

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y
ELECTRONICA**



**"ESTUDIO PARA DETERMINAR LOS AJUSTES DE
LOS SISTEMAS DE PROTECCION Y PARAMETROS
DE OPERACION DE LOS NUEVOS SISTEMAS
ESTATICOS DE COMPENSACION REACTIVA
DE ELECTROLIMA INSTALADOS EN LAS
SUBESTACIONES DE TRANSMISION 60 KV
BALNEARIOS Y CHAUARRIA"**

TESIS

PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRICISTA

ERNESTO GERMAN SIXTO, VILLANUEVA ROCA

PROMOCION: 1979-2

LIMA - PERU

1993

S U M A R I O

El Estudio de los Sistemas o Estaciones de Compensación Estática de Potencia Reactiva de propiedad de la Empresa Electrolima, ha sido orientado para el análisis de dos aspectos importantes que son los ajustes de los elementos de protección principal y la operación de los Sistemas dentro de la Red de alta tensión.

Los resultados esperados son : primero, el deseo de que este trabajo contribuya a divulgar, entre los profesionales, nuevos conceptos dentro del área de Sistemas de Potencia; segundo, garantizar la integridad de los equipos eléctricos instalados así como la continuidad de la operación de los Sistemas de Compensación; tercero, dejar claramente establecidos los criterios para los

ajustes de los elementos de protección principal y que en su oportunidad ha permitido a Electrolima discutirlo con el Fabricante, como sus propios criterios de acuerdo a las condiciones actuales de la Red. Finalmente, en el aspecto de operación, ha permitido elaborar un análisis individual de la operación de los Compensadores, creándose un software de análisis rápido para los operadores para cualquier condición de operación y ajuste de parámetros.

" ESTUDIO DE LOS AJUSTES DE LA PROTECCION
Y PARAMETROS DE OPERACION DE LOS NUEVOS
SISTEMAS ESTATICOS DE COMPENSACION REACTIVA
INSTALADOS EN LA RED DE ELECTROLIMA "

TEMA : "ESTUDIO PARA DETERMINAR LOS AJUSTES DE LOS SISTEMAS DE PROTECCION Y PARAMETROS DE OPERACION DE LOS NUEVOS SISTEMAS ESTATICOS DE COMPENSACION REACTIVA DE ELECTROLIMA INSTALADOS SUBESTACIONES DE TRANSMISION 60 kV BALNEARIOS Y CHAVARRIA"

AUTOR: ERNESTO GERMAN SIXTO, VILLANUEVA BOCA
PROMOCION 79-2

TITULO: INGENIERO ELECTRICISTA

FACULTAD: FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

LUGAR: Lima - Perú

AÑO: 1993

EXTRACTO

El presente trabajo muestra inicialmente la actualización de las especificaciones técnicas con que fueron diseñados los Sistemas Estáticos de

Compensación Reactiva de la Empresa Electrolima S.A. y que están basados en las especificaciones contractuales establecidas en su oportunidad entre Electrolima y el Proveedor.

Posteriormente se establecieron criterios y ajustes de la protección convencional en coordinación con la protección especial de las válvulas de tiristores, con la finalidad de garantizar la integridad de los equipos y al mismo tiempo evitar desconexiones innecesarias ante fallas en la Red eléctrica. Así mismo, se analiza las diferentes condiciones de operación de la red eléctrica y se proponen los valores de ajuste de los parámetros de operación que garanticen un correcto funcionamiento automático de los compensadores dentro del Sistema Interconectado Centro-Norte.

Finalmente, los resultados que deben garantizar la continuidad de la operación y evitar desconexiones innecesarias, han sido discutidos y aceptados oportunamente por la compañía Asea Brown Boveri de Suiza, quienes son los fabricantes de los equipos.

INDICE

PROLOGO	1
CAPITULO I : CARACTERISTICAS GENERALES	
1. INTRODUCCION	3
1.1 Características eléctricas del sistema	4
1.2 Condiciones Ambientales	7
1.3 Características Eléctricas de los Sistemas de Compensación Reactiva	9
1.4 Características Eléctricas Generales para los equipos de alta y baja tensión	11
1.5 Normas utilizadas	13

**CAPITULO II : DESCRIPCION DEL SISTEMA DE
COMPENSACION REACTIVA**

2	INTRODUCCION	14
2.1	Alcance de los Sistemas de Compensación	15
2.2	Disposición Eléctrica y datos técnicos	21
2.2.1	Disposición Eléctrica	21
2.2.2	Válvulas TCR y TSC	23
2.2.3	Datos Eléctricos de los Reactores y Capacitores	25
2.3	Valores Nominales y Diagrama Voltaje Corriente	25
2.4	Comportamiento con diferentes valores de tensión	27
2.4.1	Sobretensión	28
2.4.2	Sub-Tensión	30
2.4.3	Tensión sin carga	30
2.5	Operación temporal a baja tensión	31
2.6	Valores de Armónicos RAMA TCR	32
2.7	Ajuste de los parámetros del Regulador de Tensión	32
2.7.1	Funciones especiales de protección de las válvulas	32
2.7.2	Parámetros de operación	35
2.7.2.1	Tensión de referencia	35
2.7.2.2	Pendiente de operación	36

**CAPITULO III : REQUERIMIENTOS Y AJUSTE DE LOS
SISTEMAS DE PROTECCION**

3	INTRODUCCION	38
3.1	Descripción del Sistema de Protección	40
3.2	Zonas y Subzonas de Protección	41
3.3	Funciones especiales para RAMAS TSC y TCR	43
3.4	Coordinación entre las funciones especiales de protección de las válvulas y la protección convencional	48
3.4.1	Protección RAMA TCR	48
3.4.1.1	Protección Sobrecorriente	49
3.4.1.2	Encendido por protección	51
3.4.1.3	Pérdida de Tiristores	52
3.4.2	Protección RAMA TSC	53
3.4.2.1	Protección Sobrecorriente	54
3.4.2.2	Encendido por protección	55
3.4.2.3	Pérdida de Tiristores	56
3.5	Sistema de protección convencional	57
3.5.1	Resumen-Relés de protección	58
3.5.2	Filosofía de los relés utilizados	58
3.5.3	Determinación de los ajustes de los relés	66
3.5.3.1	Protección contra Sobretensiones	68
3.5.3.2	Protección por Sobrefrecuencia	71
3.5.3.3	Protección por Sobrecorriente del Transformador	72

3.5.3.4	Protección diferencial del transformador	76
3.5.3.5	Protección de Sobrecorriente en el neutro del transformador de potencia	85
3.5.3.6	Protección fallas a tierra media tensión	88
3.5.3.7	Protección diferencial de la barra media tensión	91
3.5.3.8	Protección Sobrecorriente de las RAMAS	97
3.5.3.8.1	RAMA TCR	97
3.5.3.8.2	RAMA TSC	100
3.5.3.8.3	RAMA FC	103
3.6	Señales de salida	105

**CAPITULO IV : OPERACION INDIVIDUAL Y PARALELO
DE LOS COMPENSADORES EN EL
SISTEMA INTERCONECTADO
CENTRO-NORTE**

4	Introducción	107
4.1	Principio y pautas de operación del compensador	109
4.1.1	Principio de operación	109
4.1.1.1	Comportamiento en estado estable	111
4.1.1.2	Características de la red	112
4.1.2	Pautas de operación	113

4.2	Análisis teórico del comportamiento en estado estable	115
4.2.1	Análisis de la red	115
4.2.2	Cálculo del punto de operación en el rango de control	118
4.2.3	Cálculo del punto de operación fuera del rango de control	119
4.2.4	Cálculo de los valores extremos de operación en el rango de control	121
4.2.5	Cálculo de los valores óptimos de tensión de referencia y pendiente	122
4.3	Criterios generales	123
4.4	Programas de aplicación	124
4.5	Cálculo de valores de operación	127
	ILUSTRACIONES	131
	ANEXOS	
	Anexo 1	180
	Anexo 2	189
	CONCLUSIONES	215
	BIBLIOGRAFIA	220

PROLOGO

La realización de este estudio ha sido motivada por dos razones fundamentales; la primera para lograr un anhelo personal en el desarrollo de mi profesión, y la segunda, la más importante, el deseo de que este trabajo sobre **Compensación Estática Potencia Reactiva** contribuya divulgar, entre los profesionales, nuevos conceptos dentro del área de **Sistemas de Potencia**.

Igualmente permitirá un mejor entendimiento para el análisis de la operación de los **Sistemas o Estaciones de Compensación Reactiva** en **Balnearios y Chavarría** dentro de la Red así como también permitirá establecer los criterios de ajustes de los elementos de protección principal; que son puntos indispensables para garantizar el correcto funcionamiento de las estaciones, dentro del **Sistema Interconectado de Transmisión Centro-Norte de Electrolima - Electroperú**.

Esta tesis consta de siete partes importantes, las cuales son, la Introducción que explica los antecedentes, objetivos y alcances del estudio. El Capítulo I que trata de las características ambientales y eléctricas establecidas para el diseño de las Estaciones. En el Capítulo II, se efectúa una descripción detallada de las Estaciones de Compensación, estableciendo pautas de operación y disposición de equipos.

El capítulo III presenta un análisis de los ajustes propuestos para la coordinación de los relés de protección especial existente para los tiristores. El Capítulo IV presenta un análisis de las modalidades de operación así como ajustes óptimos de la tensión de referencia y pendiente. Y para finalizar las conclusiones y recomendaciones, así como también se adjuntan los anexos con los esquemas señalados en cada capítulo.

Quiero expresar mi agradecimiento en forma especial al ingeniero Carlos Arroyo, quien con capacidad y experiencia asesoró este estudio.

Mi reconocimiento a los funcionarios de Electrolima por permitir mi participación directa en la obra de recepción de las Estaciones de Compensación Estática de potencia reactiva, equipos únicos en América del Sur.

C A P I T U L O I

CARACTERISTICAS GENERALES

1 INTRODUCCION

El presente Capitulo contiene la información técnica que fue requerida oportunamente por el fabricante antes de diseñar los nuevos Sistemas de Compensación Reactiva de Electrolima, y contempla datos nominales eléctricos de la Red, condiciones ambientales e igualmente los datos nominales necesarios para el diseño de los Compensadores.

Toda esta información preliminar es muy importante para los puntos a tratar en los siguientes Capítulos, porque incluye datos necesarios para los ajustes de los Sistemas de Protección y Parámetros de Operación.

Se debe anotar, que para el presente estudio, la información presentada de la Red de Electrolima ha tenido que ser necesariamente actualizada en razón a la antigüedad de la misma, elaborada hace 6 años y que algunos de sus valores han sufrido notorios cambios como son la Potencia de Cortocircuito y el rango de la Tensión de Operación.

1.1 Características Eléctricas del Sistema de Electrolima

A continuación veremos la información de los valores nominales y valores pico de la Red de Electrolima, datos que son importante en los próximos Capítulos para determinar apropiadamente los ajustes de operación y protección.

Como se mencionó, en este caso ha sido necesario actualizar algunos datos tales como la tensión mínima de operación y Potencia de Cortocircuito, los cuales originalmente fueron establecidos con valores más alto para la Tensión mínima y más bajo para la Potencia de cortocircuito.

a) Tensión Nominal (Línea-Línea)	60 kV rms
b) Máxima Tensión en condición estable	66 kV rms

c) Mínima Tensión en condición estable

- Balnearios	54 kV rms
- Chavarría	55 kV rms

d) Sobretensión

Para 3 ciclos	1.8 pu
- Para 10 ciclos	1.5 pu
- Para 20 ciclos	1.25 pu
Para 15 minutos	1.10 pu
- Continuo	1.05 pu

e) Máxima tensión secuencia negativa

Balnearios	0.62 %
- Chavarría	0.42 %

f) Frecuencia Nominal 60.0 Hz

g) Máx. frecuencia en Condición estable 60.2 Hz

h) Mín. frecuencia en Condición estable 58.0 Hz

i) Frecuencia temporal de corta duración

(menos de 10 min)

- Máximo	61.0 Hz
- Mínimo	53.0 Hz

j) Máxima Corriente de Cortocircuito

- Balnearios	16.62 kA rms
- Chavarría	12.08 kA rms

k) Mínima Corriente de Cortocircuito

Balnearios	13.62 kA rms
- Chavarría	9.08 kA rms

l) Sistema Neutro en el lado de 60 kV sólidamente a tierra.

Límites de armónicos

A lo largo del tiempo, se han presentado problemas derivados a la existencia de excesivos armónicos ocasionados por equipos y Sistemas eléctricos en general; los cuales inciden en el correcto funcionamiento de otros equipos cada vez mas sofisticados y sensibles a éstos. Ultimamente diversos Organismos Internacionales se han encargado de efectuar definiciones, clasificaciones y normalización de este tema importante.

Las corrientes de Armónicos que fluyen en el Sistema producirán como resultado tensiones de armónicos, los cuales siguen a siguiente ecuación $V_n = Z_n * I_n$; donde I_n son la corriente Z_n impedancia del Sistema a la frecuencia "n" respectivamente. El cálculo del llamado factor de distorsión de tensión (THD), sigue la siguiente ecuación :

$$THD=100\% \times \sqrt{\sum_{n=2}^H \frac{V_n^2}{V_1^2}}$$

La mayoría de las recomendaciones para la distorsión de armónicos dependen de la Norma IEEE 519-1981, cual sugiere como limite máximo de distorsión los siguientes valores, los cuales depende de la tensión de operación :

TENSION (kV)	THD (%)
MEDIA TENSION 2.4 - 69 kV	5 %
ALTA TENSION 115 kV o más	1.5 %

1.2 Condiciones Ambientales

Esta información corresponde a los valores usualmente empleados por Electrolima para el requerimiento de los nuevos equipos de Alta Tensión y que permite que todos los materiales utilizados en las instalaciones

eléctricas de los Compensadores, puedan trabajar correctamente bajo condiciones tropicales.

A continuación detallamos lo expresado:

a) Valores de Temperatura Ambiente

- Mínimo	10 oC
- Máximo	40 oC

b) Valores de Humedad relativa del aire

- Mínimo	70 %
- Máximo	
- en operación	80 %
- en Almacén	99 %

c) Condiciones Sísmicas en los puntos de Instalación

- Aceleración horizontal	0.5 g
- Aceleración vertical	0.2 g
- Rango de frecuencia	0 - 10 Hz

Bajo estas condiciones, suponemos que todos los equipos instalados en los Compensadores han sido diseñados y fabricados para conservarse y trabajar de acuerdo a los requerimientos, sin deterioro ni cambio de estado de los equipos.

1.3 Características Eléctricas de los Sistemas de Compensación Reactiva

Existen distintas configuraciones usadas para los Compensadores Estáticos de potencia reactiva, empleados en sus inicios para aplicaciones industriales. Sin embargo, Electrolima cuenta con la configuración más avanzada denominada TCR/TSC, que contiene un Reactor y un Banco de capacitores ambos controlados por tiristores de potencia.

