación de algún elemento, [8].

En el capítulo tres se describe a profundidad las características topológicas del sistema de pruebas con el que se trabaja en este proyecto. Corresponde al presente capítulo aplicar los cuatro casos de estudio evaluados mediante PSS/E®, que son los subcapítulos en lo que se divide este apartado.

De [21], [3] y [11] se define de forma general que el Análisis de Contingencias, el cual nos sirve para identificar debilidades en sistemas de potencia, simula contingencias predefinidas, encuentra la solución de flujos de potencia ante esta condición, y evalúa los resultados post contingencia para identificar a aquellos elementos que se encuentran en la posibilidad de operar cercanos o sobrepasando sus límites de operación.

En [21] después de haber realizado el análisis de las condiciones de estado de un sistema de 6 nodos ante la pérdida de una línea (de bus4 a bus 5) se realizan acciones correctivas, principalmente el redespacho de generación y el tiro de carga para disminuir la sobrecarga de las líneas afectadas, en este trabajo se realizan este tipo de soluciones en conjunto con las mencionadas en el capítulo anterior. En la teoría y en la

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

práctica, [11] y [10] el tiro de carga se considera como la última opción alternativa ante contingencias y principalmente se utiliza para desviaciones en la frecuencia nominal del sistema (60 Hertz) o para evitar el colapso de voltaje donde los esquemas de protección se encuentran ajustados al 10% del valor nominal.

Ante la aplicación de programas de mantenimiento es una práctica común en la red de transmisión perteneciente a la zona de operación de transmisión Puebla Tlaxcala, principalmente el anillo central correspondiente a las subestaciones que alimentan la carga de Puebla capital, y que presenta limitantes de transmisión, el realizar transferencias de carga hacia subestaciones externas a este anillo con la finalidad de disminuir la demanda conectada en la zona hasta que el monto total de esta sea menor que la capacidad de la línea con menor capacidad de transmisión, con esto se asegura que no se sobrepase el límite de capacidad del elemento más débil y por lo tanto que no se corra el riesgo del disparo del mismo, [40].

A continuación la aplicación de Análisis de Contingencias en el Sistema Eléctrico de Potencia de pruebas de catorce nodos de IEEE en cuatro diferentes casos de demandas características en la operación de Sistemas Eléctricos de Potencia en tiempo real, [16].

4.2 Demanda mínima

Las siguientes tablas, 4.1, 4.2 y 4.3 contienen la información ajustada al caso base que corresponden a la demanda conectada al sistema y despacho económico de generación, además de la solución de flujos de potencias para las condiciones de demanda mínima.

Tabla 4.1. Demanda conectada al sistema en demanda mínima.

Demanda Mínima			
		Pload (MW)	Qload (MVAR)
Carga Doméstica	BUS 2	4.34	2.54
Carga Industrial	BUS 3	94.2	19
Carga Industrial	BUS 4	47.8	-3.9
Carga Doméstica	BUS 5	1.52	0.32
Carga Doméstica	BUS 6	2.24	1.5

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de tabla 4.1, demanda conectada al sistema en demanda mínima

		Pload (MW)	Qload (MVAR)
Carga Doméstica	BUS 9	5.9	3.32
Carga Doméstica	BUS 10	1.8	1.16
Carga Doméstica	BUS 11	0.7	0.36
Carga Industrial	BUS 12	6.1	1.6
Carga Doméstica	BUS 13	2.7	1.16
Carga Doméstica	BUS 14	2.98	1
Carga Total		170.28	

Tabla 4.2. Despacho económico en demanda mínima.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E MON, OCT 10 2016 18:54						
IEEE 14 BUS TEST CASE						
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA						
RESUMEN DE UNIDADES:						
NOMBRE	VNOMkV	MW	MVAR	ETERM	CORRIENTE	PF
BUS 1	230	45.3	17.6	100	-20	1.06
BUS 2	230	88.7	-28.3	50	-40	1.045
BUS 3	230	8.7	9	40	0	1.01
BUS 6	115	7.2	-6	24	-6	1.0951
BUS 8	13.2	23.9	2.1	24	-6	1.09
	TOTALES	173.7	-5.8	238	-72	

Tabla 4.3. Flujos de potencia en demanda mínima.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E MON, OCT 10 2016 18:59										
IEEE 14 BUS TEST CASE					%MVA FOR TRANSFORMERS					
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA					% I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES					
<<< DE BUS >>>					<<< A BUS >>>					
NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL	VOLTAJE	ÁNGULO	NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL	MW	MVAR	AMPS	CARGA	
	kV	PU/kV			kV				%	LÍMITE 1
BUS 1	230	1.06	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		243.8		BUS 2	230	11.2	8.3	33	19	169A
				BUS 2	230	11.2	8.3	33	19	169A
				BUS 5	230	23	0.9	54	14	377A
BUS 2	230	1.045	-0.5	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		240.35		BUS 1	230	-11.1	-11	38	22	169A
				BUS 1	230	-11.1	-11	38	22	169A
				BUS 3	230	55.3	5.6	134	59	226A
				BUS 4	230	30	-8.1	75	44	169A
				BUS 5	230	21.2	-6.4	53	31	169A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 4.3 flujos de potencia demanda mínima

<<< DE BUS >>>				<<< A BUS >>>						
NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL	VOLTAJE	ÁNGULO	NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL				CARGA	
	kV	PU/kV			kV	MW	MVAR	AMPS	%	LIMITE 1
BUS 3	230	1.01	-6.2	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		232.3		BUS 2	230	-54	-4.6	135	60	226A
				BUS 4	230	-31.6	-5.4	80	85	94A
BUS 4	230	1.0403	-3.5	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		239.26		BUS 2	230	-29.5	5.9	73	43	169A
				BUS 3	230	32.2	5.8	79	84	94A
				BUS 5	230	-37.8	9	94	42	226A
				BUS 7	1	-11	-11.9	39	22	75M
				BUS 9	115	-1.7	-4.9	12	7	75M
BUS 5	230	1.0416	-2.6	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		239.57		BUS 1	230	-22.7	-5.3	56	15	377A
				BUS 2	230	-20.9	3.4	51	30	169A
				BUS 4	230	38	-8.4	94	42	226A
				BUS 6	115	4.1	10	26	14	75M
BUS 6	115	1.0951	-3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		125.94		BUS 5	230	-4.1	-9.8	49	14	75M
				BUS 11	115	0.3	-0.3	2	0	377A
				BUS 12	115	4.2	1.5	20	4	452A
				BUS 13	115	4.6	1	22	5	452A
BUS 7	1	1.0874	-2.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		1.0874		BUS 4	230	11	12.4	8817	22	75M
				BUS 8	13.2	-23.9	-1.2	12693	80	30M
				BUS 9	115	12.9	-11.2	9070	23	75M
BUS 8	13.2	1.09	-0.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		14.388		BUS 7	1	23.9	2.1	962	80	30M
BUS 9	115	1.0988	-3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		126.36		BUS 4	230	1.7	5	24	7	75M
				BUS 7	1	-12.9	11.5	79	23	75M
				BUS 10	115	2.2	1.8	13	6	226A
				BUS 14	115	3	1.3	15	3	452A
BUS 10	115	1.0968	-3.1	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		126.13		BUS 9	115	-2.2	-1.8	13	6	226A
				BUS 11	115	0.4	0.6	4	1	301A
BUS 11	115	1.0953	-3.1	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		125.96		BUS 6	115	-0.3	0.3	2	0	377A
				BUS 10	115	-0.4	-0.6	4	1	301A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 4.3 flujos de potencia demanda mínima

<<< DE BUS >>>				<<< A BUS >>>						
NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL	VOLTAJE	ÁNGULO	NOMBRE	VOLTAJE NOMINAL				CARGA	
	kV	PU/kV			kV	MW	MVAR	AMPS	%	LIMITE 1
BUS 12	115	1.087	-3.5	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		125		BUS 6	115	-4.1	-1.5	20	4	452A
				BUS 13	115	-1.9	-0.1	9	2	452A
BUS 13	115	1.0911	-3.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		125.47		BUS 6	115	-4.6	-1	22	5	452A
				BUS 12	115	1.9	0.2	9	2	452A
				BUS 14	115	0	-0.3	1	1	264A
BUS 14	115	1.0921	-3.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		125.59		BUS 9	115	-3	-1.3	15	3	452A
				BUS 13	115	0	0.3	1	1	264A

Se observa de la tabla 4.3 que se viola el límite alto de voltaje en varios nodos y que no se presentan violaciones al límite de transferencia. Se aplican las siguientes acciones de control para eliminar las violaciones de voltaje.

