

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN**

**EFFECTOS DE LOS COMPENSADORES DE
REACTIVOS DE SISTEMAS DE
EXCITACION EN EL CONTROL DE
VOLTAJE-POTENCIA REACTIVA DE
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO

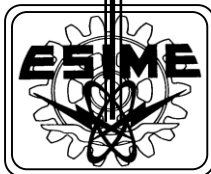
DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA**

PRESENTA

JAVIER A. JIMENEZ VALDÉS

MÉXICO, D.F. AGOSTO DE 2010





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de MEXICO siendo las 12:00 horas del día 26 del mes de FEBRERO del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la: E. S. I. M. E. ZAC. para examinar la tesis titulada:

"EFECTOS DE LOS COMPENSADORES DE REACTIVOS DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN EN EL CONTROL DE VOLTAJE-POTENCIA REACTIVA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

Presentada por el alumno:

JIMÉNEZ

Apellido paterno

VALDÉS

Apellido materno

JAVIER ALBERTO

Nombre(s)

Con registro:

B	0	6	1	7	1	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

DIRECTOR(A) DE TESIS


DR. DAVID ROMERO ROMERO


DR. RICARDO OCTAVIO ARTURO
MOTA PALOMINO
PRESIDENTE


DR. JAIME ROBLES GARCIA
SECRETARIO


DR. JOSÉ ALBERTO
GÓMEZ HERNÁNDEZ
SEGUNDO VOCAL


M. EN C. TOMAS IGNACIO
ASIAIN OLIVARES
TERCER VOCAL

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


DR. JAIME ROBLES GARCIA  SECCION DE ESTUDIOS DE



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 22 del mes de agosto del año 2010

el (la) que suscribe Javier Alberto Jiménez Valdés alumno (a) del Programa de

Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica

Con número de registro B061710 adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

de la E.S.I.M.E. Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente Trabajo

de Tesis bajo la dirección del Dr. David Romero Romero y cede los derechos del

trabajo intitulado “Efectos de los Compensadores de Reactivos de Sistemas de Excitación

en el control de voltaje-potencia Reactiva de Sistemas Eléctricos de Potencia” al

Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines Académicos y de Investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del

Trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido

escribiendo a la siguiente dirección: javier.jimenez04@cfе.gob.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la

fuelle del mismo.

Nombre y firma

Javier A. Jiménez Valdés

RESUMEN

El control de la potencia reactiva y perfiles de voltaje en los diferentes nodos de un Sistema Eléctrico de Potencia es complejo, no lineal y una tarea de gran dimensión.

Para esto, es necesario comprender la naturaleza de la potencia reactiva y el flujo de esta en el sistema de potencia.

La fuente principal de esta potencia, reside en los generadores y a diferencia de la potencia real, existen dispositivos como los reactores, compensadores estáticos de Var's, condensadores síncronos que contribuyen a mejorar los perfiles de voltaje en un punto de conexión sin aportar potencia real.

La función compensadora de reactivos residente en los sistemas de excitación de los generadores, contribuyen a la mejora del perfil de voltaje y flujo de reactivos del nodo donde se encuentra conectado el generador o generadores.

En este trabajo se presentan los conceptos básicos de control de voltaje, flujo de potencia reactiva, sistemas de excitación y el concepto de función compensadora de reactivos residente en los sistemas de excitación.

En el tema de la función compensadora de reactivos, se aborda el concepto de su operación, su representación vectorial, tanto de voltajes como de corrientes que se ven involucrados; así como, la tecnología antigua del tipo pasiva y la que actualmente se está consolidando, la tecnología digital.

La finalidad es la de habilitar los compensadores de reactivos residentes en los sistemas de excitación y que actualmente se encuentran fuera de operación en los generadores. El objetivo es mejorar los flujos de reactivos de las unidades generadoras en los nodos en los cuales se encuentran conectadas, permitiendo así el obtener una mejor regulación de los perfiles de voltaje de las aéreas donde se habiliten estas funciones compensadoras de reactivos.

Se recurre a la simulación del dispositivo, integrándolo a una red de potencia (Red Anderson) y adicionalmente una red que se implementó para ser evaluada en software de simulación digital de PTI conocido como PSS/E[®], esto con el fin de desarrollar simulaciones a nivel de Flujos la operación y desempeño de la función compensadora de reactivos.

ABSTRACT

The control of the reactive power and the voltage profiles in the different nodes of the Electric Power System, is complex, non-linear and a great dimension task.

For this, it's necessary to understand the nature of the reactive power and the flow of the system.

The main source of this power, resides in the generators and different from the real power, there exists devices like reactors, static compensator (Var's static compensator), Sync Condensators that contribute the improving of the voltage profiles in a connection point without giving real power.

The compensating function of reactivities power resides in the system excitation, contribute the improving of the voltage profile and the reactive flow where the bus is connected to the generator or generators.

In this thesis, the basic concepts of the voltage control, reactive power flow, system excitation and the concept of the compensating function of reactivities residing in the voltage regulators, are presented.

In the reactive compensating function, the concept of its operation, its vectorial representation, as voltages that are involved; as well as the technology of old, passive type, and the one used to this day, digital technology, are covered.

The objective is to make the reactive compensators in the excitation system to operate, and that are non-operational in the generators to this day. The purpose is to improve the reactive flow in the generators units that are connected allowing the acquisition of a better voltage profile regulation in areas where reactive compensators are operating.

The simulation device is integrated to a power network (Anderson Network) and an additional network that was introduced to be assessed in simulating software of PTI also known as PSS/E[®], This, with the goal of developing simulations at flow levels, the operation and performance of the reactive compensator.

DEDICATORIA

A mi familia, por todo el tiempo que les robé para invertirlo en este proceso educativo, para obtener este nivel de preparación, por el apoyo brindado en el desarrollo del actual documento, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional para obtener una mejora personal.

A mis hermanas por sus palabras de aliento durante todo el tiempo que duró este proceso.

A la empresa por el apoyo decidido e incondicional en permitir participar en esta nueva política que esta llevando a cabo con el fin de mejorar la calidad de sus procesos, el desempeño y superación de su recurso humano.

A mis padres por su eterna aprobación y exhorto en nuestra disposición en realizar mejoras personales.

A los compañeros que integraron este grupo, por las experiencias gratas, por los malos momentos que nos permitieron fortalecer lasos; me quedo con esos recuerdos y vivencias únicas.

A los maestros que participaron, un reconocimiento a sus capacidades y domino de los temas que expusieron, por sus objetivos trazados para obtener la mejora del grupo.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa, por su apoyo en cursar esta maestría, por el tiempo que me permitió dedicarme a esta tarea, por la plena confianza otorgada a sus elementos de trabajo.

A mi asesor Dr. David Romero, por todo el apoyo que me brindó, en facilitarme material bibliográfico, documentación referente al tema; por sus acertados comentarios y sugerencias en la formulación del actual documento.

Al Dr. Jaime Robles, por no perder ninguna oportunidad en dirigirnos palabras de aliento para terminar el actual documento.

Al Ing. Genaro Genel por estar al pendiente del grupo en su evolución y desarrollo durante el proceso de capacitación y ejecución de esta tarea de capacitación de este grupo.

Al Ing. Paredes por su determinación y convicción de la capacidad de mejora del recurso humano de la empresa.

A la Lic. Limón por su energía y esfuerzos que empleó durante el lapso que estuvo al pendiente de este grupo en el transcurso de su proceso educativo.

Al Ing. Leonardo Ocaña por los apoyos que me brindó para concluir con éxito este proyecto.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iiii
CONTENIDO.....	1
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE GRAFICAS	9
LISTA DE TABLAS	10
NOMENCLATURA.....	12
ABREVIATURAS.....	13
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	17
<hr/>	
1.1 Antecedentes y generalidades.....	17
1.2 Revisión del estado del arte	18
1.3 Objetivos de la tesis.....	21
1.4 Justificación	22
1.5 Aportaciones	23
1.6 Estructura de la tesis	24
CAPÍTULO II: CONTROL DE VOLTAJE	25
<hr/>	
2.1 Introducción.....	25
2.2 Potencia Reactiva	26
2.3 Conceptos Básicos de Control de Voltaje	29
2.3.1.- Flujo de Reactivos-Control de Voltaje	30
2.3.2.- Ecuaciones de flujo de potencia	33
2.4 Control de Voltaje Local	35
2.4.1.- Balance de potencia reactiva	36
2.5 Inyecciones de Potencia Reactiva	40
2.6 Transferencia de Potencia entre Fuentes Activas	40
2.7 Flujo de Potencia en Líneas de Transmisión	45
CAPÍTULO III: COMPENSADOR DE REACTIVOS	49
<hr/>	
3.1 Introducción.....	49
3.2 Sistemas de Excitación o Reguladores de Voltaje	49
3.2.1.- Funciones.....	51
3.3 Funciones Adicionales	53
3.3.1.- Funciones	53
3.4 Función Compensadora de Reactivos	53

Compensadores de Corriente Reactiva

	Pagina
3.4.1.- Compensación de potencia activa y reactiva	53
3.4.2.- Efecto de la corriente activa	56
3.4.3.- Efecto de la corriente reactiva.....	58
3.5 Conexiones del compensador	64
3.5.1.- Tecnología General Electric	69
3.5.2.- Compensador de reactivos unidades CT. Rio.....	72
Escondido y Rio Bravo	
3.5.3.- Compensador de reactivos Sistema Excitación	74
Marca Vatech	
3.5.3.1.- Compensación de Carga Activa y Reactiva	74
3.5.3.2.- Regulador de Carga Reactiva	74
3.5.3.3.- Transferencia entre Regulación de Voltaje y	77
Regulación de Carga Reactiva	
3.5.4.- Sistema de Excitación ABB	78
3.5.4.1.- Sistemas de Excitación para Máquinas	78
Síncronas	
3.5.4.2.- Componentes Principales del Sistema de	78
Excitación Tipo Estático.	
3.5.4.3.- Característica del Control de Excitación	81
3.5.4.4.- Característica del Software del Sistema	82
de Excitación	
3.5.4.5.- Ajuste del Sistema de Excitación	83
3.5.4.6.- Compensación de Potencia Activa y Reactiva	84
3.5.4.7.- Regulador Sobre-Impuesto	85
3.5.4.8.- Funciones del Software del Sistema de	86
Excitación ABB	
3.5.4.9.- Control de Potencia Reactiva Encendido/	91
Apagado	
3.5.4.10.- Comandos Alto/Bajo con señales de	91
Reconocimiento Min/Max.	
3.5.5.- Opciones de sistemas de control en Sistemas	93
de Excitación	
3.5.5.1.- Control de Var's y Factor de Potencia	93
3.5.5.2.- Compensación de Línea.....	95
3.5.5.3.- Compensación resistiva	95
3.5.5.4.- Compensación de Impedancia	95

CAPÍTULO IV: MODELADO Y SIMULACIÓN DIGITAL DEL COMPENSADOR DE REACTIVOS **96**

4.1 Introducción	96
4.2 Modelado	97
4.2.1 Flujos de Potencia.....	97
4.2.2 El Problema de Flujo de Potencia	100
4.2.3 Control de Flujos de Potencia	102
4.3 PSS/E.....	105
4.4 Simulación Digital del CCR	106

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN **117**

5.1.0- Simulaciones realizadas en el PSS/E con la red de potencia	117
5.1.1- Caso de Impedancia igual a 0.8 p.u. entre nodos 200 y 201	117
5.1.2 Caso de Impedancia igual a 1.2 p.u entre nodos 200 y 201	118
5.1.3 Caso de Impedancia igual a 0.4 p.u entre nodos 200 y 201	119
5.2.0- Evaluación de la Función compensadora de Reactivos de librería ...	120
5.3.0- Corridas realizadas de Flujos en el sistema Anderson	121
5.3.1 Flujo de Reactivos entre nodo 3 y 10	121
5.3.2 Compensador de Reactivos entre nodo 3 y 10, se mueve	123
voltaje de Unidad 2	
5.3.3 Sin Compensación de Reactivos entre nodo 3 y 10, se.....	125
mueve voltaje en unidad 3	
5.3.4 Sin compensación de Reactivos entre nodo 3 y 10, se	126
mueve voltaje en unidad 2	
5.3.5 Con compensación de Reactivos entre nodo 3 – 11 y	128
nodo 4 – 12, Impedancia 0.1, se mueve voltaje unidades 3 y 4	
5.3.6 Con compensación de Reactivos entre nodo 3,11 y nodo 4,12.....	130
5.3.7 Con compensación de reactivos entre nodo 3,11 y nodo 4,12	133
5.3.8 Con Compensación de Reactivos entre nodo 3,11 y nodo 4,12	136
5.4.0 Compensador de cruce de Corriente	139
5.5.0 Análsis de Compensadores Dentro-Fuera	140
5.6.0 Análsis de Compensadores de Reactivos y PSS	140
5.7.0 Evaluación del Estabilizador de Potencia.....	141
5.8.0 Conclusiones de las simulaciones.....	142

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **143**

6.1.- CONCLUSIONES.....	143
6.2.- RECOMENDACIONES	145

	Pagina
REFERENCIAS.....	146
ANEXOS	149
A. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN DIGITAL (MARCA ABB, MODELO UNITROL)	150
B. GRAFICA DE PRUEBAS REALIZADAS A UN COMPENSADOR DE REACTIVOS	155
C. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN SISTEMA..... DE EXCITACIÓN	157
D. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN	158
DE LAS UNIDADES DE RIO ESCONDIDO	
E. CAIDA DE COMPENSACIÓN REACTIVA	159
DIFERENCIAL	
F. BASES DE DATOS IMPLEMENTADA EN EL PSS/E	164
PARA CORRIDAS DE FLUJOS Y DINÁMICA	
G. CONTROL SECUNDARIO DE VOLTAJE	167
H. PRUEBAS ESTÁTICAS AL COMPENSADOR DE	171
DE REACTIVOS	
I. SIMULACIÓN FLUJOS/DINAMICA EN PSS/E®	174
DE UNA RED DE POTENCIA	

LISTA DE FIGURAS

	Pagina
Fig. 1.1 Sistema de control de velocidad y de excitación	20
Fig. 2.2.1 Circuito monofásico	26
Fig. 2.2.2 Circuito equivalente de línea o cable	27
Fig. 2.2.3 Diagrama Vectorial de caída de Tensión	27
Fig. 2.3.1 Circuito básico de potencia.....	30
Fig. 2.3.2 Diagrama Fasorial, circuito fig. 2.3.1	30
Fig. 2.3.3 Diagrama Fasorial para carga con factor de Potencia atrasado.....	32
Fig. 2.3.4 Diagrama fasorial para carga reactiva inductiva	33
Fig. 2.3.5 Conexión de nodos a través de una reactancia	33
Fig. 2.3.6 Diagramas fasoriales para diferentes condiciones	34
Fig. 2.3.7 Esquema de control local típico	35
Fig. 2.3.8 Soporte de voltaje mediante control de voltaje	36
Fig. 2.4.1 Cambio en la Excitación del Generador	36
Fig. 2.4.2 Sistema elemental para analizar el efecto de cambios en el voltaje de generación	37
Fig. 2.4.3 Diagrama fasorial para analizar el cambio en el voltaje de generación	38
Fig. 2.4.4 Sistema de potencia elemental	38
Fig. 2.4.5 Sistema de potencia con dos generadores	39
Fig. 2.5.1 Inyección de potencia reactiva en el nodo de Carga	40
Fig. 2.6.1 Transferencia de Potencia entre dos fuentes	41
Fig. 2.6.2 Diagrama fasorial con $\delta = 0$	42
Fig. 2.6.3 Diagrama fasorial con I fuera de fase con ER	43
Fig. 2.6.4 Diagrama fasorial con I en fase con ER	44
Fig. 2.7.1 Línea de Transmisión	45
Fig. 2.7.2 Locus P-Q de un sistema sin compensar	48
Fig. 3.2.1 Tipos de sistemas de excitación o reguladores	50
de voltaje	
Fig. 3.2.1.1 Sistema de excitación o bloques tipo estático	51
Fig. 3.2.1.2 Diagrama a bloques del canal manual	52
Fig. 3.2.1.3 Diagrama esquemático de la representación del	52
canal automático en un sistema de excitación	
Fig. 3.4.1.1 Sistema de Excitación y compensador de Reactivos	54
Fig. 3.4.1.2 Sistema de Excitación rotatorio	54
Fig. 3.4.1.3 Diagrama esquemático de un compensador de carga	55
Fig. 3.4.2.1 Diagrama de conexión de terminales del generador y compensador de reactivos T2	57

	Pagina
Fig. 3.4.2.2 Diagrama vectorial de voltajes y corriente en eje directo.....	57
Fig. 3.4.2.3 en eje de cuadratura	58
Fig. 3.4.3.1 Diagrama conexión del compensador de reactivos fase T3.....	59
Fig. 3.4.3.2 Diagrama vectorial de voltajes y corriente en eje directo fase T3	60
Fig. 3.4.3.3 Diagrama vectorial de voltajes y corriente en eje cuadratura fase T3	60
Fig. 3.4.3.5 Diagrama vectorial de voltajes y corriente en eje cuadratura fase T3	61
Fig. 3.4.3.6 Diagrama conexión del compensador de reactivos fase T3 y T2	61
Fig. 3.4.3.7 Diagrama de conexión del generador a la red eléctrica	62
Fig. 3.4.3.8 Característica de pendiente debido a la magnitud de la reactancia	62
Fig. 3.4.3.9 Gráfica de curvas de ajuste de un compensador de reactivos	63
Fig. 3.4.3.10 Grafica de operación de unidades con compensador de reactivos implementado.....	64
Fig. 3.5.1 Conexión del compensador de reactivos	65
Fig. 3.5.2 Diagrama vectorial de voltajes del compensador de reactivos	65
Fig. 3.5.3 Diagrama vectorial de voltajes del generador y compensador de reactivos	66
Fig. 3.5.4 Diagrama de conexión del compensador de Reactivos ..	67
Fig. 3.5.5 Corrientes del generador y disposición de voltajes en el compensador de reactivos	67
Fig. 3.5.6 Gráfica vectorial de suma de voltajes en todo el rango de operación del compensador	68
Fig. 3.5.7 Diagrama vectorial de voltajes de generador y del compensador de reactivos	69
Fig. 3.5.1.1 Relación vectorial de salida de voltajes de CT y TP	69
Fig. 3.5.1.2 Diagrama a bloques del compensador de Reactivos	70
Fig. 3.5.1.3 Condiciones del sistema	71
Fig. 3.5.1.4 Vectores del compensador de reactivos	71
Fig. 3.5.1.5 Diagrama a bloques del Sistema de Excitación	72

	Pagina
Fig. 3.5.2.1 Diagrama vectorial de voltajes de generador y compensador de reactivos.....	73
Fig. 3.5.2.2 Conexión del compensador de reactivos en el Sistema de Excitación	73
Fig. 3.5.4.1.1 Diseño del Sistema de Excitación	78
Fig. 3.5.4.2.1 Diagrama a bloques de un Sistema de Excitación	79
Fig. 3.5.4.2.2 Sistema de Excitación o Regulador Automático de Voltaje con alimentación paralela	80
Fig. 3.5.4.3.1 Diagrama a bloques con configuración de simple Canal	81
Fig. 3.5.4.3.2 Diagrama a bloques de Configuración de doble Canal	82
Fig. 3.5.4.5.1 Diagrama a bloques de variables que afectan a la referencia del regulador	83
Fig. 3.5.4.5.2 Bloque de programación del ajuste de Referencia	84
Fig. 3.5.4.6.1 Curva de Ajuste	85
Fig. 3.5.4.6.2 Diagrama a bloques del Regulador de Potencia Reactiva	85
Fig. 3.5.4.8.1 Sistema de Excitación Digital	86
Fig. 3.5.4.8.2 Sistema de Excitación Digital con funciones Limitadoras	87
Fig. 3.5.4.8.3 Variables que afectan la característica de la referencia del sistema de excitación	88
Fig. 3.5.4.8.4 Variables que afectan la referencia del Sistema de Excitación	88
Fig. 3.5.4.8.5 Funciones limitadoras de P-Q	89
Fig. 3.5.4.8.6 Funciones Q_CONTROL y COSPHI_CONTROL	89
Fig. 3.5.4.8.7 Programación a bloques del Sistema de Excitación	90
Fig 3.5.4.10.1 Rango de variación del valor de referencia	92
Fig. 3.5.5.1 Regulación de voltaje versión: caída y Var/PF	94
Fig. 3.5.5.2 Curva de capacidad de un generador	94
Fig. 3.5.5.2.1 Representación de un sistema con impedancia en la línea	95
Fig. 4.2.1 Representación de un sistema con admitancias	100

	Pagina
Fig. 4.2.2 Potencia entregada al bus k	101
Fig. 4.2.3.1 Generador equivalente de Thévenin	103
Fig. 4.2.3.2 Circuito de potencia con banco de capacitores	105
Fig. 4.4.1 Modelado del Generador como Nodo P_V y P_Q	107
Fig. 4.4.2 Representación Fasorial del Generador Síncrono	108
Fig. 4.4.3 Sistema de potencia en PSS/E®	112
Fig. 4.4.4 Sistema de potencia Anderson con diez nodos	113
Fig. 4.4.5 Sistema de potencia Anderson con doce nodos	114
Fig. A.1.- Diagrama a bloques de un Sistema de	150
Excitación Digital (Marca ABB modelo Unitrol)	
Fig. A.2.- Programación de un Sistema de Excitación	151
Digital, Transferencia de Canales	
Fig. A.3.- Programación de un Sistema de Excitación	152
Estrategia de control Q y Cos	
Fig. A.4.- Programación de un Sistema de Excitación	153
Estrategia Cos p	
Fig. C.1.- Sistema de Excitación marca Mitsubishi	157
Fig. E.1.- Circuito compensador de reactivos en dos	159
unidades	
Fig. E.2.- Circuito compensador de reactivos con	159
interruptor	
Fig. E.3.- Vectores de voltaje	160
Fig. E.4.- Representación vectorial de voltajes	160
y corrientes	
Fig. E.5.- Diagrama vectorial voltaje resistor	161
Fig. E.6.- Laso de corriente en circuitos.....	162
compensadores	
Fig. F.1.- Modelo librería Compensación reactiva modo de cruce ...	165
Fig. F.2.- Modelo librería Compensación Reactiva (Reactancia) ...	166
Fig. F.3.- Modelo librería Compensación Reactiva (Impedancia) ...	166
Fig. G.1.- Laso de Control secundario de voltaje	170
Fig. H.1.- Diagrama esquemático Disposición del compensador	171
de reactivos	

LISTA DE GRAFICAS

	Pagina
Grafica 5.1.1.1 Grafica de Compensación Reactiva Nodos 200 y 201 Red de Potencia de 3 nodos Impedancia 0.8 p.u.	117
Grafica 5.1.2.1 Grafica de Compensación Reactiva Nodos 200 y 201 Red de Potencia de 3 nodos Impedancia 0.8 p.u.	118
Grafica 5.1.3.1 Grafica de Compensación Reactiva Nodos 200 y 201 Red de Potencia de 3 nodos Impedancia 0.4 p.u.	119
Grafica 5.3.1.1 Grafica de Compensación Reactiva Nodo 3 Red de Potencia Anderson Impedancia 0.10 p.u.	121
Grafica 5.3.1.2 Grafica de Compensación Reactiva Nodos 3 y 10 Red de Potencia Anderson Impedancia 0.1 p.u.	122
Grafica 5.3.2.1 Grafica de Compensación Reactiva Nodo 2 red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje	123
Grafica 5.3.2.2 Grafica de Compensación Reactiva Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje	123
Grafica 5.3.3.1 Grafica de Compensación Reactiva Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve Sin compensador de reactivos	125
Grafica 5.3.4.1 Grafica de Compensación Reactiva Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve Sin compensador de reactivos entre buses 3 y 10	126
Grafica 5.3.5.1 Grafica de Compensación Reactiva Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 Con compensador de reactivos	128
Grafica 5.3.6.1 Grafica de Compensación Reactiva Nodo 2 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve Voltaje, U#3 y4 sin y U#2 con compensación	130
Grafica 5.3.6.2 Grafica de Compensación Reactiva Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve Voltaje, U#3 y 4 con compensación reactiva	130

Grafica 5.3.6.3 Grafica de Compensación Reactiva	131
Nodo 4 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve	
Voltaje U#3 y 4 con compensación reactiva	
Grafica 5.3.7.1 Grafica de Compensación Reactiva	133
Nodo 3 Red de Potencia Anderson, se mueve	
Voltaje U#3 y 4 y con diferente compensación	
Grafica 5.3.7.2 Grafica de Compensación Reactiva	133
Nodo 4 Red de Potencia Anderson, se mueve	
Voltaje U#3 y 4 y con diferente compensación	
Grafica 5.3.8.1 Grafica de Compensación Reactiva	136
Nodo 2 Red de Potencia Anderson, se mueve	
Voltaje U#3 y 4 y con diferente compensación	
Grafica 5.3.8.2 Grafica de Compensación Reactiva	136
Nodo 3 Red de Potencia Anderson, se mueve	
Voltaje en U#2. U#3 y 4 diferente compensación	
Grafica 5.3.8.3 Grafica de Compensación Reactiva	137
Nodo 4 Red de Potencia Anderson, se mueve	
Voltaje en U#2. U#3 y 4 diferente compensación	
Grafica B.1 curvas del Compensador de Reactivos	156