Para Electrolima, cada Compensador ha sido diseñado básicamente bajo los mismos principios y modelo, tal como se puede apreciar en los Diagramas Unifilares UNI-93-06/07, pero existen algunas características eléctricas diferentes entre ellos debido a razones principalmente de Potencia, donde el Compensador de Balnearios es de mayor capacidad comparada con el de Chavarría.

En el Capítulo II se detallará mayor información sobre este punto.

Las características eléctricas de los compensadores son las siguientes:

- * **Objetivos del Compensador** Regular Tensión

- * **Tensión Nominal** 60.0 kV

- * **Tensión de Referencia típica**
 - Balnearios 60.5 kV
 - Chavarría 60.5 kV

- * **Rango de tensión de referencia** 57.5 kV - 63.5 kV

- * **Rango de tensión dentro de la zona de operación en estado estable**
 - Balnearios 54.0 kV - 66.0 kV
 - Chavarría 55.0 kV - 66.0 kV

- * **Rango de la pendiente de operación** 0 - 10 %

- * **Potencia Nominal de los Compensadores**
 - Balnearios a 60.5 kV 30 Mvars inductivo
60 Mvars capacitivo
 - Chavarría a 60.5kV 20 Mvars inductivo
40 Mvars capacitivo

1.4 Características Eléctricas Generales para los equipos en alta y baja tensión

Con la finalidad de proporcionar información adicional de los límites de los equipos, a continuación les entregamos los requerimientos eléctricos con los cuales fueron solicitados los equipos de Alta Tensión y Baja Tensión, más no así los de Media Tensión; ya que Electrolima no conocía cual sería el Modelo propuesto por el fabricante.

** Equipos Alta Tensión

- Tensión Nominal	60.0 kV
- Máxima tensión de operación	72.5 kV
* Frecuencia Nominal	60.0 Hz
- Prueba de tensión	
* Frecuencia industrial	140.0 kV
* Tensión de impulso 1.2/50 us	325.0 kV
* Para equipos auxiliares (1min)	2.0 kV

**** Equipos Baja Tensión**

- Tensión Nominal	220.0 V
Máxima tensión de operación	300.0 V
* Frecuencia Nominal	60.0 Hz
- Prueba de tensión	
* Para equipos auxiliares (1min)	2.0 kV

Consideramos conveniente agregar los datos nominales de placa de los principales equipos instalados.

ESQUEMA	DESCRIPCION
UNI-93-01	Datos de Placa del Transformador de Potencia
UNI-93-02/03	Datos de Equipos de Maniobra y Descargadores en Balnearios y Chavarría respectivamente
UNI-93-04/05	Datos de los Transformadores de Medida y Protección en Balnearios y Chavarría respectivamente

1.5 Normas utilizadas

Las especificaciones ingeniería de diseño y construcción de los compensadores han sido llevados a cabo de acuerdo a las siguientes normas establecidas por CEI.

Transformadores de Potencia	CEI 76
Reactores	CEI 289
Capacitores	CEI 70
Interruptores	CEI 56
Interruptores Hexafluoruro (SF6)	CEI 376
Seccionadores	CEI 129
Transformadores de tensión	CEI 185
Transformadores de corriente	CEI 186
Pararrayos ZnO (Oxido de Zinc)	CEI 99
Válvulas de tiristores	
(La CEI recomienda efectuar las mismas pruebas ejecutadas en Estaciones de Alta Tensión Continua HVDC).	
Relés de Protección	CEI 255
Sistemas de Indicación	CEI 51
Baterías	CEI 95

Para los casos que no existan normas CEI que respalden lo dicho, el fabricante ha recurrido a otras normas parecidas para el diseño como son: ASA, BSA, NEMA, SEV, o VDE.

C A P I T U L O I I

DESCRIPCION DEL SISTEMA DE COMPENSACION REACTIVA

2 INTRODUCCION

El Capitulo II tiene como principal objetivo el entregar toda la información técnica necesaria para conocer los nuevos Sistemas Estáticos de Compensación Reactiva de Electrolima y entregar los límites nominales de Operación y equipamiento.

Para cumplir con ello, el capítulo ha sido dividido en seis partes que son:

- Descripción General.
- Disposición eléctrica y datos técnicos de las

válvulas de tiristores y Componentes.

Valores nominales de potencia, tensión y corriente.

- Comportamiento dentro del rango de operación.
- Valores de armónicos de la Rama TCR.

Definición de los parámetros de operación.

2.1 Alcance de los Sistemas de Compensación

Los Sistemas de Compensación reactiva en Electrolima cumplen principalmente dos objetivos:

- A) Mejorar la regulación de tensión y
- B) Compensar la energía reactiva requerida por la carga y la generada o consumida por las líneas de transmisión.

A) Regulación de tensión

Hasta el año 1988, la regulación de tensión para los Usuarios de Electrolima era realizada únicamente en la barra de 10 kV de todas las Subestaciones de Transmisión, con el empleo de transformadores de potencia con conmutadores o gradines controlados con reguladores automáticos de tensión. Este sistema de regulación normalmente es ajustado de modo tal que el perfil de tensiones en las barras 10 kV siempre esté dentro de los siguientes límites:

Tensión mínima	:	9.90 kV
Tensión máxima	:	10.10 kV
Tiempo de regulación	:	20 seg

Sin embargo, la experiencia en la operación bajo esta modalidad resultó ser insuficiente y con algunas limitaciones debido al incremento del consumo de energía reactiva de la carga eléctrica y líneas de transmisión. Esto se explica así:

Las grandes variaciones del perfil de tensiones en 60 kV producían un excesivo número de maniobras diarias en los conmutadores de los transformadores de potencia y por consecuencia ocasionaba un alto porcentaje de falla en los mismos porque en su mayoría tienen una antigüedad promedio de 20 a 30 años. Cada reparación tiene un costo mínimo de USA \$ 20,000 y el índice de falla anual promedio fue de 10 conmutadores.

Otro problema ha sido la gran diferencia que existe en los valores de tensión de 60 kV entre las condiciones de máxima y mínima demanda de la Red, ocasionando que los transformadores de potencia operaran algunas veces con el conmutador en posición extrema de regulación sin posibilidad de seguir regulando, y por lo tanto los límites de tensión.

Existe una fórmula aproximada que permite calcular la variación unitaria de la tensión en función de la relación existente entre la Potencia reactiva y Potencia de cortocircuito. Esta variación se presenta en mayor magnitud para casos de mayor concentración de carga.

$$\frac{\text{DELTA (V)}}{V} = \frac{\text{DELTA (Q)}}{P_{cc}}$$

P_{cc} - Potencia de Cortocircuito (MVA)

Esta ecuación permite aproximar la relación entre la variación unitaria de la tensión y la potencia reactiva de la carga para que la misma sea lineal.

Por datos históricos se conoce que los Compensadores Convencionales no tienen posibilidad de adaptarse a las variaciones rápidas de tensión porque para ello se requiere de un sistema de respuesta rápida. Esta limitación permitió decidir a la Compañía ElectroLima solicitar modernos compensadores estáticos los cuales al ser instalados redujeron el índice de falla en los conmutadores a casi cero y el número de maniobras diarias promedio también se redujo al 60 %

B) Compensación Reactiva

La Compensación de la potencia reactiva estática beneficia a la Red en los siguientes aspectos:

Mejora el perfil de tensiones y pérdidas en las líneas de transmisión.

Mejora la Estabilidad Transitoria y Dinámica.

Variaciones bruscas de tensión y sobretensiones.

Electrolima a través de su sector de Planeamiento Eléctrico ha determinado el lugar y potencia instalada óptima de los compensadores, empleando los resultados de flujo de carga para diferentes condiciones de operación y comparando las ventajas técnico-económicas en aspectos tales como los perfiles de tensión y la reducción de pérdidas en las líneas de transmisión.

El presente estudio no está orientado a demostrar detalladamente los aspectos de estabilidad sin embargo para propósitos de un mejor entendimiento a continuación explico brevemente estos puntos:

**** Estabilidad Transitoria:**

Para comprender el efecto que la compensación reactiva produce sobre la mejora de la estabilidad transitoria, consideraremos un Sistema Eléctrico simplificado mostrado en la figura UNI-93-40a, donde para el caso de falla o cortocircuito en una de las líneas y un tiempo de apertura determinado, la estabilidad del sistema se puede estudiar en forma simplificada con el denominado Criterio de Areas, como apreciaremos en la Figura UNI-93-40b.

Si existe un ángulo máximo tal que las dos áreas achuradas A_1 y A_2 sean iguales, el sistema sera estable ante esta perturbación. Habitualmente, como medida del margen de estabilidad, se utiliza el área señalada por la Figura UNI-93-40b; sin embargo, con la instalación de un compensador en un punto intermedio del sistema antes mencionado cuya respuesta se adapte instantáneamente a cualquier variación de potencia que circula por las líneas, de forma que la tensión en dicho punto se mantenga constante, entonces el compensador modifica las curvas de potencia-desfase angular, como se indica en la Figura UNI-93-40c.

**** Estabilidad Dinámica:**

La estabilidad dinámica está relacionada con la respuesta del sistema ante perturbaciones pequeñas, como pueden ser las oscilaciones naturales de la red. Es importante garantizar que existe suficiente amortiguamiento en ésta para evitar que estas dichas oscilaciones crezcan y den lugar a una inestabilidad en el sistema. Utilizando los compensadores con un sistema de control más sofisticado que para el caso de estabilidad transitoria, es posible mejorar el amortiguamiento de estas oscilaciones.

Finalmente, las sobretensiones que se originan como consecuencia de la desconexión de cargas eléctricas grandes, pueden ser "compensadas" por el compensador de potencia reactiva de respuesta rápida.

Es así que luego de las ventajas explicadas anteriormente, Electrolina decidió adquirir dos Compensadores Estáticos o también llamados "SVC's" (**STATIC VAR COMPENSATOR**) en la barra de 60 kV de las Subestaciones de Balnearios y Chavarría con una configuración denominada **TCR/TSC/FC**, diseño del cual trataremos a continuación.

2.2 Disposición Eléctrica y datos técnicos

2.2.1 Disposición Eléctrica

Los Diagramas Unifilares de los Compensadores mostrados en los Esquemas UNI-93-06/07 que corresponden respectivamente a las Subestaciones Balnearios y Chavarria son similares, y están compuestos por los siguientes componentes eléctricos:

Rama denominada "TCR" (Thyristor Controlled Reactor), que contiene una pareja de Reactores instalados en serie y las corrientes que fluyen por ellos son controladas por sus propias válvulas de tiristores variando su ángulo de encendido desde cero a 180 grados, tal como se muestra en el gráfico UNI-93-08. Las armónicas resultantes debido a la forma de onda de la corriente que no es sinusoidal son mostradas en el gráfico UNI-93-09 como función del ángulo de disparo del tiristor.

Para este caso, la función de los Tiristores es permitir que el comportamiento de los reactores sea semejante al de un reactor de inductancia variable y que la corriente también sea variable.

Rama denominada TSC (Thyristor Controlled Reactor), consistente en un Banco de Capacitores conmutados por las válvulas de tiristores que cumplen una función muy similar a la de un interruptor convencional de maniobra, permitiendo que circule la corriente nominal o impidiendo el flujo de la misma. Esta conmutación del Banco de Capacitores TSC en el rango de operación permite garantizar un control continuo de potencia reactiva del compensador que puede ser cambiado sin problemas al lado capacitivo tal como se aprecia en el Gráfico UNI-93-10.

Con la finalidad de limitar la corriente de inserción de esta Rama, se han instalado pequeños reactores conectados en serie en cada fase, que además permiten que la Rama también se comporte como filtro de armónicos sintonizados a la 3.75^{va}

Por último existen dos Ramas de Bancos de Capacitores Fijos denominados "FC" (Fixed Capacitor) los cuales absorben los armónicos producidos por la Rama TCR cumpliendo la función de doble filtro de armónicos sintonizados aproximadamente 5^{ta} y 7^{ma} orden respectivamente. Al igual que para la Rama TSC, los reactores limitan también la corriente de inserción en cada Rama.

2.2.2 Válvulas TCR Y TSC

Cada fase de las Válvulas "TCR" está compuesta por siete (7) niveles de tiristores conectados en serie para Balnearios y cinco (5) niveles para Chavarría. Cada fase incluye un nivel redundante o adicional como función de respaldo. Cada nivel está protegido contra sobretensiones por elementos de protección denominados "BOD" (Break Over Diode).

Los datos técnicos de las válvulas son los siguientes:

CARACTERISTICAS	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Corriente Nominal ($I_{TCR} = 1.05I_{pu}$)	2487 Amps	2487 Amps
Número de Niveles de Tiristores por fase	7	5
Tipo de Tiristor	CS 1302-44	CS 1302-44

Igualmente las válvulas "TSC" están compuestas por Once (11) niveles de Tiristores para Balnearios y Ocho (8) niveles para Chavarría y como en el caso anterior existe un nivel de redundancia. Como protección se ha conectado un descargador tipo ZnO (Oxido de Zinc) en paralelo a la conexión serie de la

válvula y el capacitor, y en caso de ocurrir una sobretensión, esta conexión serie será "punteada" por el descargador

DATOS TECNICOS VALVULA TSC

DESCRIPCION	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Corriente Nominal (Itsc= 1.05 p.u)	2005 Amps	2005 Amps
Número de Niveles de Tiristores por fase	11	8
Tipo de Tiristor	CS 1302-44	CS 1302-44

En caso de existir un "Misfiring" (Ver Anexo 2 Parte 2), podría ocasionarse una sobrecorriente en la Rama que alcance una alta amplitud que supere los 6 kiloamperios, por tanto se producirá una señal de Encendido Continuo (Ver Anexo 2 Parte 3) de las válvulas por CF (Continuos Firing) con la finalidad de proteger las mismas contra altos esfuerzos mecánicos.

En el Capítulo III de protección, se explicará más detalladamente los alcances y funciones del "BOD", "Continuos Firing" y "Misfiring".

2.2.3 Datos Eléctricos de los Reactores y Capacitores

La información de los valores nominales y datos de placas de cada uno de los reactores y capacitores empleados en las ramas del Compensador son mostrados a continuación.

- UNI-93-11 Datos de Placa de los Reactores en Balnearios
- UNI-93-12 Datos de Placa de los Reactores en Chavarria
- UNI-93-13 Datos de Placa de los Capacitores en Balnearios y Chavarria (Rama TSC).
- UNI-93-14 Datos de Placa de los Capacitores en Balnearios y Chavarria (Rama FC -4.9va).
- UNI-93-15 Datos de Placa de los Capacitores en Balnearios y Chavarria (Rama FC - 7.0ma).

2.3 Valores Nominales y Diagrama Voltaje-Corriente

Los valores de potencia nominal de ambos Compensadores son mostrados en sus respectivos Diagramas Unifilares y adicionalmente en la Tabla UNI-93-16 se aprecian los valores de corriente y tensión los cuales están expresados en valores unitarios considerando un valor de tensión de entrada de 1.0 pu.

Los valores nominales mostrados en el Diagrama UNI-93-17, punto 1, representan los puntos de operación en 60 MVA y 40 MVA capacitivo para Balnearios y Chavarría respectivamente. Igualmente lo es el punto 2 para la zona inductiva con 30 MVA y 20 MVA en Balnearios y Chavarría.