Tabla 4.4. Acciones de control demanda mínima

ACCIONES DE CONTROL	ANTES	DESPUES
UNIDAD EN BUS	VOLTAJE PROGRAMADO (pu)	VOLTAJE PROGRAMADO (pu)
01	1.06	1.00
02	1.045	1.00
03	1.01	1.00
06	1.07	1.00
08	1.0647	1.00

A continuación se aplica el análisis de contingencias al sistema corregido con los siguientes resultados contenidos en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Análisis de contingencias del sistema en demanda mínima.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS (R) E	FRI, OCT 14
2016 19:57	PAGE 4

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 4.5 análisis de contingencias del sistema en demanda mínima

AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS CONTINGENCY CASE MONITORED BRANCHES LOADED ABOVE 100.0% OF RATING SET 1 - WORST CASE VIOLATIONS			
% LOADING VALUES ARE % MVA FOR TRANSFORMERS AND % CURRENT FOR NON- TRANSFORMER BRANCHES			
THRESHOLD FOR THE COUNT OF CONTINGENCIES CAUSING OVERLOADING IS 100.0% OF RATING SET 1			
MONITORED ELEMENT	X-----LABEL-----X		
3 BUS 3	230.00		249.7%
4 BUS 4	230.00	SINGL1 2-3 (1)	91MVA
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS SISTEMA' CONTINGENCY CASE BUSES WITH VOLTAGE GREATER THAN 1.0500 - WORST CASE VIOLATIONS			
X----- BUS -----X	X-----LABEL-----X		
6 BUS 6	115.00	SINGL1 7-9 (1)	1.06034
7 BUS 7	1.0000	SINGL1 4-7 (1)	1.05145
9 BUS 9	115.00	SINGL1 7-9 (1)	1.07428
10 BUS 10	115.00	SINGL1 7-9 (1)	1.07020
11 BUS 11	115.00	SINGL1 7-9 (1)	1.06454
12 BUS 12	115.00	SINGL1 7-9 (1)	1.05280
13 BUS 13	115.00	SINGL1 7-9 (1)	1.05749
14 BUS 14	115.00	SINGL1 7-9 (1)	1.06342
EAC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS SISTEMA' CONTINGENCY CASE BUSES WITH VOLTAGE LESS THAN 0.9500 - WORST CASE VIOLATIONS			
X----- BUS -----X	X-----LABEL-----X		
3 BUS 3	230.00	SINGL1 2-3 (1)	0.93801

De los resultados obtenidos a partir del análisis de contingencias se detecta que el disparo del transformador de B07-B09 o el disparo del transformador de B04-B07 provoca violación de límite alto de voltaje en varios nodos, el disparo de la línea de B02-B03 provoca sobrecarga en la línea B03-B04 y bajo voltaje en el B03. La siguiente tabla 4.6 contiene las acciones correctivas para eliminar las violaciones anteriores.

La tabla 4.7 muestra la solución de flujos de potencia después de haber aplicado las acciones correctivas, lo que demuestra la efectividad de las mismas. Con la aplicación de acciones correctivas se provee de características de continuidad y confiabilidad de operación al sistema de pruebas bajo condiciones de demanda mínima en condiciones de operación normal y ante la pérdida de un elemento de la red.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Tabla 4.6. Acciones de control correctivas en demanda mínima

ACCIONES DE CONTROL	ANTES	DESPUÉS
CAPACITOR EN BUS	POTENCIA REACTIVA (MVAR)	POTENCIA REACTIVA (MVAR)
09	19.00	0.00
UNIDADES EN BUS	AJUSTE DE GENERACION (MW)	AJUSTE DE GENERACION (MW)
01	45.5837	47.9439
02	88.6508	59.9735
03	8.6508	65.7578
06	7.2090	0.0000
08	23.8757	0.0000

Tabla 4.7. Flujos de potencia condiciones después de aplicar acciones correctivas

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E FRI, OCT 14 2016 21:14										
IEEE 14 BUS TEST CASE				%MVA FOR TRANSFORMERS						
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA				% I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES						
DE BUS				A BUS					CARGA	
NOMBRE	BASKV	VOLT PU/kV	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	AMPS	%	LÍMITE 1
BUS 1	230	1	0	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		230		BUS 2	230	9	-4.2	25	15	169A
				BUS 2	230	9	-4.2	25	15	169A
				BUS 5	230	30	-1.4	75	20	377A
BUS 2	230	1	-0.7	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		230		BUS 1	230	-8.9	1.7	23	13	169A
				BUS 1	230	-8.9	1.7	23	13	169A
				BUS 4	230	41.9	-4.9	106	63	169A
				BUS 5	230	31.5	-1.8	79	47	169A
BUS 3	230	1	-8.8	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		230		BUS 4	230	-28.4	21	89	94	94A
BUS 4	230	0.9841	-5.1	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		226.35		BUS 2	230	-40.9	4.6	105	62	169A
				BUS 3	230	29.3	-20	91	96	94A
				BUS 5	230	-44	15.7	119	53	226A
				BUS 7	1	4.9	1.4	13	7	75M
				BUS 9	115	2.9	2.2	9	5	75M
BUS 5	230	0.9836	-3.9	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		226.23		BUS 1	230	-29.5	-1.4	75	20	377A
				BUS 2	230	-31	0.1	79	47	169A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 4.7 flujos de potencia condiciones después de aplicar acciones correctivas

DE BUS				A BUS						CARGA
NOMBRE	BASKV	VOLT PU/kV	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	AMPS	%	LIMITE 1
				BUS 4	230	44.3	-14.8	119	53	226A
				BUS 6	115	14.7	15.8	55	29	75M
BUS 6	115	1.0182	-5.8	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		117.1		BUS 5	230	-14.7	-14.7	103	28	75M
				BUS 11	115	2.3	2.8	18	5	377A
				BUS 12	115	4.5	1.9	24	5	452A
				BUS 13	115	5.7	2.6	31	7	452A
BUS 7	1	1.0034	-5.7	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		1.0034		BUS 4	230	-4.9	-1.4	2942	7	75M
				BUS 8	13.2	0	1.9	1099	6	30M
				BUS 9	115	4.9	-0.5	2849	7	75M
BUS 8	13.2	1	-5.7	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		13.2		BUS 7	1	0	-1.9	83	6	30M
BUS 9	115	1.0039	-6	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		115.45		BUS 4	230	-2.9	-2.1	18	5	75M
				BUS 7	1	-4.9	0.6	25	7	75M
				BUS 10	115	0.2	-1.2	6	3	226A
				BUS 14	115	1.6	-0.6	9	2	452A
BUS 10	115	1.0049	-6	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		115.56		BUS 9	115	-0.2	1.2	6	3	226A
				BUS 11	115	-1.6	-2.4	14	5	301A
BUS 11	115	1.0107	-6	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		116.23		BUS 6	115	-2.3	-2.7	18	5	377A
				BUS 10	115	1.6	2.4	14	5	301A
BUS 12	115	1.0081	-6.4	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		115.94		BUS 6	115	-4.5	-1.8	24	5	452A
				BUS 13	115	-1.6	0.2	8	2	452A
BUS 13	115	1.0112	-6.2	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		116.29		BUS 6	115	-5.7	-2.6	31	7	452A
				BUS 12	115	1.6	-0.2	8	2	452A
				BUS 14	115	1.4	1.6	10	4	264A
BUS 14	115	1.0034	-6.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	----
		115.4		BUS 9	115	-1.6	0.6	9	2	452A
				BUS 13	115	-1.3	-1.6	10	4	264A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

4.3 Demanda media

Se muestran las tablas 4.8 y 4.9, que contienen la base de datos que caracteriza a las condiciones de demanda media que son las mismas del caso base, y la aplicación del análisis de contingencias. Se puede observar en la solución de flujos de potencia contenida en la tabla 4.10 que el sistema no presenta ninguna violación de límite de transferencia de potencia o de límite de voltaje. La diferencia con el caso base del capítulo 2 es el ajuste en el voltaje programado en los nodos de voltaje controlado en 1.04 por unidad como lo muestra la tabla de despacho económico.

Tabla 4.8. Demanda conectada al sistema en demanda media.

Demanda Media (Caso Base)			
		Pcarga (MW)	Qcarga (MVAR)
Carga Doméstica	BUS 2	21.7	12.7
Carga Industrial	BUS 3	94.2	19
Carga Industrial	BUS 4	47.8	-3.9
Carga Doméstica	BUS 5	7.6	1.6
Carga Doméstica	BUS 6	11.2	7.5
Carga Doméstica	BUS 9	29.5	16.6
Carga Doméstica	BUS 10	9	5.8
Carga Doméstica	BUS 11	3.5	1.8
Carga Industrial	BUS 12	6.1	1.6
Carga Doméstica	BUS 13	13.5	5.8
Carga Doméstica	BUS 14	14.9	5
Carga Total		259	

Tabla 4.9. Despacho económico en demanda media.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E TUE, OCT 11 2016 17:25								
IEEE 14 BUS TEST CASE								
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA								
RESUMEN DE UNIDADES:								
BUS	BASKV	MW	MVAR	QMAX	QMIN	ETERM	CURRENT	PF
1	230	65.6	-18.9	100	-20	1.04	65.7	0.9611
2	230	115.6	48	50	-40	1.045	119.8*	0.9236
3	230	35.6	15.1	40	0	1.01	38.3	0.9209
6	115	29.7	-0.8	24	-6	1.04	28.5	0.9997
8	13.2	17	4.8	24	-6	1.04	17	0.9622
TOTALES		263.5	48.2	238	-72			

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Tabla 4.10. Flujos de potencia en demanda media.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E THU, OCT 13 2016 20:19										
IEEE 14 BUS TEST CASE				%MVA FOR TRANSFORMERS						
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA				%I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES						
DE BUS				A BUS						
NOMBRE	BASKV	VOLT		ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	CARGA	
		PU/kV	ÁNGULO						%	LÍMITE 1
BUS 1	230	1.04	0	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		239.2		BUS 2	230	15.6	-10.7	27		169A
				BUS 2	230	15.6	-10.7	27		169A
				BUS 5	230	34.4	2.6	22		377A
BUS 2	230	1.045	-1.2	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		240.35		BUS 1	230	-15.5	8.2	25		169A
				BUS 1	230	-15.5	8.2	25		169A
				BUS 3	230	48.8	6.5	52		226A
				BUS 4	230	42.7	5.2	61		169A
				BUS 5	230	33.3	7	48		169A
BUS 3	230	1.01	-6.2	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		232.3		BUS 2	230	-47.8	-6.7	53		226A
				BUS 4	230	-10.8	2.8	29		94A
BUS 4	230	1.0116	-5	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		232.67		BUS 2	230	-41.7	-5.8	62		169A
				BUS 3	230	10.9	-3.9	30		94A
				BUS 5	230	-39.6	8.9	45		226A
				BUS 7	1	12.2	1.2	16		75M
				BUS 9	115	10.4	3.4	15		75M
BUS 5	230	1.0133	-4	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		233.05		BUS 1	230	-33.8	-5.3	23		377A
				BUS 2	230	-32.7	-8.8	50		169A
				BUS 4	230	39.8	-8.3	45		226A
				BUS 6	115	19.1	20.8	38		75M
BUS 6	115	1.04	-6.5	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		119.6		BUS 5	230	-19.1	-19.1	36		75M
				BUS 11	115	10.2	2.1	13		377A
				BUS 12	115	8.1	2.3	9		452A
				BUS 13	115	19.1	6.5	22		452A
BUS 7	1	1.0322	-6.4	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		1.0322		BUS 4	230	-12.2	-0.9	16		75M
				BUS 8	13.2	-17	-4.3	58		30M
				BUS 9	115	29.2	5.2	40		75M
BUS 8	13.2	1.04	-4.8	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de tabla 4.10 flujos de potencia en demanda media.