LISTA DE TABLAS

	Pagina
Tabla 2.4.5 Comportamiento del sistema con Diferentes voltajes de generación	40
Tabla 3.5.4.1 Tiempos de ejecución de diferentes Tareas del Sistema de Excitación	90
Tabla 5.1.1.1 Voltaje y Potencia reactiva	117
Nodos 200 y 201 Red de Potencia 3 nodos Impedancia 0.8 p.u.	
Tabla 5.1.2.1 Voltaje y Potencia reactiva.....	118
Nodos 200 y 201 Red de Potencia 3 nodos Impedancia 0.8 p.u.	
Tabla 5.1.3.1 Voltaje y Potencia reactiva	119
Nodos 200 y 201 Red de Potencia 3 nodos Impedancia 0.4 p.u.	
Tabla 5.2.1 Compensación reactiva	120
Tabla 5.3.1.1 Voltaje y Potencia reactiva	121
Nodos 3 Red de Potencia Anderson Impedancia 0.10 p.u.	
Tabla 5.3.1.2 Voltaje y Potencia reactiva	122
Nodos 10 Red de Potencia Anderson Impedancia 0.10 p.u.	
Tabla 5.3.1.3 Voltaje y Potencia reactiva	122
Nodos 9 Red de Potencia Anderson Impedancia 0.10 p.u.	
Tabla 5.3.2.1 Voltaje y Potencia reactiva	124
Nodo 2 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3 y 10	
Tabla 5.3.2.2 Voltaje y Potencia reactiva	124
Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3 y 10	
Tabla 5.3.2.3 Voltaje y Potencia reactiva	124
Nodo 10 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3 y 10	
Tabla 5.3.2.4 Voltaje y Potencia reactiva	124
Nodo 9 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3 y 10	

	Pagina
Tabla 5.3.3.1 Voltaje y Potencia reactiva	125
Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#3 se mueve voltaje. Sin compensación Nodo 3 y 10	
Tabla 5.3.3.2 Voltaje y Potencia reactiva	125
Nodo 9 Red de Potencia Anderson U#3 se mueve voltaje. Sin compensación Nodo 3 y 10	
Tabla 5.3.3.3 Voltaje y Potencia reactiva	126
Nodo 3 a 9 Red de Potencia Anderson U#3 se mueve voltaje. Sin compensación Nodo 3 y 10	
Tabla 5.3.4.1 Voltaje y Potencia reactiva	127
Nodo 2 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Sin compensación Nodo 3 y 10	
Tabla 5.3.4.2 Voltaje y Potencia reactiva	127
Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Sin compensación Nodo 3 y 10	
Tabla 5.3.4.3 Voltaje y Potencia reactiva	127
Nodo 9 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Sin compensación Nodo 3 y 10	
Tabla 5.3.4.4 Voltaje y Potencia reactiva	127
Nodo 3 a 9 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Sin compensación Nodo 3 y 10	
Tabla 5.3.5.1 Voltaje y Potencia reactiva	128
Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.5.2 Voltaje y Potencia reactiva	129
Nodo 10 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.5.3 Voltaje y Potencia reactiva	129
Nodo 10 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.5.4 Voltaje y Potencia reactiva	129
Nodo 11 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.5.5 Voltaje y Potencia reactiva	129
Nodo 12 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.6.1 Voltaje y Potencia reactiva	131
Nodo 2 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	

	Pagina
Tabla 5.3.6.2 Voltaje y Potencia reactiva	131
Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.6.3 Voltaje y Potencia reactiva	132
Nodo 4 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.6.4 Voltaje y Potencia reactiva	132
Nodo 10 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.6.5 Voltaje y Potencia reactiva	132
Nodo 11 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.6.6 Voltaje y Potencia reactiva	132
Nodo 12 Red de Potencia Anderson U#2 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.7.1 Voltaje y Potencia reactiva	134
Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.7.2 Voltaje y Potencia reactiva	134
Nodo 4 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.7.3 Voltaje y Potencia reactiva	134
Nodo 10 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,11 y 4,12	
Tabla 5.3.7.4 Voltaje y Potencia reactiva	134
Nodo 11 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,4 y 4,12	
Tabla 5.3.7.5 Voltaje y Potencia reactiva	135
Nodo 12 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,4 y 4,12	
Tabla 5.3.8.1 Voltaje y Potencia reactiva	137
Nodo 2 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,4 y 4,12	
Tabla 5.3.8.2 Voltaje y Potencia reactiva	137
Nodo 3 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,4 y 4,12	
Tabla 5.3.8.3 Voltaje y Potencia reactiva	138
Nodo 4 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,4 y 4,12	

	Pagina
Tabla 5.3.8.4 Voltaje y Potencia reactiva	138
Nodo 10 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,4 y 4,12	
Tabla 5.3.8.5 Voltaje y Potencia reactiva	138
Nodo 11 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,41 y 4,12	
Tabla 5.3.8.6 Voltaje y Potencia reactiva	138
Nodo 12 Red de Potencia Anderson U#3 y 4 se mueve voltaje. Compensación Nodo 3,4 y 4,12	
Tabla 5.4.1. Compensación reactiva	139
Cruce de corriente.	
Tabla B.1. Compensador de Reactivos	155
Tabla F.1. Base de Datos de Flujos	164
Tabla F.2. Base de Datos de Dinámica	164

NOMENCLATURA

ϕ :	Angulo De factor de potencia
δ :	Integración Compensador de corriente reactiva
s :	Operador de Laplace
V :	Voltaje
Q :	Potencia reactiva
P :	Potencia real
V :	Voltaje entre fases
I :	Corriente de fase
R :	Resistencia
$\frac{jB}{2}$:	Admitancia
jX :	Impedancia
V_g :	Voltaje del Generador
V_C :	Voltaje de la Carga
Z :	Impedancia
I_r :	Corriente resistiva
I_x :	Corriente reactiva
q_a :	flujo de reactivos
q_b :	Flujo de reactivos
V_{ts} :	Voltaje entre fases t y s
I_s :	Corriente de fase
X_t :	Impedancia de Transformador
$G_{1,2}$	Generador 1 y 2
V_{in} :	Voltaje de entrada
V_{5a} :	Voltaje 5a
I_d :	Corriente de eje directo
I_q :	Corriente de eje en cuadratura
90 E, R	Referencia del canal Auto
70 E, R	Referencia del canal Manual
If:	Corriente de campo
Efd:	Voltaje de campo

ABREVIATURAS

<i>MEL:</i>	Limite de mínima excitación (Minimum excitation limiter)
<i>CCR:</i>	Compensador de corriente reactiva
<i>RAT:</i>	Regulador Automático de voltaje
<i>Fp:</i>	Factor de potencia
<i>CEV:</i>	Compensador estático de var's
<i>K_v:</i>	Kilo volt
<i>CPU:</i>	Unidad Central de Procesamiento (Central process unit)
<i>PSS:</i>	Estabilizador de Potencia (Power system stability)
<i>SSC:</i>	Sistema de corto circuito (Short system circuit)
<i>E_{fd}:</i>	Voltaje de campo
<i>V_{ref}:</i>	Voltaje de referencia
<i>RAT:</i>	Regulador de Tensión
<i>RAV:</i>	Regulador de Velocidad
<i>PSS/E[®]:</i>	Simulador de Sistemas de Potencia para Ingenieros (Power System Simulator for Engineering)
<i>WSCC:</i>	Western System Coordinating Council
<i>RECAP:</i>	
<i>SCRX:</i>	
<i>Q_{ss}:</i>	Quasi-steady-state
<i>Var:</i>	Volts-amperes reactivos
<i>Droop:</i>	Caída
<i>Tc:</i>	Transformador de corriente
<i>Tp:</i>	Transformador de voltaje
<i>ABB:</i>	Asea Brown Boveri
<i>CT:</i>	Central Térmica
<i>PTI:</i>	Tecnologías de Potencia Internacional (Power Technologies International)
<i>OEL:</i>	Limite de sobre-excitación (Overexcitation Limiter)
<i>FACT:</i>	Sistemas de Transmisión Flexible en CA. (Flexible ac Transmisión System)

CAPITULO I.- INTRODUCCIÓN.

1.1.- ANTECEDENTES Y GENERALIDADES.

Los generadores que integran los sistemas eléctricos de potencia, son operados en paralelo con el fin de obtener una buena economía en su operación, así como proporcionar una mayor confiabilidad al sistema en el que están sincronizados. Esta economía se obtiene por medio de la selección de la suficiente generación para alimentar la demanda de la carga en cualquier instante de tiempo. Esto se logra operando a cada generador muy cerca de su máxima capacidad, punto en el cual el combustible necesario para producir dicha potencia es el más eficiente.

La confiabilidad en el sistema es proporcionada por los mismos generadores que están operando sincronizados a la red, pues al dispararse uno de ellos, el resto de los generadores se repartirán la carga excedente.

Para que esto suceda, es necesario que el centro de despacho y operación del sistema, considere la suficiente energía de regulación de reserva en los generadores que están sincronizados y que sus sistemas de gobierno estén libres para poder participar en la regulación primaria.

La regulación primaria, es el concepto que se maneja para identificar la respuesta del regulador de velocidad; que integra a la turbina del generador, ante variaciones de velocidad o frecuencia que se presente en el sistema en el cual se encuentra conectado.

La operación paralela de los generadores requiere de sistemas de control para que estos puedan realizar una operación confiable y segura; satisfaciendo así los requisitos de la carga y las pérdidas, así como las demandas establecidas por el sistema. Estos sistemas de control se pueden clasificar en dos: el sistema regulador de velocidad y el sistema de excitación que controla el voltaje en terminales del generador.(Kundur)

El regulador de velocidad abarca el control de frecuencia-potencia real del generador y el sistema de excitación el control de voltaje-potencia reactiva, conocidos también como lazos de frecuencia-potencia y voltaje-reactivos en los sistemas eléctricos de potencia (Kundur).

Es común recurrir a esta separación debido a que en estado estacionario; o régimen estable, el sistema de excitación y velocidad se pueden analizar en forma independiente sin tener mucho margen de error en las consideraciones de su operación, y comportamiento ante pequeñas variaciones se puede considerar como lineal su comportamiento. (Kundur).

Para el caso del regulador de velocidad el lazo de frecuencia-potencia tiene una característica de respuesta el cual es conocido como “estatismo” o “speed droop” (caída de velocidad), esta característica es una línea con pendiente negativa compuesta por los valores de potencia real en el eje de las x y frecuencia en el eje de las y.

En el sistema de excitación, la característica de respuesta de voltaje-reactivos es conocido como “estatismo de reactivos”, siendo esta característica una línea con una pendiente negativa, compuesta por los valores de potencia reactiva en el eje de las x y voltaje de terminales del generador en el eje de las y; esto de acuerdo a que tipo de compensación se desea realizar y considerando el caso anteriormente descrito, es para compensar la caída de tensión que se genera en la reactancia del transformador de máquina o controlar el nivel de voltaje en un punto de la línea de transmisión (Kundur). La característica de compensación de potencia reactiva, proporcionada por el compensador de reactivos; cuenta con ajuste, siendo su rango más común entre 0 y 10 %, para el caso de tecnología analógica y digital -20 a +20 %, considerándose suficiente para contrarrestar la caída de tensión debido a la corriente que fluye por la impedancia del transformador que está conectado al generador. La función del transformador del generador es elevar el voltaje del generador al nivel que se conectará al sistema eléctrico de potencia.

Por lo general el nivel de voltaje en terminales de los generadores es de 13.8 a 21 Kv's., esto está regido más que todo por el nivel de aislamiento que se necesita tener entre el estator y la conexión de tierra del generador.

Por medio del transformador de máquina, el voltaje es elevado a 115, 230 o 400 Kv's según nivel de voltaje de operación de la red. Las impedancias de los transformadores varían entre 4 y 7 % (Elger).

En los sistemas de excitación del tipo estático, la función compensadora de reactivos es del tipo analógico; esto es, está integrada por elementos resistivos, amplificadores operacionales y por transformadores los cuales realizan la función de compensación (manual de operación de sistema Excitación Westinghouse).

Para el caso de los compensadores de reactivos digitales; ya que el sistema del cual forman parte, es un sistema de excitación Digital; esto es, cuenta con tarjetas de entradas/salidas analógicas, digitales y CPU's para realizar la función de control; la función compensadora está desarrollada por medio de software y el rango de ajuste es de -20 a 20 % (Manual de operación Sistema de Excitación ABB).

1.2.- REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.

Desde un inicio se han realizado esfuerzos para mejorar la operación de los sistemas eléctricos de potencia y de generadores conectados a la red; ante este reto, los ingenieros y fabricantes han diseñado funciones adicionales que operen a través de los sistemas de control del generador con el fin de poder mejorar su desempeño en el sistema eléctrico de potencia.

Para el caso del regulador de velocidad, cuya respuesta en el tiempo se considera lenta en comparación con otras variables del sistema de potencia, se cuenta con la función de valvuleo rápido, la cual es activada por ciertas condiciones de operación del generador y turbina; por ejemplo, cuando el generador se encuentra a máxima carga y hay una variación de frecuencia considerable, esto es un desbalance entre el par eléctrico y el par motor, se tiene un par acelerante debido al desequilibrio traduciéndose en una variación de velocidad, el par acelerante es positivo lo cual significa que la carga es menor que la potencia generada; esto es, el par motor es mayor, lo cual se traduce en un aceleramiento del conjunto turbina-generador.

El valvuleo rápido permite disminuir el par motor y evitar de esta forma que la turbina (dispositivo que proporciona el par motor al generador) llegue a condiciones de disparo ocasionado la pérdida del generador y agravar el desbalance entre el par motor y par eléctrico en el sistema de potencia, pudiéndose presentar una condición de operación no

Compensadores de Corriente Reactiva

deseada en el sistema; debido a la variación de frecuencia que se haría presente evitando así, un posible colapso (Kundur).

Para el caso del Sistema de Excitación, cuya respuesta en el tiempo es más rápida, esto permite que el sistema cuente con tipo de funciones que contribuyan en la estabilidad del sistema eléctrico de potencia en zonas de operación que son dañinas al generador, en la repartición de potencia reactiva que se presente por variación del voltaje en terminales; para el caso de estabilidad de oscilaciones de potencia, las cuales pueden ser en el rango de 0.1 hasta 3.0 hertz, clasificándose en oscilaciones del tipo: local, en un punto de conexión entre unidades; y entre áreas, abarcando grupos de máquinas. Cuenta con la función estabilizadora de potencia, conocida como estabilizador de potencia la cual se abrevia como PSS, siglas en inglés (Power System Stability). (ver figura 1.1 donde se muestra los lazos de los sistemas de control de velocidad y voltaje en el generador) (Elger)

Esta función estabilizadora de potencia real, es una función que a primera instancia parecería que debería residir en el regulador de velocidad, pero como ya se mencionó anteriormente, los tiempos de respuesta de este dispositivo son muy altos, no llega a tener influencia alguna; en cambio, debido a que el sistema de excitación tiene tiempos de respuesta bajos, altas ganancias y una rápida respuesta ante transitorios, lo cual a pesar de influir en forma negativa en los primeros ciclos del transitorio que sufra el sistema, el beneficio del amortiguamiento obtenido de la potencia real ante estas condiciones es justificación suficiente para incluir esta función en el Sistema de Excitación.

El Sistema de Excitación cuenta con funciones protectoras y limitadoras necesarias para proteger al generador; siendo estas: función limitadora de sobre excitación y protecciones de sobre excitación que evita que el generador opere en regiones durante periodos de tiempo prolongado durante una falla que pueden ser dañinas. Otra de las protecciones con las que cuenta, es el caso de conmutación del canal automático a canal manual debido a una condición de sobre-excitación, el elemento protector actúa con un determinado tiempo de retardo realizando la conmutación a canal manual para evitar la pérdida del generador, a consecuencia de la operación de la protección eléctrica de sobre-excitación del generador.

Tiene las funciones limitadoras de Sobreexcitación y Baja excitación, más conocidas como MEL y OEL, (mínimum excitation limiter y máximum excitation limiter, respectivamente), como su nombre lo indica, su función es proteger al generador cuando se encuentre operando en estas regiones.

La función compensadora de reactivos, tema de interés del presente documento, es la de aportar potencia reactiva según varíe el voltaje en terminales del generador, de acuerdo a una característica de respuesta de esto con el fin de aumentar el nivel de voltaje permitiendo de esta forma compensar la caída de tensión que se genera en la reactancia del generador, del transformador o de la línea.

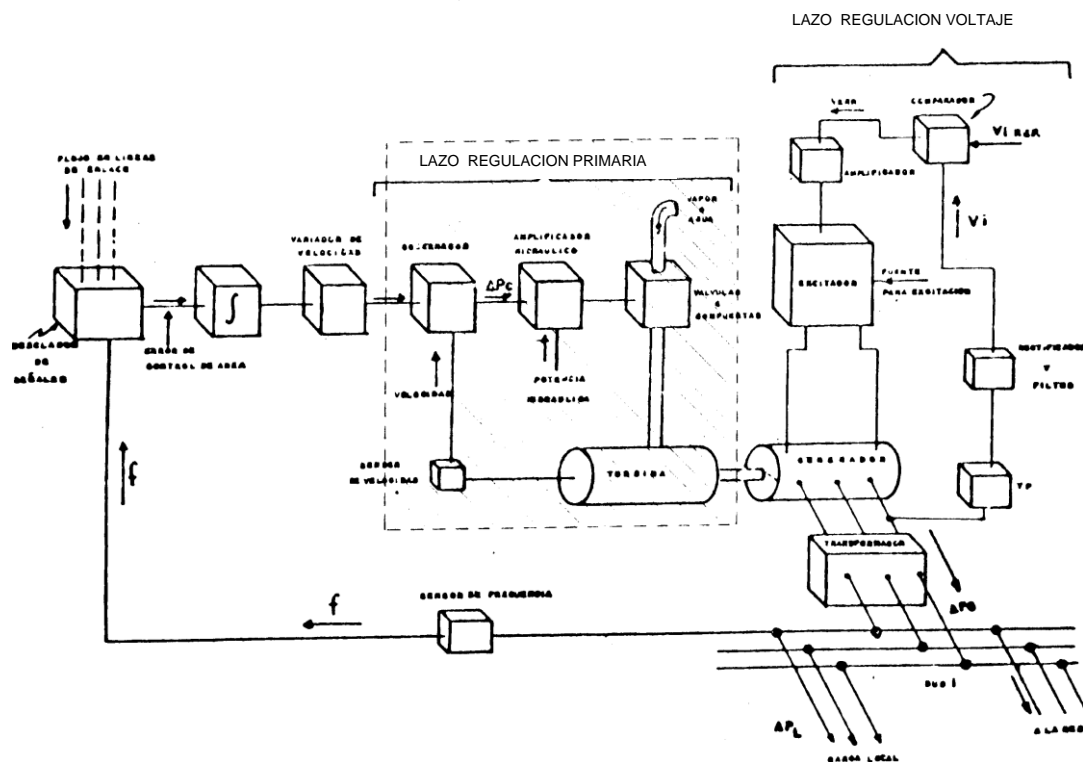


Figura 1.1 Sistema de Control de Velocidad y de Excitación

Es de pensar que esta función fue una de las primeras que se implementaron, ya que lo primero que se observó al estar operando los generadores en paralelo fue el flujo de reactivos que se establecía entre los generadores conectados en un mismo nodo ante las variaciones de voltaje que se presentaban en el sistema eléctrico o los ajustes de perfil de voltaje realizados por el operador de la planta. Las primeras funciones compensadoras de reactivos que se implementaron fueron del tipo eléctrico, necesitándose solamente para su implementación transformadores, reactores y resistencias. Los transformadores necesarios para implementar las señales de voltaje y corriente del generador, los reactores o transformadores para proporcionar el requisito de desfaseamiento o vector de voltaje adecuado para ser sumado con el vector de voltaje de terminales del generador modificando así el voltaje de retroalimentación en terminales del generador al sistema de excitación. Su función es simple, del voltaje de terminales y corriente de fase b del generador, se determina la magnitud y polaridad de la potencia reactiva que se necesita para compensar los niveles de corrección en la caída de voltaje del generador y con esto introduce un error en la retroalimentación del sistema de excitación dando como resultado un incremento o disminución de la potencia reactiva en el generador de acuerdo al ajuste realizado.

El ajuste de operación se establece por medio de un potenciómetro, que en unos casos puede ser burdo y fino, el burdo comprende la escala mayor o total de graduación y la fina comprende un rango menor de ajuste.

El ajuste esta graduado en porciento el cual representa el porciento de la potencia reactiva en p.u. que el generador entregaría o absorbería del sistema de potencia, lo cual nos proporcionaría una característica de ajuste de voltaje-potencia reactiva conocida como “estatismo de reactivos”, estableciendo así una operación adecuada y necesaria en la operación de los generadores en paralelo, de tal forma que la distribución de la potencia reactiva sería equitativa entre ellos, principalmente cuando estén conectados a un mismo nodo.

El manejo de Potencia reactiva en forma equitativa entre generadores, contribuye a la mejora del perfil del voltaje en el punto de conexión y se puede extender hasta la compensación de la(s) línea(s) cercana(s) conectada(s) al nodo (s) del generador(es).

A consecuencia del crecimiento y desarrollo de la tecnología; se tiene una emigración del control de los sistemas de excitación analógicos a los sistemas de excitación digitales, la función compensadora de reactivos ha sufrido modificaciones en cuanto a su estructura física, primero estuvo integrada por tecnología electro-magnética (elementos inductivos y resistencias), posteriormente surgió la tecnología estática (elementos inductivos, resistencias y amplificadores operacionales); y por último, la integración digital o tecnología Digital; que para este caso, no se cuenta con elementos físicos; ya no cuenta con transformadores, ni inductores, ni amplificadores. Solamente se toman las señales de voltaje y corriente de terminales del generador suficientes para que el controlador (CPU) del sistema de excitación por medio de programación realice las funciones de control de las variables de interés; como es, funciones de limitación de sobre excitación, baja excitación, limitación de volts-hertz, pss (Estabilización de Potencia) y función compensadora de reactivos etc.

De esta forma por medio de programación o por medio de software se implementa la función compensadora de reactivos la cual continua con su filosofía de operación; esto es, la modificación de la señal de referencia con la que cuenta el sistema de excitación para que el generador aporte potencia reactiva de acuerdo a una característica y modifique la caída de voltaje a través de la impedancia del transformador del generador o caída de la línea de conexión.

1.3.- OBJETIVOS DE LA TESIS.

Contar con los fundamentos necesarios para poner en servicio la función compensadora de reactivos existente en los sistemas de excitación, observar los beneficios en perfiles de voltaje, manejo de reactivos en los nodos donde se encuentre operando la función compensadora, así como el beneficio en los flujos de reactivos en las líneas de transmisión que estén conectadas.

Determinar el ajuste de operación de la función compensadora según requisitos de potencia reactiva del nodo de conexión.

Análisis de la afectación de esta función compensadora en el desempeño del sistema de excitación ante diferentes condiciones de operación según requisitos dictados por el sistema eléctrico de potencia en el generador.

Establecer un procedimiento de pruebas para realizar la puesta en servicio de esta función compensadora de reactivos, así como las pruebas a desarrollar para evaluar su operación durante el mantenimiento preventivo.

La capacitación del personal que da mantenimiento a los sistemas de excitación para que puedan evaluar su operación; y como punto final, establecer, si es necesario realizar estudios de simulación digital para establecer los ajustes requeridos para que la función compensadora de reactivos opere adecuadamente.

1.4.- JUSTIFICACIÓN.

Conforme el sistema eléctrico de potencia crece, su operación demanda el implemento de funciones y sistemas que operen en forma automática que pueden contribuir a su calidad y desempeño. El evitar intervenciones manuales por parte del operador de las plantas o de subestaciones para mejorar parámetros pertenecientes al sistema eléctrico de potencia, como son los perfiles de voltaje, manejo de potencia reactiva, etc.

La puesta en servicio y operación de la función compensadora de reactivos que se encuentra implementada en cualquier sistema de excitación, representa un beneficio para la operación del sistema eléctrico de potencia ya que contribuye en la mejora de los perfiles de voltaje y manejo de reactivos en la operación paralela de generadores, lo cual se reflejará en un mejor desempeño de los generadores al tener esta función en servicio y un mejor manejo de la potencia reactiva en los nodos y en las líneas conectadas.

Desventajas

- 1.- Incrementa el mantenimiento preventivo y correctivo de los sistemas de excitación ya que incrementa los rangos de operación del equipo.
- 2.- Demanda de la formulación de un historial durante su operación para obtener datos de análisis y realizar mejoras en su operación y perfil de voltaje en el nodo de conexión.
- 3.- Realizar pruebas de verificación de su adecuada operación durante los mantenimientos preventivos a los sistemas de excitación.
- 4.- Desarrollar pruebas estáticas durante el mantenimiento preventivo del sistema de excitación para su evaluación preliminar de operación.
- 5.- Realizar estudios de flujos de Potencia para verificar el desempeño de la función compensadora de reactivos en el sistema de potencia

Ventajas

- 1.- Reducción de la participación del operador de sistema para mantener perfiles de voltaje dentro de sus rangos de operación, ya que esta función se realizaría en forma automática.
- 2.- Mejora de la operación del sistema eléctrico de potencia en el manejo de reactivos y en perfiles de voltaje de los nodos que cuentan con generadores con esta función implementada.