Los límites de Potencia reactiva dependen de la tensión de entrada en 60 kV tal como se muestra a continuación:

CARACTERISTICAS	BALNEARIOS		CHAVARRIA		DIAGRAMA
	Qcap	Qind	Qcap	Qind	UNI-93-
$U_1 = 0.90 \text{ pu}$	48.6	24.3	32.4	16.2	Puntos 5,6
$U_1 = 1.00 \text{ pu}$	60.0	30.0	40.0	20.0	Puntos 1,2
$U_1 = 1.05 \text{ pu}$	68.2	33.1	44.1	22.1	Puntos 3,4

Si las tensiones son mayores que 1.0 pu., entonces la corriente en el transformador para el lado capacitivo está limitada a $I_1 = 1.05 \text{ pu}$, a través de la rama "TCR" tal como se muestra en los puntos del 1 - 5 en el Diagrama UNI-93-17.

Tiempo de respuesta:

El tiempo de respuesta del compensador ante cualquier cambio de la tensión de la red es tomado como el tiempo que se requiere para alcanzar el 90 % del cambio especificado y medido desde el inicio de la perturbación. Bajo condiciones normales, el tiempo de respuesta de Balnearios y Chavarría no debería exceder a los tres (3) ciclos para cambiar su punto de operación del valor máximo capacitivo al valor máximo inductivo.

2.4 Comportamiento con diferentes valores de tensión

El comportamiento de los compensadores que no incluye las sobretensiones y subtensiones lo que detallaremos a continuación denominaremos Rango de Control y estos valores son idénticos para ambas subestaciones.

Para la tensión de entrada nominal $U_1 = 60$ kV (1.0 pu), se describe en el Diagrama UNI-93-22 con líneas punteadas A-B-C-D para el lado primario en 60 kV y a-b-c-d para el lado secundario en 7.0 kV ó 4.86 kV.

Para el caso donde la tensión de entrada U_1 esté entro del rango de $0.90 \text{ pu} < U_1 < 1.05 \text{ pu}$, el comportamiento de los compensadores es mostrado en el Esquema UNI-93-22 con líneas A1-A2-D2-D1 para el lado primario y como líneas descontinuas a1-a2-d2-d1 para el lado secundario. Con la finalidad de determinar estos valores de operación, que están dentro y fuera del rango de control mostrado en los diagramas UNI-93-21/22, ha sido necesario conocer en cada caso los valores unitarios de Impedancia equivalente; los cuales están mostrados en las Tablas UNI-93-18/19.

2.4.1 Sobretensión

Para una sobretensión de entrada mayor que 1.05 pu . se bloquea el "TSC" y para sobretensiones mayores a 1.3 pu , el compensador trabajará en condición de máximo inductivo (Full Inductive).

Dentro del rango de control, cuando la tensión primaria es $U_1 = 1.05 \text{ pu}$, los valores de máxima tensión secundaria son 8.9 kV para la Subestación de Balnearios y 5.9 kV para Chavarría (Ver Tabla UNI-93-21, punto a2).

El comportamiento de la tensión en el lado secundario está descrito por la línea a2-b2-c2-d2 (Ver Esquemas UNI-93-21/22).

El comportamiento para sobretensiones continuas fuera del rango de control se puede describir de la manera siguiente:

1.05 pu < U1 < 1.10 pu La Rama TSC se bloquea y el resto de Ramas continúan trabajando sin límite de sobrecorriente por corto tiempo (15 minutos); para luego limitar la corriente en la Rama "TCR" con:

$$I_{tcr} = 2487 (1.05 \times I_n)$$

Por otro lado, las ramas "FC" y "TCR" tienen que soportar los esfuerzos de las corrientes ocasionados por sobretensiones transitorias mayores a U1 = 1.05 hasta 1.8 pu, por los tiempos anteriormente especificados en los Items 1.1, parte "d". Esta condición se describe con la línea d2-e2-f2-g2-h2 (Ver Esquema UNI-93-22). Igualmente en la Tabla UNI-93-20 se muestran los valores de sobrecorriente en la Rama TCR para estos casos de sobretensiones.

2.4.2 Sub-tensión

Dentro del rango de control, el comportamiento en el lado secundario para condición de subtenión en estado estable ($U_1 = 0.90$ pu) está mostrado por la línea a1-b1-c1-d1 (Ver Diagrama UNI-93-22), así el mínimo valor de tensión secundaria es de 7.61 kV para la Subestación Balnearios y 5.10 kV para Chavarría tal como se muestra en el punto "a1" de la Tabla UNI-93-21.

Para subteniones transitorias que estén por debajo de $V_1 < 0.70$ pu, la rama "TSC" será bloqueada por un corto tiempo para evitar sobretensiones en el momento en que la tensión de la línea del Sistema recupere su valor normal.

2.4.3 Tensión sin carga

Con respecto a los valores máximos de corriente de los tiristores CS 1302-44, la tensión mínima secundaria sin carga es de 7.29 kV para Balnearios y 4.86 kV para Chavarría. La máxima corriente para la tensión primaria de $U_1 = 1.10$ pu es de 2487 Amps para la rama "TCR" y para $U_1 = 1.05$ pu es 2005 Amps para el "TSC". Como lo explicamos anteriormente, la válvula "TCR" ha sido diseñada para soportar

sobrecorrientes y sobretensiones según los valores y tiempos establecidos en el párrafo 1.1 del capítulo anterior.

2.5 Operación temporal a baja frecuencia

El rango de frecuencia para una operación estable es de 58 a 60.2 Hz y los Compensadores están diseñados para operar continuamente dentro de este rango. Su operación en condiciones de sobrefrecuencia y subfrecuencia estará limitada a 10 minutos según lo especificado en el Item 1.1, parte h".

Para la operación de los compensadores a baja frecuencia (58 Hz o menos), es obligatorio mantener la tensión de la red, por lo tanto los compensadores están preparados para que en estas condiciones operen a la máxima potencia capacitiva. Si persiste esta condición después de 10 minutos, estos Compensadores serán desconectados por el relé de protección correspondiente.

2.6 Valores de Armónicos RAMA TCR

Las limitaciones de armónicos han sido establecidas en el Capítulo I Item 1.1 y estos valores no

deberían ser excedidos. En el Anexo 2, adjuntamos algunos valores de armónicos medidos en los compensadores de ElectroLima, los cuales en su mayoría son magnitudes que coinciden con los establecidos por el fabricante tal como se muestra en el Gráfico UNI-93-09.

2.7 Ajustes de los parámetros del Regulador de Tensión

2.7.1 Funciones especiales de protección de las válvulas

Existen funciones de Protección de las válvulas, cuyos valores serán ajustados en la Programación de los parámetros del Regulador de Tensión y además coordinados con los ajustes de los relés de protección convencionales existentes para los Compensadores. Este punto será detallado en el Capítulo de Protección, sin embargo mostraremos algunos de estos valores.

El Regulador de Tensión tiene un controlador programable de alta velocidad (PHSC) con el cual no solamente se logra el control de la tensión sino también el de las corrientes que fluyen en cada Rama incluyendo funciones especiales relacionadas a la protección. El lenguaje de programación es de Bloques de Funciones y está basado en señales convencionales

de Diagrama de Flujo tradicional usada en Sistemas de Control. Todas estas funciones del Controlador PHSC son efectuadas secuencialmente de acuerdo a una rutina propia del equipo.

A continuación, se definirán los valores de ajustes de estas funciones, las cuales han sido determinadas en base a las capacidades límites de las válvulas y a las condiciones de operación de los compensadores en su punto de ubicación. Todo esto está resumido en el Diagrama de Bloques UNI-93-23.

- a) Para el caso de las sobretensiones producidas en la Red luego de despejarse un cortocircuito, existen una función que permite bloquear la Rama TSC. Las condiciones para este Bloqueo son las siguientes:

$$V_{60 \text{ kV}} < 0.7 \text{ pu}$$

$$V_{60 \text{ kV}} > 1.05 \text{ pu}$$

Sin embargo en estas condiciones, la válvula TCR puede continuar trabajando hasta tensiones de 0.30 pu; pero luego de dos ciclos de normalizarse el valor de tensión de entrada a su valor nominal (60kV), la regulación se normalizará.

- b) Para evitar altos esfuerzos en las válvulas y el descargador de la Rama TSC y luego de un "MISFIRING" con alta corriente, se generara una orden de "CONTINUOUS FIRING" y parada de emergencia. Esto se cumple así:

$I_{TSC} > 8.8 \text{ kA}$ se genera la señal y ESOFF

- c) Para evitar altos esfuerzos en las válvulas de la Rama TCR luego de ocurrir un pico de corriente con amplitudes mayores que 7 KA, se generará una señal de "CONTINUOUS FIRING" luego de un tiempo ajustable entre 0.5 al 1.0 segundos. En este caso no hay orden de parada de emergencia.

$I_{TCR} > 7.0 \text{ kA}$. se genera la señal CF

- d) Cuando la frecuencia está por debajo de 58 Hz se encenderá la rama "TSC" y la otra rama "TCR" operará en un ángulo de conducción de 180 grados eléctricos (Condición de mínimo corriente por la rama). Para evitar que la rama "TSC" se encienda y se apague, ésta quedará

permanentemente encendido hasta que la tensión de entrada recupere su valor nominal de $V1= 1.0$ pu.

$f < 58$ Hz Se genera la señal de encendido de la Rama TSC y la señal de ALPHA = 180 grados para la rama TCR.

Si la frecuencia continúa por debajo de ese valor durante los 10 minutos, un relé de frecuencia convencional desconectará al compensador.

2.7.2 Parámetros de operación

2.7.2.1 Tensión de referencia

La tensión de referencia es el valor de tensión en la barra que debe ser mantenida por el compensador y cuando ambos valores sean iguales, entonces el compensador no absorberá ni entregará potencia reactiva. El rango de tensión de referencia es igual en ambas subestaciones y debería ser ajustable con una precisión de + 0.1 %.

El regulador de tensión es responsable igualmente de la regulación de la tensión de la red, por lo tanto, la tensión de referencia es ajustada en este equipo de la forma siguiente:

$IDT= 1, PF=6$

ADDR=06 PAR-RAMP-MAX VREF 105.798 x 43B6

Valor máximo para la tensión de referencia (V ref)

ADDR=07 PAR-RAMP-MIN VREF 95.801 x 3d50

Valor mínimo para la tensión de referencia

ADDR=11 PAR-RAMP-SETPV 0.098 x 00010

Velocidad de la variación del Vref para el telemando

ADDR=22 PAR-RAMP-VREFINIT 100 x 40BC

Valor del Vref almacena de un RAM no volátil

2.7.2.2 Pendiente de operación

El valor de la pendiente es la relación entre la variación de tensión y su correspondiente variación de corriente dentro del rango de control del compensador. Su rango es ajustable dentro de los

valores de 0 y 10 % , con una tolerancia + 0.5 % de los valores especificados.

IDT= 1, PF=6

ADDR=1D PAR=ST-SLOOP 3.500% 023D

Valor de la pendiente en Diagrama de Voltaje vs Corriente

C A P I T U L O I I I

REQUERIMIENTOS Y AJUSTE DE LOS SISTEMAS DE PROTECCION

3 INTRODUCCION

El Capitulo III contiene toda la información de los Sistemas de Protección empleados para proteger los equipos principales instalados en los compensadores. Es importante mencionar que este asunto fue tratado durante la puesta en servicio de los compensadores en coordinación con los representantes fabricantes del compensador. Para ello, fue necesario conocer la siguiente información:

Características eléctricas de cada uno de los componentes del compensador mostrados en el Capitulo II (Párrafos 2.2).

Datos de los ajustes de las protecciones principales externas al compensador.

Finalmente, revisar los criterios normalmente empleados en Electrolima para proteger sus equipos y generadores, para posteriormente discutirlos con el fabricante.

Existen algunos ajustes determinados en fábrica como son los relés de desbalance del banco de capacitores. Este tema será tratado a manera de explicación en el presente capítulo, pero no se entregará ningún criterio de ajuste.

El objetivo principal de este capítulo, es explicar el funcionamiento de cada tipo de relé y así como también los criterios utilizados por Electrolima para proponer sus ajustes al fabricante durante la puesta en servicio de los nuevos sistemas de compensación reactiva.

Existen dos (2) tipos de protección que serán explicados a continuación:

- a) Protección Especial, establecida como algunas funciones de los Equipos de Control que son el Regulador de Tensión y Encendido de tiristores.

- b) Protección Convencional, establecida con los relés tradicionales.

Para cumplir con el objetivo de análisis de la protección, el capítulo ha sido dividido en cinco (5) partes que son:

Descripción General.

Zonas y Subzonas de Protección.

Descripción de las funciones especiales para protección.

Coordinación de las funciones especiales con la protección convencional.

Descripción de la Protección Convencional:

- a) Filosofía de cada relé.
- b) Criterios y cálculos de los ajustes.

3.1 Descripción del Sistema de Protección

El Diagrama Unifilar UNI-93-24 muestra los diferentes equipos de protección convencional además los equipamientos a ser protegidos tales como: Un Interruptor de Alta Tensión 60 kV, tres transformadores de potencia monofásicos conectados con característica YNd5, Dos (2) Bancos de Capacitores Fijos, Un Reactor controlado por Tiristores y Un Capacitor conmutado por Tiristores.

En el lado de media tensión, las ramas de los reactores y capacitores controlados por tiristores están conectadas en Delta, mientras que las ramas de los capacitores fijos se encuentran conectadas en estrella con neutro aislado.

Los transformadores, los bancos de capacitores y los reactores están diseñados para ser instalados a la intemperie, pero las válvulas de tiristores, el sistema de enfriamiento de válvulas y los sistemas de control interiores.

Todos estos equipos han sido diseñados para soportar los requerimientos establecidos en el Capítulo I y además los relés pueden trabajar en condiciones especiales tales como distorsiones en la forma de onda ocasionadas por armónicos de corriente y tensión, sin que los mismos operen incorrectamente.

3.2 Zonas y Subzonas de Protección

El sistema de protección convencional mostrado en las Tablas UNI-93-25a/25b, ha sido instalado y agrupado del modo siguiente:

- a) **Grupo A:** Reúne los relés de Protección Principal o primaria.

- b) **Grupo B:** Reúne los relés de Protección de Respaldo o secundaria.

Al ser todos los relés de fabricación estática o electrónica, requieren entonces de una alimentación auxiliar de corriente continua (CC), que en nuestro caso es suministrada por separado para cada uno de los dos grupos tal, como se aprecia en el Gráfico UNI-93-26.

Para la alimentación de corrientes al relé se emplean transformadores de corrientes con doble núcleo, para así separar la protección primaria y protección de respaldo. Igualmente las desconexiones de ambos grupos de protección deben actuar por separado a dos bobinas de disparo del interruptor a través de contactos auxiliares también separados (Ver Figura UNI-93-27).