DE BUS				A BUS					
NOMBRE	BASKV	VOLT		NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	CARGA	
		PU/kV	ÁNGULO					%	LÍMITE 1
		13.728		BUS 7	1	17	4.8	59	30M
BUS 9	115	1.0272	-8.1	-----	-----	-----	-----	----	-----
		118.13		BUS 4	230	-10.4	-2.8	14	75M
				BUS 7	1	-29.2	-4.3	39	75M
				BUS 10	115	2.4	5.9	14	226A
				BUS 14	115	7.7	4.7	10	452A
BUS 10	115	1.0216	-8.1	-----	-----	-----	-----	----	-----
		117.48		BUS 9	115	-2.4	-5.8	14	226A
				BUS 11	115	-6.6	0	11	301A
BUS 11	115	1.0269	-7.4	-----	-----	-----	-----	----	-----
		118.1		BUS 6	115	-10.1	-1.9	13	377A
				BUS 10	115	6.6	0.1	11	301A
BUS 12	115	1.0249	-7.4	-----	-----	-----	-----	----	-----
		117.87		BUS 6	115	-8.1	-2.1	9	452A
				BUS 13	115	1.9	0.5	2	452A
BUS 13	115	1.0199	-7.6	-----	-----	-----	-----	----	-----
		117.29		BUS 6	115	-18.9	-6	22	452A
				BUS 12	115	-1.9	-0.5	2	452A
				BUS 14	115	7.4	0.7	14	264A
BUS 14	115	1.0054	-8.9	-----	-----	-----	-----	----	-----
		115.62		BUS 9	115	-7.6	-4.5	10	452A
				BUS 13	115	-7.3	-0.5	14	264A

Los resultados obtenidos al aplicar el método de análisis de contingencias al sistema de pruebas que se está evaluando en este subcapítulo se muestran en la siguiente tabla 2.11. Se observa que existe solo una contingencia que provoca condiciones de sobrecarga en la línea de B03-B04 operando con el 167% de su límite 1, que es de 37.5 MVA.

Se pueden tomar las acciones de la tabla 4.12, de forma preventiva o correctiva, dependiendo del momento en que se aplique la siguiente acción ya sea en pre-disturbio o post-disturbio.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Tabla 4.11. Análisis de contingencia del sistema en demanda media.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E		THU, OCT 13
2016 21:07		PAGE 4 .
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS		
CONTINGENCY CASE MONITORED BRANCHES LOADED ABOVE 100.0% OF RATING		
SET 1 - WORST CASE VIOLATIONS		
% LOADING VALUES ARE % MVA FOR TRANSFORMERS AND % CURRENT FOR		
NON-TRANSFORMER BRANCHES		
THRESHOLD FOR THE COUNT OF CONTINGENCIES CAUSING OVERLOADING IS		
100.0% OF RATING SET 1		
MONITORED ELEMENT	X-----LABEL-----X	
3 BUS 3	230.00	167.1%
4 BUS 4	230.00	63MVA
	SINGL1 2-3(1)	

Tabla 4.12. Acciones de control preventivas/correctivas

ACCIONES DE CONTROL	ANTES	DESPUES
UNIDAD EN BUS	AJUSTE DE GENERACIÓN (MW)	AJUSTE DE GENERACIÓN (MW)
03	35.6 MW	63.5964 MW

Una vez realizadas las acciones preventivas/correctivas se soluciona flujos de potencia con el nuevo ajuste de generación de la unidad tres.

Tabla 4.13. Flujos de potencia condiciones finales de demanda media

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E				THU, OCT 13 2016 20:57					
IEEE 14 BUS TEST CASE				%MVA FOR TRANSFORMERS					
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA				% I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES					
DE BUS				A BUS					
		VOLT						CARGA	
NOMBRE	BASKV	PU/kV	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	%	LÍMITE 1
BUS 1	230	1.04	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		239.2		BUS 2	230	4.6	-7.3	21	12 169A
				BUS 2	230	4.6	-7.3	21	12 169A
				BUS 5	230	27	3.9	66	17 377A
BUS 2	230	1.045	-0.4	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		240.35		BUS 1	230	-4.6	4.5	15	9 169A
				BUS 1	230	-4.6	4.5	15	9 169A
				BUS 3	230	32.8	9.1	82	36 226A
				BUS 4	230	38.8	6.3	94	56 169A
				BUS 5	230	31.5	7.5	78	46 169A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 4.13 flujos de potencia condiciones finales de demanda media

DE BUS				A BUS					
NOMBRE	BASKV	VOLT PU/kV	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	CARGA	
								%	LÍMITE 1
BUS 3	230	1.01	-3.6	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		232.3		BUS 2	230	-32.3	-11.6	85	38 226A
				BUS 4	230	1.7	-2.2	7	7 94A
BUS 4	230	1.0115	-3.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		232.65		BUS 2	230	-38	-7.3	96	57 169A
				BUS 3	230	-1.7	0.9	5	5 94A
				BUS 5	230	-31.3	5.8	79	35 226A
				BUS 7	1	12.5	1.1 0	31	17 75M
				BUS 9	115	10.6	3.4 0	28	15 75M
BUS 5	230	1.0133	-3.1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		233.06		BUS 1	230	-26.6	-7.5	69	18 377A
				BUS 2	230	-30.9	-9.4	80	47 169A
				BUS 4	230	31.4	-5.4	79	35 226A
				BUS 6	115	18.5	20.8 0	69	37 75M
BUS 6	115	1.04	-5.5	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		119.6		BUS 5	230	-18.5	-19.1 1	129	36 75M
				BUS 11	115	9.9	2.1	49	13 377A
				BUS 12	115	8.1	2.3	40	9 452A
				BUS 13	115	19.1	6.5	97	22 452A
BUS 7	1	1.0323	-5.3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		1.0323		BUS 4	230	-12.5	-0.8 1	7018	17 75M
				BUS 8	13.2	-17	-4.3 1	9804	58 30M
				BUS 9	115	29.5	5.1 1	16755	40 75M
BUS 8	13.2	1.04	-3.7	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		13.728		BUS 7	1	17	4.8 1	743	59 30M
BUS 9	115	1.0274	-7	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		118.15		BUS 4	230	-10.6	-2.8 1	54	15 75M
				BUS 7	1	-29.5	-4.2 1	146	40 75M
				BUS 10	115	2.7	5.8	31	14 226A
				BUS 14	115	7.9	4.6	45	10 452A
BUS 10	115	1.0218	-7.1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		117.5		BUS 9	115	-2.7	-5.7	31	14 226A
				BUS 11	115	-6.3	-0.1	31	10 301A
BUS 11	115	1.027	-6.4	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		118.11		BUS 6	115	-9.8	-2	49	13 377A
				BUS 10	115	6.3	0.2	31	10 301A
BUS 12	115	1.025	-6.4	-----	-----	-----	-----	-----	-----

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 4.13 flujos de potencia condiciones finales de demanda media

DE BUS				A BUS					
NOMBRE	BASKV	VOLT PU/kV	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	CARGA	
								%	LIMITE 1
		117.88		BUS 6	115	-8	-2.1	40	9 452A
				BUS 13	115	1.9	0.5	10	2 452A
BUS 13	115	1.0199	-6.6	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		117.29		BUS 6	115	-18.8	-6.1	97	22 452A
				BUS 12	115	-1.9	-0.5	10	2 452A
				BUS 14	115	7.2	0.8	36	13 264A
BUS 14	115	1.0055	-7.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		115.63		BUS 9	115	-7.8	-4.4	45	10 452A
				BUS 13	115	-7.1	-0.6	36	13 264A

Al aplicarse el análisis de contingencias al sistema final de demanda media se obtiene los resultados contenidos en la siguiente tabla 4.14.

Tabla 4.14. Análisis de contingencia del sistema final en demanda media.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS (R) E FRI, OCT 14 2016 19:14 PAGE 4 .		
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS CONTINGENCY CASE MONITORED BRANCHES LOADED ABOVE 100.0% OF RATING SET 1 - WORST CASE VIOLATIONS		
% LOADING VALUES ARE % MVA FOR TRANSFORMERS AND % CURRENT FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES		
THRESHOLD FOR THE COUNT OF CONTINGENCIES CAUSING OVERLOADING IS 100.0% OF RATING SET 1		
MONITORED ELEMENT	X-----LABEL-----X	
-----	-----	-----
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS SISTEMA' CONTINGENCY CASE BUSES WITH VOLTAGE GREATER THAN 1.0500 - WORST CASE VIOLATIONS		
X----- BUS -----X	X-----LABEL-----X	
-----	-----	-----
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS SISTEMA' CONTINGENCY CASE BUSES WITH VOLTAGE LESS THAN 0.9500 - WORST CASE VIOLATIONS		
X----- BUS -----X	X-----LABEL-----X	
-----	-----	-----

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Los resultados de la tabla anterior 4.14 indican que al aplicar las acciones de control propuestas el sistema opera en condiciones de estado estable, lo que significa que ante contingencia sencilla más severa no se presentan violaciones de transmisión de potencia o de perfil de voltaje con lo que se asegura la confiabilidad, seguridad y continuidad en la operación del sistema.