- 3.- El implementar su operación en el Sistema Eléctrico de Potencia, permitirá el dar paso a la instalación de la función de regulación de voltaje secundario en la red de potencia; ya que esto representa la regulación primaria de voltaje/Reactivos instantánea en los nodos en que se encuentre en operación.

1.5.- APORTACIONES.

Se considera que el presente trabajo brindará las siguientes aportaciones:

- 1.- Las evidencias para justificar la puesta en servicio de los dispositivos conocidos como función compensadora de reactivos existentes en los sistemas de excitación.
- 2.- El procedimiento de puesta en servicio de tales dispositivos
- 3.- El procedimiento de pruebas de evaluación durante el mantenimiento preventivo.
- 4.- Análisis de desempeño y operación de dicha función en diferentes sistemas de excitación y nodos de conexión.

1.6.- ESTRUCTURA DE LA TESIS.

La tesis está estructurada con una introducción sobre la función compensadora de reactivos, se menciona las causas de su creación y los beneficios por la cual fue diseñada, la evolución que a tenido en el transcurso del tiempo y las funciones que se han desarrollado con el venir de la tecnología digital, esto es tratado en el capítulo I del presente trabajo, en el capítulo II se aborda la formulación y concepto eléctrico de la potencia reactiva, así como, los aspectos que abarcan el control de voltaje en la red eléctrica, en el capítulo III, se desarrolla todo el sustento técnico de la función compensadora de reactivos; tipos de operación y ajustes que se pueden realizar, que elementos la integran, que señales recibe para poder realizar su misión, sus puntos de conexión en el sistema de excitación; así como, sus rangos de operación.

En el capítulo IV, se realizan las simulaciones de su operación integrado a uno o varios sistemas de excitación, esto se realiza por medio del paquete de simulación digital a nivel industrial de sistemas eléctricos de potencia conocido como PSS/E®, donde se integran pequeños sistemas de potencia para realizar simulaciones; a nivel de flujos, para ver el comportamiento de la potencia reactiva; y, dinámica para probar la función compensadora en forma simulada a nivel de flujos por medio de los paquetes de simulación conocido como PSS/E (Power System Simulator for Engineering) y el Programa de simulación Digital de Sistemas Eléctricos de Potencia para estudios de Estabilidad Transitoria desarrollado por el IPN sección ESIME . Se realizan simulaciones de la operación de dicha función compensadora en regiones de operación que abarca o es campo de operación de otras funciones de los sistemas de excitación; como es, el estabilizador de potencia (PSS).

En el capítulo V, se realiza el análisis de las simulaciones realizadas en las pequeñas redes implementadas para tal fin; esto es, tanto en flujos como en dinámica donde se abarca la operación de la función compensadora de reactivos y de la estabilizadora de potencia ante situaciones de oscilación.

En el capítulo VI, se obtiene las conclusiones del presente trabajo, los resultados de las simulaciones realizadas, los beneficios esperados en la puesta en servicio de estos dispositivos de los sistemas de excitación y recomendaciones que se formulan desde el punto de vista de control de voltaje en los nodos de un sistema eléctrico de potencia.

Se agregó al documento una serie de anexos con el fin de tener una mayor cantidad de información sobre el tema abarcando lo siguiente:

Anexo A, el cual corresponde a diagrama y estructuración de un Sistema de Excitación Digital de la marca ABB.

Anexo B, comprende la Grafica de pruebas realizadas a un compensador de reactivos de un Sistema de Excitación de una unidad generadora.

Anexo C, D, contiene el diagrama esquemático y descripción de la estructura de un sistema de excitación analógico de la marca Mitsubishi de las unidades de la CT. Río Escondido.

Anexo E, trata sobre la caída de Compensación Reactiva Diferencial

Anexo F, muestra las Bases de datos implementadas en el PSS/E que fueron utilizadas para correr flujos y dinámica.

Anexo G, trata sobre el control secundario de voltaje

Anexo H, menciona el procedimiento para realizar pruebas estáticas al compensador de reactivos de los sistemas de excitación.

CAPITULO II.- CONTROL DE VOLTAJE.

2.1 INTRODUCCION.

Con la finalidad de comprender el concepto de flujo de potencia reactiva en un sistema eléctrico de potencia, como se origina en ella, como viaja en la red eléctrica y que es lo que haría la función compensadora de corriente reactiva existente en los Sistemas de Excitación; se procede a dar una breve explicación del concepto de la Potencia Reactiva en un Sistema Eléctrico de Potencia.

La potencia reactiva aparece en todos los sistemas de energía de corriente alterna. Muchas cargas consumen no solo potencia activa sino también reactiva. La red eléctrica misma consume y produce potencia reactiva. En la transmisión y distribución de la energía eléctrica se producen pérdidas de potencia reactiva debido a la inductancia en serie de transformadores, líneas aéreas y cables subterráneos. Las líneas y cables también generan potencia reactiva debido a la capacitancia en paralelo existente entre el conductor y tierra; no obstante, esta generación de potencia reactiva sólo cobra importancia a elevadas tensiones del sistema.

Durante el funcionamiento estable de un sistema de energía de c.a., la producción de potencia activa debe ser igual al consumo o carga, mas las pérdidas que se presentan en líneas y transformadores, ya que de lo contrario la frecuencia cambiará para establecer el equilibrio entre el par motor y el par eléctrico; esto es, el desequilibrio entre generación y carga. También existe un vínculo muy fuerte en el equilibrio de la potencia reactiva de un sistema de potencia y las tensiones. De por sí, siempre se encuentra presente, inherentemente el equilibrio de la potencia reactiva, con respecto al voltaje dentro de rangos de operación admisibles, de lo contrario se presentarían unas tensiones inadmisibles; esto es, si el equilibrio no fuera correcto. El exceso de potencia reactiva en un área, significa altas tensiones, mientras que su carestía se supone condiciones de bajas tensiones. El equilibrio de la potencia reactiva en un sistema de energía también influye en las pérdidas activas de la red, en el calentamiento de los componentes y, en ciertos casos, en la estabilidad del sistema de energía.

A diferencia del equilibrio de la potencia activa, que se obtiene únicamente en los generadores, el equilibrio correcto de la potencia reactiva suele a menudo obtenerse en los generadores y mediante dispositivos reactivos especiales dispersos en la red, para producir o absorber la potencia reactiva. (manuales de operación de Compensadores de Potencia Reactiva de ABB)

El empleo de dispositivos reactivos en Sistemas de Transmisión, es decir, la compensación en serie y paralelo, es un método de compensación de la reactancia de la línea.

En los primeros sistemas de energía de c.a. no se empleaban dispositivos de compensación reactiva especiales, debido a estar los generadores próximos a las cargas. Al extenderse más las redes, las necesidades de potencia reactiva se incrementaron y se utilizaron motores síncronos, pequeños compensadores síncronos y capacitores estáticos en paralelo para la corrección del factor de potencia y abastecer las demandas de potencia reactiva y evitar que la potencia reactiva de los generadores viajase por el sistema de Transmisión. Pasaron entonces a instalarse compensadores síncronos cada vez mayores. (Manual de Operación de FACT's de ABB)

Junto con el desarrollo de capacitores más eficaces y económicos, se ha producido un aumento fenomenal en el empleo de capacitores en paralelo para proveer potencia reactiva, particularmente en los sistemas de distribución. Con la introducción de líneas de extra alta tensión, cobró importancia el empleo de reactores en paralelo y capacitores en serie y paralelo como dispositivos de compensación. El más reciente desarrollo es el compensador estático controlado por tiristores, que ya está bien establecido no solo en redes industriales de gran potencia sino también en sistemas de transmisión.

2.2 POTENCIA REACTIVA.

En una descripción vectorial de la tensión y corriente, la potencia reactiva suministrada a un circuito de c.a. es el producto de la tensión y la componente reactiva (I_q) de la corriente, estando esta componente de la corriente reactiva en cuadratura con la tensión.

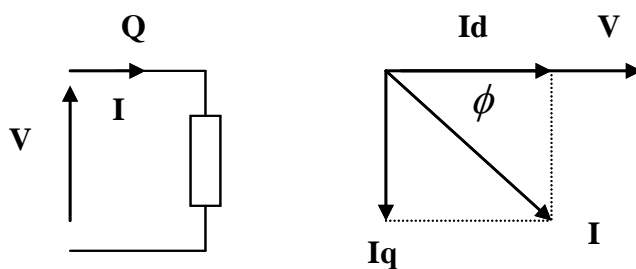


Fig 2.2.1 Circuito Monofásico

Para un circuito monofásico como el de la figura 2.2.1, la potencia reactiva Q viene dada por la fórmula:

$$Q = VI \sin \phi \quad 5$$

La unidad es el voltio-amperio reactivo (var). El signo de Q es cuestión de convenio; depende de la definición de la dirección de ϕ . El signo será tal que la potencia reactiva neta suministrada a un elemento inductivo sea positiva. Por consiguiente, la potencia reactiva neta suministrada a un elemento capacitivo será negativa. En el pasado, se ha empleado también el convenio del signo contrario, se dice que la potencia reactiva se produce o genera por máquinas síncronas sobre-excitadas y capacitores, consumiéndose o absorbiéndose por máquinas síncronas sub-excitadas, inductores, etc.

La demanda de potencia reactiva por parte de los consumidores varía de forma un tanto similar a la demanda de potencia activa. La demanda de potencia activa resultante en un sistema de energía varía aproximadamente según la variación de la carga total.

La demanda de potencia reactiva resultante podrá variar mucho más debido a las pérdidas variables de potencia reactiva en serie en las redes de transmisión.

Relación existente entre la Potencia Reactiva y la Tensión.

En lo referente al estudio de las tensiones terminales de un enlace de transmisión o de distribución, el enlace puede representarse por la impedancia en serie únicamente, si se incluyen las admitancias en paralelo del circuito equivalente en el tratamiento de las partes que conectan el sistema de energía (fig. 2.2.2). El enlace podrá ser una línea aérea, un cable subterráneo, un transformador o una combinación de estos elementos.

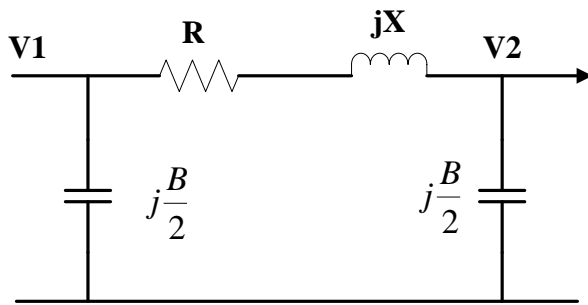


Figura 2.2.2 Circuito Equivalente de línea o cable

La diferencia escalar de tensión (la caída de tensión) está definida por:

$$\Delta V = V1 - V2$$

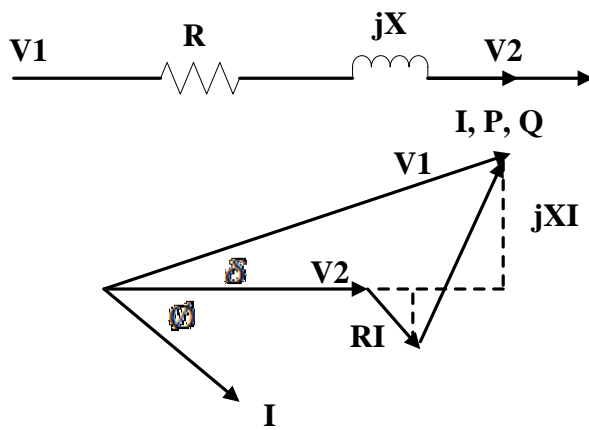


Fig 2.2.3 Diagrama Vectorial de caída de Tensión

El diagrama vectorial en la fig 2.2.3 muestra que se puede expresarse aproximadamente por las siguientes ecuaciones:

$$\Delta V = RI \cos \delta + XI \sin \delta \quad (10)$$

Compensadores de Corriente Reactiva

Pero:

$$P = VI \cos \phi \quad Q = VI \sin \phi$$

Sustituyendo en 10

$$\Delta V = R \left(\frac{P}{V_2 \cos \delta} \right) \cos \phi + X \left(\frac{Q}{V_2 \sin \delta} \right) \sin \phi$$

$$\Delta V = \left(\frac{RP + XQ}{V_2} \right) \quad (20)$$

Las ecuaciones 10 y 20 son más exactas cuando menor sea la diferencia del ángulo de tensión θ . Las ecuaciones suelen ser lo suficientemente exactas para los cálculos relativos a un solo enlace, si no se incluye una línea de transmisión larga. Los cálculos exactos para una red completa se realizan en la actualidad mediante programas de computador.

La ecuación 20 resulta útil y es normalmente lo suficientemente exacta, para todos los enlaces, para las discusiones cualitativas de la tensión en relación a la potencia reactiva. Para líneas y cables de transmisión (no de distribución), el valor X suele ser mucho mayor que el valor R. Para todos estos numerosos enlaces en que X es mucho mayor que el valor R, existirá evidentemente una influencia mucho mayor en el valor ΔV por Kvar de potencia reactiva que por Kw de potencia activa transmitida.

Cuando se suministra la potencia por un solo enlace (fig. 2.2.3), asumiendo que V1 es constante, V2 varía con los cambios en los valores P y Q. Las variaciones de la carga crearán variaciones de tensión si estas variaciones no se contrarrestan.

Esta es una característica general, y a veces problemática, de los sistemas de energía de c.a.

Hay tres métodos principales para controlar la tensión del sistema de energía:

- * Variando la excitación de los generadores por medio de sus sistemas de excitación.
- * Variando la relación de espiras de los transformadores mediante sus cambiadores de Tap's bajo carga modificando la relación de transformación.
- * Variando la compensación en paralelo, si se aplica.

Por compensación en paralelo se entiende la extracción o inyección de potencia reactiva, en un punto de un sistema de energía, mediante un dispositivo conectado en paralelo que se instala exclusivamente para este fin. La inyección de potencia reactiva, por ejemplo, produciéndola mediante un capacitor en paralelo, resulta en aumento de la tensión. La ecuación 20 y la figura 2.2.3 muestran cómo la compensación en paralelo influye en la tensión. Las direcciones de cambio de tensión mencionadas se producen debido a que la impedancia equivalente de la red tiene un carácter inductivo a la frecuencia fundamental.

La compensación en paralelo podrá ser fija, conmutable en pasos o del tipo de control continuo. Alrededor de la tensión nominal, el cambio de tensión ΔV , al cambiar un paso la compensación en paralelo, se expresa aproximadamente por la ecuación:

$$\Delta V = \frac{\Delta Q}{S_{SC}}$$

Donde:

ΔQ .- cambio en la inyección reactiva trifásica nominal Mvar

S_{SC} .- capacidad de corto circuito MVA

Naturalmente, los generadores adyacentes con reguladores de tensión y los transformadores adyacentes con variadores en carga de la relación de transformación controlados por relés de tensión, reducirán más o menos el cambio de tensión después de cierto tiempo.

La compensación en serie se ha empleado en un grado limitado para reducir la caída de tensión en circuitos de subtransmisión y de distribución. Por compensación en serie se entiende la compensación parcial de la reactancia en serie de la línea mediante un capacitor fijo en serie con la línea, reduciendo así la reactancia efectiva y la diferencia de tensiones.

En la actualidad, la compensación en serie sólo se emplea mayormente en líneas largas de Extra alta tensión, con la finalidad principal de mejorar la estabilidad de perturbaciones transitorias o para obtener una división de la potencia entre circuitos paralelos. Pero al mismo tiempo, la compensación en serie resulta muy beneficiosa en el control de tensiones y equilibrio de potencia reactiva, debido a las menores variaciones en los equilibrios netos de potencia reactiva de las líneas.

Relación Existente entre la Potencia Reactiva y las Pérdidas y carga térmica de los componentes de la Red.

En relación a la figura 2.2.3. y por las ecuaciones:

$$I = RP_2 + Q_2 \quad P_{perd} = R(P_2 + \frac{Q_2}{V_{22}})$$

Es evidente que la transferencia de potencia reactiva supone una corriente mas alta y por lo tanto mayores pérdidas y mayor carga térmica. Esta última podrá influir en la capacidad de los transformadores y cables.

2.3 CONCEPTOS BASICOS DE CONTROL DE VOLTAJE

En la operación de sistemas de potencia el control de voltaje es una función prioritaria. El objetivo de este control es ajustar todos los voltaje nodales dentro de una banda operativa. Esto hace que la solución del problema sea más compleja, comparada con el control de frecuencia, ya que se tiene un problema multivariable. Se debe recordar que en estado estable se tiene un valor de frecuencia único en el sistema, en cambio todos los voltajes nodales pueden ser diferentes en un sistema eléctrico de potencia.

En el análisis de este tema se relaciona el flujo de potencia reactiva con el perfil de voltaje del sistema, siendo muy importante la localización de fuente de potencia reactiva y la estructura del sistema de transmisión. Otra característica interesante del problema, que agrega complejidad a la solución, es la generación y consumo variable de potencia reactiva en elementos de transmisión y transformación.

2.3.1 FLUJO DE REACTIVOS – CONTROL DE VOLTAJE

Es común en la literatura asociar el problema de voltaje con la circulación de potencia reactiva. Esto se puede mostrar analizando el circuito de la fig. 2.3.1

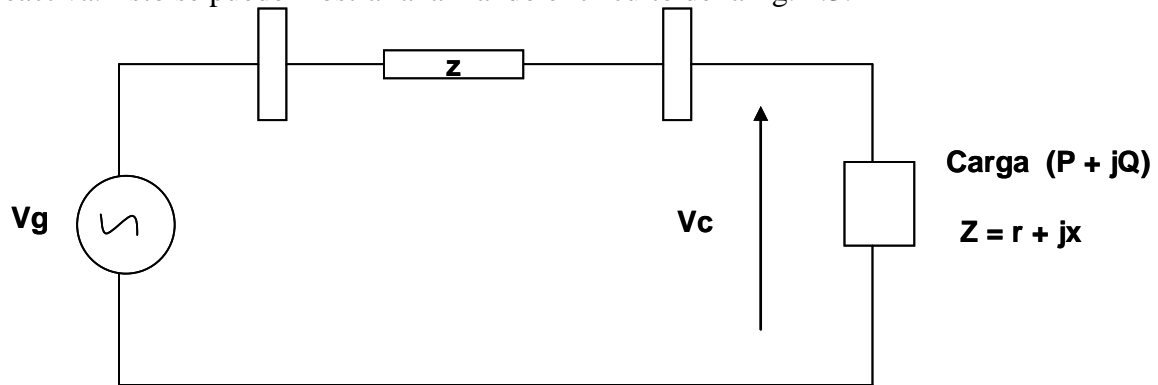


Fig. 2.3.1 Circuito básico de Potencia

Si en la figura 2.3.1 se considera que la carga consume sólo potencia activa, entonces el diagrama fasorial que relaciona el voltaje de generación (V_g) y el de carga (V_c) es el mostrado en la fig. 2.3.2

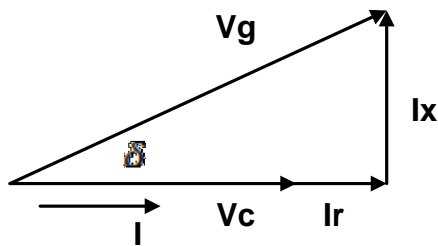


Fig. 2.3.2 Diagrama fasorial del circuito de la fig 2.3.1

La relación entre la corriente y la potencia de carga se expresa en la ecuación 2.1. En todos los desarrollos se utilizan magnitudes de corrientes y voltajes.

$$I = \frac{P}{V_c} \quad (2.1)$$

La relación entre voltajes se obtiene del diagrama fasorial de la fig 2.3.2

$$V_g^2 = (V_c + I_r)^2 + (I_x)^2 \quad (2.2)$$

Substituyendo la ecuación (2.1) se obtiene:

$$V_g^2 = \left(V_c + \frac{P}{V_c} r \right)^2 + \left(\frac{P}{V_c} x \right)^2 \quad (2.3)$$

En (2.3.3) se observa que las caídas de voltaje en fase y en cuadratura con V_c dependen de los valores de resistencia y reactancia del elemento de transmisión.

Como generalmente la relación $\frac{r}{x}$ es baja en sistemas de transmisión, la componente en fase será pequeña. Por otro lado, la componente en cuadratura no cambia significativamente la magnitud de V_c , solo causa el desfase entre voltajes. De esta forma;

$$\delta \cong \frac{P}{V_c V_g} x \quad (2.4)$$

Esto se puede deducir de:

$$\text{Sen } \delta = \frac{Ix}{V_g}$$

Se sustituye I en la ecuación

$$\text{Sen } \delta = \frac{\frac{P}{V_c} x}{V_g}$$

Lo cual nos da:

$$\delta = \text{Sen}^{-1} \frac{P}{V_c V_g} x$$

Y la caída de voltaje para ángulos pequeños es;

$$\Delta V \cong \frac{P}{V_c} r \quad (2.5)$$

El análisis de las ecuaciones (2.4) y (2.5) muestra:

- Que la carga activa afecta en mayor grado el desfase entre voltajes.
- El cambio en la magnitud del voltaje depende del valor de la carga, pero su efecto se reduce debido al valor de la resistencia.

Otro aspecto importante que se debe observar es que aún cuando la carga no consume potencia reactiva, el generador si está aportando reactivos al sistema. Esto se observa del diagrama de la fig. 2.3.2 con el voltaje V_g adelantado respecto a la corriente de carga. Aquí, la potencia reactiva que se inyecta en el extremo de envío se consume en la reactancia del sistema de transmisión, causando una caída de voltaje (Ix) en cuadratura con el voltaje de carga.

Un caso que ilustra el efecto del flujo de reactivos se tiene cuando la carga demanda potencia reactiva inductiva (factor de potencia atrasado).

El diagrama fasorial para este caso se muestra en la fig. 2.3.3

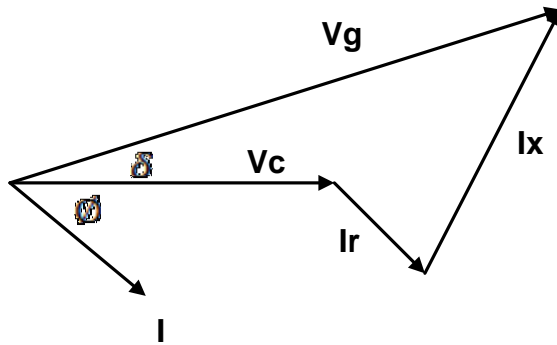


Fig. 2.3.3 Diagrama fasorial para carga con factor de potencia atrasado
La relación entre voltaje y corriente en la carga es la siguiente;

$$\frac{P}{V_C} = I \cos \phi \quad (2.6)$$

$$\frac{Q}{V_C} = I \sin \phi \quad (2.7)$$

Del diagrama fasorial de la fig. 2.3.3 se obtiene la relación entre voltajes.

$$V_g = (V_C + (I \cos \phi)r + (I \sin \phi)x)^2 + ((I \cos \phi)x - (I \sin \phi)r)^2$$

La expresión final se determina utilizando (2.6) y (2.7)

$$V_g^2 = \left(V_C + \frac{P}{V_C} r + \frac{Q}{V_C} x \right)^2 + \left(\frac{P}{V_C} x - \frac{Q}{V_C} r \right)^2 \quad (2.8)$$

Al analizar la ecuación (2.8) y la fig. 2.3.3 se concluye que la componente en fase con el voltaje de carga es la que tiene mayor efecto en la caída de voltaje del punto de generación a la carga.

$$\Delta V = \frac{P}{V_C} r + \frac{Q}{V_C} x \quad (2.9)$$

En (2.9) se observa a su vez que la demanda de potencia reactiva tiene mayor efecto en el cálculo de ΔV debido a que está multiplicada por la reactancia del elemento de transmisión.

Comparando los términos en (2.9) se obtiene;

$$\alpha = \frac{\frac{Q}{V_C} x}{\frac{P}{V_C} r} = \frac{Q}{P} \left(\frac{x}{r} \right) \quad (2.10)$$

De aquí que a medida que la relación $\frac{x}{r}$ aumenta (sistemas de transmisión en alta tensión) y que el factor de potencia difiere más de la unidad, el efecto de la corriente reactiva es mayor en el cambio de voltaje.

Analizando el diagrama de la fig. 2.3.3 se observa que el ángulo entre el voltaje de generación y la corriente es $(\phi + \delta)$, lo cual indica que el generador opera con un factor de potencia más atrasado que el de la carga.

En este caso se debe generar y transmitir la potencia reactiva de la carga y la potencia reactiva que se consume en el sistema de transmisión.

Otra condición operativa de interés se tiene cuando la carga en la fig. 2.3.1 sólo consume potencia reactiva inductiva. La relación fasorial para este caso se muestra en la fig 2.3.4

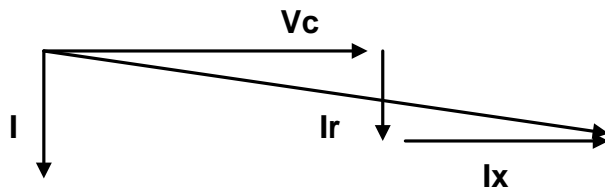


Fig. 2.3.4 diagrama fasorial para carga reactiva inductiva

Del análisis de las condiciones mostradas en la fig. 2.3.4 se obtiene;

$$\Delta V_c = \frac{Q}{V_c} x \quad (2.11)$$

Donde se aprecia el gran impacto de la corriente reactiva en la caída de voltaje, en este caso prácticamente en fase con el voltaje V_c .