La disposición de la protección para los compensadores, explicada en los párrafos anteriores, tiene por finalidad garantizar el apropiado y rápido funcionamiento de los relés de protección, aún en condiciones en que si uno de ellos fallasen. En conclusión, se espera que en caso de fallas críticas que puedan

presentarse en los compensadores, éstas deberán ser detectadas por los equipos de protección primaria o protección de respaldo.

En la Tabla UNI-93-25, se detallará mayor información de los equipos de protección convencional.

3.3 Funciones especiales para RAMAS TSC y TCR

Las funciones especiales de protección están establecidas en los equipos de control tales como el Regulador de Tensión y el Armario de Encendido de Tiristores.

Ambos equipos operan conjuntamente para el control de la tensión, corriente y operación de los tiristores, sin embargo existen claras diferencias de funciones entre ellos, tales como el regulador de tensión que determina las condiciones de operación de los tiristores mientras que el Control de Encendido se encarga de supervisar individualmente los tiristores para que operen adecuadamente de acuerdo a las órdenes recibidas desde el regulador. Donde ocurren traslapes, estas funciones especiales han sido ajustadas y coordinadas con los relés convencionales de protección y por ello serán tratadas en el siguiente párrafo 3.4.

Los ajustes de las funciones del Regulador de Tensión serán explicados a continuación:

- a) Para el caso de sobretensiones producidas en la Red, luego de despejarse un cortocircuito, existe una función que permite bloquear la Rama TSC y se ajusta del modo siguiente:

Si $V_{60kv} > 1.05pu.$ **ORDEN BLOQUEO TSC + MAXIMO INDUCTIVO**

64H PAR-TSCb-Vmax 120.00 %

Si la tensión en 60kV es más alto que este valor, entonces se bloquea la Rama TSC y se generará una señal de Máximo Inductivo.

Si $V_{60kv} < 0.70pu.$ **ORDEN BLOQUEO TSC + MAXIMO INDUCTIVO**

65H PAR-TSCb-Vmin 70.00 %

Si la tensión en 60kV es más bajo que este valor, entonces se bloquea la Rama TSC y se generará una señal de máximo inductivo por precaución ante una posterior sobretensión.

- b) Para evitar altos esfuerzos en la válvula de la Rama "TSC" y el descargador "TSC", luego de un "MISFIRING" con alta corriente, se generará una orden de "CONTINUOUS FIRING CFTSC" y posteriormente la desconexión de Emergencia del Compensador (ESOFF). El ajuste se efectúa del modo siguiente:

$I_{TSC} > 8.8 \text{ kA}$ se genera la señal CF y
ESOFF

24H PAR-It_n-CFTSC 100.00 %

Si la corriente en el TSC excede este valor, se generará una señal de Encendido continuo en la Rama TSC.

- c) Igualmente sucede en la Rama "TCR", donde para evitar altos esfuerzos en la válvula luego de ocurrir un pico de corriente de amplitud mayor a 7.0 Kamps, se generará una señal de "CONTINUOUS FIRING = CFTCR" por un tiempo ajustable entre 0.5 a 1.0 segundos. Para este caso no existe orden de parada de emergencia. El ajuste es el siguiente:

$I_{TCR} > 7.0 \text{ kA.}$ se genera la señal CF

18H PAR-It_n-CFTCR 100.00 %

Si la corriente en el TSC excede este valor,
se generará una señal de Encendido continuo
Rama TSC.

- d) Para limitar la corriente en la Rama TCR existe una función que actúa cuando la misma supera el valor nominal en 110 %. Los ajustes de esta función son:

24H PAR-IB-IREF 110.00 %

Valor de referencia en que el limitador de corriente TCR es activado.

50H PAR-IB-T1 1.000 seg

Retardo de tiempo antes de emitir la acción de limitador de corriente.

40H PAR-IB-T2 600.000 seg

Tiempo de duración de la orden del limitador de corriente.

- e) Cuando la frecuencia esté por debajo de 58Hz, se encenderá las válvulas del "TSC" y "TCR", pero esta última operará en un ángulo de encendido de 180 grados (Mínimo Inductivo); ésto significa que el compensador trabajará completamente capacitivo. Por otro lado, para evitar que la Rama "TSC" se encienda y se apague continuamente, ésta quedará encendida mientras la tensión no recupere su valor nominal ($V_1 = 1.0 \text{ pu}$).

Esto se explica de la manera siguiente:

< 58 Hz Se generará la señal de encendido de la Rama TSC y la señal de ALPHA = 180 grados para la Rama TCR. (ALPHA es el ángulo de encendido de la Rama "TCR")

Si la frecuencia continua por debajo de ese valor durante los próximos 10 minutos, un relé de frecuencia desconectará al compensador.

3.4 Coordinación entre las funciones especiales de protección de las válvulas y la protección convencional

Como se indicó en el párrafo anterior existen algunas funciones que tienen que ser coordinadas con los ajustes de los relés convencionales.

Estas son las siguientes:

3.4.1 Protección RAMA TCR

A continuación, se presenta los valores nominales de sobrecorriente permitidos por el fabricante para cada uno de los componentes de la rama TCR y que son datos obtenidos de las tablas UNI-93-11/12.

RESUMEN DE DATOS DE SOBRECORRIENTE

COMPONENTES RAMA TCR

DESCRIPCION	REGIMEN CONTINUO	REGIMEN TRANSITORIO
DATOS DE VALVULA	$I_n = 2374 \text{ Amps}$ $I_{m\acute{a}x} = 1.3 \times I_n$ $= 3.0 \text{ kA}$	
DATOS DEL REACTOR	$I_n = 2374 \text{ Amps}$ $I_{m\acute{a}x} = 1.3 \times I_n$ $= 3.0 \text{ kA}$	$I_{m\acute{a}x} = 4.53 \text{ kA (1seg)}$ $= 1.9 \times I_n$

Por ejemplo, en el gráfico UNI-93-28 se observa que el valor máximo de corriente en la rama TCR luego de despejar o eliminar una falla en la red podría ser de 8.2 kAmps.

3.4.1.1 Protección Sobrecorriente

Para la Rama TCR existen dos tipos de protección contra sobrecorriente y son los siguientes:

- Protección con los Equipos de Control.
- Protección con los relés convencionales.

Las funciones del equipo de control (Regulador de Tensión) se efectúan en dos etapas:

Etapas 1: Tan pronto la corriente en la válvula supere su valor nominal de 2487 Amps (Ver Item 2.2.2), el regulador inicia la supervisión de la misma por espacio de 15 minutos, pudiendo durante este periodo, alcanzar el valor de corriente de 8.0 KA pico como podría suceder luego de una falla tal como se muestra en el Gráfico UNI-93-28.

ETAPA 2: Luego de 15 minutos con sobrecorriente, este valor es reducido al 115 % de la corriente nominal (2 487 Amps). Esta condición se mantiene por 5 seg y se elimina esta limitación tan pronto la corriente operacional sea menor que 2487 Amps rms.

Por otro lado, las válvulas de tiristores también están protegidas contra sobrecorriente por dos relés convencionales, que a su vez tienen dos diferentes ajustes de tiempo y corriente. Ambos valores han sido determinados de manera que no excedan las características de sobrecarga establecidas por las válvulas Tiristores, ni tampoco los valores máximos de corrientes permitidos por el fabricante de los reactores (Valor 4.5 KAmps por 1 seg).

Todo lo expresado se puede observar claramente en el Gráfico UNI-93-29 y el resumen de los ajustes se muestran a continuación:

Etapa 1: 7.5 kA / 0 mseg

Etapa 2: 5.0 kA / 150 mseg

Etapa 3: 3.2 kA / 2 seg

Etapa 4: 2.7 kA / 9.9 seg

En un relé se ajusta las etapas 1 y 3 y el otro las etapas 2 y 4.

3.4.1.2 Encendido por protección

Para la Rama TCR, la detección de una pérdida del pulso individual de encendido, es efectuada secuencialmente a través de los siguientes controles:

Protección por sobretensión BOD (Break Over Diode)

Equipo de Control o supervisor de Estado de Tiristores

Los relés convencionales.

La pérdida de pulso individual de uno o más tiristores produce que la válvula correspondiente deje de conducir la corriente, entonces la tensión recibida en el tiristor afectado será igual a la tensión de línea.

En estas condiciones, la Protección BOD propia del tiristor actúa inmediatamente y produce un encendido continuo como medida de protección. Mientras tanto, la pérdida del pulso es detectada por el Supervisor de Estado de los Tiristores y se genera una señal de

alarma "Perturbación de encendido TCR" y/o "Protección BOD-TCR). Si son más de dos tiristores defectuosos, entonces se producirá la parada de Emergencia del Compensador. Si esto no ocurriera y el supervisor de estado no anunciar la anormalidad, entonces la Rama TCR operará en forma desbalanceada y debido a ello el relé de la corriente neutral podría actuar de acuerdo a los ajustes predeterminados (120 Amps para Balnearios y 80 Amperios para Chavarría y con un tiempo aproximado de 4 segundos para ambos). Estos ajustes del relé neutral serán tratados posteriormente en el párrafo 3.5.3.5.

3.4.1.3 Pérdida de Tiristores

Para la Rama TCR, la protección se efectúa secuencialmente a través de los siguientes controles:

Protección por sobretensión BOD (Break Over Diode).

Equipo de Control o supervisor de Estado de Tiristores.

Los relés convencionales.

Si se malograrán dos o más Tiristores en una fase o válvula, entonces el compensador será desconectado por

actuación del supervisor de estado de tiristores. En caso que éello fallara, el compensador continuará trabajando con uno o más tiristores sin un completo control, resultando una condición de operación de corriente desbalanceada en la rama TCR, más aún cuando los tiristores de las otras fases tienen un ángulo de disparo de 90 grados, que correspondería a baja corriente.

De la misma manera que en el caso anterior, este desbalance debería ser detectado por el relé de sobrecorriente neutral.

3.4.2 Protección RAMA TSC

A continuación se presenta los valores nominales permitidos por el fabricante para cada uno de los componentes de la rama TSC y que son datos obtenidos de las tablas UNI-93-11/12/13.

RESUMEN DE DATOS DE COMPONENTES

RAMA TSC

DESCRIPCION	REGIMEN CONTINUO	REGIMEN TRANSITORIO
DATOS DE LA VALVULA	In = 2005 Amps Imax= 1.3 x In = 2.6 kA	
DATOS DEL REACTOR	In = 1910 Amps Imax= 1.3 x In = 2.5 kA	Imax = 12.60 kA (1 seg)
DATOS DEL CAPACITOR	In = 1910 Amps Imax= 1.3 x In = 2.5 kA	

3.4.2.1 PROTECCION SOBRECORRIENTE

Para la Rama TSC existen dos tipos de protección contra sobrecorriente que están establecidos por:

Los equipos de Control (Función Regulación de Tensión) y los relés convencionales.

La función del Equipo de Control es limitar la corriente que fluye por la rama al valor nominal que es de 2005 Amps. Para ello se efectúa una supervisión de la tensión de entrada en 60 kV y cuando este valor supera el 105 Vnominal que equivale a 63 kV, entonces la válvula TSC es bloqueada, esto es, deja de conducir. Esta función fue anteriormente explicada en el párrafo.

Igualmente el Equipo de Control supervisa que la corriente de la válvula no supere los 8.8 kA ajustados, y si é ello ocurriera, entonces se generará inmediatamente una señal de encendido continuo a las válvulas y además otra señal de parada de Emergencia del compensador.

Al igual que la Rama TCR, la Rama TSC también está protegida por dos relés convencionales, con ajustes diferentes tal como se muestran a continuación. Todos estos ajustes están mostrados en UNI-93-30 y han sido elaborados de manera que los tiempos no excedan los valores permitidos por la curva característica de sobrecarga de cada válvula tiristor.

Etapas 1,2:	6.0 kA / 100 ms
Etapas 3:	3.0 kA / 1.5 seg
Etapas 4:	2.5 kA / 99 seg

En un relé se tiene ajustado las etapas 1 y 3 y en el otro las etapas 2 y 4.

3.4.2.2 Encendido por protección

Para la Rama TSC, la detección de la pérdida del pulso individual de encendido, es efectuada de la misma

manera que se explicó en el párrafo, 3.4.1.2 para el caso de la Rama TCR. Esto es:

Protección por sobretensión BOD (Break Over Diode).

Equipo de Control o supervisor de Estado de Tiristores y

los relés convencionales.

Como resultado del retardo en el encendido, se producirá corrientes armónicas, las cuales circularán a través de la conexión delta de la Rama TSC e incrementarán el valor eficaz de la corriente pudiendo ser superior al valor nominal.

El Supervisor de Estado de los Tiristores producirá la desconexión o parada de emergencia del Compensador, pero si ello no sucediera o fallara, el Compensador será desconectado por la Etapa 4 del relé de protección de la Rama explicado en el párrafo 3.4.2.1 anterior.

3.4.2.3 Pérdida de Tiristores

Para la Rama TSC, la detección de la pérdida de tiristores se efectúa de la siguiente manera:

Protección por sobretensión BOD (Break Over Diode).

Equipo de Control o supervisor de Estado de Tiristores y los relés convencionales.

Si se malograrán dos o más Tiristores en una fase o válvula, éstos serán detectados por el control de Encendido de tiristores y se generará una señal de parada de emergencia del Compensador. Si ello fallara, el compensador continuará operando hasta que cuatro (4) o más Tiristores en Balnearios también fallen. Igualmente para Chavarria con tres (3) tiristores o más. En tal caso, la válvula no está disponible para ser bloqueada normalmente y al ocurrir esto causará un "Misfiring" que será detectado por el Regulador de Tensión a través de una función especial de sobrecorriente que generará dos señales que son una de encendido continuo (CF) y otra de parada de emergencia del Compensador.

3.5 Sistema de protección convencional

La protección convencional compuesta por relés típicos, que han sido instalados para proteger al compensador contra grandes valores de corriente y

tensión, generando orden de desconexión para evitar deterioros de algunos de los equipos instalados.

Los valores nominales de los relés son los siguientes:

I_n 5 Amps ; 1 Amps.

V_n 63.5 Volts ; 115.5 Volts

3.5.1 Resumen-Réles protección

Las funciones y tipos de los relés de protección empleados en los compensadores son mostrados en la Tabla UNI-93-25a/25b, que para un mejor entendimiento han sido divididos en sub-zonas o grupos.

3.5.2 Filosofía de los relés utilizados

Los relés modulares de estado sólido, empleados en el Compensador, tienen el mismo principio de operación. Esto significa que la señal de entrada analógica que proviene de los lados secundarios de los transformadores de medida de Tensión y/o Corriente ingresan al relé para luego convertirse en señales de voltajes en corriente continua proporcionales a la

señal de entrada. Estas señales son posteriormente comparadas con valores de referencia establecidas con los valores de propios del relé. Con la finalidad de mostrar las características de los relés empleados en el Compensador, presentamos a continuación la descripción de cada uno de ellos, y que es información imprescindible para elegir posteriormente los valores de ajuste.

A continuación, se entregan los detalles técnicos de cada uno de los relés principales instalados en los compensadores.

a) Relé de Sobretensión : TIPO UT91 MARCA HBC

Aplicación :

Es un relé modular trifásico de tensión y tiempo definido, utilizado en las siguientes aplicaciones:

Protección contra sobretensiones ó subtensiones del Sistema en 60 kV. En este caso empleamos un relé como protección contra sobretensiones en la red de 60 kV.