4.4 Demanda máxima

A continuación se presentan las características de demanda, despacho económico y solución de flujos de potencia que representan la operación del sistema de pruebas bajo condiciones de operación de demanda máxima. La tabla 4.17 indica que el sistema bajo demanda máxima presenta sobrecarga en el transformador que va de bus siete a bus ocho y violación de límite alto de voltaje en los buses uno, tres y ocho.

Tabla 4.15. Demanda conectada al sistema en demanda máxima

Demanda Máxima			
		Pload (MW)	Qload (Mvar)
Carga Doméstica	BUS 2	54.25	25.4
Carga Industrial	BUS 3	18.84	-38
Carga Industrial	BUS 4	9.56	-0.78
Carga Doméstica	BUS 5	19	3.2
Carga Doméstica	BUS 6	28	15
Carga Doméstica	BUS 9	73.75	33.2
Carga Doméstica	BUS 10	22.5	11.6
Carga Doméstica	BUS 11	8.75	3.6
Carga Industrial	BUS 12	1.22	0.32
Carga Doméstica	BUS 13	33.75	11.6
Carga Doméstica	BUS 14	37.25	10
Carga Total		306.87	

Tabla 4.16. Despacho económico en demanda máxima.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E TUE, OCT 11 2016 17:44										
IEEE 14 BUS TEST CASE										
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA										
RESUMEN DE UNIDADES										
X--	NAME --X	BASKV	ID	MW	MVAR	QMAX	QMIN	ETERM	CURRENT	PF
	BUS 1	230	1	13	39.8	100	-20	1.06	39.5	0.3105

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 4.16 despacho económico en demanda media

X-- NAME --X	BASKV	ID	MW	MVAR	QMAX	QMIN	ETERM	CURRENT	PF
BUS 2	230	1	119.8	-7.3	50	-40	1.045	114.9*	0.9981
BUS 3	230	1	39.8	0	40	0	1.0577	37.7	1
BUS 6	115	1	33.2	24	24	-6	1.0391	39.4	0.8103
BUS 8	13.2	1	49.9	24	24	-6	1.0647	52	0.901
TOTALES			255.7	80.5	238	-72			

Tabla 4.17. Flujos de potencia en demanda máxima.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E TUE, OCT 11 2016 17:44										
IEEE 14 BUS TEST CASE					%MVA FOR TRANSFORMERS					
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA					%I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES					
DE BUS				A BUS						
NOMBRE	BASKV	VOLT PU/kV	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	AMPS	%	LÍMITE 1
BUS 1	230	1.06	0	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		243.8		BUS 2	230	-4.5	13.5	34	20	169A
				BUS 2	230	-4.5	13.5	34	20	169A
				BUS 5	230	22.1	12.8	60	16	377A
BUS 2	230	1.045	0.6	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		240.35		BUS 1	230	4.6	-16.2	40	24	169A
				BUS 1	230	4.6	-16.2	40	24	169A
				BUS 3	230	5.5	-10.3	28	12	226A
				BUS 4	230	30	4.4	73	43	169A
				BUS 5	230	31.7	5.5	77	46	169A
BUS 3	230	1.0577	-0.2	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		243.27		BUS 2	230	-5.4	5.7	19	8	226A
				BUS 4	230	26.4	13.3	70	75	94A
BUS 4	230	1.0188	-2.1	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		234.32		BUS 2	230	-29.5	-6.5	75	44	169A
				BUS 3	230	-25.9	-13.4	72	76	94A
				BUS 5	230	5.1	3.5	15	7	226A
				BUS 7	1	19.5	7	51	28	75M
				BUS 9	115	21.2	10.2	58	31	75M
BUS 5	230	1.0167	-2.2	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		233.83		BUS 1	230	-21.7	-16.7	68	18	377A
				BUS 2	230	-31.1	-7.5	79	47	169A
				BUS 4	230	-5.1	-3.5	15	7	226A
				BUS 6	115	42.8	24.4	122	66	75M
BUS 6	115	1.0391	-7.6	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		119.5		BUS 5	230	-42.8	-19.3	227	63	75M

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 4.17 flujos de potencia en demanda máxima

DE BUS				A BUS						
NOMBRE	BASKV	VOLT		NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	AMPS	CARGA	
		PU/kV	ÁNGULO						%	LÍMITE 1
				BUS 11	115	13.1	9.4	78	21	377A
				BUS 12	115	9.2	2.9	47	10	452A
				BUS 13	115	31.3	16	170	38	452A
BUS 7	1	1.0283	-4.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		1.0283		BUS 4	230	-19.5	-6.2	11480	27	75M
				BUS 8	13.2	-49.9	-19.2	30005	178	30M
				BUS 9	115	69.3	25.4	41469	98	75M
BUS 8	13.2	1.0647	0.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		14.055		BUS 7	1	49.9	24	2273	184	30M
BUS 9	115	1.0039	-8.5	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		115.45		BUS 4	230	-21.2	-7.4	112	30	75M
				BUS 7	1	-69.3	-19.8	361	96	75M
				BUS 10	115	12.2	6.6	69	31	226A
				BUS 14	115	19.3	6.5	102	23	452A
BUS 10	115	0.9945	-9	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		114.37		BUS 9	115	-12.2	-6.4	69	31	226A
				BUS 11	115	-5.8	-5.2	39	13	301A
BUS 11	115	1.0093	-8.6	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		116.07		BUS 6	115	-12.9	-8.9	78	21	377A
				BUS 10	115	5.9	5.3	39	13	301A
BUS 12	115	1.0212	-8.7	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		117.43		BUS 6	115	-9.1	-2.7	47	10	452A
				BUS 13	115	7.8	2.4	40	9	452A
BUS 13	115	0.9996	-9.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		114.96		BUS 6	115	-30.5	-14.5	170	38	452A
				BUS 12	115	-7.7	-2.3	40	9	452A
				BUS 14	115	11.3	5.2	62	24	264A
BUS 14	115	0.9629	-11.1	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		110.73		BUS 9	115	-18.8	-5.4	102	23	452A
				BUS 13	115	-11	-4.6	62	24	264A
-----	-----	-----	-----							

La siguiente tabla 4.18 contiene acciones conjuntas de control de voltaje y control de flujos para eliminar las violaciones de criterios operativos del sistema.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Tabla 4.18. Acciones de control demanda máxima.

AJUSTES DE CONTROL	ANTES	DESPUÉS
UNIDAD EN BUS	GENERACIÓN MW	GENERACIÓN MW
01	13	19.25
02	119.8	119.8292
03	39.8	39.8292
06	33.2	59.4973
08	49.9	18.0343
UNIDAD EN BUS	VOLTAJE PROGRAMADO (pu)	VOLTAJE PROGRAMADO (pu)
01	1.06	1.04
02	1.045	1.02
06	1.07	1.04
08	1.0647	1.04
TAP EN TRANSFORMADOR	RELACION DE VUELTAS (pu)	RELACION DE VUELTAS (pu)
5-6	0.9320	0.9070
7-9	1	1.025

Una vez realizadas las modificaciones, el sistema opera bajo condiciones normales de operación. A continuación la tabla 4.19 contiene la solución del análisis de contingencias aplicado al sistema de pruebas partiendo de operación normal poniendo en evidencia las debilidades del sistema al operar bajo condiciones de demanda máxima.

Tabla 4.19. Análisis de contingencia del sistema en demanda máxima.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E			FRI, OCT 14
2016 16:33		PAGE 4 .	
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS CONTINGENCY CASE MONITORED BRANCHES LOADED ABOVE 100.0% OF RATING SET 1 - WORST CASE VIOLATIONS			
% LOADING VALUES ARE % MVA FOR TRANSFORMERS AND % CURRENT FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES			
THRESHOLD FOR THE COUNT OF CONTINGENCIES CAUSING OVERLOADING IS 100.0% OF RATING SET 1			
MONITORED ELEMENT	X-----LABEL-----X		
3 BUS 3 230.00			107.3%
4 BUS 4 230.00 1	SINGL1 2-4 (1)		39MVA
4 BUS 4 230.00			102.0%
9 BUS 9 115.00 1	SINGL1 7-9 (1)		77MVA

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de tabla 4.19 análisis de contingencia del sistema en demanda máxima.

MONITORED ELEMENT			X-----LABEL-----X	
5	BUS 5	230.00		133.2%
6	BUS 6	115.00	SINGL1 7-9 (1)	100MVA
7	BUS 7	1.0000		100.1%
8	BUS 8	13.200	SINGL1 1-2 (1)	30MVA
7	BUS 7	1.0000		115.6%
9	BUS 9	115.00	SINGL1 5-6 (1)	87MVA
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS SISTEMA' CONTINGENCY CASE BUSES WITH VOLTAGE GREATER THAN 1.0500 - WORST CASE VIOLATIONS				
X----- BUS -----X			X-----LABEL-----X	
3	BUS 3	230.00	SINGL1 3-4 (1)	1.06865
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS SISTEMA' CONTINGENCY CASE BUSES WITH VOLTAGE LESS THAN 0.9500 - WORST CASE VIOLATIONS				
X----- BUS -----X			X-----LABEL-----X	
4	BUS 4	230.00	SINGL1 7-9 (1)	0.94967
5	BUS 5	230.00	SINGL1 7-9 (1)	0.94274
6	BUS 6	115.00	SINGL1 5-6 (1)	0.85159
7	BUS 7	1.0000	SINGL1 5-6 (1)	0.92863
9	BUS 9	115.00	SINGL1 7-9 (1)	0.69657
10	BUS 10	115.00	SINGL1 7-9 (1)	0.70274
11	BUS 11	115.00	SINGL1 7-9 (1)	0.77480
12	BUS 12	115.00	SINGL1 5-6 (1)	0.83589
13	BUS 13	115.00	SINGL1 7-9 (1)	0.80300
14	BUS 14	115.00	SINGL1 7-9 (1)	0.68492

Tabla 4.20. Acciones de control individuales después del análisis de contingencias.