Comparando las ecuaciones (2.5) y (2.11), que representan los casos extremos de tener una inyección activa y reactiva respectivamente, se observa que el mayor impacto de la inyección reactiva (2.11) es debido a la reactancia del elemento de transmisión, de esta forma la ecuación (2.11) es el término dominante en la caída de voltaje. En el caso general la ecuación (2.9) define las contribuciones de cada componente de la carga.

2.3.2 ECUACIONES DE FLUJO DE POTENCIA

Si se considera dos nodos unidos por una reactancia, Fig 2.3.5, el flujo de potencia reactiva se puede expresar en función de las magnitudes de voltaje y la diferencia angular.

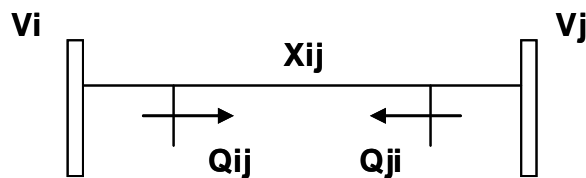


Fig. 2.3.5 Conexión de nodos a través de una reactancia.

La expresión resultante para el flujo de la i a j es la siguiente

$$Q_{IJ} = \frac{V_I}{X_{IJ}} (V_i - V_j \cos \delta) \quad (2.12)$$

En (2.12) se observa que el flujo de potencia reactiva depende del signo del término entre paréntesis. Es decir, de la diferencia de las magnitudes de voltaje entre los extremos del elemento. De esta manera, para diferencias angulares pequeñas, la potencia reactiva tenderá a circular del voltaje mayor al voltaje menor.

El consumo de potencia reactiva en el elemento de transmisión se obtiene sumando los flujos en direcciones opuestas

$$O_P = Q_{IJ} + Q_{JI}$$

De acuerdo a (2.12) se obtiene

$$O_P = \frac{V_I^2}{X_{IJ}} + \frac{V_J^2}{X_{IJ}} - \frac{2V_I V_J}{X_{IJ}} \cos \delta \quad (2.13)$$

Las pérdidas reactivas en (2.13) dependen en forma aproximada de la diferencia de voltajes al cuadrado. De esta forma, el consumo de reactivos en la reactancia tiene un comportamiento no-lineal, incrementando el consumo de reactivos a medida que se tiene una diferencia de voltaje mayor. Para ilustrar en forma esquemática el flujo de potencia reactiva se presentan los casos de la fig. 2.3.6

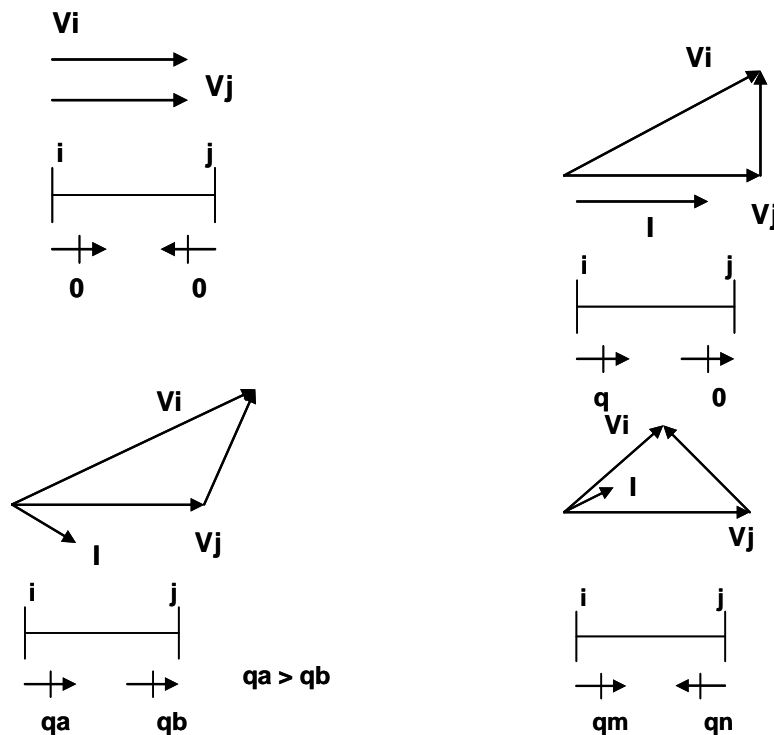


Fig. 2.3.6 Diagramas Fasoriales para diferentes condiciones de operación

Del análisis de las ecuaciones del flujo de reactivos y de los diagramas fasoriales se puede resumir lo siguiente:

- * El flujo de reactivos produce una caída de voltaje que depende de la reactancia del elemento de transmisión.
- * La diferencia de voltajes incrementa el consumo de potencia reactiva en la reactancia del elemento.
- * Las pérdidas reactivas tienen un comportamiento no-lineal, con cambios crecientes al tener una diferencia de voltaje mayor.
- * La distribución de flujos reactivos en los extremos de la línea depende de la corriente de carga y del consumo de reactivos en la reactancia de transmisión.

2.4 CONTROL DE VOLTAJE LOCAL

De acuerdo a los conceptos básicos presentados se puede decir que el problema básico para evitar la degradación del perfil de voltaje es eliminar o reducir el flujo de potencia reactiva en el sistema. Sin embargo, en sistemas reales las fuentes de reactivos no necesariamente están cerca de la carga, de ahí que se requiere cierto transporte de potencia reactiva.

La primera fase en el control de voltaje es tener nodos de voltaje controlado que definan en forma general el perfil de voltaje del sistema de excitación de generadores o la conexión continua de reactores o capacitores, en el caso de compensadores estáticos de var's.

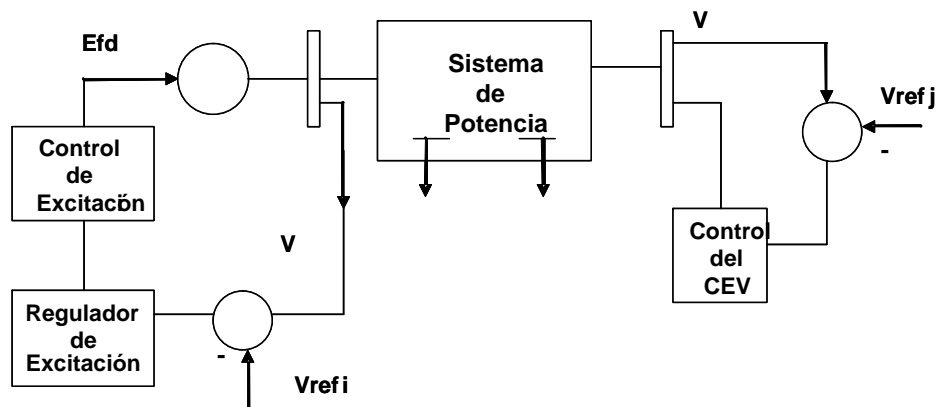


Fig. 2.3.7 Esquema de control local típico

Si el esquema de control mostrado en la fig. 2.3.7 se aplica en diversos puntos del sistema se tendrá la estructura básica que definirá el flujo de reactivos en la red. En forma esquemática la fig. 2.3.8 muestra como los nodos de voltaje controlado sirven de referencia (soporte) al perfil de voltaje del sistema.

Es importante señalar que en estado estable los controles mantendrán el voltaje del nodo controlado en el valor especificado. En cambio, ante perturbaciones, se tendrán cambios en los voltajes y el regreso a los valores de referencia dependerá de la respuesta dinámica del sistema de excitación, de la respuesta del control de CEV's o dispositivos suministradores de reactivos y de la inercia electromagnética de generadores.

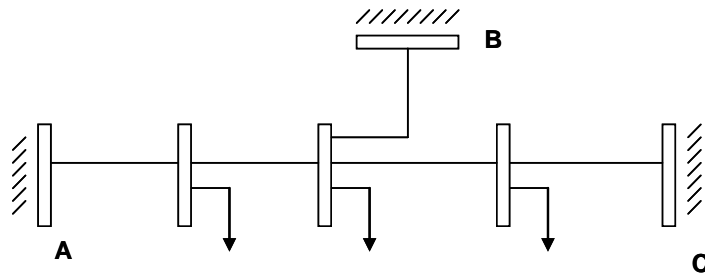


Fig. 2.3.8 Soporte de voltaje mediante control de voltaje local

En la fig. 2.3.8 los nodos A,B, y C son de voltaje controlado y mantienen el nivel de voltaje aportando la potencia reactiva requerida por las cargas y el sistema de transmisión.

En un caso real, las fuentes de reactivos son limitadas y solo podrán mantener el voltaje mientras los requerimientos de potencia reactiva del sistema estén dentro de la capacidad de la fuente. Si se llega a un límite, se pierde el soporte de reactivos y el control de voltaje en la zona donde se localiza la fuente.

De esta manera, en un sistema de potencia es muy importante la localización de las fuentes de reactivos, el objetivo en la ubicación es tratar de lograr un soporte de voltaje adecuado y reducir la transmisión de potencia reactiva a los puntos de carga.

Si, por otro lado, se tienen pocas fuentes de potencia reactiva y están alejadas eléctricamente de la carga, entonces se tendrá la degradación del perfil de voltaje debido a la transmisión de reactivos a grandes distancias. Se debe resaltar que este es un problema acumulativo, ya que al tener mayores diferencias de voltaje también se incrementa el consumo de reactivos en los elementos de transmisión, lo que a su vez causa una caída de voltaje mayor.

2.4.1 BALANCE DE POTENCIA REACTIVA

En un sistema de potencia los nodos de voltaje controlado actúan como compensadores de potencia reactiva, suministrando los reactivos necesarios, de acuerdo a las variaciones de la demanda, de manera de mantener el voltaje especificado (referencia).

La aportación de reactivos de las fuentes dependerá del voltaje de referencia que se controla. Así, por ejemplo, si se incrementa el voltaje de referencia que se controla, se incrementa el voltaje interno del generador, como resultado de un cambio en la corriente de campo, se tendrá un caso como el que se muestra en el diagrama fasorial de la fig. 2.4.1

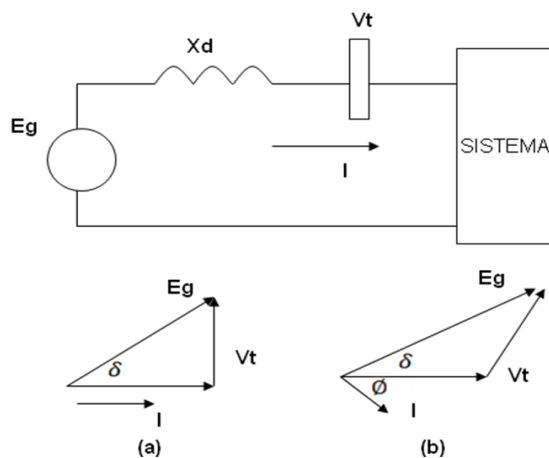


Fig. 2.4.1 Cambio en la excitación del generador

En la fig. 2.4.1a se presenta la condición antes del cambio, se tiene un factor de potencia unitario en terminales, sin embargo, internamente se tiene una inyección de potencia reactiva (corriente I atrasada con respecto a E_g) que se consume en la reactancia del generador. Esta es la condición que define el límite entre lo sobre o sub excitación de un generador.

En la fig. 2.4.1b se presenta el diagrama fasorial después de un cambio en la demanda de reactivos en el sistema, se mantiene la potencia activa sin cambio y el voltaje terminal constante.

En este caso, a través del sistema de excitación se incrementa la corriente de campo, y el voltaje interno de la máquina, y para mantener la potencia activa constante se ajusta el ángulo δ a δ' . Esta relación entre la corriente (I) y voltaje interno (E_g) es el mecanismo compensador para la potencia reactiva.

En la fig. 2.4.1b se observa que la inyección (interna) de potencia reactiva de la máquina parte se consume en la reactancia del generador y parte se inyecta al sistema (corriente atrasada con respecto al voltaje terminal). En este caso la máquina está sobreexcitada, ya que suministra los requerimientos internos del generador y los del sistema.

Un análisis similar se puede realizar cuando se modifica el voltaje de referencia de un generador, manteniendo el resto de los generadores del sistema sin cambio. Para ilustrar este comportamiento se utiliza el sistema y el diagrama fasorial de la fig 2.4.2

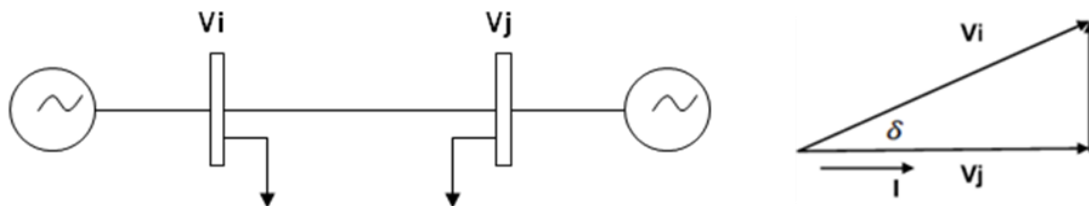


Fig. 2.4.2 Sistema elemental para analizar el efecto de cambios en el voltaje de generación.

En el diagrama fasorial de la fig. 2.4.2 se observa que la máquina i entrega potencia activa y reactiva al sistema, en cambio en el nodo j sólo se recibe potencia activa a través de la línea de transmisión.

Si se incrementa el voltaje V_i y se mantiene la potencia activa sin cambio, entonces se debe ajustar el ángulo δ para mantener la potencia activa (P).

$$P = \frac{V_i V_j}{x_{ij}} \text{Sen } \delta' \quad (2.14)$$

$$\text{Sen } \delta' = \frac{Px_{ij}}{V_i V_j} \quad (2.15)$$

Como el denominador en (2.15) crece, el ángulo δ debe ser menor que δ de esta manera, la corriente se debe ajustar en magnitud y fase para cumplir con la potencia activa transmitida y con relación de voltajes. En este caso la componente de la corriente en fase con el voltaje V_j debe ser la misma que antes del cambio.

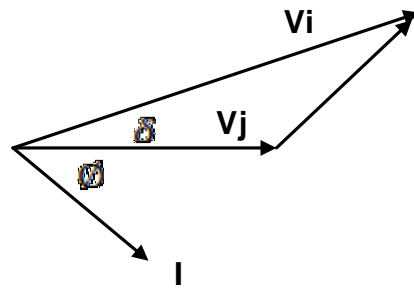


Fig. 2.4.3 Diagrama fasorial para analizar el cambio en el voltaje de generación V_i .

En la fig. 2.4.3 se observa que la inyección de potencia reactiva en el nodo i aumenta, ya que crece la magnitud de V_i , la corriente I y el ángulo entre estos fasores. Por otro lado, en el nodo j se recibe potencia reactiva del sistema de transmisión, la cual se consume en la carga o la debe absorber el generador en ese nodo.

El resultado de modificar el voltaje de generación es un cambio en el flujo de reactivos. Se tendrá un intercambio de potencia reactiva entre generadores, y como consecuencia se altera el perfil de voltaje del sistema. La efectividad del cambio (mejoramiento del perfil del voltaje) dependerá de que se reduzca el flujo de reactivos en las trayectorias de mayor impedancia.

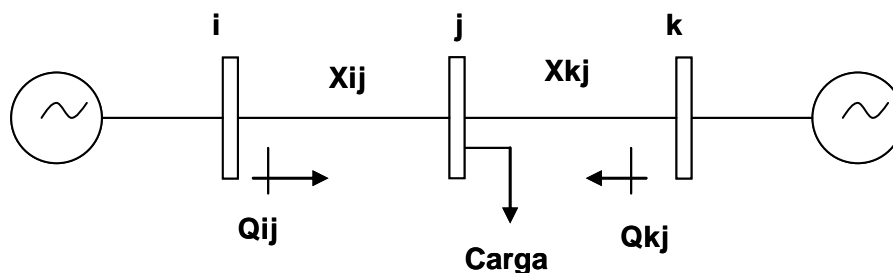


Fig. 2.4.4 Sistema de potencia elemental

En forma natural se tiene la tendencia a suministrar la potencia reactiva requerida por la carga a través de las líneas con menor impedancia. Esto se puede mostrar utilizando las ecuaciones del flujo de potencia reactiva en el sistema de la fig. 2.4.4

$$Q_{ij} = \frac{V_i}{X_{ij}} (V_i - V_j \cos \delta_{ij}) \quad (2.16)$$

$$Q_{kj} = \frac{V_k}{X_{kj}} (V_k - V_j \cos \delta_{kj}) \quad (2.18)$$

Si se considera que los voltajes de generación ($V_i = V_k$) y las diferencias angulares ($\delta_{ij} = \delta_{kj}$) son iguales, entonces;

$$\frac{Q_{ij}}{Q_{kj}} = \frac{X_{kj}}{X_{ij}} \quad (2.19)$$

La ecuación (2.18) muestra que la relación de flujos reactivos dependerá de las reactancias de las ramas. Así, si $X_{kj} = 4X_{ij}$, el flujo Q_{ij} será 4 veces mayor que el flujo Q_{kj} .

De esta forma, a medida que la reactancia del elemento de transmisión es mayor, el flujo de reactivos disminuye. La distribución del flujo de reactivos trata de lograr el equilibrio de voltaje en el nodo j , la ecuación (2.18) también se puede escribir en forma aproximada como una caída de voltaje.

$$\Delta V = \frac{Q_{ij} X_{ij}}{V_I} = \frac{Q_{kj} X_{kj}}{V_k}$$

En forma alterna se puede decir, que al aumentar la demanda de potencia reactiva en el nodo j , esta se obtendrá en mayor proporción de la fuente de reactivos más cercana eléctricamente a la carga, de manera de tener la menor desviación de voltaje en el nodo j .

Un análisis interesante es la evaluación del efecto de incrementar el voltaje en la fuente de reactivos más alejada de la carga. En este caso, el control es opuesto a la tendencia natural, ya que se estaría forzando un flujo de reactivos a través de una trayectoria de alta impedancia. La conclusión es que esta acción no es efectiva, ya que el incremento en la aportación de reactivos en la fuente se consumirá en la reactancia de la línea de transmisión.

La acción de control recomendada sería modificar el voltaje de la fuente de reactivos más cercana a la carga, de manera de aumentar el flujo por la trayectoria natural de carga y al mismo tiempo descargar las trayectorias de alta impedancia. El resultado es un efecto positivo en el control de voltaje en el nodo de carga.

En la fig. 2.4.5 se presenta un sistema donde se realizan cambios en el voltaje de generación, se incluyen resultados de casos que muestran el comportamiento del flujo de potencia reactiva y voltajes en el sistema. Es importante observar el efecto en la distribución de potencia reactiva, y en la efectividad del cambio de voltaje en el nodo de carga.

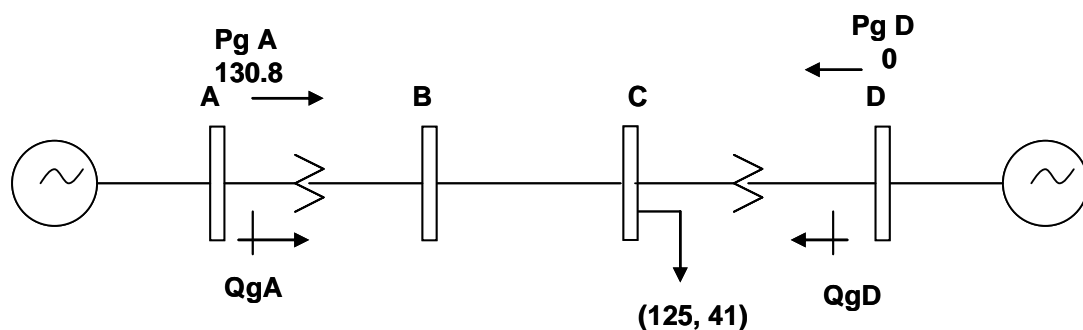


Fig. 2.4.5 Sistema de potencia con dos generadores

	Va	Vb	Vc	Vd	Qga	Qgd
Caso 1	1.00	0.987	0.946	1.00	21.8	43.1
Caso 2	1.00	1.003	0.987	1.05	07.9	53.6
Caso 3	1.05	1.027	0.964	1.00	29.3	28.9
Caso 4	1.05	1.044	1.005	1.05	15.1	38.4

Tabla 2.4.5 Comportamiento del sistema con diferentes voltajes de generación

2.5 INYECCIONES DE POTENCIA REACTIVA.

Hasta el momento solo se ha considerado fuentes de reactivos como nodos de voltaje controlado. En algunos casos se pueden tener elementos pasivos que consumen o generan potencia reactiva en función del voltaje del punto donde se conectan. En cualquier situación la idea básica es la misma, la fuente variable de reactivos suministrará las necesidades de potencia reactiva en nodos cercanos, tratando de evitar el viaje de potencia reactiva desde puntos alejados. Este es el caso de capacitores y reactores, que alteran el balance nodal de potencia reactiva y causan cambios en la distribución de flujos de reactivos, en la generación de potencia reactiva en nodos de voltaje controlado, y como consecuencia en el perfil de voltaje del sistema.

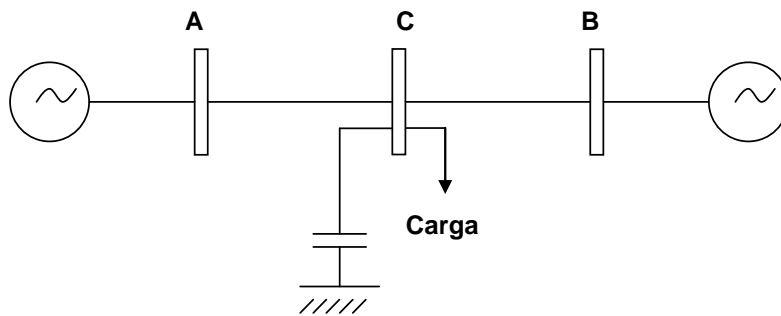


Fig. 2.5.1 Inyección de potencia reactiva en nodo de carga.

De la fig. 2.5.1 la demanda de reactivos de la carga será suministrada parcialmente por el capacitor en el punto de carga y sólo la diferencia, en su caso, deberá obtenerse de los generadores. De acuerdo a la ecuación (2.19), al reducirse el flujo de reactivos se mejorará el voltaje del nodo de carga.

El análisis anterior permite extrapolar el efecto de una inyección de reactivos, la cual trata en forma natural de evitar la circulación de potencia reactiva. Si en cada punto del sistema se logra el balance de potencia reactiva (se genera y se consume lo necesario), se tendrá un perfil plano de voltaje, con pequeñas variaciones debidas a la caída por efecto de resistencia.

2.6 TRANSFERENCIA DE POTENCIA ENTRE FUENTES.

Los factores que influyen en la transferencia de potencia activa y reactiva entre dos fuentes conectadas por una reactancia inductiva se muestra en la figura 2.6.1

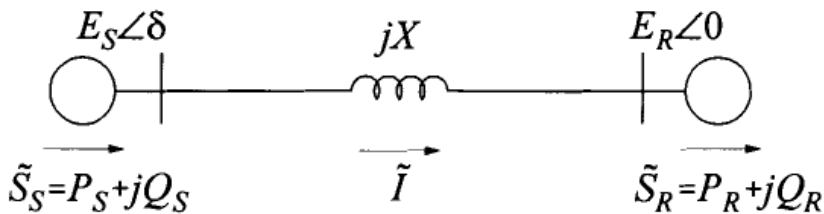
Cada sistema representa a dos secciones de un sistema de potencia interconectadas por un sistema de transmisión, con transferencia de potencia de una sección a otra. (Kundur)

Consideramos una reactancia inductiva para interconectar dos fuentes. Esto es porque la impedancia representa las líneas de transmisión, transformadores y generadores, que son predominantemente inductivos. Cuando la red total es representada por un modelo apropiado por cada elemento que lo integra y reducido en dos buses del sistema, la impedancia resultante deberá ser esencialmente una reactancia inductiva.

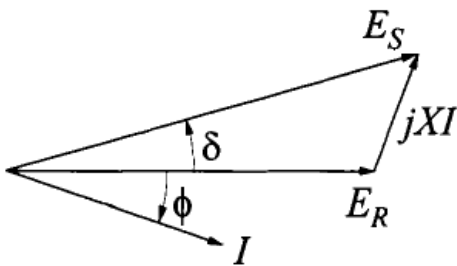
La capacitancia Shunt en líneas de transmisión no aparecen explícitamente en el modelo mostrado en la fig. 2.6.1, sus efectos son representados implícitamente por la potencia reactiva neta transmitida. El análisis de la transmisión de la potencia activa y reactiva a través de una reactancia inductiva le da un significado útil dentro de las características de sistemas de Transmisión.

Refiriéndose a la fig. 2.6.1, la potencia compleja en el punto de recepción es:

$$\begin{aligned} \bar{S}_R &= P_R + jQ_R = \bar{E}_R \bar{I}^* = \bar{E}_R \left[\frac{\bar{E}_S - E_R}{jX} \right]^* \\ &= E_R \left[\frac{E_S \cos \delta + E_S \text{Sen } \delta - E_R}{jX} \right]^* \end{aligned}$$



a).- Diagrama equivalente del Sistema



δ = ángulo de carga
 ϕ = ángulo de factor potencia.

b).- Diagrama de fasores

fig. 2.6.1 Transferencia de Potencia entre dos Fuentes.