Protección contra falla a Tierra. Esta se realiza detectando el desplazamiento del punto

estrella de las tensiones de fase, con el empleo de una conexión delta abierto del lado secundario de los transformadores de tensión. Esta modalidad es empleada en nuestro caso para supervisar la tensión en la barra de media tensión.

Datos técnicos y ajustes :

Tensión Nominal (V_n) : 100 V y 200 V al escoger.

Frecuencia Nominal(F_n) : 50/60 Hz.

Rango de Ajustes (V) : 0.02 a $1.98 \times U_n$ en etapas de $0.02 U_n$

(t) : 0.1 a 9.9 *seg* en etapas 0.1 *seg*

Valor de Recaída : > 95 % (Sobretensión)

: < 105% (Subtensión)

Valor Térmico continuo : $2 \times U_n$

b) Relé de Sobrecorriente: TIPO IT91 MARCA BBC

Aplicación:

Es un Relé modular trifásico de sobrecorriente y tiempo definido, para ser utilizado en las siguientes aplicaciones:

Protección contra sobrecorriente ocasionada por cortocircuitos monofásicos en redes con neutro a

tierra o cortocircuito polifásico de cualquier condición de la red.

Estos relés también se emplean en algunos casos para habilitar o bloquear otras protecciones que actúan igualmente por sobrecorriente.

Datos técnicos y ajustes:

Corriente Nominal (I_n): 1A y 5A

Frecuencia Nominal (F_n): 50/60 Hz

Rango de Ajuste

Etapa temporizada I_D : 0.2 a 4.8 x I_n en etapas de 0.2 x I_n

Etapa Instantánea I_D : 1,2,3,4,5,6,10,15 y 20 x I_n

en etapas de 1 x I_n .

Rango de Tiempo

Etapa temporizada I_D : 0. a 9.9 seg. en etapas de 0.1 seg

Etapa Instantánea I_D : 0, 50, 100 y 150 mseg

Capacidad de carga : 4 x I_n Continuamente

30 x I_n por 1 seg

100 x I_n por 10 seg

Valor de Recaída : > 93 %

Tiempo del Instantáneo: < 40 msecs

c) Relé de frecuencia: TIPO FC-95 MARCA BBC

Aplicación:

Es un relé modular monofásico de frecuencia que permite supervisar con gran exactitud el valor absoluto de la frecuencia de la red, así como cualquier variación de la misma en el tiempo (f/t ó $\Delta(f) / \Delta(t)$). Con este diseño, el relé es empleado mayormente en las siguientes aplicaciones:

Para efectuar rechazo automático de carga por frecuencia en sistemas sobrecargados cuando la potencia activa consumida es muy inferior a la generada. Su aplicación en nuestro caso es evitar que el compensador opere con frecuencia inferior a 58 Hz durante 10 minutos por razones que son explicadas a continuación:

- a) El valor de 58 Hz es un dato entregado por ElectroLima y corresponde al valor mínimo de ajuste de los relés de frecuencia empleados como parte del Programa de rechazo automático de carga.
- b) Igualmente sucede con el sistema de refrigeración donde el flujo de agua de enfriamiento de las válvulas de tiristores es

proporcional a la frecuencia de la alimentación alterna de los motores de las bombas. Esto está explicado en el movimiento de agua que se efectúa con bombas accionadas por motores de corriente alterna cuya velocidad depende de la frecuencia de la red. Adicionalmente debemos mencionar que en los Armarios de Control del Sistema de refrigeración existen también dispositivos de Control de Bajo flujo de Agua los cuales pueden generar la señal de parada de emergencia del compensador.

En la industria, este relé es empleado para desacoplar la alimentación principal por defecto del mismo y trabajar con su propia generación.

Datos técnicos y ajustes:

Tensión Nominal (U_n) : 100 V y 200 V al escoger.

(0.2-1.2 U_n).

Frecuencia Nominal (F_n) : 50/60 Hz

Tiempo de evaluación : 5 periodos

Rango de Ajuste (f) : 45 - 65 Hz en etapas de 0.01

Rango de Ajuste (ΔF) : 0.1 - 9.9 Hz/seg en etapas de 0.1
Hz/seg

Rango de Ajuste (t) : 0.0 - 99.99 seg

Tiempo mínimo de operación: 70 mseg

d) Relé diferencial: TIPO DT-92 MARCA BBC

Aplicación:

Es un relé modular trifásico diferencial de corriente, empleado para la protección de fallas a tierra de los transformadores de dos devanados, generadores / transformadores y autotransformadores.

Datos técnicos y ajustes:

Corriente Nominal (I) : 1A y 5A

Frecuencia Nominal (Fn) : 50/60 Hz

Rango de Ajuste

de Sensibilidad "g" : 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 x In

Valor de operación "v" : 50 %

Corrección de fase : Todos los Grupos de conexión

Corrección de Corriente : 1-1.96 en ambos lados en Etapas de 0.04

Capacidad de carga : 4 x In continuamente
30 x In por 10 seg.

Tiempo del Instantáneo : <- 40 msecs

e) Relé Diferencial Multialimentador : TIPO DT-93

MARCA BBC

Aplicación:

Es un relé modular diferencial de multi-corrientes empleado como protección de barras, y está constituido por una unidad Central de medida DI93 y un número determinado de unidades IW93 proporcional al número de alimentadores y/o transformadores que convergen a la Barra a ser protegida. El ajuste de tiempo al igual que el caso anterior es casi instantáneo.

Este equipo ha sido diseñado como protección de los siguientes unidades:

Transformadores de Potencia Multi-Bobinados.

Disposición de Transformadores/generadores.

Autotransformadores y Reactores.

Barras Simples y secciones de ellas.

Datos técnicos y ajustes:

Corriente nominal : 1 y 5A

Frecuencia Nominal (Fn) : 50/60 Hz

***** MODULO DI93:**

Valor de Sensibilidad "g" : 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 % In

Valor de operación "v" : 50 %

***** MODULO IW93:**

Corrección de fase : Todos los Grupos de conexión

Corrección por relación : Ver procedimiento que será mostrado
en el Item No. 3.5.3.7

Capacidad de carga : 4 x In continuamente.
30 x In por 10 seg.

3.5.3 Determinación de los ajustes de los relés

A continuación se determinará los ajustes de cada uno de los relés empleados en el compensador, valores que están resumidos en la Tabla UNI-93-31.

El presente párrafo ha sido dividido por tipo de protección, detallando en cada uno de ellos la siguiente información

- **Denominación :** Nombre del relé en el Esquema de Protección UNI-93-24.

- **Criterio** Explica las razones de los ajustes elegidos.

- **Cálculo** Describe los cálculos matemáticos.

- **Resultado** : Muestra los ajustes al relé.

3.5.3.1 Protección contra sobretensiones

Denominación:

La denominación establecida es Relé 59.

Criterio :

Se ha instalado un relé trifásico en el lado de 60 kV empleando la tensión del Transformador PT1.

Se ha establecido un mismo ajuste tanto para el Compensador de Balnearios como Chavarria; ésto es, 130 % del valor de la tensión nominal y un tiempo de operación de 1 seg. Este ajuste de tensión corresponde a un valor que usualmente es empleado como criterio general en los equipos de alta tensión, en razón a que la mayoría de los fabricantes de los equipos alta y media tensión presentan como límite eléctrico, el

valor de 120 % de la tensión nominal para un (1) minuto de operación en esta condición.

El ajuste de tiempo pudo haberse elegido instantáneo, pero para evitar alguna falsa actuación por sobretensiones de muy corta duración se ha elegido el valor de 1 seg. Otra información adicional tomada en cuenta es que la tensión máxima de operación se ha considerado el valor de 110 % Vnominal.

Cálculo:

a) **BALNEARIOS**

**DATOS TECNICOS
DE LOS TRANSFORMADORES DE TENSION**

RELACION	<u>60,000</u>	/	<u>110</u>	Volts
	V3		V3	
Descripción	NUCLEO 1	NUCLEO 2	NUCLEO 3	
Conexión	Estrella	Estrella	Estrella	
Clase	0.5	0.5	3P	
Carga(por fase)	50 VA	50 VA	50 VA	

Cálculo del ajuste de la Protección :

$$1.3 \times \frac{60,000 \text{ V}}{\sqrt{3}} \times \frac{110}{60,000} = 82.56 \text{ Volts}$$

El nivel de protección es :

82.56 V, 1 seg.

b) CHAVARRIA

DATOS TECNICOS

DE LOS TRANSFORMADORES DE TENSION

RELACION	<u>60,000 / 200</u> Volts		
	V3	V3	
Descripción	NUCLEO 1	NUCLEO 2	NUCLEO 3
Conexión	Estrella	Estrella	Estrella
Clase	0.5	0.5	3P
Carga(por fase)	50 VA	50 VA	50 VA

Cálculo de nivel de Protección :

$$1.3 \times \frac{60,000 \text{ V}}{\sqrt{3}} \times \frac{200}{60,000} = 150.0 \text{ Volts}$$

El nivel de protección es:

$$150.0 \text{ V, } 1.0 \text{ seg.}$$

Resumen:

Considerando una tensión nominal del relé de 200 Voltios, entonces los ajustes son los siguientes:

CUADRO DE AJUSTES - TIPO UT91

RELÉ SOBRETENSION

BALNEARIOS	1.3 x Vn	1 seg
CHAVARRIA	1.3 X Vn	1 seg

3.5.3.2 Protección por Sobre frecuencia

Denominación:

La denominación establecida es Relé 81.

Criterio:

Se ha instalado un relé monofásico al núcleo del transformador de tensión PT1 entre las fases R-T de 60 kV.

El Ajuste ha sido fijado por ElectroLima en 58 Hz, valor elegido del Programa de rechazo automático de carga, que permite operar al compensador hasta 58 Hz en no más 10 minutos.

El Compensador está diseñado para operar continuamente dentro de este rango de operación. En caso de una condición extrema como es 58 Hz o menos, el compensador ha sido ajustado para que trabaje automáticamente en máximo capacitivo con un ajuste efectuado en el regulador de Tensión. Sin embargo, si persiste esta condición de baja frecuencia por 10 minutos, se producir la parada de emergencia por actuación de este relé.

Cálculo:

Cálculo de los niveles de ajuste de operación:

$$(58.00) \times 100 \% = 96.6 \% \text{ 60 Hz}$$

Nivel de protección :

97 % (referido a 60 Hz), 10 min.

Resultados:**CUADRO DE AJUSTES - TIPO PCN950****RELE FRECUENCIA**

BALNEARIOS	95% fn (Fn=60hz)	10 min
CHAVARRIA	97% fn (Fn=60hz)	10 min

3.5.3.3 Protección por Sobrecorriente del Transformador**Denominación:**

La denominación establecida es Relés 51/50T por disponer de un elemento temporizado (51) y un elemento instantáneo (50).

Criterio:

Se trata de un relé trifásico que emplea la corriente secundaria del transformador CT1 instalado en el lado de 60 kV. El ajuste ha sido elegido en base al valor esperado de corriente mínima de cortocircuito en la barra de media tensión.

**VALORES DE CORRIENTE ($I_{cc \text{ min}}$)
EN EL LADO 60kV**

Conociendo los valores de corriente de cortocircuito en el lado de 60 kV, determinaremos estos valores en el lado de media tensión (MT).

UBICACION FALLA	BALNEARIOS	CHAVARRIA
BARRA 60 kV	13.62 kA	9.08 kA
BARRA MT	3.00 kA	2.00 kA

Esta protección es de respaldo para la Protección Diferencial, por ello se ha determinado un ajuste de tiempo de 1 seg.

Cálculo :

DATOS TRANSFORMADOR DE MEDIDA CT1

DESCRIPCION	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Relación	600 / 5 / 5	600 / 1 / 1
Clase	5 P 20	5 P 20
Carga	30 VA	30 VA

DATOS NOMINALES DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

NIVEL DE PROTECCION	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Corriente Nominal (In)	580 Amps	385 Amps
Sobrecarga (1.3xIn)	754 Amps	500 Amps

DATOS DE LA RED

NIVEL DE PROTECCION	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Conexión lado Alta (60 kV)	Estrella	Estrella
Conexión lado Baja (MT)	Delta	Delta
Valor Cortocircuito (I_{min})	3 kAmps	2 kAmps

a) BALNEARIOS**** Ajuste de elemento con tiempo instantáneo:**

$$\frac{3000}{600} \times 5 = 25 \text{ Amps RMS} - 35.4 \text{ Amps pico}$$

**** Ajuste del elemento temporizado:**

$$\frac{754}{600} \times 5 = 6.3 \text{ Amps RMS}$$

b) CHAVARRIA**** Ajuste del elemento con tiempo instantáneo:**

$$\frac{2000}{600} \times 5 = 16.67 \text{ Amps RMS} - 23.6 \text{ Amps pico}$$

**** Ajuste del elemento temporizado:**

$$\frac{500}{600} \times 5 = 4.2 \text{ Amps RMS}$$

Resultado:

**CUADRO DE AJUSTES - TIPO IT94
RELES DE SOBRECORRIENTE**

BALNEARIOS	5 x In	1.1 seg	(Etapa 1)
	1.3 x In	1.0 seg	(Etapa 2)
CHAVARRIA	3.3 x In	0.1 seg	(Etapa 1)
	0.985 x In	1.0 seg	(Etapa 2)

3.5.3.4 Protección diferencial del transformador

Denominación:

La denominación establecida es Relé 87T.

Criterio:

Se trata de un relé trifásico que emplea las corrientes secundarias de los Transformadores CT1 y CT2.

Esta protección es principal y protege al transformador contra cortocircuitos externos al mismo; esto es, fallas externas a la Cuba.

Como protección principal contra cortocircuitos dentro de la Cuba está el relé Buchholz y como respaldo el relé diferencial.

Cálculos:

Los datos necesarios para iniciar los cálculos son los siguientes:

DATOS NOMINALES DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

DESCRIPCION	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Grupo de Conexión	Ynd5	Ynd5
Relación (UP/US)	60/10 kV	60/10 kV
Potencia Nominal (P_n)	60 MVA	40 MVA
I Nominal Primario (I_n)	580 Amps	385 Amps
Sobrecarga ($1.3 \times I_n$)	754 Amps	500 Amps

DATOS DE TRANSFORMADOR DE MEDIDA CT1

DESCRIPCION	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Relación	600 / 5 / 5	600 / 1 / 1
Clase	5 P 20	5 P 20
Carga	30 VA	30 VA

DATOS TRANSFORMADOR DE MEDIDA CT2

DESCRIPCION	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Relación	3000 / 5 / 5	3000 / 5 / 5
Clase	5 P 20	5 P 20
Carga	40 VA	40 VA

A) Cálculo de la compensación por relación:

En primer lugar, se determinarán los valores nominales del transformador, tanto en el lado de alta como en el lado de baja tensión.