Acciones Correctivas Para La Contingencia:

X----- MONITORED ELEMENT -----X				X-----LABEL-----X	...\PSSE \sistema.acc	
3	BUS 3	230.00	4 BUS 4 230.00	SINGL1 2-4(1)	39MVA	107.3%

AJUSTES DE CONTROL	ANTES	DESPUES
UNIDAD EN BUS	GENERACIÓN MW	GENERACIÓN MW
01	19.2586	20.3543
02	119.8292	99.3027
03	39.8292	39.8292
06	59.4973	81.0887
08	18.0343	17.00
TAP EN TRANSFORMADOR	RELACION DE VUELTAS (pu)	RELACION DE VUELTAS (pu)
7-9	1.025	1.05

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de tabla 4.20. Acciones de control individuales después del análisis de contingencias.

Acciones Correctivas Para Las Contingencias:

X----- MONITORED ELEMENT -----X						X-----LABEL----X			
4	BUS 4	230.00	9	BUS 9	115.00	SINGL1 7-9(1)	102.00%	77MVA	
5	BUS 5	230.00	6	BUS 6	115.00	SINGL1 7-9(1)	133.20%	100MVA	
X----- BUS -----X			X-----LABEL----X			VOLT			
4	BUS 4	230.00				SINGL1 7-9(1)	0.94967		
5	BUS 5	230.00				SINGL1 7-9(1)	0.94274		
9	BUS 9	115.00				SINGL1 7-9(1)	0.69657		
10	BUS 10	115.00				SINGL1 7-9(1)	0.70274		
11	BUS 11	115.00				SINGL1 7-9(1)	0.7748		
13	BUS 13	115.00				SINGL1 7-9(1)	0.803		

AJUSTES DE CONTROL	ANTES	DESPUES
UNIDAD EN BUS	GENERACIÓN MW	GENERACIÓN MW
01	31.1711	62.2509
02	119.8292	97.2276
03	39.8292	17.2276
06	59.4973	14.3564
08	18.0343	17.00
TIRO DE CARGA EN BUS	MW	MVAR
10	18	11.6
14	29.8	10

Una vez realizadas las acciones de control anteriores el sistema vuelve a condiciones de operación dentro de los límites operativos de transmisión de potencia y de perfil de voltaje. La siguiente tabla 4.21 muestra la solución de flujos de potencia al aplicar las acciones de control ante la contingencia presente en la línea de bus siete a bus nueve confirmando la efectividad de dicho conjunto de acciones.

Tabla 4.21. Flujos de potencia solución ante contingencia de línea entre bus siete y bus nueve

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E FRI, OCT 14 2016 18:03										
IEEE 14 BUS TEST CASE						%MVA FOR TRANSFORMERS				
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA						% I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES				
DE BUS				A BUS						
		VOLT							CARGA	
NOMBRE	BASKV	PU/kV	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	AMPS	%	LÍMITE 1

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de tabla 4.21 flujos de potencia solución ante contingencia de línea entre bus siete y bus nueve

DE BUS				A BUS						
NOMBRE	BASKV	VOLT	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	AMPS	CARGA	
		PU/kV							%	LÍMITE 1
BUS 1	230	1.04	0	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		239.2		BUS 2	230	14	11.6	44	26	169A
				BUS 2	230	14	11.6	44	26	169A
				BUS 5	230	34.3	13.9	89	24	377A
BUS 2	230	1.02	-0.6	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		234.6		BUS 1	230	-13.9	-14	49	29	169A
				BUS 1	230	-13.9	-14	49	29	169A
				BUS 3	230	16.5	-9.6	47	21	226A
				BUS 4	230	30.6	3.6	76	45	169A
				BUS 5	230	34.4	6.2	86	51	169A
BUS 3	230	1.0273	-2.6	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		236.28		BUS 2	230	-16.4	5.7	42	19	226A
				BUS 4	230	14.8	13.3	49	52	94A
BUS 4	230	0.9945	-3.5	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		228.73		BUS 2	230	-30.1	-5.5	77	46	169A
				BUS 3	230	-14.5	-14	51	54	94A
				BUS 5	230	13.9	9.2	42	19	226A
				BUS 7	1	-17	-5.6	45	24	75M
				BUS 9	115	38.1	16.6	105	55	75M
BUS 5	230	0.9887	-3.8	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		227.4		BUS 1	230	-33.5	-16	94	25	377A
				BUS 2	230	-33.7	-7.6	88	52	169A
				BUS 4	230	-13.8	-9.1	42	19	226A
				BUS 6	115	65.9	29.5	183	96	75M
BUS 6	115	1.0332	-12.2	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		118.82		BUS 5	230	-65.9	-18.4	333	91	75M
				BUS 11	115	21.5	11.1	118	31	377A
				BUS 12	115	8.3	2.5	42	9	452A
				BUS 13	115	28.1	13.8	152	34	452A
BUS 7	1	1.0289	-1.5	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		1.0289		BUS 4	230	17	6.2	10160	24	75M
				BUS 8	13.2	-17	-6.2	10161	60	30M
BUS 8	13.2	1.04	0.1	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		13.728		BUS 7	1	17	6.8	770	61	30M
BUS 9	115	0.959	-15.9	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		110.29		BUS 4	230	-38.1	-7.4	203	52	75M
				BUS 10	115	-13.7	-5.8	78	35	226A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de tabla 4.21 flujos de potencia solución ante contingencia de línea entre bus siete y bus nueve

DE BUS				A BUS						
		VOLT							CARGA	
NOMBRE	BASKV	PU/kV	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	AMPS	%	LÍMITE 1
				BUS 14	115	-7.1	-2.5	39	9	452A
BUS 10	115	0.9687	-15.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		111.4		BUS 9	115	13.8	6	78	35	226A
				BUS 11	115	-13.8	-6	78	26	301A
BUS 11	115	0.9925	-14	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		114.14		BUS 6	115	-21	-10	118	31	377A
				BUS 10	115	14	6.4	78	26	301A
BUS 12	115	1.0173	-13.2	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		116.99		BUS 6	115	-8.2	-2.3	42	9	452A
				BUS 13	115	7	2	36	8	452A
BUS 13	115	0.9982	-13.8	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		114.79		BUS 6	115	-27.5	-12.6	152	34	452A
				BUS 12	115	-6.9	-1.9	36	8	452A
				BUS 14	115	7.3	2.9	39	15	264A
BUS 14	115	0.9757	-15	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		112.21		BUS 9	115	7.2	2.7	39	9	452A
				BUS 13	115	-7.2	-2.7	39	15	264A

4.5 Demanda de día festivo

A continuación se enlistan en la tabla 4.22 y 4.23 las características de demanda y despacho económico que representa al caso de demanda de día festivo, así como los resultados obtenidos de la solución de flujos de potencia del sistema que muestra los sobrevoltajes en diferentes nodos.

Tabla 4.22. Demanda conectada al sistema en día festivo

Día Festivo			
		Pload (MW)	Qload (Mvar)
Carga Doméstica	BUS 2	2.7125	1.5875
Carga Industrial	BUS 3	11.775	2.375
Carga Industrial	BUS 4	5.975	-0.4875
Carga Doméstica	BUS 5	0.95	0.2
Carga Doméstica	BUS 6	1.4	0.9375
Carga Doméstica	BUS 9	3.6875	2.075
Carga Doméstica	BUS 10	1.125	0.725

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de tabla 4.22, demanda conectada al sistema en día festivo

		Pload (MW)	Qload (Mvar)
Carga Doméstica	BUS 11	0.4375	0.225
Carga Industrial	BUS 12	0.7625	0.2
Carga Doméstica	BUS 13	1.6875	0.725
Carga Doméstica	BUS 14	1.8625	0.625
Totales		32.375	

Tabla 4.23. Despacho económico en día festivo

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E TUE, OCT 11 2016 17:44									
IEEE 14 BUS TEST CASE									
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA									
RESUMEN DE UNIDADES									
X-- NAME --X	BASKV	ID	MW	MVAR	QMAX	QMIN	ETERM	CURRENT	PF
BUS 1	230	1	1.2	13.5	100	-20	1.06	12.8	0.0908
BUS 2	230	1	31.4	-40	50	-40	1.0506	48.4	0.6173
BUS 3	230	1	0	0	40	0	1.0521	0	0
BUS 6	115	1	0	-6	24	-6	1.1141	5.4	0
BUS 8	13.2	1	0	-5.6	24	-6	1.09	5.2	0
TOTALES			32.6	-38.1	238	-72			

La tabla 4.24 indica que el sistema con condiciones de carga características de día festivo se encuentra violando el límite alto de voltaje en todos los nodos ya que presentan voltajes por arriba del 1.05 pu.