Puesto que:

$$P_R = \frac{E_S E_R}{X} \text{Sen } \delta \quad (6.79)$$

$$Q_R = \frac{E_S E_R \cos \delta - E_R^2}{X} \quad (6.80)$$

Similarmente:

$$P_S = \frac{E_S E_R}{X} \sin \delta \quad (6.81)$$

$$Q_S = \frac{E_S^2 - E_S E_R \cos \delta}{X} \quad (6.82)$$

Las ecuaciones 6.79 a 6.82 describen la forma en la cual la potencia activa y reactiva son transferidas entre fuentes de voltaje considerando separadamente los efectos de las diferencias en la magnitud de los voltajes y los ángulos.

a).- veremos primeramente la condición de $\delta = 0$ ecuaciones 6.79 a 6.82 serán:

$$P_R = P_S = 0$$

Y

$$Q_R = \frac{E_R (E_S - E_R)}{X}$$

$$Q_S = \frac{E_S (E_S - E_R)}{X}$$

La transferencia de potencia activa es cero, con $E_S > E_R$, Q_S y Q_R son positivos; esto es, la potencia reactiva es transferida del nodo de envío al nodo de recepción. El correspondiente diagrama fasorial se muestra en la fig 2.6.2 (a). Con $E_S < E_R$, Q_S y Q_R son negativos, indicando que la potencia reactiva fluye del punto de recepción al Punto de envío.

El diagrama fasorial se muestra en la figura 2.6.2 (b).

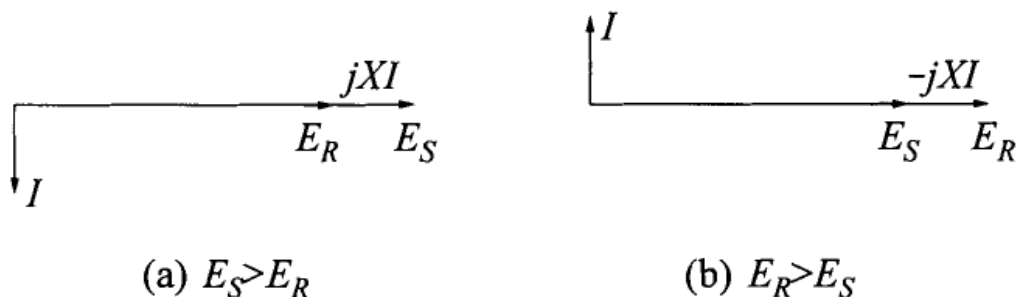


Fig.2.6.2 Diagrama Fasorial con $\delta = 0$
42

- La transmisión de corriente en atraso a través de una reactancia inductiva, causa una caída en el voltaje de recepción.
- La transmisión de corriente en adelanto a través de una reactancia inductiva causa un aumento de voltaje en el punto de recepción.

En cada caso, $Q_S - Q_R = \frac{(E_S - E_R)^2}{X} = XI^2$

Sin embargo, la potencia reactiva consumida por X es XI^2

(b). Ahora nosotros consideraremos la condición de $E_S = E_R$ pero con $\delta \neq 0$

De las ecuaciones 6.79 a 6.82, nosotros tendremos

$$P_R = P_S = \frac{E^2}{X} \text{ Sen } \delta$$

$$Q_S = -Q_R = \frac{E^2}{X} (1 - \text{Cos } \delta)$$

$$= \frac{1}{2} XI^2$$

Con δ positivo, P_S y P_R son positivos, esto es, la potencia activa fluye del punto de envío al de recepción. Con δ negativos, la dirección de la potencia activa fluye en forma invertida.

En cada caso, no hay potencia reactiva transferida de un punto a otro; ya que cada extremo proporciona la mitad de XI^2 consumida por la reactancia X .

El correspondiente diagrama fasorial se muestra en la figura 2.6.3

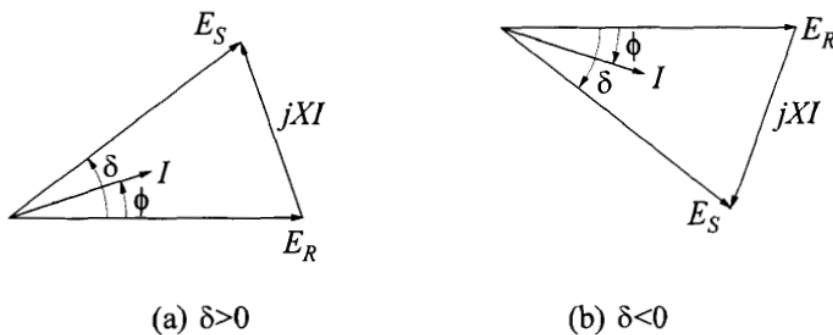


Figura 2.6.3 Diagrama Fasorial con I en fuera de fase con E_R .

Si la corriente I está en fase con E_R (el factor de potencia en el punto de recepción es unitario).

El diagrama fasorial se muestra en la figura 2.6.4.

En el caso de que la magnitud de E_S es ligeramente mayor que E_R , el punto de envío proporciona todo de XI^2 consumida por X .

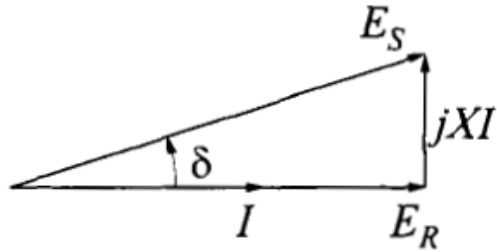


Figura 2.6.4 Diagrama Fasorial con I en fase con E_R .

Hemos visto que la transferencia de potencia activa (P_R) es una función de la magnitud de los voltajes y de δ . Sin embargo, para satisfacer la operación del sistema de potencia, la magnitud del voltaje en cualquier bus, no se puede desviar significativamente del valor nominal.

Sin embargo, el control de la transferencia de la potencia activa, se logra principalmente por medio de las variaciones del ángulo (δ).

(c).- Finalmente. Consideremos un caso original aplicable a cualquier valor de δ , E_S y E_R .

La corriente I es:

$$I = \frac{E_S \cos \delta + jE_S \sin \delta - E_R}{jX} \quad (6.83)$$

De las ecuaciones 6.80, 6.82 y 6.83, tenemos.

$$\begin{aligned} Q_S - Q_R &= \frac{E_S^2 + E_R^2 - 2E_S E_R \cos \delta}{X} \\ &= \frac{(XI)^2}{X} = XI^2 \end{aligned} \quad (6.84)$$

Si en adición a la reactancia inductiva X , nosotros consideramos la resistencia serie R de la red, entonces:

$$Q_{loss} = XI^2 = X \frac{P_R^2 + Q_R^2}{E_R^2} \quad (6.85)$$

$$P_{loss} = RI^2 = R \frac{P_R^2 + Q_R^2}{E_R^2} \quad (6.86)$$

De la ecuación 6.84, la potencia reactiva absorbida por X para todas las condiciones es $X I^2$. Esto adelanta al concepto de “Pérdida de Potencia Reactiva”, en comparación al término de pérdida de potencia activa perdida asociado con los elementos resistivos.

Tal como se ha visto de las ecuaciones 6.85 y 6.86, un incremento en la potencia reactiva transmitida incrementa las pérdidas de potencia tanto activa como reactiva. Esto tiene un impacto en la eficiencia de Transmisión de potencia y en la regulación de voltaje.

De los análisis anteriormente realizados, nosotros podemos obtener las siguientes conclusiones:

- La transferencia de potencia activa, depende principalmente del ángulo por el cual el voltaje del punto de envío, adelanta al voltaje del punto de recepción.
- La transferencia de potencia reactiva depende principalmente de la magnitud de los voltajes. Esta es transmitida de un lugar con magnitud de voltaje alto al otro lugar con magnitud de voltaje bajo.
- La potencia reactiva no puede ser transmitida sobre largas distancias puesto que requiere un gran gradiente de voltaje para realizar eso.
- Un incremento en la transferencia de potencia reactiva, causa un incremento en pérdidas de potencia tanto activa como reactiva.

Aunque hemos considerado un simple sistema, las conclusiones generales son aplicables a cualquier sistema práctico. En efecto, las características básicas concluidas; y reflejadas en el sistema de transmisión de CA. Tienen un efecto dominante en la forma en que se opere y controle un sistema de potencia.

2.7 FLUJO DE POTENCIA EN LINEAS DE TRANSMISIÓN.

La línea de transmisión mostrada en la figura 2.7.1, es modelada por una impedancia serie, $Z = R + jX$, donde R y X son la resistencia y la reactancia de la línea. (Ali Feliachi, Azira Hasanovic, Karl Schoder)



Figura 2.7.1 Línea de Transmisión

La potencia compleja S_s , fluyendo por la línea del punto de envío al punto de recepción, es dado por:

$$S_s = V_s * I_{línea} \quad (20.1)$$

Compensadores de Corriente Reactiva

Donde

$V_S = V_S \angle \delta$ Es el fasor del Voltaje en rms del Bus de envío
 $I \text{ línea}$ = Fasor de corriente conjugado en la línea

La potencia real y reactiva son obtenidas de la potencia compleja:

$$S_s = P_s + jQ_s \quad (20.2)$$

La corriente de la línea, utilizando la ley de ohm es:

$$I \text{ línea} = \frac{V_S - V_r}{Z} = (V_S - V_r)Y = (V_S - V_r)(G + jB) \quad (20.3)$$

Donde

$$Y = G + jB = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2}$$

Sin embargo, la conductancia y susceptancia de la línea es:

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} = \frac{R}{X^2(1 + (\frac{R}{X})^2)}$$

$$B = -\frac{X}{R^2 + X^2} = -\frac{\frac{1}{X}}{(1 + (\frac{R}{X})^2)}$$

Usando las ecuaciones (20.1) y (20.3), el conjugado complejo de la potencia compleja es:

$$\begin{aligned} S^*s &= P_s - jQ_s = V_S^* \times I_s^* = V_S^* \times (V_S - V_r)(G + jB) \\ &= (V_S^* - V_S^*V_r)(G + jB) \end{aligned} \quad (20.4)$$

De acuerdo a la identidad de Euler, $V_S \angle \delta = V(\cos \delta - j \sin \delta)$, es utilizado para escribir:

$$\begin{aligned} \bar{V}_S^* \bar{V}_R &= (V_S \angle \delta_S)(V_R \angle \delta_R) = V_S V_R \angle (-(\delta_S - \delta_R)) \\ &= V_S V_R (\text{Cos}(\delta_S - \delta_R) - j \text{Sen}(\delta_S - \delta_R)) \end{aligned} \quad (20.5)$$

Sustituyendo ecuación (20.5) dentro de ecuación (20.4), la potencia real y reactiva se obtiene:

$$P_s = V_S^2 G - V_S V_R G \text{Cos}(\delta_S - \delta_R) - V_S V_R B \text{Sen}(\delta_S - \delta_R) \quad (20.6)$$

$$Q_s = -V_S^2 B - V_S V_R G \text{Sen}(\delta_S - \delta_R) + V_S V_R B \text{Cos}(\delta_S - \delta_R) \quad (20.7)$$

Similarmente, la potencia real y reactiva recibida en el Bus de recepción es:

$$P_o = -P_R = -V_R^2 G + V_S V_R G \text{Cos}(\delta_S - \delta_R) - V_S V_R B \text{Sen}(\delta_S - \delta_R) \quad (20.8)$$

$$Q_O = -Q_R = -V_R^2 B + V_S V_R G \text{Sen}(\delta_S - \delta_R) - V_S V_R B \text{Cos}(\delta_S - \delta_R) \quad (20.9)$$

Las ecuaciones Pr y Qr, representan la potencia dejando el bus de recepción y fluyendo al Bus de envío.

Sin embargo, la potencia real y reactiva de pérdidas en la línea son:

$$P_L = P_S - (-P_R) = (V_S^2 + V_R^2)G - 2V_S V_R G \text{Cos}(\delta_S - \delta_R) \quad (20.10)$$

$$Q_L = Q_S - (-Q_R) = -(V_S^2 + V_R^2)B + 2V_S V_R B \text{Cos}(\delta_S - \delta_R) \quad (20.11)$$

Para líneas de transmisión típicas, la reactancia X es más grande que la resistencia R, el radio R/X es más pequeño y usualmente la conductancia G es despreciada y la susceptancia B es aproximadamente a $B = 1/X$. Utilizando estas aproximaciones, ecuaciones (20.6) y (20.8) se obtiene la potencia transmitida sobre la línea desde el punto de envío al bus de recepción.

$$\begin{aligned} P_S = -P_R = P_{SR} &= -V_S V_R B \text{Sen}(\delta_S - \delta_R) \\ &= \frac{V_S V_R}{X} \text{Sen}(\delta_S - \delta_R) = \frac{V_S V_R}{X} \text{Sen}(\delta) \\ &= P_O(\delta) \end{aligned} \quad (20.12)$$

Donde el ángulo $\delta = \delta_S - \delta_R$ es conocido como ángulo de potencia

La potencia reactiva enviada a la línea en ambos buses es:

$$Q_S = -V_S^2 B + V_S V_R B \text{Cos}(\delta_S - \delta_R) = \frac{V_S^2 - V_S V_R \text{Cos}(\delta)}{X} \quad (20.13)$$

$$Q_R = -V_R^2 B + V_S V_R B \text{Cos}(\delta_S - \delta_R) = \frac{V_R^2 - V_S V_R \text{Cos}(\delta)}{X} = -Q_O(\delta) \quad (20.14)$$

La potencia reactiva promedio fluyendo es definida como:

$$Q_{SR} = \frac{Q_S - Q_R}{2} = \frac{(V_S^2 - V_R^2)B}{2} = \frac{V_S^2 - V_R^2}{2} \quad (20.15)$$

La ecuación (20.12) y (20.15) son la base para entender el control del flujo de potencia en una línea de transmisión. De la ecuación (20.12) se puede ver el incremento de la cantidad de la potencia real transmitida sobre la línea, siendo:

- *Incrementando la magnitud del voltaje en el punto final (soporte de voltaje).
- *Reducción de la reactancia de la línea (compensación de la línea)
- *Incremento del ángulo de potencia (reducción de ángulo).

Se puede observar que la potencia fluye en forma reversa al cambiar el signo del ángulo de potencia.

Angulo positivo, $\delta_R > \delta_S$, la potencia fluirá del punto de recepción al de envío.

Similarmente de la ecuación (20.15), se puede ver que ambas magnitudes de voltajes y la reactancia de la línea afectará la potencia reactiva. Si las magnitudes de ambos voltajes son iguales, el perfil de voltaje será plano, en cada bus se enviará la mitad de la potencia reactiva absorbida por la línea. La potencia reactiva fluye del punto de envío al punto de recepción cuando $V_S > V_R$.

Los cuatro parámetros que afectan el flujo de potencia real y reactiva son V_S , V_R , X y δ . Para entender esta relación, ecuaciones (20.12) y (20.14) pueden combinarse:

$$(P_o(\delta))^2 + \left(Q_o(\delta) + \frac{V_R^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{V_S V_R}{X}\right)^2$$

Esta ecuación representa un círculo centrado en $(0, -V_R^2/X)$, con un radio $V_S V_R/X$. Relaciona la potencia real y reactiva recibida en el bus R según los cuatro

parámetros: V_S , V_R , δ , X . Para ver, por ejemplo, que $V_S = V_R = V$ y $V/X = 1$ El locus de $P - Q$ para este caso se muestra en la figura 2.7.2 (línea sólida). Para un ángulo de potencia δ específico valores de P_o y Q_o pueden ser encontrados, si $\delta = \pi/4$ (punto A en el círculo), entonces $P_o A = 0.707$ y $Q_o A = -0.293$. Reduciendo la reactancia de la línea X , digamos $X' < X$, mantenemos $V_S = V_R = V$, incrementaremos el radio del círculo (línea punteada). Note que el ángulo de potencia δ será restringido por los límites de estabilidad.

Similarmente, la relación entre la potencia real y reactiva enviada a la línea del punto del bus de envío δ puede expresarse como:

$$(P_o(\delta))^2 + \left(Q_o(\delta) + \frac{V_R^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{V_S V_R}{X}\right)^2$$

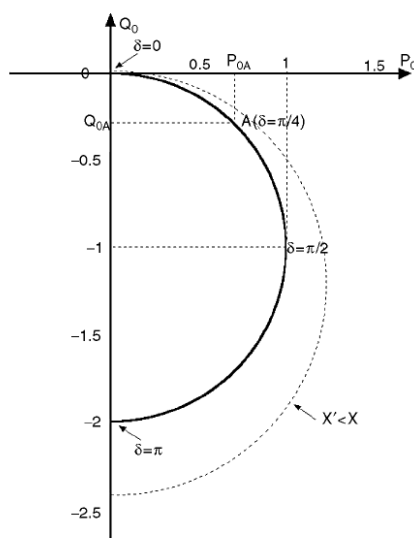


Figura 2.7.2 Locus P-Q de un sistema sin compensar

CAPITULO III.- COMPENSADORES DE REACTIVOS

3.1 INTRODUCCIÓN.

En el capítulo anterior, se abordaron los conceptos básicos sobre el control de voltaje en un sistema eléctrico de potencia; así como, el comportamiento de la potencia reactiva en dicho sistema, su generación, pérdidas y compensación en un sistema de transmisión y como influye la carga en su comportamiento, temas que están ligados con el compensador de corriente reactiva los cuales físicamente residen en los Sistemas de Excitación y que serán tratados a continuación.

El compensador de corriente reactiva es una función que se encuentra implementada en los Sistemas de Excitación de los Generadores, tales sistemas de excitación cuentan con funciones adicionales entre las que se pueden mencionar la de mínima y máxima excitación (MEL y OEL), volts/Hertz (Volts por Hertz) y PSS (Estabilizador de Potencia) por mencionar entre las principales.

La función del compensador de corriente reactiva, es la de equilibrar el flujo de corriente reactiva, o potencia reactiva en el generador en forma equitativa y entre los diferentes generadores que están conectados a un nodo, esto de acuerdo a una curva la cual se puede ajustar, siendo la más conocida, la de tipo pendiente negativa.

El sistema de excitación o regulador de voltaje, es el encargado de proporcionar la energía que necesita el generador para que este cubra las necesidades de las cargas que se encuentren conectadas al sistema eléctrico de potencia y abastecer las demandas de potencia reactiva.

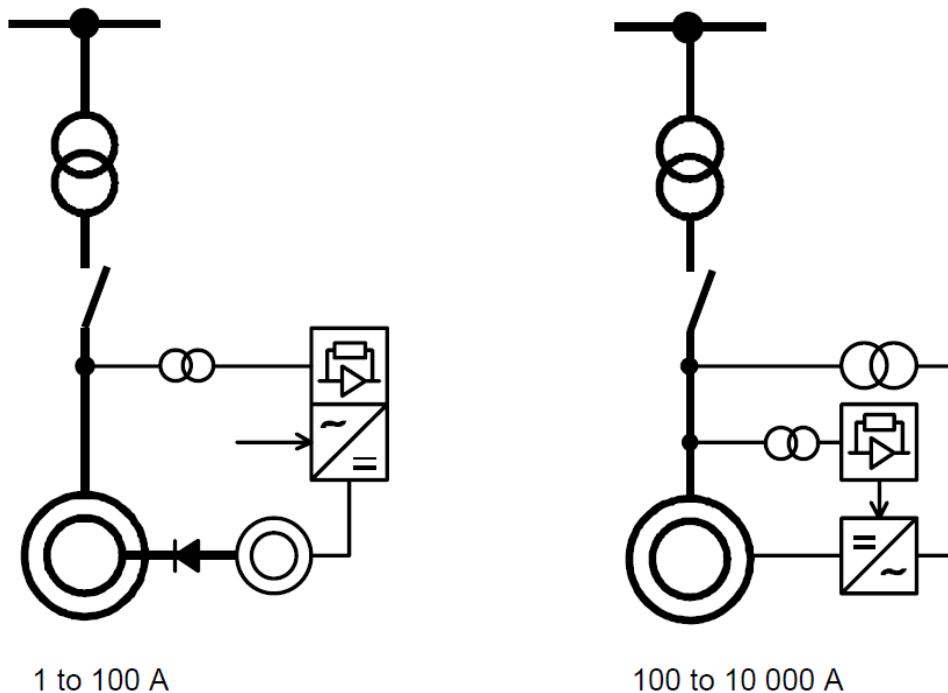
Con esta acción contribuye a la mejora del perfil de voltaje donde se encuentra conectado el generador. Esto se refleja en la disposición de potencia reactiva la cual puede ser útil para soportar o mejorar los perfiles de voltaje de nodos que no cuenten con fuentes de energía de potencia reactiva.

Para que la función compensadora de reactivos opere, es necesario que el sistema de excitación del generador se encuentre operando en canal automático, ya que en canal manual queda deshabilitada la función compensadora de reactivos, lo cual incluye a todas las funciones compensadoras del sistema de excitación que anteriormente se mencionaron.

Debido a la importancia del sistema de excitación en la operación del generador y de la función compensadora de reactivos, se procederá a dar una breve explicación de dicho sistema.

3.2 SISTEMAS DE EXCITACIÓN PARA MÁQUINAS SINCRONAS.

Los sistemas de excitación, los que hasta ahora son usados en la mayoría de las máquinas síncronas, pueden clasificarse en dos grandes grupos: como excitación con máquina rotatoria; conocida como excitación indirecta y excitación sin máquina rotatoria conocida como excitación directa o estática y esta última se puede considerar estática o digital. (Manual de sistemas de excitación marca ABB). (Ver Fig. 3.2.1)



Excitación con Máquina Rotatoria Excitación sin Máquina Rotatoria
 Figura 3.2.1 Tipos de Sistemas de Excitación o Reguladores de Voltaje.

La principal tarea del sistema de excitación o regulador de voltaje, es la de proporcionar el nivel de corriente necesario para excitar el campo del generador y obtener el nivel de voltaje necesario para que el generador pueda ser sincronizado a la red de potencia, así como controlar su voltaje en sus terminales en forma automática y mantenerlo constante.

El mantener constante la tensión en terminales del generador, hace que tenga una influencia definitiva en el comportamiento dinámico del grupo turbo-generador, lo cual exige una adecuada representación de este equipo para fines de análisis y estudios de estabilidad. (Kundur)

El sistema de excitación cuenta con una referencia, la cual es manipulada por el operador cuando se desea modificar la corriente de excitación del generador y a su vez modificar el voltaje de terminales o la potencia reactiva cuando este se encuentra sincronizado a la red. Por lo general es identificado como 90 E o R (E o R por reóstato o estática), es esta referencia precisamente la que se ve modificada por la función compensadora de corriente reactiva cuando se encuentra activa en el sistema de excitación.

Cuenta también con un canal manual, el cual controla el nivel de la corriente de excitación de campo, al comparar esta señal con la referencia del canal manual conocido como 70 E o R (E o R, por reóstato o estática); el control del voltaje de terminales del generador por medio de este canal es con la asistencia del operador, ya que no se tiene retroalimentación del voltaje de terminales en el sistema de excitación para el canal manual; es de mencionar que la operación del sistema de excitación en este canal no opera ninguna de las funciones adicionales que tenga implementadas, ya que funcionan a través del canal automático.

Los primeros sistemas de excitación podían operar con ambos canales, ya que el canal manual era la referencia base y en canal automático tenía un rango de operación sobre el canal manual; casi por lo general, de un $\pm 15\%$. Los actuales sistemas de excitación cuentan con una independencia en sus canales; se puede mencionar el caso de los sistemas estáticos; para el caso de los sistemas digitales, se cuenta hasta con doble sistema de control donde se reside tanto el canal automático como el canal manual. Cuentan con un dispositivo conocido como seguidor de canal automático y canal manual; según el canal que este habilitado, para el caso de cambio de un canal a otro por la acción de sus protecciones o del operador, evita el tener un transitorio o escalón de voltaje que se refleja en escalón de potencia reactiva por la diferencia que se presenta entre los niveles de señal entre ambos canales.

(En la figura 3.2.1.1 se representa un sistema de excitación tipo estático a bloques)

3.2.1 FUNCIONES

- 1).- El sistema de excitación permite llevar al grupo turbo-generador a la tensión adecuada para poder realizar su sincronización.
- 2).- Una vez sincronizada la unidad, permite controlar la potencia reactiva dentro de los límites de la curva de capacidad del generador.
- 3).- El sistema de excitación proporciona seguridad a la unidad generadora mediante la implementación de funciones limitadoras y de protección, evitando así condiciones peligrosas de operación de la máquina.
- 4).- Ayuda al mejoramiento de la estabilidad del sistema de potencia mediante una rápida acción sobre la excitación del generador, en cualquier condición operativa y dinámica del sistema de potencia.