**** Lado alta del transformador:**

$$I_{nom} = \frac{P_n}{\sqrt{3} * V_n}$$

$$= \frac{60 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * 60 \text{ kV}} = 577.35 \text{ Amps (Balnearios)}$$

$$= \frac{40 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * 60 \text{ kV}} = 384.90 \text{ Amps (Chavarria)}$$

La corriente en el lado secundario de los CT's:

$$I_{ct1} = \frac{577.35}{600/5} = 4.8113 \text{ Amps (Balnearios)}$$

$$I_{ct1} = \frac{384.90}{600/1} = 0.6407 \text{ Amps (Chavarria)}$$

**** Lado baja del transformador:**

$$I_{nom} = \frac{P_n}{\sqrt{3} * V_n}$$

$$I_{\bullet} = \frac{60/3}{7.29} = 2743.48 \text{ Amps (Balnearios)}$$

$$I_a = \frac{40/3}{4.86} = 2743.48 \text{ Ampe (Chavarría)}$$

$$I_{ct11} = \frac{2743.48}{600} = 4.57 \text{ Ampe (Balnearios Chavarría)}$$

Ahora procederemos a determinar los ajustes por compensación de relación.

TABLA DE AJUSTES DEL RELE DT92

IN/I	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	0.0	0.04	0.08	0.12	0.16
1	I	II	III	IV	V					
2						I	II	III		V

a) Ajuste del T1 (lado de Alta):

$$IN_{ret1} = \frac{5}{4.814} = 1.04 \quad (\text{Balnearios})$$

$$IN_{ret1} = \frac{1}{0.64} = 1.56 \quad (\text{Chavarría})$$

De la Tabla de Ajustes se elige lo siguiente:

AJUSTE	BALNEARIOS		CHAVARRIA	
	SWITCH 1	I	1.00	IV
SWITCH 2	II	0.04	I	0.00
TOTAL	1.04		1.60	

b) Ajuste T2 (lado de Baja)

$$IN_{ret11} = \frac{5}{4.57} = 1.09 \quad (\text{Balnearios y Chavarría})$$

De la Tabla de Ajustes se elige lo siguiente:

AJUSTE	BALNEARIOS		CHAVARRIA	
SWITCH 1	I	1.00	I	1.00
SWITCH 2	III	0.08	III	0.08
TOTAL		1.08		1.08

b) Cálculo del valor de ajuste básico "g":

TABLA DE AJUSTES DEL RELÉ DT92

g	"	% In
I	"	20
II	"	30
III	"	40
IV	"	50

La fórmula general establecida para transformadores con gradines es la siguiente:

$$g > 10 + \left(\frac{I_p \text{ max} - I_p \text{ medio}}{I_p \text{ medio}} \right) * 100 \%$$

Para nuestro caso, el transformador no tiene gradines y además el valor mínimo usualmente empleado es de 20 % por lo tanto queda ajustado el valor de "g" para ambos Compensadores con el valor de $g = 20\%$, esto es:

AJUSTE	BALNEARIOS Y CHAVARRIA
g	I

c) Compensación de fase:

TABLA DE AJUSTE DEL RELÉ DT92

T	Y _{r0}	Y _{rb}	Y _{rs}	Y _{d11}	Y _{d7}	Y _{d1}	D ₇₅	B ₇₁₁	B _{d0}	B _{d0}	D ₇₆	D ₇₁	D ₇₇
T1	5	5	5	11	7	1	0	0	0	0	0	0	0
T2	5	11	0	0	0	0	7	1	0	0	6	11	5

Los puntos neutros de los transformadores de corriente (CT's) principales deben estar conectados simétricamente, esto significa que los puntos neutro a tierra deberán estar arreglados tal como se muestra en las Figuras UNI-93-33(a,b), donde ambas corrientes están ingresando al relé.

Cuando los CT's principales ya se encuentran conectados en Delta para compensar el grupo de conexión como es el caso de Electrolima, no es necesario la compensación de conexión y los switches T1 y T2 deberán ser ajustados en 0. En este caso, asumimos que los neutros de los CT's principales están correctamente conectados.

Por el contrario, si por alguna razón ambos CT's principales están conectados en Estrella, los switches T1 y T2 deberían ser ajustados en el relé de acuerdo a la Tabla de Ajustes del grupo de conexión. Así por ejemplo, para nuestro caso el transformador con grupo de conexión igual a Yd5 (T=5) se ajustarían de la siguiente manera:

$$T = 5 \quad T1 = 5 \quad T2 = 0$$

De lo anterior se concluye:

AJUSTE	BALNEARIOS Y CHAVARRIA
T1 y T2	0

Resultados:

AJUSTE	BALNEARIOS	CHAVARRIA
SWITCH 1	I , II	IV , I
SWITCH 2	II , III	I , III
Valor "g"	II	II
T1 Y T2	0	0

3.5.3.5 Protección sobre corriente en el neutro del transformador de potencia

Denominación:

La denominación establecida es Relé 51E.

Criterio:

Se tiene un relé monofásico de sobrecorriente que emplea la corriente del transformador CT10 que se encuentra en el neutro de 60 kV del transformador de potencia.

Este relé detecta cortocircuitos fase a tierra que se puedan presentar en el lado de 60 kV de la Red. Igualmente evita que el compensador opere por tiempos prolongados en condiciones de desbalance superiores al 20 % del valor de corriente nominal, porque puede ser perjudicial para el sistema de potencia. El ajuste del 20 % corresponde a un valor normalmente empleado como límite de desbalance de cualquier equipo de alta y baja tensión.

Igualmente se ha determinado un ajuste de tiempo de 4 seg, que corresponde al tiempo máximo de ajuste de las protecciones de distancia en las líneas y circuitos contiguos. Con esto esperamos garantizar que el Compensador no se desconecte para fallas externas.

Cálculos:

DATOS TECNICOS DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

DESCRIPCION	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Relación	600 / 5	400 / 5
Clase	5 P 20	5 P 20
Carga	30 VA	30 VA

NIVEL DE PROTECCION	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Corriente final (In)	577 A ps	385 A ps
Criterio Desbalance (0.2 In)	115 Aps	Aps
Valor Cortocircuito (Imín)	kAps	kAps

a) BALNEARIOS

** Ajuste tiempo instantáneo:

$$\frac{3000 \times 5}{600} - 25 \text{ Aps RMS} - 35.4 \text{ Aps pico}$$

** Ajuste temporizado:

$$\frac{115 \times 5}{600} - 0.95 \text{ Aps RMS}$$

b) CHAVARRIA

** Ajuste tiempo instantáneo:

$$\frac{2000 \times 5}{400} - 25.0 \text{ Aps RMS} - 35.35 \text{ Aps pico}$$

**** Ajuste temporizado:**

$$\frac{77 \times 5}{400} = 0.96 \text{ Amps RMS}$$

Resultados:

CUADRO DE AJUSTES - RELÉ IT (94)			
BALNEARIOS	5 x In	0.1 seg	(Etapa 1)
	0.2 x In	4.0 seg	(Etapa 2)
CHAVARRIA	5 x In	0.1 seg	(Etapa 1)
	0.2 x In	4.0 seg	(Etapa 2)

3.5.3.6 Protección fallas a tierra media tensión**Denominación:**

La denominación establecida es Relé 64E.

Criterio:

Se trata de un relé monofásico de sobretensión que utiliza el transformador PT2 cuyo núcleo secundario está conectado y arreglado en delta abierto.

El relé mide la suma de las tensiones de fase desde los transformadores de medida, determinando la tensión homopolar existente del sistema neutro aislado que se encuentra en la barra de media tensión.

Se ha elegido un ajuste del 30 % de la tensión nominal, que corresponde un valor usualmente empleado para protecciones de alta tensión. Al respecto debemos indicar que teóricamente se demuestra que para el caso de una falla monofásica a tierra de una fase en un sistema neutro aislado, produciría una tensión homopolar equivalente a la tensión nominal de la barra de media tensión.

Por otro lado, se ha definido un ajuste de tiempo de 4 seg por ser éste el tiempo máximo de ajuste de las protecciones externas de la red de Electrolima.

Cálculo:

a) **BALNEARIOS**

RELACION DEL TRANSFORMADOR DE MEDIDA PT2

RELACION	$\frac{10,000}{\sqrt{3}} / \frac{110}{3}$ Volts
Conexión Primaria	Estrella
Conexión Secundaria	Delta Abierto
Carga	30 VA

Cálculo del nivel de Protección:

$$\frac{0,3 \times 7,29 \text{ kV} \times 110}{\sqrt{3} \times 10,000} = 14.00 \text{ Volts}$$

El nivel de protección es:

14.00 V, 4 seg

El voltaje Nominal del relé es - 20 V.

b) CHAVARRIA

RELACION DEL TRANSFORMADOR DE MEDIDA PT2

RELACION	$\frac{6.20}{\sqrt{3}} / \frac{200}{3}$ Volts
Conexión Primaria	Estrella
Conexión Secundaria	Delta Abierto
Carga	30 VA

Cálculo del nivel de Protección:

$$\frac{0.3 \times 4.86 \text{ kV} \times 220}{\sqrt{3} \times 6,200} = 30.00 \text{ Volts}$$

El nivel de protección es:

30.00 V, 4 seg

El voltaje Nominal del relé es - 40 V.

Resultados:

**CUADRO DE AJUSTE
RELE DE SOBRETENSION HOMOPOLAR**

BALNEARIOS	0.3 x Vn	4 seg
CHAVARRIA	0.3 x Vn	4 seg

3.5.3.7 Protección diferencial de la barra media tensión**Denominación:**

La denominación establecida es Relé B7B.

Criterio:

Para la protección de la barra de media tensión se emplea un relé diferencial de corriente multi-alimentadores que está compuesto de varios módulos como son: Un módulo de medida DT93 y cuatro módulos intermedios IW93 que recibirán información de las corrientes de la ramas que convergen a la barra de media tensión.

A continuación, se mostrará el método de cálculo empleado en nuestro caso y que probablemente difiere con otros fabricantes por razones principalmente de tipo y construcción del relé.

Cálculo:

Los siguientes datos son necesarios para los cálculos:

**DATOS DE LOS CT9 Y CT5
(RAMAS TSC Y FC RESPECTIVAMENTE)**

DESCRIPCION	BALNEARIOS Y CHAVARRIA
Relación	2000 / 5 / 5
Clase	5 P 20 / 5 P 20
Carga	20 VA / 20 VA

**DATOS DEL CT2
(RAMA TRANSFORMADOR)**

DESCRIPCION	BALNEARIOS Y CHAVARRIA
Relación	3000 / 5 / 5
Clase	5 P 20
Carga	20 VA / 20 VA

DATOS DE LOS CTB

DESCRIPCION	BALNEARIOS Y CHAVARRIA
Relación	2500 / 5 / 5
Clase	5 P 20 / 5 P 20
Carga	30 VA / 30 VA

a) Compensación de relación "a"

$$I_{cti} = \frac{S_{base} * 1/CTi}{\sqrt{3} * U_{ni}}$$

$$a_i(*) = \frac{1/I_{cti} * 100}{m_{ai}} \text{ (kV * kA)}$$

I_{cti} = Valor primario de corriente.

cti = Valor primario de la relación de los Transformadores de Medida.

S_{base} = Potencia Base MVA donde son:

60 MVA para Balnearios

40 MVA para Chavarría.

m_{ai} = Constante (2, 0.5)

Todas las tensiones de las ramas están al mismo nivel de tensión por tanto se define lo siguiente:

$V_n = 7.29 \text{ kV}$ para Balnearios
 4.86 kV para Chavarría

En el manual del relé, el fabricante sugiere emplear la constante $m_a = 2.0$, sin embargo para algunos casos se usará $m_a = 0.50$.

m_a	A (%)	PASO (%)	a (%)	APLICACION
2	198...50(20)	2	99...25	Rango Normal
0.5	49.5...15(5)	0.5	99...30	Rango Especial

$A =$ Valor de Amplitud Primario $= a \times M_a(\%)$

$a = 10, 11, \dots, 98, 99 \%$

$m_a = 2, 0.5$

$I_{base} = \frac{60}{3 \times 7.29} = 2743.50 \text{ Amps}$ (Balnearios)

$I_{base} = \frac{40}{3 \times 4.86} = 2743.50 \text{ Amps}$ (Chavarría)

Todos los cálculos efectuados a continuación serán válidos para ambos Compensadores.

**** RAMA TRANSFORMADOR DE POTENCIA:**

Con relación de CT1 = 3000/5

$$I1 = \frac{2743.50 * (1)}{3000} = 0.9145 \text{ Amps}$$

$$a1 = \frac{(1/0.9145) * 100}{2} = 54.67 = 55 \%$$

**** RAMA TCR:**

Con relación de CT2 = 2500/5

$$I1 = \frac{2743.50 * (1)}{2500} = 1.0974 \text{ Amps}$$

$$a1 = \frac{(1/1.0974) * 100}{2} = 45.56 = 46 \%$$

**** RAMA TSC Y FC:**

Con relación de CT3 y CT4 = 2000/5

$$I1 = \frac{2743,50 * (1)}{2000} = 1.3717 \text{ Ampe}$$

$$a1 = \frac{(1/1,3717) * 100}{2} = 36.45 = 36 \%$$

b) Compensación de fase

El Diagrama UNI-93-34 muestra los puntos de los transformadores de corrientes que están simétricamente conectados y orientados a la barra de media tensión a excepción de la rama TSC. Para esta última rama son válidos los siguientes ajustes:

**** RAMA TSC**

$$V2 = 0 + 6 = 6$$

Ajuste adicional para
esfazar 180 grados.

Ajuste del Grupo de
conexión

**** RESTO DE RAMAS**

$$V1 = V3 = V4 = 0 + 0 = 0$$

Resultados:

DESCRIPCION DEL ALIMENTADOR	BALNEARIOS Y CHAVARRIA		
	a	ma	v
1	32	2	0
2	26	2	6
3	84	2	0
4	84	2	0

3.5.3.8 Protección de sobrecorriente de las Ramas

3.5.3.8.1 RAMA TCR

Denominación:

La denominación es de relé 51TCR.a/51TCR.b

Criterio:

Se trata de dos (2) relés trifásicos de sobrecorriente, los cuales constituyen las protecciones primaria y secundaria de la rama TCR. El criterio empleado para determinar los ajustes ha sido establecido en el párrafo 3.4.1.1.

Las corrientes para estos relés serán suministradas por los transformadores CT3 para la protección primaria y CT9 para la protección secundaria.

Cálculos:

Datos del transformador de corriente del CT3 que igualmente son válidos para el CT9.