Tabla 4.24. Flujos de potencia en demanda día festivo.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E TUE, OCT 11 2016 18:23									
IEEE 14 BUS TEST CASE					%MVA FOR TRANSFORMERS				
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA					%I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES				
DE BUS				A BUS					
		VOLT							CARGA
NOMBRE	BASKV	PU/kV	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	%	LÍMITE 1
BUS 1	230	1.06	0	-----	-----	-----	-----	----	-----
		243.8		BUS 2	230	-1.7	7.5	11	169A
				BUS 2	230	-1.7	7.5	11	169A
				BUS 5	230	4.7	-1.5	3	377A
BUS 2	230	1.0506	0.3	-----	-----	-----	-----	----	-----

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación tabla 4.24 flujos de potencia en demanda día festivo

DE BUS				A BUS					
NOMBRE	BASKV	VOLT		NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	CARGA	
		PU/kV	ÁNGULO					%	LÍMITE 1
		241.64		BUS 1	230	1.8	-10.4	15	169A
				BUS 1	230	1.8	-10.4	15	169A
				BUS 3	230	9.7	-5.4	12	226A
				BUS 4	230	8.3	-8.6	17	169A
				BUS 5	230	7.1	-6.9	14	169A
BUS 3	230	1.0521	-0.8	-----	-----	-----	-----	----	-----
		241.98		BUS 2	230	-9.6	0.7	10	226A
				BUS 4	230	-2.2	-3.1	10	94A
BUS 4	230	1.0574	-0.7	-----	-----	-----	-----	----	-----
		243.2		BUS 2	230	-8.3	5	14	169A
				BUS 3	230	2.2	1.7	7	94A
				BUS 5	230	-5.5	7.6	10	226A
				BUS 7	1	3.6	-9.3	13	75M
				BUS 9	115	2.1	-4.5	7	75M
BUS 5	230	1.0551	-0.5	-----	-----	-----	-----	----	-----
		242.67		BUS 1	230	-4.7	-3.9	4	377A
				BUS 2	230	-7.1	3.2	11	169A
				BUS 4	230	5.5	-7.5	10	226A
				BUS 6	115	5.3	8.1	13	75M
BUS 6	115	1.1141	-1.1	-----	-----	-----	-----	----	-----
		128.13		BUS 5	230	-5.3	-7.9	13	75M
				BUS 11	115	0.8	0.1	1	377A
				BUS 12	115	1	0.3	1	452A
				BUS 13	115	2.1	0.6	2	452A
BUS 7	1	1.0991	-1	-----	-----	-----	-----	----	-----
		1.0991		BUS 4	230	-3.6	9.4	13	75M
				BUS 8	13.2	0	5.7	19	30M
				BUS 9	115	3.6	-15.1	21	75M
BUS 8	13.2	1.09	-1	-----	-----	-----	-----	----	-----
		14.388		BUS 7	1	0	-5.6	19	30M
BUS 9	115	1.1142	-1.2	-----	-----	-----	-----	----	-----
		128.14		BUS 4	230	-2.1	4.6	7	75M
				BUS 7	1	-3.6	15.3	21	75M
				BUS 10	115	0.7	0.9	2	226A
				BUS 14	115	1.2	0.7	1	452A
BUS 10	115	1.1133	-1.2	-----	-----	-----	-----	----	-----
		128.03		BUS 9	115	-0.7	-0.9	2	226A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación tabla 4.24 flujos de potencia en demanda día festivo

DE BUS				A BUS					
NOMBRE	BASKV	VOLT		NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	CARGA	
		PU/kV	ÁNGULO					%	LÍMITE 1
				BUS 11	115	-0.4	0.2	1	301A
BUS 11	115	1.1133	-1.2	-----	-----	-----	-----	----	-----
		128.03		BUS 6	115	-0.8	-0.1	1	377A
				BUS 10	115	0.4	-0.2	1	301A
BUS 12	115	1.1125	-1.2	-----	-----	-----	-----	----	-----
		127.94		BUS 6	115	-1	-0.3	1	452A
				BUS 13	115	0.1	0.1	0	452A
BUS 13	115	1.1121	-1.2	-----	-----	-----	-----	----	-----
		127.89		BUS 6	115	-2.1	-0.6	2	452A
				BUS 12	115	-0.1	-0.1	0	452A
				BUS 14	115	0.6	0	1	264A
BUS 14	115	1.1112	-1.3	-----	-----	-----	-----	----	-----
		127.79		BUS 9	115	-1.2	-0.7	1	452A
				BUS 13	115	-0.6	0	1	264A

A continuación se presenta la tabla 4.25 que contiene las acciones de control de voltaje para mantener al sistema dentro de los límites operativos de voltaje.

Tabla 4.25. Acciones de control demanda de día festivo.

ACCIONES DE CONTROL	ANTES	DESPUES
UNIDAD EN BUS	Voltaje Programado (pu)	Voltaje Programado (pu)
01	1.0600	1.0
02	1.0450	1.0
03	1.0100	1.0
06	1.0700	1.0
08	1.0900	1.0
CAPACITOR PARALELO EN BUS	MVAR	MVAR
09	19.0	0.00

Se observa de la tabla 4.26 que una vez realizadas las acciones de control en el sistema no se viola ningún límite operativo.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Tabla 4.26. Flujos de potencia después de realizar acciones de control.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E FRI, OCT 14 2016 15:55									
IEEE 14 BUS TEST CASE					%MVA FOR TRANSFORMERS				
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA					% I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES				
DE BUS				A BUS					
NOMBRE	BASKV	VOLT		NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	CARGA	
		PU/kV	ÁNGULO					%	LÍMITE 1
BUS 1	230	1	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		230		BUS 2	230	-1.7	-0.8	3	169A
				BUS 2	230	-1.7	-0.8	3	169A
				BUS 5	230	4.6	0.3	3	377A
BUS 2	230	1	0.1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		230		BUS 1	230	1.7	-1.9	4	169A
				BUS 1	230	1.7	-1.9	4	169A
				BUS 3	230	9.8	-4.4	12	226A
				BUS 4	230	8.2	-0.3	12	169A
				BUS 5	230	7.2	0.9	11	169A
BUS 3	230	1	-1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		230		BUS 2	230	-9.8	0.2	11	226A
				BUS 4	230	-2	4.4	13	94A
BUS 4	230	0.9928	-0.7	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		228.35		BUS 2	230	-8.2	-3	13	169A
				BUS 3	230	2	-5.6	16	94A
				BUS 5	230	-4.6	4.8	7	226A
				BUS 7	1	3	2.3	5	75M
BUS 5	230	0.9914	-0.5	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		228.02		BUS 1	230	-4.6	-5.1	5	377A
				BUS 2	230	-7.2	-4.2	12	169A
				BUS 4	230	4.6	-4.8	7	226A
				BUS 6	115	6.3	13.9	20	75M
BUS 6	115	1.0308	-1.3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		118.54		BUS 5	230	-6.3	-13.4	20	75M
				BUS 11	115	1.3	3.4	5	377A
				BUS 12	115	1.1	0.7	1	452A
				BUS 13	115	2.4	2.4	4	452A
BUS 7	1	1.0104	-1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		1.0104		BUS 4	230	-3	-2.3	5	75M
				BUS 8	13.2	0	5.9	20	30M
				BUS 9	115	3	-3.7	6	75M
BUS 8	13.2	1	-1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		13.2		BUS 7	1	0	-5.9	20	30M

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de tabla 4.26 flujos de potencia después de realizar acciones de control

DE BUS				A BUS					
NOMBRE	BASKV	VOLTPU/kv	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	%	LÍMITE 1
BUS 9	115	1.0144	-1.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		116.65		BUS 4	230	-1.7	-1.9	3	75M
				BUS 7	1	-3	3.7	6	75M
				BUS 10	115	0.3	-2.4	5	226A
				BUS 14	115	0.8	-1.5	2	452A
BUS 10	115	1.0163	-1.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		116.87		BUS 9	115	-0.3	2.4	5	226A
				BUS 11	115	-0.9	-3.2	5	301A
BUS 11	115	1.023	-1.3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		117.64		BUS 6	115	-1.3	-3.4	5	377A
				BUS 10	115	0.9	3.2	5	301A
BUS 12	115	1.0278	-1.4	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		118.19		BUS 6	115	-1.1	-0.7	1	452A
				BUS 13	115	0.3	0.5	1	452A
BUS 13	115	1.0262	-1.4	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		118.02		BUS 6	115	-2.4	-2.4	4	452A
				BUS 12	115	-0.3	-0.5	1	452A
				BUS 14	115	1.1	2.1	4	264A
BUS 14	115	1.0173	-1.4	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		116.99		BUS 9	115	-0.8	1.5	2	452A
				BUS 13	115	-1.1	-2.1	4	264A

La tabla 4.27 contiene los datos después de realizar el análisis de contingencias para verificar las condiciones del sistema después de la aplicación del criterio N-1.

Tabla 4.27. Análisis de contingencias del sistema en demanda de día festivo.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS (R)E		FRI, OCT 14
2016 15:55		PAGE 4 .
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS CONTINGENCY CASE MONITORED BRANCHES LOADED ABOVE 100.0% OF RATING SET 1 - WORST CASE VIOLATIONS		
% LOADING VALUES ARE % MVA FOR TRANSFORMERS AND % CURRENT FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES		
THRESHOLD FOR THE COUNT OF CONTINGENCIAS CAUSING OVERLOADING IS 100.0% OF RATING SET 1		
MONITORED ELEMENT	X-----LABEL-----X	
-----	-----	-----

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de la tabla 4.27, análisis de contingencias del sistema en demanda de día festivo

AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS SISTEMA' CONTINGENCY CASE BUSES WITH VOLTAGE GREATER THAN 1.0500 - WORST CASE VIOLATIONS		
X----- BUS -----X	X-----LABEL-----X	
-----	-----	-----
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS SISTEMA' CONTINGENCY CASE BUSES WITH VOLTAGE LESS THAN 0.9500 - WORST CASE VIOLATIONS		
X----- BUS -----X	X-----LABEL-----X	
-----	-----	-----

La tabla anterior 4.27, al igual que en el caso de demanda media indica que el sistema se encuentra en condiciones de operación de estado estable confirmando que las acciones de control propuestas cumplen con el objetivo de proveer confiabilidad operativa al sistema de pruebas bajo condiciones de demanda mínima.

CONCLUSIONES

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

CONCLUSIONES

En México, el objetivo del operador independiente del Sistema Eléctrico Nacional (CENACE) y las Zonas de Operación de Transmisión es la de asegurar la operación del sistema bajo condiciones de confiabilidad. Las acciones principales para llevar a buen término son una buena planificación y criterios de operación adecuados, capacidades de transferencia de transmisión y límites basados en esos criterios, métodos y procedimientos efectivos de monitoreo, evaluación y cumplimiento de los criterios.