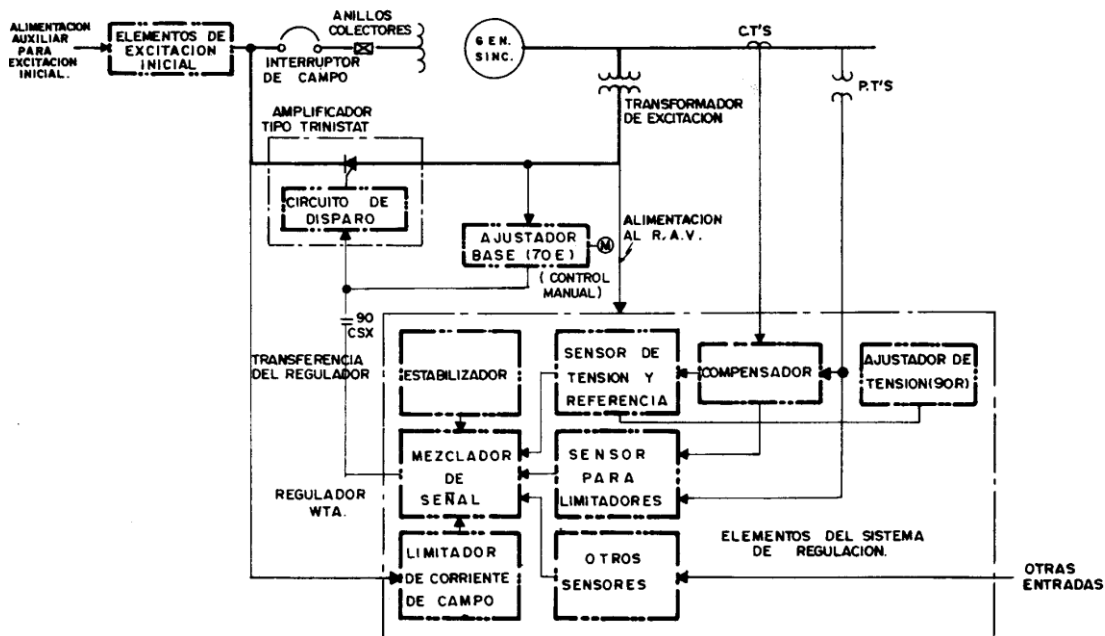


Figura 3.2.1.1 Sistema de Excitación a Bloques tipo Estático.

La operación más común es en canal automático (ver figura 3.2.1.3), ya que por medio de el se realiza el control del voltaje de terminales del generador en forma automática y además, es por medio de este canal que las funciones adicionales operan en el sistema de excitación y así como en el generador.

En el canal manual (ver figura 3.2.1.2), como se mencionó anteriormente, se controla la corriente de excitación del campo del generador. El control del voltaje de terminales del generador y de la potencia reactiva, es por medio del operador de la unidad y de dicho sistema de excitación.

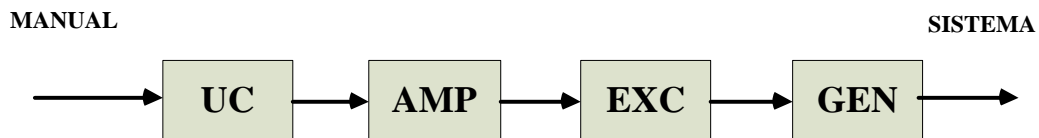


Figura 3.2.1.2 DIAGRAMA A BLOQUES DEL CANAL MANUAL

En este caso, las variaciones del voltaje en el sistema eléctrico por cambios de velocidad de la turbina o de las cargas, no es retroalimentado a la unidad de control y por lo tanto no se tiene un control adecuado de la variable deseada. De ahí la necesidad de disponer de un sistema retroalimentado en el cual se compare constantemente la señal de mando con la variable a controlar, por medio del transductor adecuado, y el error que representa la desviación entre el valor deseado (señal de mando o referencia) y el valor real retroalimentado (variable a controlar), actúa directamente en el sistema de excitación después de ser procesada por la unidad de control, sobre la excitación del generador con el fin de corregir la desviación que se presente, anulando así el error y manteniendo estable la variable controlada (voltaje en terminales).

Si la tensión aumenta, el error es negativo y la unidad de control manda reducir la excitación; y en forma inversa, si la tensión disminuye se incrementa la excitación para corregir el error; por lo tanto, independientemente de las perturbaciones del sistema y para una misma señal de mando, se tiene una excitación única (ver figura 3.2.1.3).

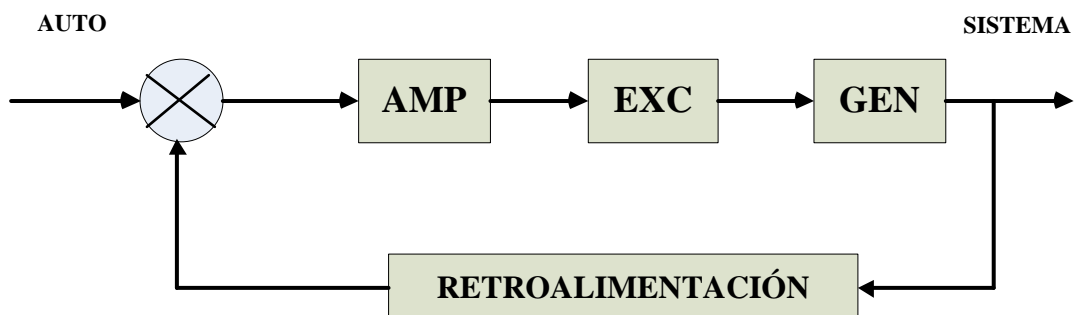


Figura 3.2.1.3

Diagrama esquemático de la representación del canal automático en un sistema de excitación.

3.3 FUNCIONES ADICIONALES.

Como se mencionó anteriormente, la principal función del sistema de excitación es la de controlar el voltaje en terminales del generador de acuerdo al nivel de referencia que se tenga ajustado; mas sin embargo, cuenta con funciones adicionales catalogadas como funciones de protección, limitadoras y compensadoras las cuales a continuación se describen.

3.3.1 FUNCIONES: COMPENSADORAS

- Compensadores de potencia activa y/o reactiva
- Estabilizadores de potencia

LIMITADORES

- Limitador de mínima excitación
- Limitador de máxima excitación
- Limitador de Volts/Hertz

PROTECCIONES

- Protección para condición de sobre-excitación
- Protección de Volts/Hertz
- Protección de cambio de canal Auto-Manual

3.4.- FUNCION COMPENSADORA DE REACTIVOS.

3.4.1 COMPENSACIÓN DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA

A continuación se presenta de una manera simplificada, recurriendo a la ayuda de los diagramas vectoriales de tensión y corrientes producidas por los generadores síncronos, el comportamiento, teoría y aplicación de los compensadores por corrientes activa y/o reactiva con que cuentan casi en su totalidad los reguladores automáticos de voltaje o sistemas de excitación.

Al dispositivo en cuestión normalmente se le designa, debido a su aplicación más generalizada, “compensador de reactivos” o menos frecuentemente “compensador por caída de línea”.

Con el objeto de entender la operación de tal dispositivo, fue utilizado un modelo de compensador el más comúnmente encontrado en las instalaciones

La figura 3.4.1.1 muestra de manera esquemática el sistema de excitación completo, indicando la ubicación del compensador de reactivos.

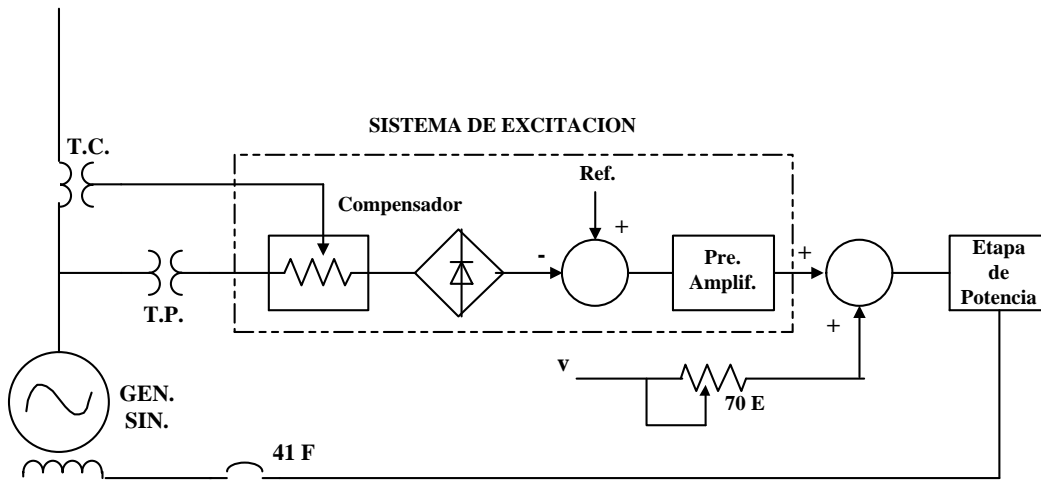


Figura 3.4.1.1 Sistema de excitación y Compensador de Reactivos

Se puede observar en la figura 3.4.1.1 que la función principal del compensador de reactivos es la de modificar los valores de retro-alimentación del voltaje de terminales del generador al canal automático, procesando la señal de corriente de terminales del generador.

En la figura 3.4.1.2 representa un regulador de voltaje a bloques y las señales que lo integran, como son las funciones adicionales y las de compensación, representa un sistema rotatorio del tipo sin escobillas que es muy utilizado por la Cía. Westinghouse.

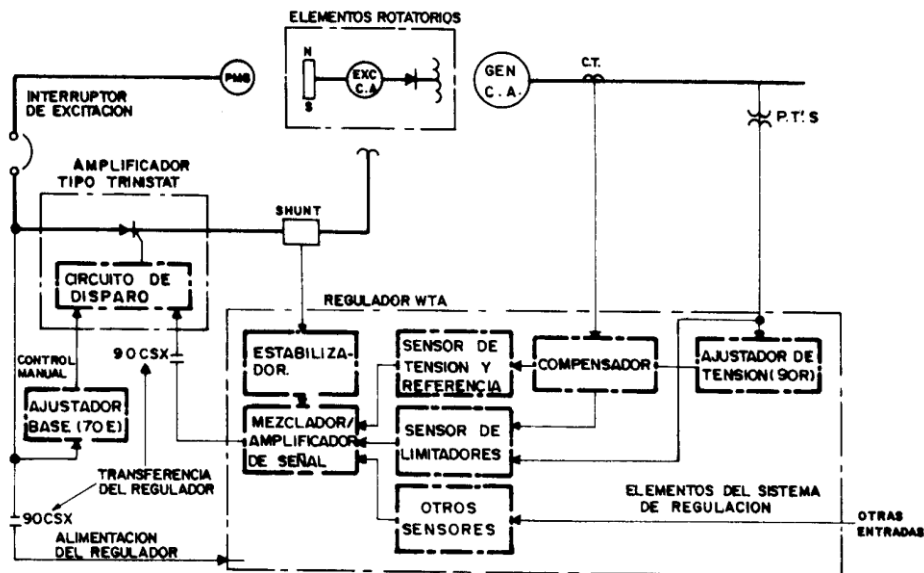


Fig. 3.4.1.2 Sistema de Excitación Rotatorio

El sistema de excitación normalmente controla el voltaje de terminales del generador. Algunas veces, compensación de carga; es de aclarar, que el termino de carga es utilizado para describir las necesidades o demanda de potencia tanto activa como reactiva, es utilizada para controlar el voltaje en un punto cualquiera, ya sea interno o externo del generador. (Kundur)

Esto se obtiene por la construcción de un circuito adicional dentro del lazo de control del regulador de tensión tal como se muestra en la figura 3.4.1.3

El compensador tiene una resistencia ajustable (R_C) y una reactancia (X_C) que simula la impedancia entre las terminales del generador y el punto en el cual el voltaje es controlado. Utilizando esta impedancia y la medición de la corriente de armadura, se obtiene con esto una caída de voltaje la cual es sumada o restada al voltaje de terminales del Generador que se está retroalimentando.

La magnitud del resultado del voltaje compensado (V_C), el cual es alimentado al sistema de excitación o regulador de voltaje, es dado por

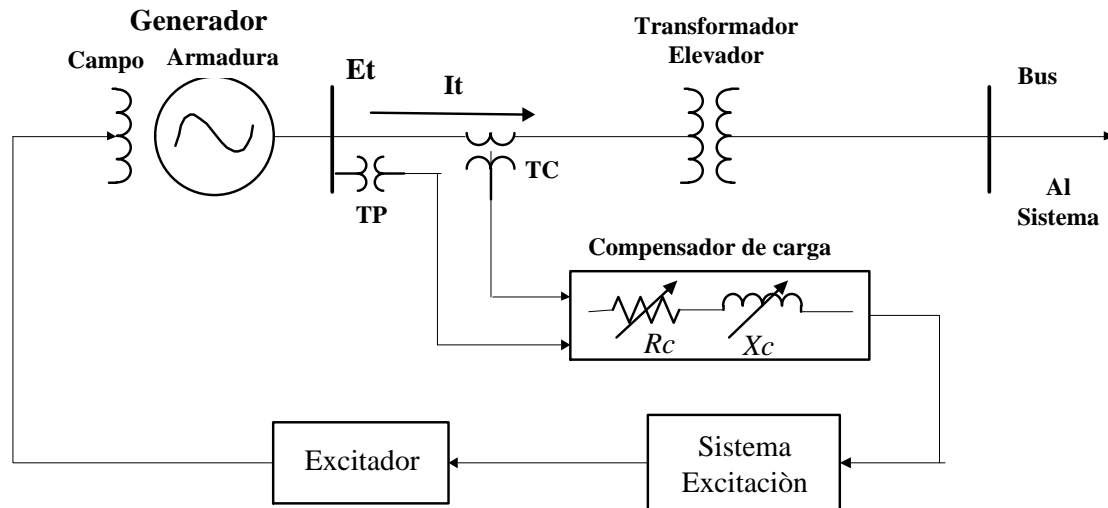


Figura 3.4.1.3 Diagrama esquemático de un compensador de carga

$$V_c = |\tilde{E}_t + (R_c + jX_c)\tilde{I}_t| \quad (8.1)$$

Con R_C y X_C positiva en la ecuación 8.1, la caída de voltaje en el compensador es sumada al voltaje en terminales.

El compensador regula el voltaje en el punto con el generador y una caída de voltaje hacia ese punto. (Kundur)

Como se ha explicado anteriormente, es usado para asegurar un manejo apropiado de potencia reactiva entre generadores que están conectados al mismo bus y manejando un transformador común. Tales arreglos son usados comúnmente en generadores hidroeléctricos y unidades térmicas del tipo cruzadas. El compensador funciona tal como "Compensador de corriente reactiva" creando un acoplamiento artificial entre generadores. Sin este arreglo, uno de los generadores trataría de controlar el voltaje en terminales ligeramente mayor que el otro generador, originando que un generador intente suplir toda la potencia reactiva y el otro generador la absorbería.

Con R_C y X_C negativo, el compensador regula el voltaje en un punto más allá del voltaje en terminales del generador. Esta forma de compensación es utilizada para compensar la caída de voltaje a través del transformador de unidad, cuando dos o más unidades son conectadas a través de un transformador individual.

Típicamente, el 50 % al 80 % de la impedancia del transformador es compensada, asegurando una caída de voltaje en un punto de su operación en paralelo permitiendo la operación satisfactoria de los generadores.

Este dispositivo comúnmente es referido como “Compensación de caída de Línea”, aunque esto es siempre utilizado para compensar solamente la caída del transformador. La nomenclatura es semejante a la utilizada en los sistemas de reguladores de voltaje en redes de distribución. En la mayoría de los casos, la compensación resistiva de la impedancia a compensar no se considera y R_C deberá ser ajustado a cero.

3.4.2 EFECTO DE LA CORRIENTE ACTIVA.

A partir de la fig. 3.4.2.1 la conexión del transformador auxiliar T3 es tal que en el círculo formado por el secundario del transformador T1 (fases C-B), el transformador T2 y la resistencia variable R_1 , para un instante de tiempo cualquiera se cumple que:

$$V_{AC} - V_{R1} = V_{A2}$$

Donde:

$$V_{R1} = I_2 R_1$$

Así, la corriente que circula por el transformador auxiliar T3, produce en la resistencia variable R_1 una caída de voltaje $I_2 R_1$ la cual se sustrae vectorialmente del voltaje C-B para producir la tensión en el lado primario de T2.

Así, en caso de que el generador se encuentra entregando exclusivamente potencia activa (factor de potencia unitario) la corriente por la fase B puede ser descompuesta únicamente en su componente en eje directo, es decir:

$$I_s = I_d + I_q$$

$$I_q = 0 \quad I_s = I_d$$

Y el efecto causado por R_1 es producir una caída de tensión $I_d R_1$ que se sustrae vectorialmente a la tensión C-B como lo muestra las figuras 3.4.2.1 y 3.4.2.2, lo cual origina una disminución en la tensión V_{T2} .

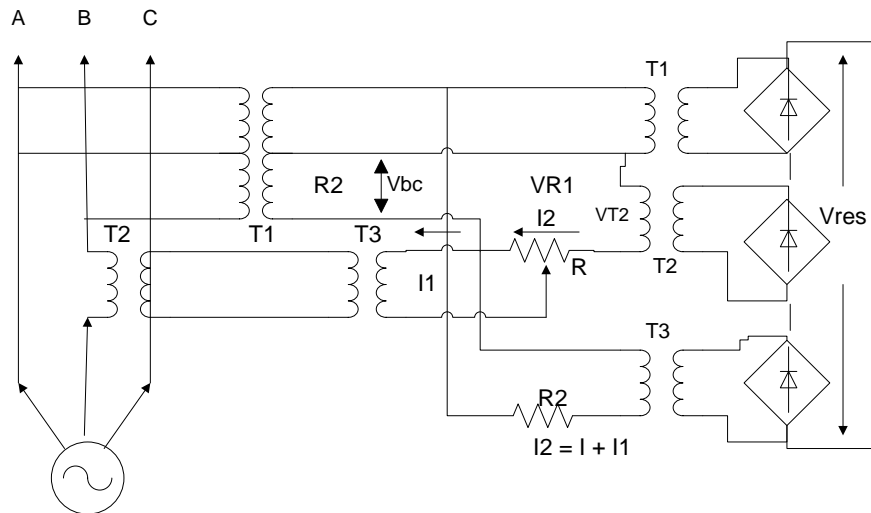


Figura 3.4.2.1 Diagrama de conexión de Terminales del generador y compensador de reactivos T2

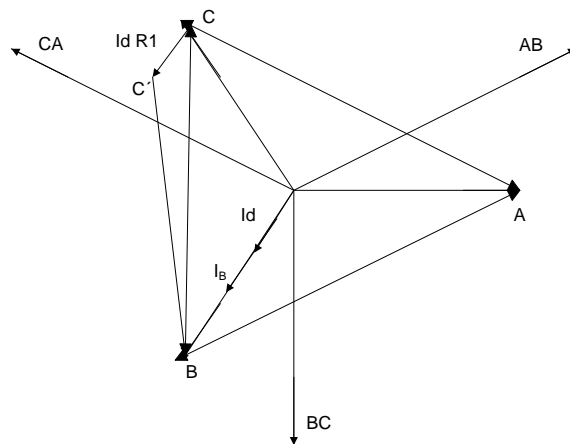


Figura 3.4.2.2 Diagrama Vectorial de voltajes y corriente en eje directo

El efecto resultante es que el área del triángulo A-B-C se ve reducida, disminuyendo el valor de la tensión resultante V_{res} ya rectificadas, que el regulador automático de voltaje recibe como señal de valor actual.

Por el anterior motivo, un incremento en la potencia activa entregada por la unidad, trae una consiguiente disminución en la señal de valor actual del R.A.T. ocasionando que la respuesta del anterior sistema sea incrementar la corriente de excitación con el consiguiente incremento en la potencia reactiva, de esta manera el regulador tiene la tendencia de mantener un factor de potencia constante.

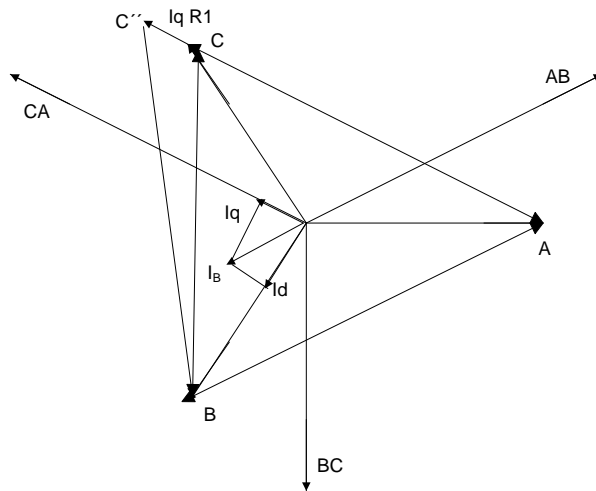


Fig. 3.4.2.3 Vectorial de voltajes y corriente en eje de cuadratura

Sin embargo, con la misma conexión de la figura 3.4.2.1 el efecto producido al estar entregando el generador una cierta cantidad de potencia reactiva es que se hará presente una componente I_q de la misma corriente I_s . Si el sentido de rotación de fases es A-B-C, una carga con factor de potencia en atraso (carga inductiva) producirá la componente I_q mostrada en la fig. 3.4.2.3.

La circulación de dicha corriente a través de la resistencia R_1 , produce la caída de tensión $I_q R_1$ que vectorialmente se adiciona a la tensión AC, originando que el voltaje V_{T2} se vea ahora aumentando de un valor original V_{T5} cuando no hay circulación de corriente, a un valor V_{T5} en la condición mostrada en la Fig. 3.4.2.3, sin embargo tal cambio es muy pequeño en comparación con el que es producido por efecto de la corriente activa.

En este caso, el efecto por la corriente reactiva produce un efecto benéfico en la estabilización, cuando dos o más máquinas se hallan operando en paralelo, ya que al ocurrir incrementos en la corriente reactiva debido a aumentos en cargas de tipo inductivo, ésta conexión permite que el sistema de excitación reciba un incremento en la señal de valor actual, ordenando disminuir la excitación, logrando de esta manera un efecto de amortiguamiento ante estas perturbaciones, lo mismo sucede al trabajar con factor de potencia en adelanto.

El presente tipo de conexión es utilizado cuando se desea compensar la caída de tensión debido a la resistencia ohmica de los conductores que conectan al generador con la carga; de ésta manera es posible lograr una buena regulación de tensión no en los terminales de la unidad, sino en un punto distante del sistema, con las siguientes ventajas que esto involucra.

3.4.3 EFECTO DE LA CORRIENTE REACTIVA

De la fig. 3.4.3.1 la corriente de la fase B y que circula proporcionalmente por el transformador auxiliar T4 es aplicado a la resistencia variable R_2 , con el objeto de producir algún efecto sobre la tensión A-C, el cual se analiza a continuación:

La caída de tensión $I R_2$ puede ser sumada o restada de la tensión A-C dependiendo de la polaridad del transformador auxiliar T4, debiéndose tomar particular precaución en tal conexión, en virtud de que los efectos causados debido a ella son totalmente distintos, aún cuando ambos son usados prácticamente, dependiendo solo de la aplicación particular que sea requerida.

Así, tomando como referencia las figuras 3.4.3.1 y 3.4.3.2

$$V_{AB} - V_{R2} = V_{T3}$$

Donde:

$$V_{R2} = I R_2, \quad \text{predominantemente}$$

Cuando no existe circulación de corriente por T4 o está punteada la resistencia R_2 , la tensión V_{RT} es idéntica a la existente en el primario del transformador T3. Así, al estar entregando el generador exclusivamente potencia activa

$$I_s = I_d$$

El voltaje resultante A'-C es obtenido como lo muestra la figura 3.4.3.2. Puede ser observado que entre esta última tensión y el voltaje A-C no existe prácticamente diferencia, por lo que el efecto de la corriente activa con este tipo de conexión resulta para todo fin despreciable.

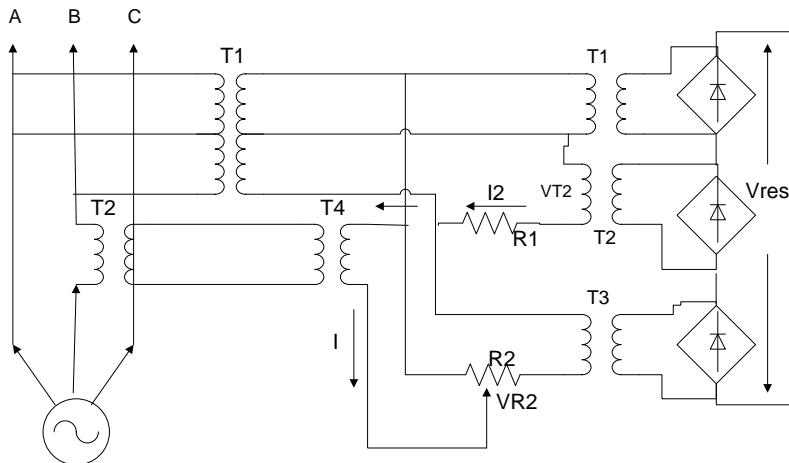


Figura 3.4.3.1 Diagrama conexión del compensador de reactivos fase T3

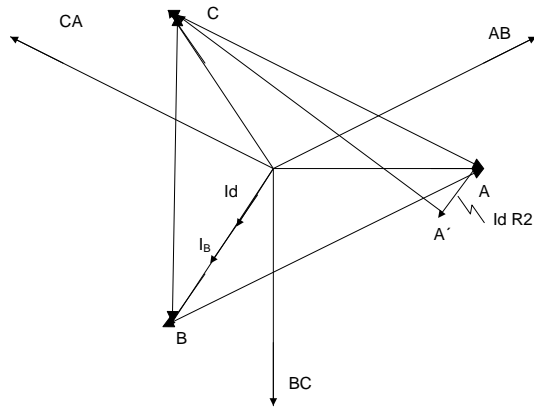


Fig. 3.4.3.2 Diagrama vectorial de voltajes y corriente en eje directo fase T3

Por otro lado, si la carga que está abasteciendo el generador posee un factor de potencia cero en atraso, la componente de la corriente existente únicamente es la de eje de cuadratura, I_q , cuya circulación a través de la resistencia R_2 origina la caída de tensión $I_q R_2$ expresada en la fig. 3.4.3.3.