DESCRIPCION	BALNEARIOS Y CHAVARRIA
Relación	2500 / 5 / 5
Clase	5 P 20
Carga	30 VA

NIVELES DE PROTECCION	BALNEARIOS Y CHAVARRIA	
Etapa 1 - P. Primaria	7500 Ampe	0 mseg
Etapa 2 - P. Secundaria	5000 Ampe	150 mseg
Etapa 3 - P. Primaria	3400 Ampe	2.0 seg
Etapa 4 - P. Secundaria	2700 Ampe	9.9 seg

a) Relé Primario

** Ajuste del relé con tiempo instantáneo:

$$\frac{7500 \times 5}{2500} = 15 \text{ Ampe RMS} = 21.2 \text{ Ampe pico}$$

** Ajuste del relé con temporizado:

$$\frac{3400 \times 5}{2500} = 6.8 \text{ Ampe RMS}$$

b) Relé Secundario

** Ajuste tiempo instantáneo:

$$\frac{5000 \times 5}{2500} = 10 \text{ Ampe RMS} = 14.14 \text{ Ampe pico}$$

**** AJUSTE TEMPORIZADO:**

$$\frac{2700 \times 5}{2500} = 1.0 \text{ Ampere RMS}$$

Resultados:**CUADRO DE AJUSTE RAMA TCR IT94**

BALNEARIOS Y CHAVARRIA			
RELE PRIMARIO	3 x In	0 seg	(Etapa 1)
	1.36 x In	2.0 seg	(Etapa 2)
RELE SECUNDARIO	2 x In	0 seg	(Etapa 1)
	1.08 x In	9.9 seg	(Etapa 2)

3.5.3.8.2 RAMA TSC**Denominación:**

La denominación es de relé SITSCa/SITSCb.

Criterio:

Se trata de dos (2) relés trifásicos de sobrecorriente, los cuales constituyen las

protecciones primarias y secundarias de la Rama TSC. El criterio empleado para determinar los ajustes ha sido establecido en el párrafo 3.4.2.1.

Las corrientes para los relés serán suministradas por los transformadores CT4 para la protección primaria y CT8 para la protección secundaria.

Datos del transformador de corriente CT4 que tambien es válido para su similar CT9.

DESCRIPCION	BALNEARIOS Y CHAVARRIA
Relación	2000/5/5
Clase	5P20
Carga	30 VA

NIVELES DE PROTECCION	BALNEARIOS Y CHAVARRIA	
Etapas 1 - P. Primaria	6000 Amps	100 mseg
Etapas 2 P. Secundaria	6000 Amps	100 mseg
Etapas 3 - P. Primaria	7000 Amps	1.8 seg
Etapas 4 - P. Secundaria	2500 Amps	9.9 seg

Cálculo:

a) Relé Primario:

**** Ajuste del relé de sobrecorriente con tiempo instantáneo**

$$\frac{6000 \times 5}{2000} = 15 \text{ Amps RMS} = 21.2 \text{ Amps pico}$$

**** Ajuste del relé con ajuste temporizado**

$$\frac{3000 \times 5}{2000} = 7.5 \text{ Amps RMS} = 10.5 \text{ Amps pico}$$

b) Relé Secundario

**** Ajuste del relé con ajuste instantáneo**

$$\frac{6000 \times 5}{2000} = 15 \text{ Amps RMS} = 21.2 \text{ Amps pico}$$

**** Ajuste del relé con ajuste temporizado**

$$\frac{2500 \times 5}{2000} = 6.25 \text{ Amps RMS} = 8.75 \text{ Amps pico}$$

Resultados:**CUADRO DE AJUSTES - RELÉ IT94****BALNEARIOS Y CHAVARRIA**

RELÉ PRIMARIO	3 x In	0.1 seg	(Etapa 1)
	1.5 x In	1.0 seg	(Etapa 3)
RELÉ SECUNDARIO	1.3 x In	0.1 seg	(Etapa 2)
	1.2 x In	99 seg	(Etapa 4)

3.5.3.8.3 RAMA FC**Denominación:**

La denominación es de relé 51FC.

Criterio:

Se trata de un relé trifásico de sobrecorriente, cuyo criterio de ajuste ha sido establecido en base a los valores de sobrecarga y cortocircuito de la rama, tal como lo veremos a continuación. La corriente al relé es suministrada desde el transformador denominado CT5.

Cálculos:

DATOS DEL CT5

DESCRIPCION	BALNEARIOS Y CHAVARRIA
Relación	2000 / 5 / 5
Clase	5 P 20
Carga	30 VA

NIVEL DE PROTECCION	BALNEARIOS Y CHAVARRIA
Corriente Nominal (In)	1837.00 Amps
Sobrecarga (1.2 x In)	2205.00 Amps
Valor Cortocircuito	6000.00 Amps

**** Ajuste tiempo instantáneo:**

$$\frac{6000 \times 5}{2000} = 15 \text{ Amps RMS} = 21.2 \text{ Amps pico}$$

**** Ajuste temporizado:**

$$\frac{2200 \times 5}{2000} = 5.5 \text{ Amps RMS}$$

Resultados:**CUADRO DE AJUSTES - RELE IT94****BALNEARIOS Y CHAVARRIA**

3	x In	0.1 seg	(Etapa 1)
1.1	x In	1.0 seg	(Etapa 2)

3.6 Señales de salida**A) Señales de disparo**

El Interruptor de 60 kV, que es el único elemento de desconexión y ha sido diseñado con doble Bobina de apertura que permite descomponer en dos grupos las señales de disparo generadas desde los relés de protección

Todas estas señales con contactos de salida para 120 Vcc, han sido agrupadas en "Apertura de Protección Principal" y "Apertura de protección de respaldo", ambas conectadas separadamente en dos unidades interfaces antes de conectarse a la bobina de disparo del Interruptor tal como se puede apreciar en la Figura UNI-93-27.

B) Señales de arranque

Cada relé tiene disponible lámparas amarillas que permiten dar a conocer al operador que el relé funcionó. Además dispone de contactos libres para ser empleados si el caso lo requiere como alarma remota de "Relé Funcionó".

ElectroLima ha decidido por el momento no emplear estos contactos de arranque en vista de la cantidad de alarmas existentes en el compensador.

C A P I T U L O I V

OPERACION INDIVIDUAL Y PARALELO DE LOS COMPENSADORES EN EL SISTEMA INTERCONECTADO CENTRO - NORTE

4 INTRODUCCION

El capítulo tiene como objetivo explicar las pautas de operación del compensador en Estado Estable y presentar algunos programas de aplicación, elaborados para propósito de esta Tesis, los cuales pueden ser empleados en una microcomputadora PC. Estos Programas permiten calcular la potencia y tensión en el compensador bajo condiciones de Estado Estable y además calcula los valores óptimos de ajustes de los parámetros de operación que son la tensión de referencia y la pendiente de operación.

Para cumplir con estos objetivos, el capítulo ha sido dividido del modo siguiente:

- a) Principio y pautas de operación.
- b) Análisis Teórico del Compensador en Estado Estable
- c) Criterios generales
- d) Descripción del programa computacional
- e) Cálculos de valores óptimos de operación

A continuación definiremos algunos términos que serán empleados en los párrafos posteriores.

Red eléctrica :

Es el término empleado para referirse al Sistema Interconectado Centro-Norte.

Compensadores:

Es el término empleado para referirse a los sistemas de Compensación estática en la configuración TCR/TSC/FC.

Estado Estable:

Es el significado asignado a la condición normal de operación; sin considerar transitorios.

Característica de la Red:

Es la curva característica de la red que representa su impedancia equivalente dentro del diagrama Voltaje versus Corriente.

Característica de operación del Compensador:

la curva característica del compensador establecida por la pendiente y tensión de referencia dentro del rango de control regulación, igualmente dentro del diagrama Voltaje versus Corriente.

4.1 Principio y pautas de operación del compensador

Las características principales de los Compensadores fueron mayormente explicadas en el Capítulo II, en el presente párrafo elaboraremos un resumen de estos datos que serán de suma importancia para los cálculos y análisis posteriores.

4.1.1 Principio de operación

Los Compensadores tienen la propiedad de generar y absorber automáticamente la potencia reactiva de la Red dependiendo del ajuste de la tensión de referencia.

Este valor al igual que la pendiente de Operación o Estatismo serán calculados en base a ciertos criterios, los cuales se pueden resumir en lo siguiente:

En condiciones de máxima y mínima demanda, los Compensadores deben entregar y absorber respectivamente la potencia reactiva requerida por el Sistema, evitando en lo posible que los mismos trabajen a su máxima capacidad.

Como los Compensadores operan en paralelo dentro del Sistema Interconectado, será nuestra intención principal que los mismos entreguen o absorban simultáneamente la Potencia Reactiva para evitar, por ejemplo, que mientras que uno opera capacitivamente el otro opera inductivamente.

Es importante aclarar, que nuestro análisis del comportamiento del compensador se efectuará en condiciones de operación individual; sin embargo, se recomienda que luego de cada reajuste, es necesario registrar la potencia y tensión para verificar estos nuevos valores.

4.1.1.1 Comportamiento en Estado Estable

Como se explicó en el Capítulo II, los Esquemas Unifilares de ambos compensadores mostrados en las Figuras UNI-93-06/07 son similares, al igual que su comportamiento de operación.

También se dijo que existen dos términos que serán empleados para definir la operación del compensador, que son los siguientes:

- Rango de Operación.
- Rango de Control o Regulación.

El rango de operación incluye el rango de control, la zona de sobretensión y la zona de subtensión, los cuales son representados en el gráfico tensión versus corriente UNI-93-36a, como tres segmentos "1", "2" y "3".

Rango de Control

Es la zona en que la potencia del equipo es suficiente para estabilizar la tensión del sistema, y está representada con una característica inclinada establecida por la tensión de referencia "Vref" y la Pendiente de operación.

Rango de Sobretensión

Es la zona donde la tensión de la red es tan alta que el equipo opera totalmente inductivo y su comportamiento corresponde a la de una inductancia fija.

En el gráfico UNI-93-17, se puede apreciar que en la zona inductiva la corriente puede ser mayor al valor nominal por un breve periodo de 15 minutos. Por otro lado, en la zona capacitiva la corriente está limitada a su valor nominal para los casos donde las tensiones del compensador superen su valor nominal.

Rango de Subtensión

Es la zona donde la tensión de la red es tan baja que el equipo trabaja totalmente capacitivo y su comportamiento corresponde a la de un capacitor fijo.

4.1.1.2 Característica de la Red

En la figura UNI-93-36a, la característica típica de una red en estado estable es mostrada como una línea denominada con el número "5", donde el punto "A" corresponde a la intersección entre las características de la red y el Compensador.

Las diferentes configuraciones y niveles de carga en una red, dan lugar a diferentes características de las mismas tal como se puede apreciar en el diagrama Tensión versus Corriente de la Figura UNI-93-36b. Aquí se aprecia la característica del Compensador y su similar de la Red bajo condiciones de máxima demanda (Línea "MD") y mínima demanda (Línea "mD").

Las propiedades principales de la característica de la Red son las siguientes:

Es casi lineal considerando que la impedancia de la red es muy pequeña con respecto a la impedancia del Compensadores.

Con una carga inductiva, el valor de la tensión en la red es reducida, ya que su impedancia equivalente también es inductiva a la frecuencia nominal.

4.1.2 Pautas de Operación

Como consecuencia de tener que operar los Compensadores en paralelo dentro del Sistema Interconectado, se hace necesario aclarar ciertos conceptos que determinan el comportamiento de los mismos en un sistema de potencia.

Como lo expresamos anteriormente, los Compensadores tienen dos parámetros que se ajustan en el regulador de tensión a criterio del sector de operaciones y que son valores que finalmente determinan la operación de los compensadores. Estos son la pendiente de operación y la tensión de referencia.

Es importante seleccionar adecuadamente estos valores ya que una mala elección puede traer como consecuencia que el equipo se sobrecargue o que opere por mucho tiempo fuera de la zona de Control o Regulación.

La elección de estos parámetros del Compensador dependen de las características de la red y por consecuencia es importante determinar correctamente estas curvas de manera que represente los casos más desfavorable.

En la Figura UNI-93-37a, se demuestra que para la característica de operación "AB", el equipo entrega mas potencia reactiva que su similar "A'B'". Adicionalmente la variación de tensión V_1-V_2 de la característica "AB" es menor que la variación de tensión $V_1'-V_2'$ de la "A'B'"; esto quiere decir, que el ajuste "AB" resultaría una mejor operación del sistema hasta en los puntos extremos de operación del compensador.

Para lograr que los ajustes sean los óptimos, emplearemos las características más desfavorables de la red.

4.2 Análisis teórico del comportamiento

4.2.1 Análisis de la Red

En el análisis del circuito equivalente de la red mostrado en la Figura UNI-93-38a/38b, consideramos al Compensador como capacitor que inyecta corriente reactiva a la red, lo cual nos permite elaborar el diagrama fasorial mostrado en la Figura UNI-93-38c.

De estas condiciones mostradas, podemos deducir lo siguiente:

$$V = Z_{th} * I + E_{th}$$

$$V \angle \phi = Z_{th} \angle \phi * I \angle -90 + E_{th} \angle B$$

$$V = (Z_{th} * I * \cos(\phi - 90) + E_{th} * \cos B) + j (Z_{th} * I * \sin(\phi - 90) + E_{th} * \sin B)$$

Al asumirse que el ángulo de la tensión "V" es cero, entonces la parte imaginaria de la ecuación anterior no existe o es cero que es lo mismo, por tanto se concluye en lo siguiente:

$$Z_{th} * I * \sin(\phi - 90) + E_{th} * \sin B = 0$$

Si es:

$$\begin{aligned} \sin(\phi - 90) &= -\cos(\phi) \text{ para } I \text{ Capacitivo} \\ &= I \angle -90 \text{ (Capacitivo)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin(\phi + 90) &= \cos(\phi) \text{ para } I \text{ Inductivo} \\ &= I \angle +90 \text{ (Inductivo)} \end{aligned}$$

$$- Z_{th} * I * \cos(\phi) + E_{th} * \sin B = 0$$

$$\sin(B) = \frac{Z_{th} * I * \cos(\phi)}{E_{th}}$$

-1

$$B = \arcsin\left(\frac{Z_{th} * I * \cos(\phi)}{E_{th}}\right) \dots \dots \dots 1$$

Donde : para la zona Capacitiva "I" es Positiva y
para la zona Inductiva "I" es Negativa.

Por otro lado

$$V = Z_{th} * I * \cos(\phi - 90) + E_{th} * \cos B$$

Si es:

$$\begin{aligned} \cos(\phi - 90) &= + \text{sen } \phi \quad \text{para } I \\ &= I \angle -90 \quad (\text{Capacitivo}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos(\phi + 90) &= - \text{sen } \phi \quad \text{para } I \\ &= I \angle +90 \quad (\text{Inductivo}) \end{aligned}$$

Luego

$$V = Z_{th} * I * \text{Sen } \phi + E_{th} * \cos B \dots\dots\dots 2$$

o el mismo cuando se desee calcular la corriente

$$I = \frac{V - E_{th} * \cos B}{Z_{th} * \text{Sen } \phi} \dots\dots\dots 3$$

4.2.2 Cálculo del punto de operación en el rango de control

Como se mencionó anteriormente, el cálculo del punto de operación está en función a los valores de los parámetros de la red y el Compensador. Este punto es importante calcularlo porque nos permite determinar el valor de la corriente de operación y por consiguiente la tensión y potencia del compensador.

Considerando que la corriente es positiva en la zona capacitiva y que el punto de operación A de la Figura UNI-93-39a, está dentro del rango de control, tenemos la siguiente ecuación que define el comportamiento de la característica de operación.