El proceso de evaluación de confiabilidad a través de análisis de contingencias incluye el estudio del comportamiento del sistema en condiciones normales (pre-contingencia), y en condiciones de emergencia (post-contingencia). A partir del análisis se proponen medios y recursos que ayuden al sistema a regresar a su operación normal, donde la condición de operación normal del sistema es aquella en la cual todos los elementos que componen a la red se encuentran dentro de los límites térmicos y de voltaje. Se proponen el uso de los recursos disponibles como la redistribución de la generación y la aportación de recursos de potencia reactiva al sistema para mantener los parámetros de operación a condiciones normales, [36].

A partir de las simulaciones de diferentes condiciones de carga y despacho de generación para un mismo sistema de potencia de pruebas realizadas en el capítulo 4, se observa que las condiciones de demanda máxima generan en el sistema el mayor estrés ya que del análisis de contingencias se reportan las condiciones post-contingencias más severas.

El sistema cuenta con la parte más sensible en la red de 115 kV debido a la concentración de carga. Los elementos que generan mayores cambios en la operación del sistema son los transformadores conectados entre los buses B07-B09 y B05-B06 que son precisamente los que transfieren la energía de las unidades generadoras hacia las cargas.

No existe una combinación general que satisfaga las necesidades de control del sistema, en cambio se pueden generar un gran número de combinaciones de acciones de control. La aplicación jerárquica de ajustes que se toman de [11] forma parte

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

fundamental en la reducción de esfuerzos y afectación de carga en la búsqueda de la solución satisfactoria de contingencias que ponen en peligro la operación del sistema de potencia. De lo desarrollado en el capítulo anterior, los ajustes en el despacho de generación permiten solucionar de forma individual la mayor parte de violaciones de operación.

Las características que ponen en riesgo la operación del sistema evaluado ante la aplicación del criterio N-1 en el Análisis de Contingencia son:

- Limite de capacidad de transferencia del transformador de B07-B08 que provoca limitación a la capacidad de ajuste de generación en la unidad conectada al B08 y por lo tanto su participación en las acciones de control.
- Pocos recursos de potencia reactiva en la red de 115 kV lo que provoca una mayor sensibilidad en la variación de voltaje en los buses que operan en una tensión de 115 kV y una pobre regulación. El problema con la regulación de voltaje se debe a que únicamente se perciben beneficios de control de forma local.
- Limitado número de fuentes de potencia activa que alimentan a la mayoría de la carga del sistema y que se encuentra conectada en la red operada en tensión de 115 kV. En otras palabras, la marcada concentración de demanda alejada eléctricamente de las fuentes de energía en combinación con limitados recursos de transmisión.
- El disparo de los transformadores de B05-B06 y B07-B09 provocan el mayor número de límites operativos siendo incluso de los más severos para elementos conectados en los cuatro niveles de tensión.

Como resultado de las simulaciones y aplicación de análisis de contingencias en el capítulo anterior, principalmente de los resultados obtenidos del sistema de pruebas en demanda máxima y de las limitantes de la red enunciadas en los párrafos anteriores, se proponen las siguientes mejoras como parte del incremento de confiabilidad de operación del sistema de pruebas.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

1. Incremento de la capacidad de transferencia del transformador de B07-B08 para igualar a la capacidad de los demás transformadores del sistema con un límite 1 igual a 75 MVA.
2. Conexión de una unidad generadora en el B14 con capacidades de generación y curvas de costo incremental iguales a la unidad generadora conectada al B08.

La siguiente tabla 5.1 contiene la solución de flujos de potencia con las modificaciones de mejora propuestas,

Tabla 5.1. Solución flujos de potencia sistema de pruebas condiciones de demanda máxima con mejoras propuestas

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E SAT, OCT 15 2016 2:51										
IEEE 14 BUS TEST CASE				%MVA FOR TRANSFORMERS						
CASO BASE SIN DATOS DE SECUENCIA				% I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES						
DE BUS				A BUS						
		VOLT							CARGA	
NOMBRE	BASKV	PU/kV	ÁNGULO	NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	AMPS	%	LÍMITE 1
BUS 1	230	1.04	0	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		239.2		BUS 2	230	10.3	12.8	40	23	169A
				BUS 2	230	10.3	12.8	40	23	169A
				BUS 5	230	29.6	12.7	78	21	377A
BUS 2	230	1.02	-0.4	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		234.6		BUS 1	230	-10.2	-15.3	45	27	169A
				BUS 1	230	-10.2	-15.3	45	27	169A
				BUS 3	230	15.3	-10.3	45	20	226A
				BUS 4	230	31	2.6	76	45	169A
				BUS 5	230	31	4.5	77	46	169A
BUS 3	230	1.029	-2.2	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		236.67		BUS 2	230	-15.2	6.2	40	18	226A
				BUS 4	230	16.5	12.8	51	54	94A
BUS 4	230	0.9961	-3.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		229.1		BUS 2	230	-30.4	-4.4	77	46	169A
				BUS 3	230	-16.2	-13.3	53	56	94A
				BUS 5	230	-1.3	7.3	19	8	226A
				BUS 7	1	19.8	6.4	52	28	75M
				BUS 9	115	18.6	4.9	48	26	75M
BUS 5	230	0.9932	-3.2	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		228.43		BUS 1	230	-29.1	-15.5	83	22	377A
				BUS 2	230	-30.5	-6.3	79	46	169A
				BUS 4	230	1.3	-7.3	19	8	226A

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Continuación de tabla 5.1 flujos de potencia sistema de pruebas condiciones de demanda máxima con mejoras propuestas.

DE BUS				A BUS						
NOMBRE	BASKV	VOLT		NOMBRE	BASKV	MW	MVAR	AMPS	CARGA	
		PU/kV	ÁNGULO						%	LIMITE 1
				BUS 6	115	43	25.9	127	67	75M
BUS 6	115	1.04	-8.7	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		119.6		BUS 5	230	-43	-20.6	230	64	75M
				BUS 11	115	11.4	9.7	72	19	377A
				BUS 12	115	6.2	2.9	33	7	452A
				BUS 13	115	19.9	14.1	118	26	452A
BUS 7	1	1.0062	-5.6	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		1.0062		BUS 4	230	-19.8	-5.5	11800	27	75M
				BUS 8	13.2	-33.5	-18.3	21921	51	75M
				BUS 9	115	53.3	23.8	33520	78	75M
BUS 8	13.2	1.04	-2.4	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		13.728		BUS 7	1	33.5	20.9	1661	53	75M
BUS 9	115	1.0065	-9	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		115.75		BUS 4	230	-18.6	-3	94	25	75M
				BUS 7	1	-53.3	-20.1	284	76	75M
				BUS 10	115	14	6.2	76	34	226A
				BUS 14	115	-1.1	2.9	15	3	452A
BUS 10	115	0.9969	-9.6	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		114.65		BUS 9	115	-13.9	-6	76	34	226A
				BUS 11	115	-4.1	-5.6	35	12	301A
BUS 11	115	1.0111	-9.4	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		116.28		BUS 6	115	-11.2	-9.3	72	19	377A
				BUS 10	115	4.2	5.7	35	12	301A
BUS 12	115	1.0255	-9.3	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		117.93		BUS 6	115	-6.1	-2.8	33	7	452A
				BUS 13	115	5	2.5	27	6	452A
BUS 13	115	1.0099	-9.6	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		116.14		BUS 6	115	-19.5	-13.3	118	26	452A
				BUS 12	115	-4.9	-2.4	27	6	452A
				BUS 14	115	-2.6	4.2	25	9	264A
BUS 14	115	1	-8.6	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----
		115		BUS 9	115	1.1	-2.9	15	3	452A
				BUS 13	115	2.7	-4.1	25	9	264A

La tabla 5.2 contiene los resultados de la aplicación de análisis de contingencias al nuevo sistema mejorado.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Tabla 5.2. Análisis de contingencias sistema mejorado.

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E SAT, OCT 15			
2016 2:52		PAGE 4	
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS CONTINGENCY CASE MONITORED BRANCHES LOADED ABOVE 100.0% OF RATING SET 1 - WORST CASE VIOLATIONS			
% LOADING VALUES ARE % MVA FOR TRANSFORMERS AND % CURRENT FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES			
THRESHOLD FOR THE COUNT OF CONTINGENCIES CAUSING OVERLOADING IS 100.0% OF RATING SET 1			
MONITORED ELEMENT	X-----LABEL-----X		
5. BUS 5	230.00		104.3%
6 BUS 6	115.00 1	SINGL1 7-9(1)	78MVA
7 BUS 7	1.0000		114.8%
9 BUS 9	115.00 1	SINGL1 5-6(1)	86MVA
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS SISTEMA' CONTINGENCY CASE BUSES WITH VOLTAGE GREATER THAN 1.0500 - WORST CASE VIOLATIONS			
X----- BUS -----X	X-----LABEL-----X		
3 BUS 3	230.00	SINGL1 3-4(1)	1.06046
AC CONTINGENCY REPORT FOR 1 AC CONTINGENCY CALCULATION RUNS SISTEMA' CONTINGENCY CASE BUSES WITH VOLTAGE LESS THAN 0.9500 - WORST CASE VIOLATIONS			
X----- BUS -----X	X-----LABEL-----X		
6 BUS 6	115.00	SINGL1 5-6(1)	0.94791
9 BUS 9	115.00	SINGL1 7-9(1)	0.94829
10 BUS 10	115.00	SINGL1 9-10(1)	0.92318
12 BUS 12	115.00	SINGL1 5-6(1)	0.94189
13 BUS 13	115.00	SINGL1 5-6(1)	0.93767

La tabla 5.3 contiene información comparativa de los resultados de la aplicación de análisis de contingencia en demanda máxima sin y con las propuestas de mejora del sistema. Se decide hacer la comparación del comportamiento del sistema bajo condiciones de demanda máxima debido a que es en ésta donde se presenta el mayor estrés y complicaciones de regulación en el sistema.