La presencia de esta caída puede originar con la conexión eléctrica adecuada, la tensión resultante $A'' - C$ que permite al sistema de excitación incrementar la excitación del generador al recibir una tensión en terminales de un valor inferior a su referencia.

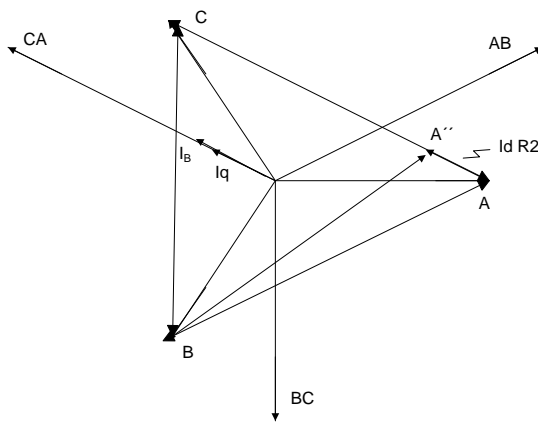


Fig. 3.4.3.3 Diagrama Vectorial de voltajes y corriente en eje de cuadratura fase T3

La presente conexión es utilizada cuando se desea compensar la caída de tensión en el transformador de unidad (debido a su propia reactancia). De esta manera el ajuste del valor de la resistencia R_2 está directamente relacionado con la impedancia del transformador citado, siendo una práctica común no llevar la compensación descrita a un valor mayor del 50 % de éste parámetro.

Con varias unidades conectadas en paralelo a un bus común a través de sus respectivos transformadores de unidad, la conexión del compensador en la manera descrita permitirá hacer una repartición estable y uniforme de la corriente reactiva que demande la carga o el sistema en un momento dado.

Un segundo caso lo muestra la fig. 3.4.3.5 en el cual se observa el efecto causado al invertir únicamente la polaridad del transformador auxiliar T4. Una vez más, puede ser observado la despreciable aportación debida a la circulación de corriente activa a través de R_2 .

En éste caso para una misma carga con factor de potencia en atraso, la tensión resultante A-C es mayor, originando que el RAT reciba un valor mayor de tensión en terminales que el real, logrando un efecto de la disminución de la excitación del generador y por lo tanto disminución del voltaje en terminales.

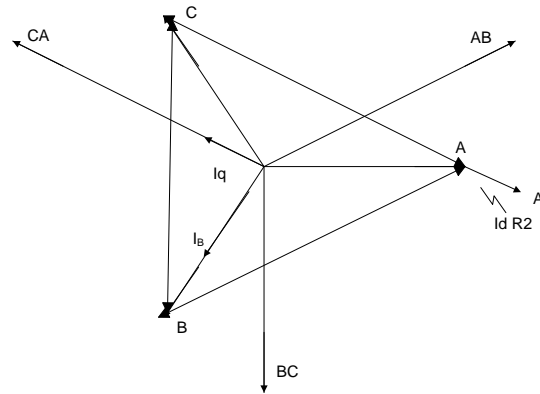


Fig. 3.4.3.5 Diagrama vectorial de voltajes y corriente en eje en cuadratura fase T3

La presente conexión halla su principal aplicación cuando un arreglo de dos o más generadores se hayan conectados en paralelo a un bus común en forma directa, de manera que el citado efecto es aprovechado para igualar la reactancia interna (reactancia síncrona) vista por cada uno de los sistemas de excitación, con el objeto de permitir una operación estable y una repartición uniforme de la potencia reactiva demandada.

Resulta práctica común encontrar en casi la totalidad de los sistemas de excitación, la opción para utilizar ambos tipos de compensación.

Así una conexión como la mostrada en la fig. 3.4.3.6 es utilizada normalmente.

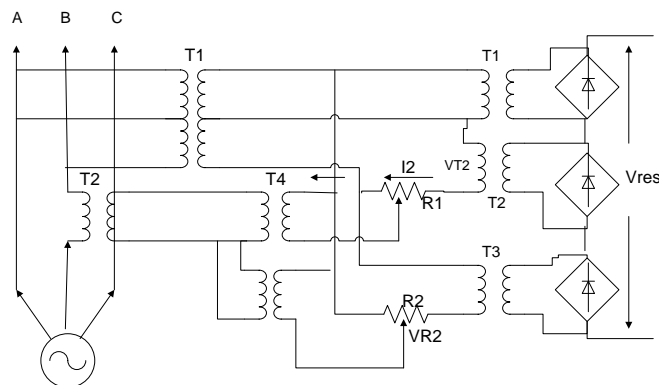


Fig. 3.4.3.6 Diagrama conexión del compensador de reactivos fase T3 y T2

Se puede mencionar que la característica de operación del compensador de reactivos es una línea recta con una pendiente negativa, dicha pendiente depende del ajuste que se le proporcione al dispositivo; como se había mencionado anteriormente (capítulo 1, inciso 1.1) puede variar entre 0 y 10 %. (ver fig. 3.4.3.7)

En el punto en el cual está conectado el generador, debido a la impedancia de conexión del generador y del transformador al bus infinito, presenta una característica también de pendiente negativa, tal como se puede apreciar en la figura 3.4.3.7

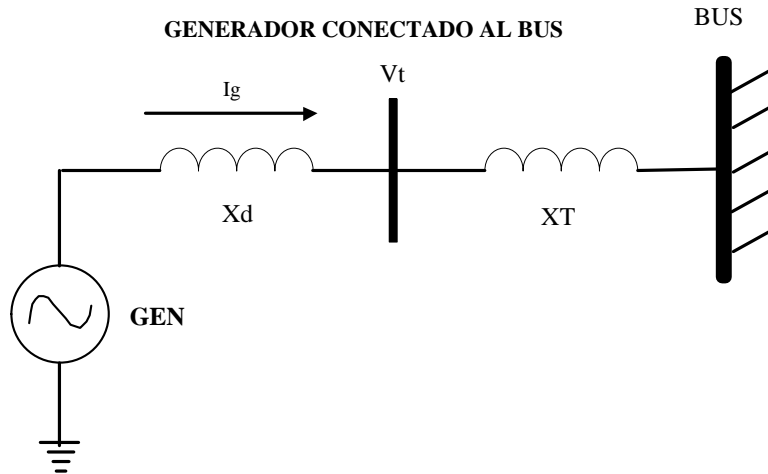


Figura 3.4.3.7 Diagrama de conexión del Generador a la Red Eléctrica

La pendiente se puede apreciar en la figura 3.4.3.8, donde se puede apreciar una diferencia de pendientes entre dos generadores. Es de mencionar que esta pendiente está definida por las reactancias que se encuentran conectadas entre el generador y el sistema, para este caso se refiere al transformador de máquina.

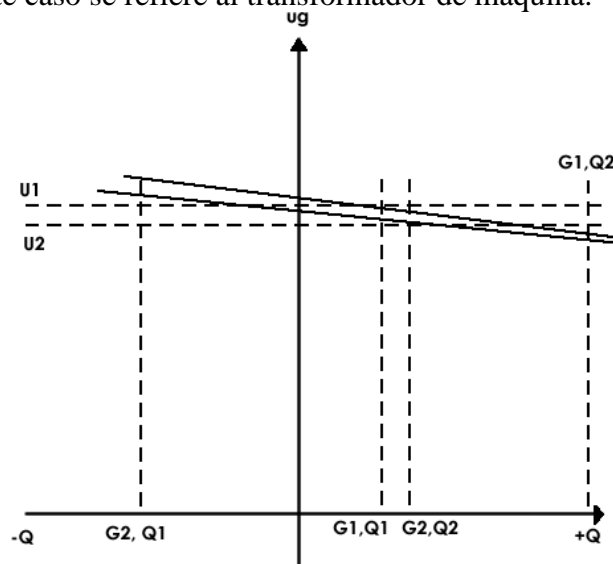


Figura 3.4.3.8 Característica de pendiente debido a la magnitud de la reactancia

Esta pendiente tiende a ser una recta horizontal cuando el sistema es muy fuerte, esto debido a que la impedancia del sistema es muy baja, y hay suficientes fuentes de reactivos para cubrir las demandas del sistema de potencia y de las cargas. (Kundur).

Las pendientes establecidas para los compensadores de reactivos están entre 0 a 10 % para sistemas de excitación estáticos y 0 a 20 %, para digitales.

El cálculo para obtener la pendiente del ajuste del compensador de reactivos en los generadores que han sido habilitados con esta función, es la siguiente:

$$\% \text{ CR} = \frac{\frac{\Delta V_g}{V_g \text{ nom.}}}{\frac{\Delta Q}{Q \text{ nom.}}} \times 100$$

Donde se puede apreciar, que según las variaciones de voltaje de terminales del generador corresponderá a una variación de potencia reactiva, según sea el ajuste que se tenga en el compensador de reactivos.

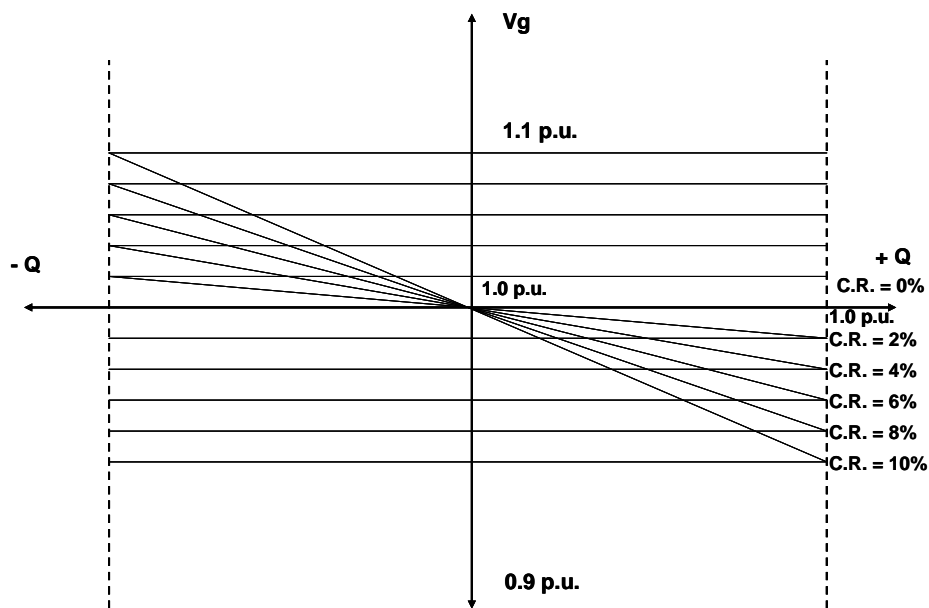


Fig.3.4.3.9 Grafica de curvas de ajuste de un Compensador de reactivos.

La señal del compensador de reactivos actúa modificando la referencia del sistema de excitación lo cual se traduce en un incremento de la potencia reactiva en el generador, según ajuste establecido para su operación.

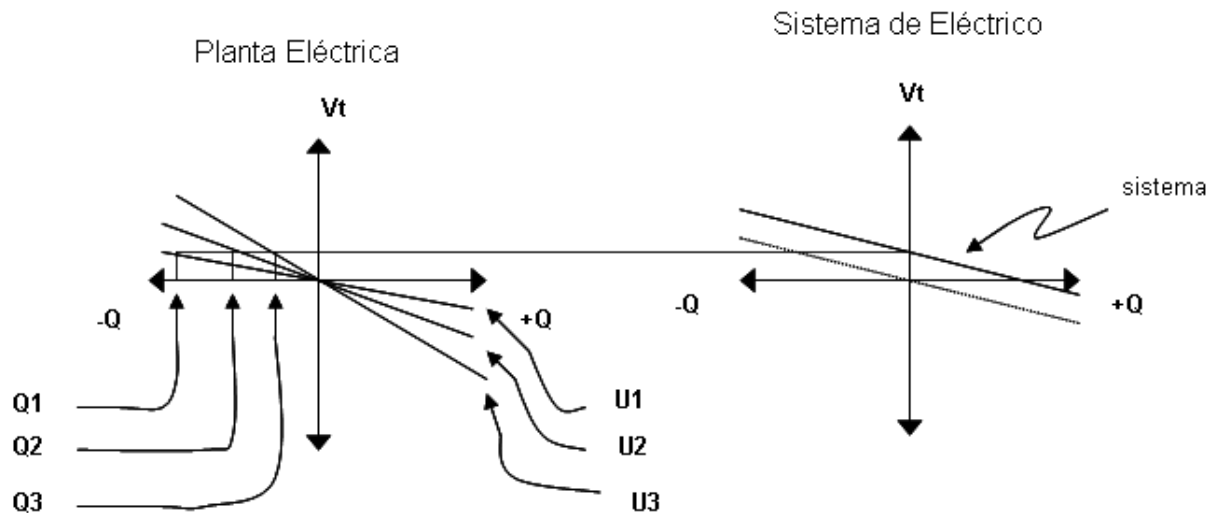


Fig.3.4.3.10 Grafica de operación de unidades con compensador de reactivos implementado.

3.5.- CONEXIONES DEL COMPENSADOR.

Las conexiones que se realizan en los sistemas de excitación del tipo; estático y rotatorio, para implementar la función compensadora de corriente reactiva, se muestran en la figura 3.5.1

Se puede observar los elementos que integran al circuito; resistencias e inductancias para obtener el desfase necesario para que en forma vectorial se sume al voltaje de terminales del generador, tal como se puede observar en el diagrama de la figura 3.5.1, el voltaje que se compara con la referencia del canal automático del sistema de excitación cuyo resultado puede ser mayor o menor; y con esto, la señal de error resultante de la comparación entre la señal de retroalimentación del voltaje en terminales del generador y la referencia sea mayor o menor, incrementa o disminuye la corriente de excitación al campo del generador, modificando así el voltaje de terminales del generador; en caso de que el generador se encuentre en vacío o en caso de estar sincronizado, se reflejará en variación de la potencia reactiva del generador.

Para el caso de sistemas de excitación digital, no existen estas conexiones, ya que la señal de corriente y voltaje entra en puntos de medición del sistema de control, la compensación es realizada por medio de programación o software.

La función de compensación en sistemas de excitación digitales se realiza modificando la referencia del canal automático con el fin de incrementar/disminuir el voltaje en terminales del generador cuando se encuentre en vacío o incremento/disminución de potencia reactiva cuando esté conectado al sistema.

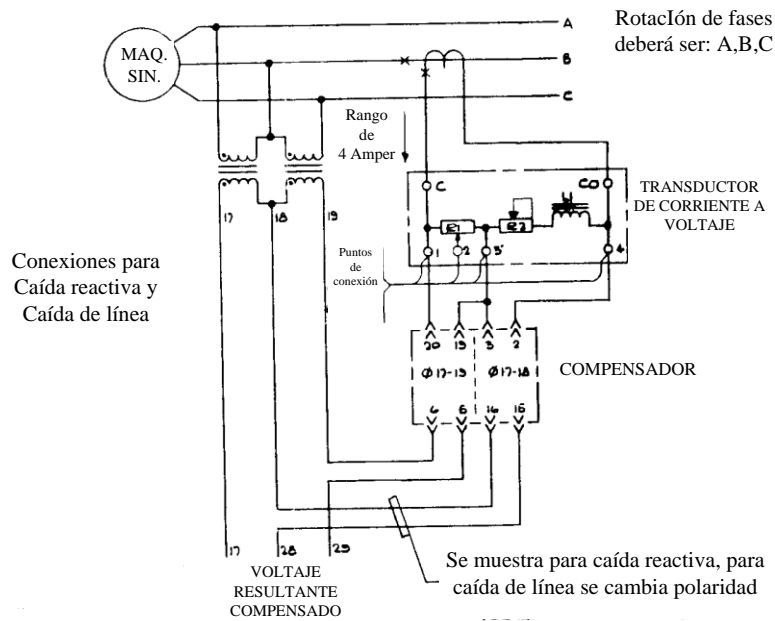


Figura 3.5.1 Conexión del Compensador de Reactivos

Se puede observar en la figura 3.5.1, los elementos que se necesitan para implementar la función compensadora de reactivos (CCR), la señal de corriente de la fase b del generador, como entrada al módulo del CCR.

El módulo está integrado por una resistencia y un elemento inductor, así como el elemento compensador. En la figura 3.5.2 se representa en forma vectorial los voltajes de terminales del generador.

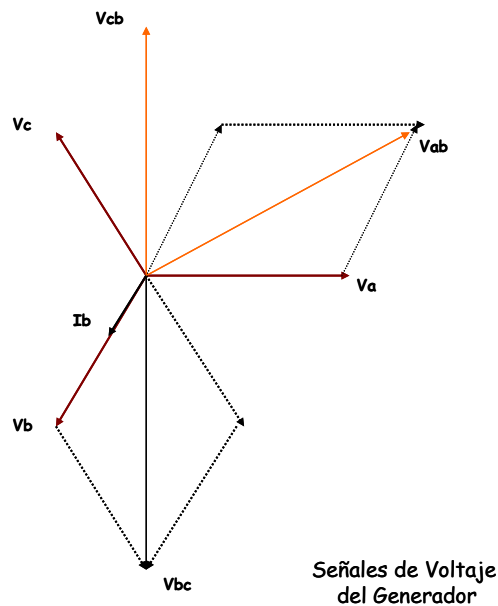


Figura 3.5.2
Diagrama Vectorial de voltajes del Compensador de Reactivos

Para su salida, es necesario conectarse al voltaje de terminales del generador, el cual se utiliza como retroalimentación de esa señal al sistema de excitación.

Ya que el dispositivo CCR, modifica las magnitudes vectoriales de las señales del voltaje de terminales del generador. Estas señales de voltaje, son las que procesa el sistema de excitación para controlar la variable del voltaje de terminales.

El circuito presentado en la Figura 3.5.2 se utiliza para realizar compensación de potencia reactiva y compensación por caída reactiva en la línea. En la figura 3.5.3 se representan los voltajes de terminales del generador y de la función compensadora de reactivos.

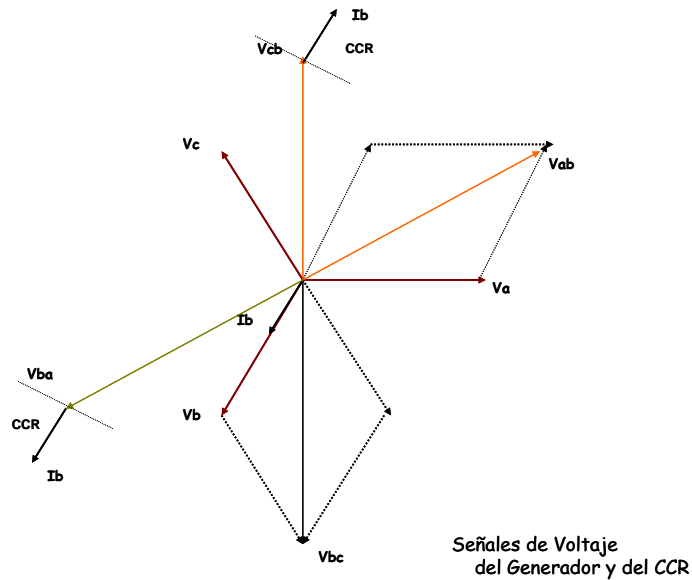


Figura 3.5.3 Diagrama vectorial de voltajes del generador y compensador de reactivos

En la figura 3.5.4 se presenta las conexiones necesarias para implementar la función compensador de reactivos así como las conexiones para el desfaseamiento de la señal de salida con respecto al voltaje de terminales del generador.

A semejanza a la figura 3.5.2, los elementos son los mismos, la diferencia es la conexión del elemento compensador. En la figura 3.5.5 se representa las corrientes del generador en forma vectorial y los voltajes de la corriente en el elemento compensador de reactivos.

En la figura 3.5.5 se puede apreciar las señales de corriente, tanto en terminal B del generador, como en el módulo del compensador de reactivos; elemento transductor de voltaje.

Estas señales vectoriales son las que se mezclan formando señales vectoriales de voltaje modificadas lo cual harán que el sistema de excitación incremente o disminuya la corriente de excitación a campo del generador incrementando o disminuyendo el voltaje de terminales. La figura 3.5.6 nos muestra como se suman estos vectores de voltaje en toda la zona de operación del generador.

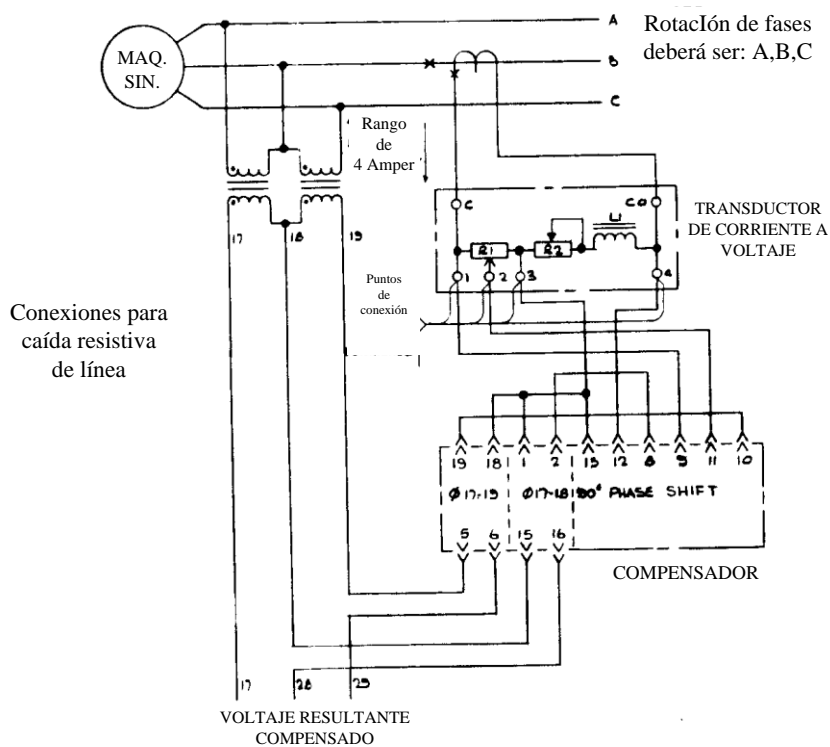


Figura 3.5.4 Diagrama de Conexión del Compensador de Reactivos

Las señales de voltaje de terminales del generador que se conectan tanto al sistema de excitación como a la función compensadora, se muestran en las figuras 3.5.1. y 3.5.4.

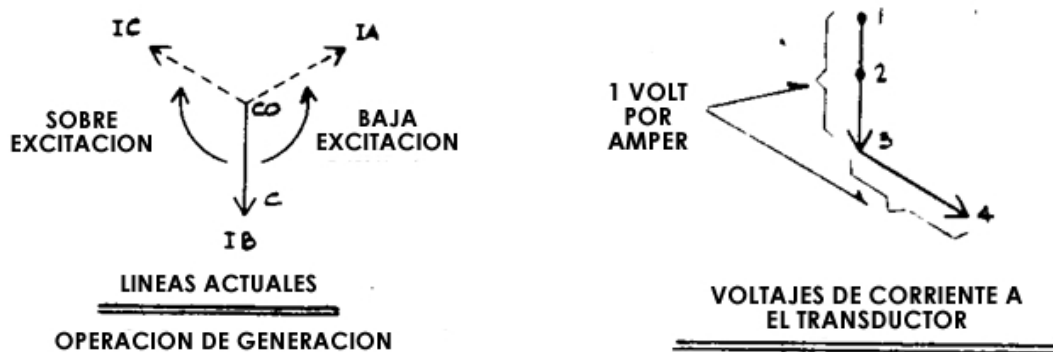


Figura 3.5.5 Corrientes del Generador y disposición de voltajes en el compensador de reactivos

La función compensadora de reactivos modifica vectorialmente estas señales de voltaje para poder tener la compensación deseada por parte del generador en el nodo al cual está conectado; compensación de reactivos, compensación por caída en línea, compensación por factor de potencia. Esto depende de las conexiones que se realicen en el acondicionador de señal del compensador; la señal de corriente del generador según

la condición de operación del generador, puede estar compuesta de dos vectores (como se muestra en la figura 3.5.7), vector de corriente en eje directo y en eje de cuadratura, lo que corresponde a los factores de potencia de adelanto y atraso. (ver figura 3.5.7)

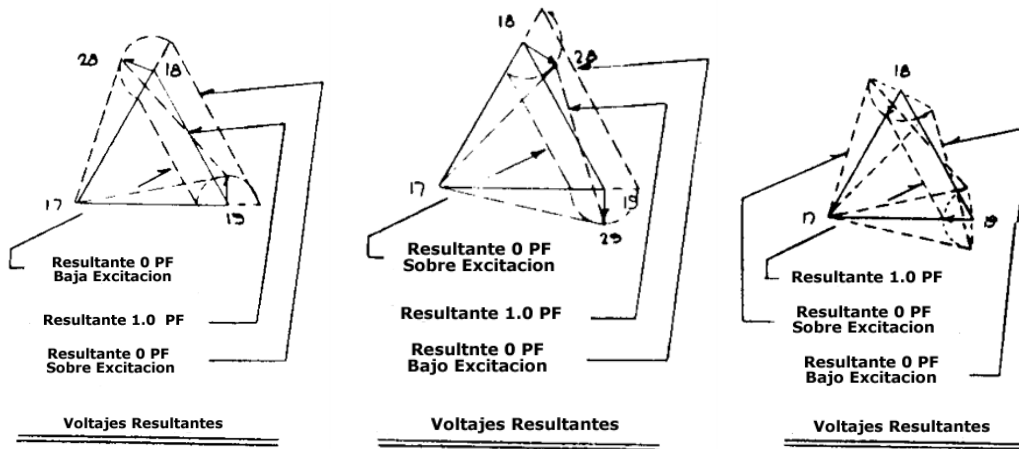


Figura 3.5.6 Grafica vectorial de suma de voltajes en todo el rango de operación del compensador

Se puede observar en la figura 3.5.7 como modifica la señal vectorial del compensador la magnitud del voltaje del vector V_{cb} .