Para capacitivo

$$V = V_{ref} - K * I \dots\dots\dots 4$$

Si el valor "K" es la pendiente de operación del Compensador entonces igualando las ecuaciones 2 y 4 se obtendrá lo siguiente:

$$V_{ref} - K * I = Z_{th} * I * \text{Sen } \phi + E_{th} * \text{Cos } B$$

$$V_{ref} - E_{th} * \text{Cos } B = Z_{th} * I * \text{Sen } \phi + K * I$$

Para la zona inductiva tenemos

$$V = - Z_{ind} * I \quad \dots\dots\dots 7$$

El punto de operación B, lo determinaremos con las ecuaciones 2 y 6, luego tenemos:

$$Z_{cap} * I = Z_{th} * I * \text{Sen } \phi + E_{th} * \text{Cos } B$$

$$I = \frac{E_{th} * \text{Cos } B}{Z_{cap} - Z_{th} * \text{Sen } \phi} \quad \dots\dots\dots 8$$

El punto de operación A, lo encontramos con las ecuaciones 2 y 7, luego tenemos:

$$- Z_{ind} * I = Z_{th} * I * \text{Sen } \phi + E_{th} * \text{Cos } B$$

$$I = \frac{E_{th} * \text{Cos } B}{Z_{ind} - Z_{th} * \text{Sen } \phi} \quad \dots\dots\dots 9$$

$$V = Z_{cap} * I \quad \dots\dots\dots 10$$

4.2.4 Cálculo de los valores extremos de operación en el rango de control

Las condiciones extremas de operación están definidas con el valor de tensión de referencia que es igual al valor nominal de la tensión cuando la pendiente es igual a cero tal como se muestra en la figura UNI-93-37b. La tensión en el rango capacitivo cuando circula la corriente "Ia" en el compensador se puede calcular de la siguiente manera:

$$V = V_{ref} - K * I_a$$

$$V = Z_{cap} * I_a$$

De donde

$$I_a = \frac{V_{ref}}{Z_{cap} + k} \dots\dots\dots 11$$

Para rango Inductivo

$$V = V_{ref} - K * I_b$$

$$V = - Z_{ind} * I_b$$

$$I_b = \frac{V_{ref}}{K - Z_{ind}} \dots\dots\dots 12$$

4.2.5 Cálculo de los valores óptimos de tensión de referencia y pendiente

Con los parámetros de la red y los datos nominales del compensador se calculan los valores óptimos de la tensión de referencia y pendiente, de manera que el compensador entregue la máxima potencia para condiciones extremas tales como máxima y mínima demanda. Para el cálculo de la corriente y la tensión de operación, en condiciones de máxima demanda, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$I_a = \frac{E_{th} * \cos \beta}{Z_{cap} - Z_{th} * \sin \phi}$$

$$V_a = + Z_{cap} * I_a$$

Igualmente para el cálculo de la corriente y la tensión de operación, en condiciones de mínima demanda, se emplean con las siguientes ecuaciones:

$$I_b = \frac{- E_{th} * \cos \beta}{Z_{ind} + Z_{th} * \sin \phi}$$

$$V_b = - Z_{ind} * I_b$$

Finalmente una vez obtenido estos valores se procede a calcular la pendiente y tensión de referencia

$$k = \frac{V_b - V_a}{I_b - I_a} \dots\dots\dots (13)$$

$$V_{ref} = V_b + k * I_b \dots\dots\dots (14)$$

4.3 Criterios generales

En el cálculo de los valores de tensión y potencia en un determinado punto de operación, se emplean algunos valores como son las impedancias equivalente de la red y su ángulo correspondiente. Con la finalidad de cuantificar la influencia que ellos tienen en el cálculo final del punto de operación, hemos efectuado el análisis de los resultados que son mostrados en las figuras UNI-93-40 y UNI-93-41.

De estos gráficos se podría concluir lo siguiente:

Al cometerse un error hasta el 40 % por debajo del valor real de la impedancia Z_{th} en el resultado se cometera también error de no mayor del 28 % en el cálculo del valor de la potencia (Megavars), lo que significa poco significativo.

Al cometerse un error entre -30 % y + 30 % en el valor real del ángulo del Zth en el resultado también se cometerá un error de cálculo no mayor de 4 % en el valor de potencia reactiva (Megavars)

Por lo tanto, de lo anteriormente expresado establecemos un rango máximo aceptable de error, que a continuación mostramos:

Amplitud (Zth) \pm e e = 15 %

ANGULO (Zth) \pm x e = -20 %/ + 5 %

Estos valores nos permiten garantizar un error en los cálculos de la potencia en un valor inferior al 5%.

4.4 Programa de aplicación

Para el presente análisis se ha desarrollado un programa de aplicación, para ser empleado en el Paquete Q-PRO y que básicamente permite calcular de manera automática la potencia reactiva para ciertas condiciones de ajuste de los parámetros principales de operación y valores de la característica de la Red.

Suponemos que este programa será de gran utilidad para el sector de operaciones, principalmente si se reconoce la necesidad de emplear dos valores diferentes de tensión de referencia para operar los compensadores en máxima y mínima demanda.

Datos del Programa :

Potencia Nominal en MVar.

Tensión Nominal en kV.

Tensiones Theveni E_{th} (pu) de máxima/minima Demanda.

Impedancia Theveni Z_{th} / ϕ (pu) de máxima/minima Demanda.

Resultados del Programa :

Potencia entregada/absorbida en MVar.

Tensión de la Red en kV.

Existen algunas consideraciones importantes que debemos mencionar; tales como que al existir diferentes niveles de carga y configuraciones de la red, también existen diferentes características equivalentes, las cuales las consideramos casi lineales para fines de cálculo matemático; sin embargo normalmente emplearemos los valores de máxima y mínima demanda.

Para el caso de ElectroLima hemos determinado los siguientes valores promedios:

Máxima Demanda:

	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Eth ---->	57.0 - 58.0 kV	58.0 kV
Zth ---->	2.16 - 2.88 Ohms/fase	IDEM
Ang ---->	80 - 88 grados	IDEM

Mínima demanda:

	BALNEARIOS	CHAVARRIA
Eth ---->	66.0 kV	IDEM
Zth ---->	6.48 - 7.20 Ohms/fase	IDEM
Ang ---->	80 - 88 grados	IDEM

Debemos indicar que estos valores han sido calculados para diversas condiciones normales de operación, pero sin considerar casos de emergencia, porque ello alteraría considerablemente los resultados, más aún si es sabido que actualmente los compensadores son insuficiente para el requerimiento de potencia reactiva.

4.5 Cálculo de los valores de Operación

Como se mencionó anteriormente, el software de aplicación elaborado en Q-PRO y nominado como SVC.WQ1 ha sido diseñado para determinar los valores de potencia y tensión de la Red, para cualquier condición de operación y ajuste de los parámetros de operación, indicándole además si la estación de compensación reactiva opera "Dentro de la Zona" o "Fuera de la Zona".

Para el efecto, a continuación detallamos y analizamos los cuatro casos de operación, todas ellas analizadas para el caso de la Estación de Balnearios

- 1.- En condiciones máxima demanda y con una tensión equivalente de la Red en 57kV, el compensador operará dentro de la Zona de Control, con una potencia de entrega de 50.89Mvar y tensión final de la Red de 58.83kV
- 2.- Idem al caso anterior; pero se considera una tensión equivalente de la Red de 56kV, pero en estas condiciones quedaría fuera de la Zona de Control.

Es importante mencionar que para este caso y si hipotéticamente asumimos una recta infinita del capacitor; entonces el compensador operaría con 64.24Mvar, lo cual supera la capacidad nominal de 60Mvar.

- 3.- En condiciones de mínima demanda y con una tensión equivalente de la Red de 66kV, la estación operará fuera de la Zona de Control.

- 4.- Idem al caso anterior No. 3; pero la tensión equivalente de la Red es de 64kV. Para esta nueva condición quedaría el compensador, dentro de la Zona de Control.

DATOS :

P (MVA) = 60.00 MVA
 Vref(kV) = 60.66 kV
 Eth (kV) = 66.00 kV
 Zth (pu) = 0.18 pu
 Ang (0) = 80.00
 k - 0.035 %

CALCULOS

Vref(pu) = 1.01 pu
 Eth (pu) = 1.10 pu
 Beta = 0.9769 -0.61
 I (pu) = -0.3768 -0.38
 V (pu) = 1.0330 pu
 N (pu) = -0.3893 pu

RESULTADOS PARAMETROS ELECTRICOS			
Zth(pu) =	0.18 pu	N (MVA) =	-40.480 MVA
Vref(pu) =	60.66 kV	V (kV) =	69.697 kV
k =	0.04 %	ZONA =	FUERA ZON
Eth(kV) =	66.00 kV		
** ANTES **		** AHORA **	
DELTA(kV)	6.00 kV	DELTA(kV)	1.98 kV

DATOS

P (MVA) = 60.00 MVA
 Vref(kV) = 60.66 kV
 Eth (kV) = 64.00 kV
 Zth (pu) = 0.18 pu
 Ang (0) = 80.00
 k - 0.035 %

CALCULOS :

Vref(pu) = 1.01 pu
 Eth (pu) = 1.07 pu
 Beta = 1.0074 -0.40
 I (pu) = -0.2354 -0.24
 V (pu) = 1.0248 pu
 N (pu) = -0.2412 pu

RESULTADOS PARAMETROS ELECTRICOS			
Zth(pu) =	0.18 pu	N (MVA) =	-24.124 MVA
Vref(pu) =	60.66 kV	V (kV) =	61.486 kV
k =	0.04 %	ZONA =	DENTRO ZON
Eth(kV) =	64.00 kV		
** ANTES **		** AHORA **	
DELTA(kV)	4.00 kV	DELTA(kV)	1.49 kV

CONCLUSIONES

- 1.- El presente trabajo permite divulgar entre los profesionales, el desarrollo técnico empleado en los Sistemas Estáticos de Compensación Reactiva, porque se trata de un sistema único en el país para este tipo de configuración.

- 2.- Se ha logrado analizar y establecer claramente los criterios necesarios para determinar los valores de ajuste más apropiados de los relés principales de protección convencionales, con la finalidad de garantizar la continuidad en la operación e igualmente la integridad de los equipos instalados, en caso de fallas (cortocircuito, sobrecarga, etc). Los resultados así como los criterios empleados se encuentran detallados en el Capítulo III.

- 3.- Se ha establecido un método para el análisis de las diferentes modalidades de operación de las Estaciones de Compensación Reactiva, creándose además un programa informático que permite rápidamente determinar la potencia reactiva entregada o absorbida con diferentes ajustes de los parámetros de tensión de referencia y pendiente de operación.

- 4.- Los reportes diarios obtenidos en el Centro de Despacho de Carga de Electrolima son mostrados en el Anexo 1 y se obtiene dos conclusiones importantes:
 - 4.1. Las Estaciones de Balnearios y Chavarría operan correctamente en estado estable, ésto significa que ambos simultáneamente trabajan en el lado inductivo o capacitivo y en ningún momento en posiciones opuestas.
 - 4.2. En condiciones de máxima y mínima demanda las estaciones operan usualmente en su máxima capacidad, lo que significa que bajo estas circunstancias, éstos no están en capacidad de mantener el perfil de tensiones en caso de una brusca perturbación.

Para la última condición, donde la Compensación opera de manera limitada, existe la posibilidad de elegir

dos valores diferentes de tensión de referencia, los cuales están relacionados a condiciones igualmente diferentes de máxima y mínima demanda. Es importante decir que se operará con valores diferentes; ya sean bajos o altos de tensión en 60 kilovoltios.

5.- Se han logrado establecer criterios para la coordinación de las protecciones especiales empleadas y los relés convencionales de protección. Estos aspectos son muy importantes para evitar daños por sobrecarga de los tiristores y/o deterioro de cualquier componente eléctrico en caso de sobretensiones o cortocircuito de larga duración.

6.- En el Capítulo I, se detalló las características eléctricas, que comparadas con los valores inicialmente tratados con el Fabricante, se ha encontrado algunas diferencias detalladas a continuación:

- a) Los valores de mínima tensión de operación en condiciones estables han decaído en un (1) kilovoltio, quedando establecidos de la siguiente manera

Balnearios	54 kVrms.
Chavarría	55 kVrms.

- b) Los valores de máxima corriente de cortocircuito se han incrementado entre 10 y 15%, quedando establecidos así

Balnearios	16.62 kArms.
Chavarría	12.08 kArms.

Todos estos nuevos valores no han alterado los resultados de los cálculos de ajustes en los Sistemas de Protección, debido a que los mismos son cambios poco significativos. Sin embargo para determinar los ajustes de los parámetros de operación ha sido necesario tomar en cuenta los valores de tensión.

8.- El presente estudio tiene la finalidad garantizar

- a) La continuidad de la operación en las Estaciones de Compensación.
- b) Evitar daños de algún componente eléctrico; en caso que aparezca algún fenómeno eléctrico tal como la sobrecarga, sobretensión, subfrecuencia y

cortocircuito, siendo necesaria que la desconexión se efectúe de manera rápida e inmediatamente.

- c) La operación continua y permanente de las Estaciones de Compensación favorece a la Red de Electrolima, evita pérdidas innecesarias en la red de Electrolima. Igualmente se reduce el número de operaciones de los conmutadores bajo carga de una (1) a dos (2) fallas al año; que comparado con los anteriores años, donde las estadísticas muestran una (1) falla por bimestre.

El costo estimado por reparación del conmutador es aproximadamente Treinta mil dólares Americanos (US \$ 30,000.00) incluyendo la reparación de las bobinas, transporte y regeneración del aceite. Por tanto, bajo este análisis existe un considerable ahorro anual.

- 9.- Con relación al tema de los Armónicos de Tensión y Corriente, se han establecidos varias formas en los límites de los mismos; sin embargo, recomendamos los valores aceptados por los países miembros de UNIPEDA, porque los mismos representan valores que en su mayoría están considerados en el resto de las normas como las Europea y Australianas.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- BBC.- Static Var Compensators for HV Power System,
Publication NOCH-N 22.001.0E
- 2.- B. RESLER.- Modern Concepts for Static VAR Systems for
HV Transmission Lines Brown Boveri & Co. Ltd.
- 3.- G. REMEGIALLI, Dipl. Ing. and H. BEELER, Dipl. Ing..-
Problems and Concepts Static Compensator Control,
IEEE Seminar, September 1980.
- 4.- H.E. SCHWEICKARDT and G. REMEGIALLI.- The Static VAR
Source in EHV Transmission Systems and its Control,
Brown Boveri & Co. Ltd.
- 5.- H.E. SCHWEICKARDT, G. REMEGIALLI and K. REICHERT.-
Closed Loop Control of Static VAR Source (SVC) in EHV
Transmission Lines, IEEE January 1978.

6.- OLLE I. ELGARD.- Electric Energy Systems Theory, Mc
Graw-Hill Book Company.

7.- T.J.E. MILLER.- Reactive Power Control in Electric
Systems, John Wiley & Sons.