Se observa a partir de las simulaciones del sistema con la aplicación de las dos propuestas de mejoramiento, que además de propiciar progreso de condiciones de operación en condiciones normales, se cuenta con mayor número de recursos de regulación principalmente por la disponibilidad de potencia activa y reactiva proporcionada por la unidad generadora conectada al B08, al incrementar la capacidad

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

de transmisión de potencia del transformador de B07-B08, y la nueva unidad conectada al B14 con capacidades similares a la unidad generadora conectada en el B08. Las violaciones de límites operativos que se presentan al aplicar análisis de contingencias pueden ser eliminadas fácilmente regulando los recursos disponibles en el sistema.

Tabla 5.3. Comparativa de resultados de análisis de contingencias, sistema sin y con mejoras

NUMERO DE VIOLACIONES	CONTINGENCIA SENCILLA MAS SEVERA	LIMITE VIOLADO
SISTEMA SIN MEJORA		
05 VIOLACIONES LIMITE DE CARGA	SINGL1 7-9(1)	BUS 5 230.00 BUS 6 115.00 1 133.2% 100MVA
11 VIOLACIONES LIMITE DE VOLTAJE	SINGL1 7-9(1)	BUS 14 115.00 0.68492 PU
SISTEMA MEJORADO		
02 VIOLACIONES LIMITE DE CARGA	SINGL1 5-6(1)	BUS 7 1.0000 114.8% 86MVA
06 VIOLACIONES LIMITE DE VOLTAJE	SINGL1 5-6(1)	BUS 13 115.00 0.93767 PU

Trabajos futuros y recomendaciones

La operación de Sistemas Eléctricos de Potencia involucra una cantidad enorme de trabajo, enfoques, criterios, economía, objetivos, análisis, [14], [1] y [28]. Continuando con la evaluación de condiciones de confiabilidad marcada en esta tesis, la siguiente pieza en el rompecabezas es continuar con la evaluación de confiabilidad de SEP's a través del enfoque de estabilidad transitoria.

De forma breve, los estudios de estabilidad transitoria evalúan el comportamiento del sistema y su capacidad de mantenerse estable transitoriamente manteniendo sincronizadas todas las unidades generadoras a la frecuencia del sistema (60 Hz para México) ante la ocurrencia de disturbios en la red interconectada, mismas que provocan oscilaciones de potencia de salida de las unidades generadoras debido a las características electromecánicas de las mismas unidades, [4].

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

Ambos análisis de estabilidad, estable y transitoria, se ven conjugados en la aplicación de esquemas de acción remedial que como se menciona en la introducción del capítulo 1 el objetivo es el de ejecutar acciones de control de forma automática con el fin de regresar al sistema eléctrico a condiciones normales de operación ante la ocurrencia de disturbios que pongan en peligro la estabilidad del sistema.

Los ajustes de los EAR pueden ser realizados con apoyo de análisis de contingencias, por lo que otro tema de trabajo futuro será el ajuste de estos esquemas de acción remedial ante condiciones de operativas más severas como lo son el criterio N-1-1.

La actualización y adquisición automática de las variables eléctricas de los sistemas eléctricos de potencia por parte de las organizaciones encargadas de la operación, a través de los equipos de medición ubicados en las subestaciones eléctricas, centrales generadoras y centros de carga, da un valor agregado superior al análisis de contingencias para su aplicación en tiempo real.

La aplicación eficiente de las acciones de control considerando su impacto en el las variables del sistema eléctrico o la economía en su empleo.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

REFERENCIAS

- [1] Comisión Reguladora de Energía, *Criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red*, Diario Oficial de la Federación, 08 de Abril 2016.
- [2] J. Tao Ma, X. Liu, H. Sinha, J. Luciano y V. Tsolias, «User Experiences with Contingency Analysis,» *IEEE*, pp. 1-8, 2012.
- [3] W. Shun King y D. Zhao Yang, «Knowledge Discovery and Data Mining for Power System Contingency Analysis,» *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-6, 2011.
- [4] J. J. Grainger y J. W. D. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*, México: McGraw-Hill, Junio 2007.
- [5] J. Baranowski y D. French, «Operational use of contingency Analysis at PJM,» *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-4, 2012.
- [6] Centro Nacional de Control de Energía, Área de Control Oriental, *Procedimiento para realizar estudios del comportamiento del sistema eléctrico de potencia O-3098-P03*, 2014.
- [7] «Power Transmission System Planning Software,» [En línea]. Available: <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/software-solutions/planning-data-management-software/planning-simulation/pages/pss-e.aspx>. [Último acceso: Septiembre 2016].
- [8] M. Hoke, *Operational Parameters Limits*, PJM, 2013.
- [9] Operations Support Division Transmission Operations Department, *PJM Manual 03: Transmission Operations*, Junio 2016.
- [10] Centro Nacional de Control de la Energía, Área de Control Oriental, *Instructivo para el Control de Variables del SEP*, Puebla, 2014.
- [11] Siemens Industry, Inc. Siemens Power Technologies International, *PSS®E 34 Program Operation Manual*, Marzo, 2015.
- [12] C. Lovasik, «How PJM Operates and Dispatches,» Julio 2013.
- [13] ANSI/IEEE Std 738-2006, *IEEE Standard for Calculation of Bare Overhead Conductor Temperature and Ampacity Under Steady-State Conditions*, New York: IEEE, 2007.
- [14] Centro Nacional de Control de Energía, *Criterios mediante los cuales se establecen las características específicas de la infraestructura requerida para la interconexión de centrales eléctricas y conexión de centros de carga*, México: Diario Oficial de la Federación, 2015.

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

- [15] Centro Nacional de Control de la Energía, *Curvas de demanda*, Puebla, 2016.
- [16] Centro Nacional de Control de la Energía, Zona de Operación de Transmisión Puebla-Tlaxcala, *Catálogo de Bancos de Transformación y Cargas de la ZOTPT*, Puebla, 2014.
- [17] J. Doneti, C. Yang, K. Trotter y A. Witmeier, «Experiences with Contingency Analysis in reliability and market operations at MISO,» *IEEE*, pp. 1-7, 2012.
- [18] J. B. Ward, «Equivalent circuits for Power-Flow studies,» *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 68, n° 1, pp. 373-382, 1949.
- [19] A. S. M. G. T. y M. B. , «Contingency analysis of operational planning models with distribution network reconfiguration,» *Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE*, p. 5, 2015.
- [20] R. Vykuka y L. Noháčová, «Sensitivity factors for contingency analysis,» *Electric Power Engineering (EPE), 2015 16th International Scientific Conference on*, pp. 551-554, 2015.
- [21] V. Jagadishprasad Mishra y M. D. Khardennis, «Contingency Analysis of Power System,» *IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, p. 4, 2012.
- [22] A. J. Wood y B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [23] R. O. Mota Palomino, *Apuntes*, Puebla, 2012.
- [24] J. F. Aparicio Pulido, *equivalentes estáticos para selección de contingencias en sistemas eléctricos de potencia*, México, D.F., 2011.
- [25] A. Escobar Zuluaga, «Análisis estático de contingencias de voltaje en sistemas eléctricos de potencia,» *Scientia et Technica*, vol. X, n° 26, p. 6, 2004.
- [26] M. S. Rodrigues, «Automatic contingency selection and power systems static security analysis using artificial neuronal networks,» *Applied Computing & Automation*, p. 5.
- [27] J. Tong y L. Wang, «Design of a DSA Tool for Real Time System Operations,» *International Conference on Power System Technology. IEEE*, pp. 1-5, 2006.
- [28] Secretaría de Energía, *Acuerdo por el que la Secretaría de Energía emite las Bases del Mercado Eléctrico*, México: Diario Oficial de la Federación, Septiembre 2015.
- [29] «Power Systems Test Case Archive,» [En línea]. Available: <https://www.ee.washington.edu/research/pstca/>. [Último acceso: Julio 2016].
- [30] M. I. Zamora Belver y A. J. Mazon Sainz-Maza, *Simulación de Sistemas Eléctricos*, Pearson Educación, 2005.
- [31] PJM, «Who we are,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.pjm.com/about-pjm/who-we>

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS A SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PRUEBAS PARA EVALUAR Y MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERATIVA

are.aspx. [Último acceso: Octubre 2016].

- [32] California Independent System Operator, «Understanding the ISO,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.caiso.com/about/Pages/OurBusiness/Default.aspx>. [Último acceso: Octubre 2106].
- [33] California Independent System Operator Corporation, *Alignment of Key Infrastructure Planning Processes by CPUC, CEC and CAISO Staff*, Diciembre 2014.
- [34] Centro Nacional de Control de Energía, Area de Control Oriental, *Procedimiento Para Actualizar el Modelo del Sistema Electrico de Potencia*, Puebla, Abril 2013.
- [35] California Independent System Operator Corporation, *CAISO Market and Processes*, Octubre 2016.
- [36] Planning Division Transmission Planing Department, *PJM Manual 14B Region Transmission Planing Process*, PJM, Agosto 2016.
- [37] California Independent System Operator Corpoartion, *Comprehensive Transmission Planning Process*, 2016.
- [38] California ISO, «Reports and Bulletins,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.caiso.com/market/Pages/ReportsBulletins/Default.aspx>. [Último acceso: Octubre 2106].
- [39] Comisión Federal de Electricidad, «Tarifas generales en alta tensión,» 2016. [En línea]. Available: http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_industria.asp?Tarifa=CMAAT&Anio=2016. [Último acceso: Octubre 2016].
- [40] Centro Nacional de Control de la Energía, Zona de Operacion de Transmisión Puebla-Tlaxcala, «Estudios Departamento Analisis,» Puebla, 2015.

APÉNDICE