Para el caso de compensación por caída de línea, se puede observar que la acción correcta sería el área inferior del círculo ya que con esto se cumpliría la acción correcta del sistema de excitación, esto es, para el incremento de la potencia real del generador, se tendría un incremento en la corriente de campo del generador, lo cual ocasiona que se incremente el voltaje de terminales del generador compensando la caída resistiva de la línea.

Para el caso de compensación reactiva, el incremento de la corriente de cuadratura en el generador, hace que se tenga una mayor magnitud en la señal desfasada que proporciona el CCR, y por lo tanto, el incremento de la corriente por el sistema de excitación en el campo del generador se reflejaría en incremento de potencia reactiva.

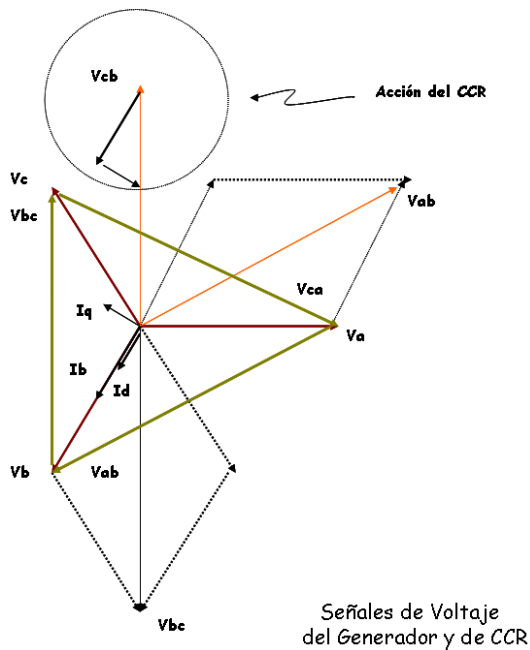


Figura 3.5.7 Diagrama vectorial de voltajes de generador y del compensador de reactivos

3.5.1 TECNOLOGÍA GENERAL ELÉCTRICA.

COMPENSADOR DE IMPEDANCIA.

Esta función causa que el voltaje del generador sea disminuido cuando los amperes reactivos sean de sobre-excitación, el cual es identificado como característica “Droop” (Caida) o compensación paralela. El compensador de reactivos es necesario cuando dos o más generadores están operando en paralelo con insuficiente reactancia entre ellos. Para poder realizar esto dos señales son necesarias; una es el voltaje senoidal proporcional y en fase a la corriente de la fase c; la otra señal es el voltaje senoidal proporcional al voltaje entre líneas de las fases B a A (V_{ba}). Estas señales tienen un diagrama vectorial que se muestra en la figura 3.5.1.1

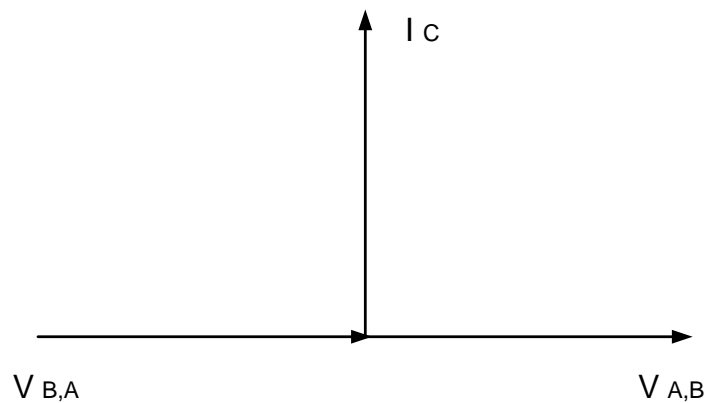


Fig. 3.5.1.1 Relación vectorial de salida de voltajes de TC y TP

En la figura 3.5.1.2 se muestra la tarjeta que realiza la función compensadora de impedancia, la cual proporciona una señal a la tarjeta reguladora de AC del canal automático, cuya función es la de obtener la señal de error para definir la demanda de ángulo de disparo a los tiristores.

Por medio del uso del voltaje de terminales y la corriente de línea, el voltaje es sintetizado, el cual es rectificado y filtrado, y es comparado el voltaje de terminales que también es filtrado y rectificado. La diferencia entre estas dos comparaciones es alimentada a tarjeta reguladora de AC.

La figura 3.5.1.4 muestra el diagrama vectorial para la operación correcta del CCR. ET es el voltaje terminal del generador, e I es la corriente de línea del generador. La salida de CCR deberá ser la diferencia entre ET y ES, donde Ix es el voltaje reactivo desarrollado por la tarjeta compensadora.

Ix simula una reactancia insertada en la salida del generador, El valor de Ix es ajustable. La figura 3.5.1.4 muestra los vectores de los voltajes y del compensador de impedancia, la figura 3.5.1.2 muestra los componentes de la tarjeta compensadora de impedancia, donde se puede observar la entrada de las señales de voltaje y de corriente, así como, su salida.

Para una sola fase de muestreo, el potenciómetro “R” proporcionará un 10 % máximo de compensación CCR.

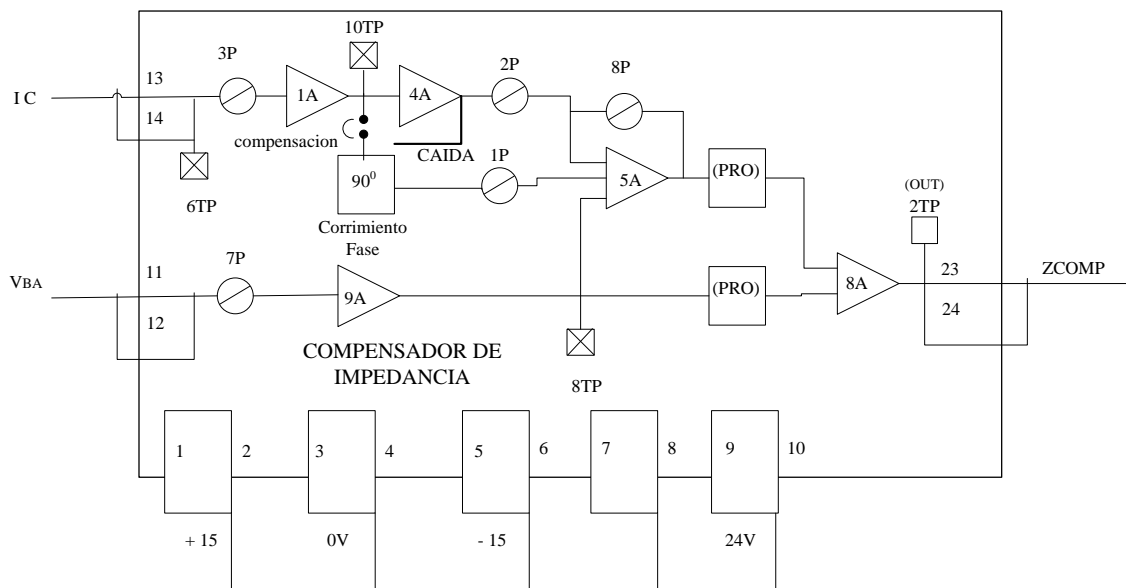


Figura 3.5.1.2 Diagrama a Bloques del Compensador de Reactivos.

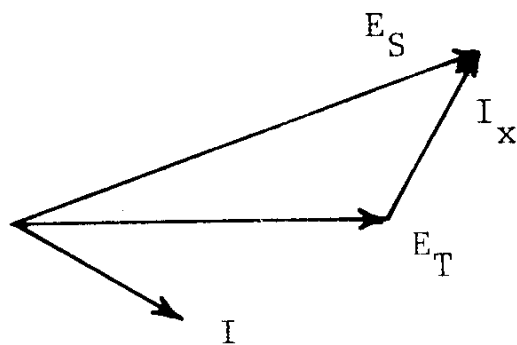


Figura 3.5.1.3 Condiciones del Sistema.

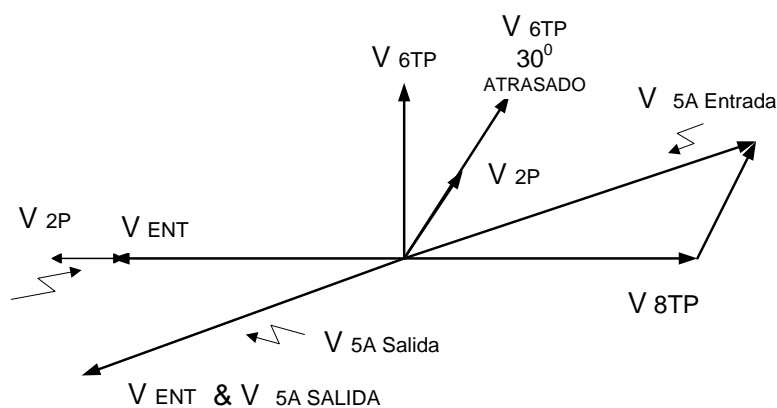


Figura 3.5.1.4 Vectores del compensador de reactivos

Como se puede apreciar en la figura 3.5.1.5, se tiene el diagrama a bloques del sistema de excitación marca General Electric, se puede apreciar los bloques acondicionadores de las señales de voltaje y corriente de los terminales del Generador, se aprecia que la salida del acondicionador alimenta a las tarjetas que monitorean el voltaje y tarjeta compensadora de impedancia.

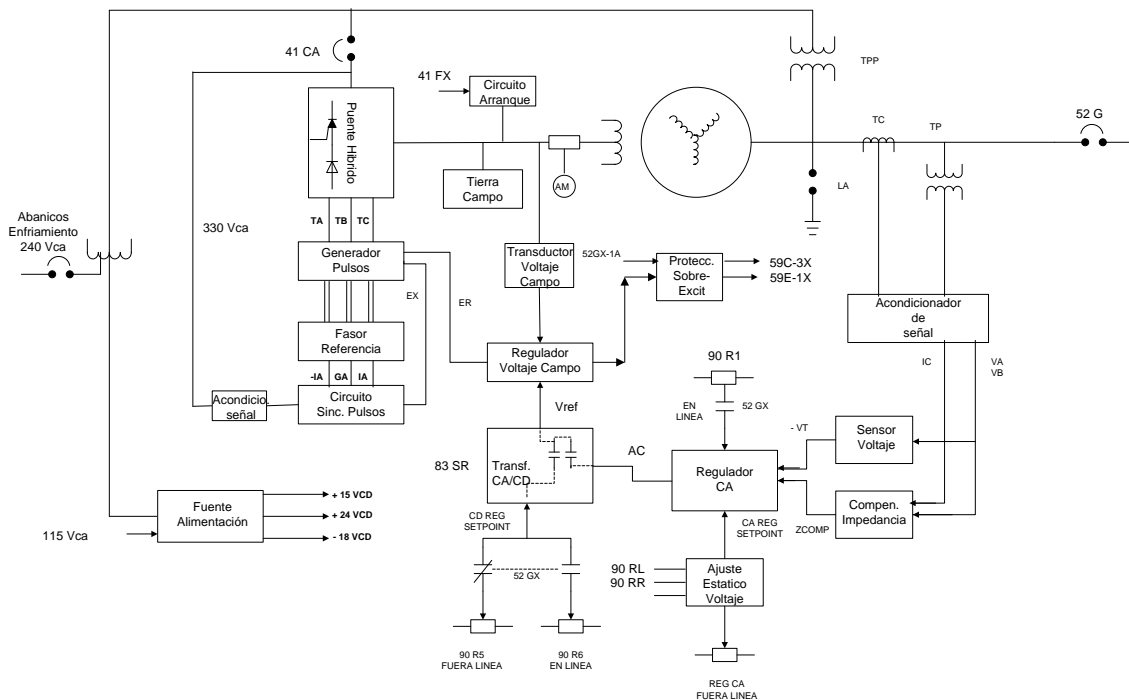


Figura 3.5.1.5 Diagrama a bloques del sistema de excitación

3.5.2 COMPENSADOR DE REACTIVOS UNIDADES DE CT RIO ESCONDIDO Y RIO BRAVO.

Como se puede apreciar en el esquema del regulador de voltaje (fig. 3.5.2.1), se tiene unos acondicionadores de señal para el caso de la corriente proveniente de las terminales del generador, y esta entra al módulo compensador de reactivos.

La salida de este módulo está conectado por medio de transformadores al circuito de retroalimentación del voltaje de terminales del generador antes de llegar al dispositivo conocido como 90 R.

La función del dispositivo compensador de corriente reactiva, es generar los vectores necesarios y adecuados para mezclarlos con los vectores del voltaje de terminales del generador, y así incrementar o disminuir el voltaje de retroalimentación que esta monitoreando el sistema de excitación, de tal forma que el sistema de excitación incrementa o disminuye la corriente reactiva en terminales del generador con el fin de poder controlar el flujo de reactivos en el nodo en el cual se encuentra conectado el generador al sistema eléctrico de potencia. (ver figura 3.5.2.1)

El diagrama vectorial de la mezcla de los voltajes de terminales del generador y del compensador de reactivos, se muestran en la grafica siguiente.

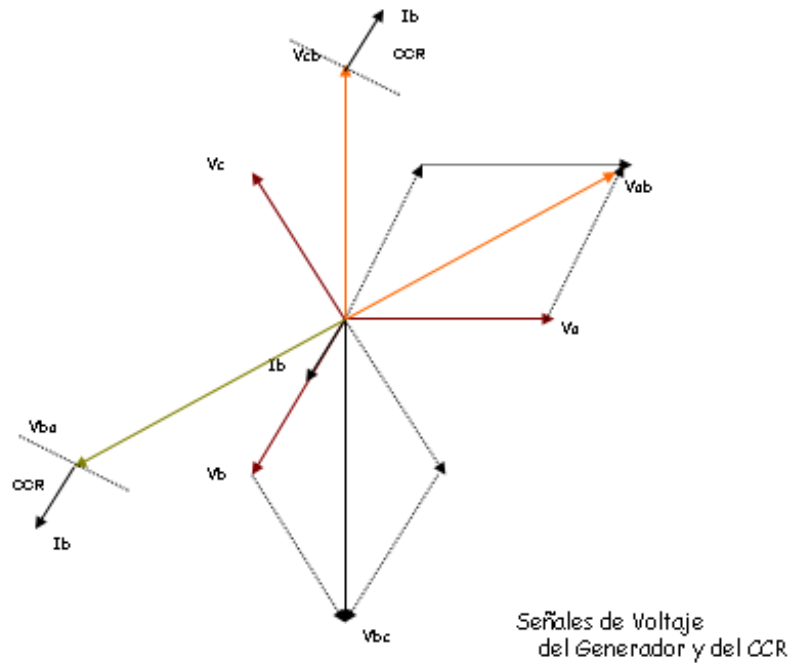


Fig. 3.5.2.1 Diagrama vectorial de voltajes de generador y compensador de reactivos

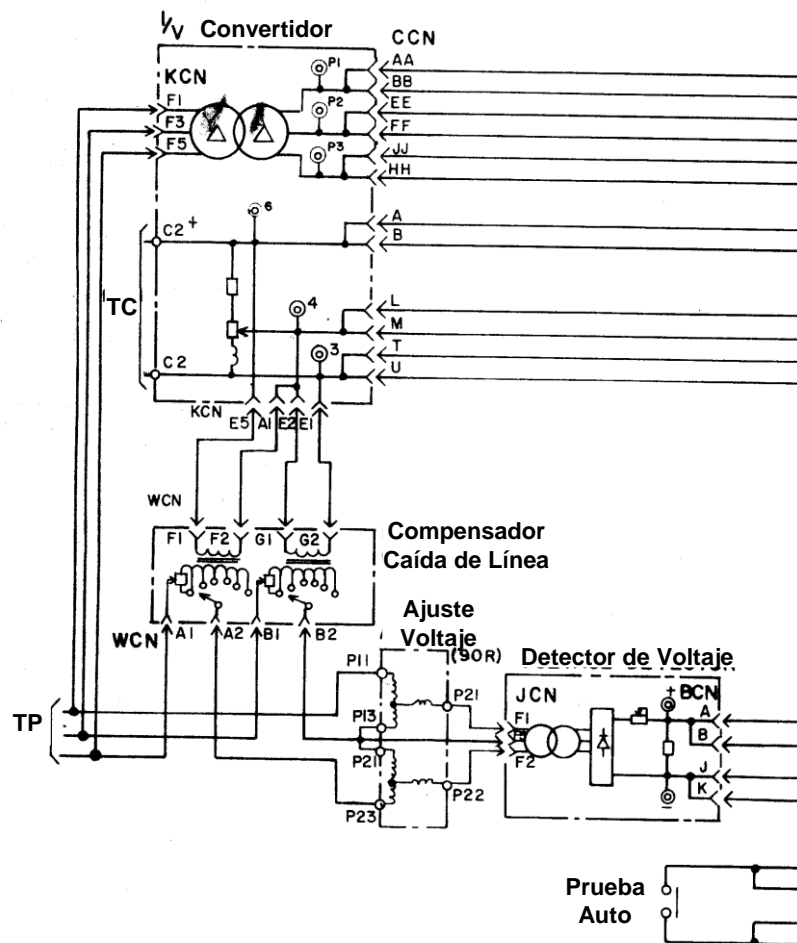


Figura 3.5.2.2 Conexión del compensador de reactivos en el sistema de excitación

Disposición de la conexión del compensador de reactivos del sistema de excitación de las Centrales Río Escondido y Río Bravo. Fig. 3.5.2.2

El voltaje de terminales del generador está indicado por las señal de T.P. y las fases son: F1, F3 y F5 correspondientes a Fase a, b y c.

La señal de corriente está indicada por TC, siendo la fase B del generador y C2 + representa la conexión de polaridad.

3.5.3 COMPENSADOR DE REACTIVOS DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN MARCA VATECH.

3.5.3.1 COMPENSACION DE CARGA ACTIVA Y REACTIVA.

La compensación de carga activa y reactiva es utilizada para operación en paralelo en la red eléctrica o para operación en paralelo de varias máquinas. Cuando dos o más máquinas trabajan en modo de control de voltaje sin suficiente reactancia entre ellas, cada máquina trata de controlar su voltaje independientemente de la potencia reactiva y no se puede lograr un punto de operación estable. Para evitar este problema puede usarse la compensación de carga reactiva con signo negativo (característica decreciente), esta proporciona un ajuste adicional el cual reduce el voltaje del estator dependiendo de la corriente reactiva.

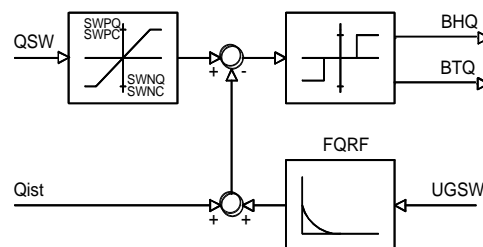
La compensación de carga reactiva con signo positivo (característica ascendente) es usada para compensar la reactancia principal, para reducir la reactancia del transformador de unidad.

Adicionalmente, hay disponible una compensación de carga activa que puede ser usada para compensar las influencias dependientes de la corriente activa, caída de voltaje por carga óhmica.

3.5.3.2 REGULADOR DE CARGA REACTIVA.

La potencia reactiva o factor de potencia puede ser regulado mediante el regulador de carga reactiva. Este actúa sobre el valor de ajuste de voltaje mediante comandos de reajuste y regula la carga reactiva a un valor de potencia reactiva estacionario. La regulación de voltaje no pierde sus características dinámicas, es decir, puede regular fluctuaciones de carga transitorias sin dificultad.

Diagrama de bloques



- Q_{ist} Valor real de la carga reactiva (potencia reactiva o factor de potencia)
- QSW Valor de ajuste de la carga reactiva
- UGSW Valor de ajuste del voltaje del generador
- BHQ Comando: subir, regulación de carga reactiva
- BTQ Comando: bajar, regulación de carga reactiva

Retroalimentación del regulador de carga reactiva:

$$F_{QRF}(s) = \frac{sK_{PQRF}}{1 + sT_{IQRF}}$$

$F_{QRF}(s)$	Función de transferencia de la retroalimentación del regulador de carga reactiva
K_{PQRF}	Amplificación diferencial
T_{IQRF}	Amortiguamiento diferencial

El valor de ajuste del regulador de carga reactiva depende de la selección del modo de regulación: potencia reactiva (Q) o factor de potencia ($\tan \varphi$). El signo puede ser positivo o negativo. Un signo positivo significa inductivo, un signo negativo significa operación capacitiva. El valor de ajuste es limitado por el limitador correspondiente al regulador de carga reactiva.

El regulador de carga reactiva incluye un controlador de tres pasos el cual da los comandos de salida: BHQ (comando: subir, regulación de carga reactiva), BTQ (comando: bajar, regulación de carga reactiva) o no salida. Estos comandos actúan sobre el ajuste de la referencias y causa un cambio en la carga reactiva de la máquina síncrona.

Para estabilizar la regulación se retroalimenta la diferencia del ajuste de voltaje del generador al valor real.

Las posibilidades de control de carga reactiva requieren lo correspondientes valores:

$$Q = U_{GK} \cdot I_{BIW} \quad \text{valor calculado de potencia reactiva}$$

$$\tan \varphi = \frac{I_{BIW}}{I_{WIW}} \quad \text{Valor calculado de } \tan \varphi$$

I_{BIW}	Corriente reactiva del estator
I_{WIW}	Corriente activa del estator
U_{GK}	Voltaje del estator

Valores Medidos, de Ajuste y Calculados

V501	UGK	Valor medido del voltaje del estator Es normalizado a 1.00 a voltaje nominal del estator por medio de V813.
V12	QSW	Valor de ajuste de la carga reactiva (regulación de carga reactiva)
V504	IBIW	Valor calculado de la corriente reactiva del estator Normalización: 1.0000 = corriente nominal (signo pos. = sobre-excitado, signo neg. = sub-excitado)

V505	IWIW	Valor calculado de la corriente activa del estator Normalización: 1.0000 = corriente nominal (signo pos. = generación, signo neg. = consumo)
V65	PBIW	Valor calculado de la potencia reactiva (1.00 a potencia nominal)
V99	TANIW	Valor calculado de $\tan \phi$ (1.00 a 45°)

Retroalimentación del Regulador de Carga Reactiva

Las características de regulación de la retroalimentación del regulador de carga reactiva son determinadas por los siguientes parámetros.

V877	KPQRF	Amplificación diferencial de la retroalimentación del regulador de carga reactiva
V957	TIQRF	Amortiguamiento diferencial de la retroalimentación del regulador de carga reactiva Normalización: 1.0000 = 100 seg.

Límites del Valor de Ajuste y Valor de Ajuste de Arranque de la Regulación de Carga (VAR)

Los siguientes parámetros definen los límites superior e inferior del ajuste de potencia reactiva.

V834	SWPQ	Límite positivo, valor de ajuste de regulación de VAR's Normalización: $\pm 1.0000 = \pm 1.00$ p.u. (p.e. carga reactiva = potencia nominal)
V836	SWNQ	Límite negativo, valor de ajuste de regulación de VAR's Normalización: $\pm 1.0000 = \pm 1.00$ p.u.

Durante el paro del sistema de excitación, el valor de ajuste puede ser ajustado a un valor constante, por lo que la potencia reactiva es controlada a su valor de arranque después de la sincronización del generador.

V838	SWAQ	Valor de ajuste de arranque de la regulación de VAR's Normalización: $\pm 1.0000 = \pm 1.00$ p.u.
------	------	--

Límites del Valor de Ajuste y Valor de Ajuste de Arranque de la Regulación de Factor de Potencia ($\tan \phi$)

Los siguientes parámetros definen los límites superior e inferior del ajuste de factor de potencia.

V835	SWPC	Límite positivo, valor de ajuste de la regulación de factor de potencia Normalización: $\pm 1.0000 = \pm 45^\circ$ factor de potencia (ajuste = $\tan \phi$)
------	------	--

V837 SWNC Límite negativo, valor de ajuste de la regulación de factor de potencia
Normalización: $\pm 1.0000 = \pm 45^\circ$ factor de potencia

Durante el paro del sistema de excitación, el valor de ajuste puede ser ajustado a un valor constante, por lo que el factor de potencia es controlado a su valor de arranque después de la sincronización de la máquina síncrona.

69

V839 SWAC Valor de ajuste de arranque de la regulación de factor de potencia
Normalización: $\pm 1.0000 = \pm 45^\circ$ factor de potencia

3.5.3.3 TRANSFERENCIA ENTRE REGULACIÓN DE VOLTAJE Y REGULACIÓN DE CARGA REACTIVA.

La transferencia de regulación de voltaje a regulación de carga reactiva únicamente es posible en operación del generador con la red eléctrica, es decir, no puede activarse en caso de que la máquina no haya sido sincronizada.

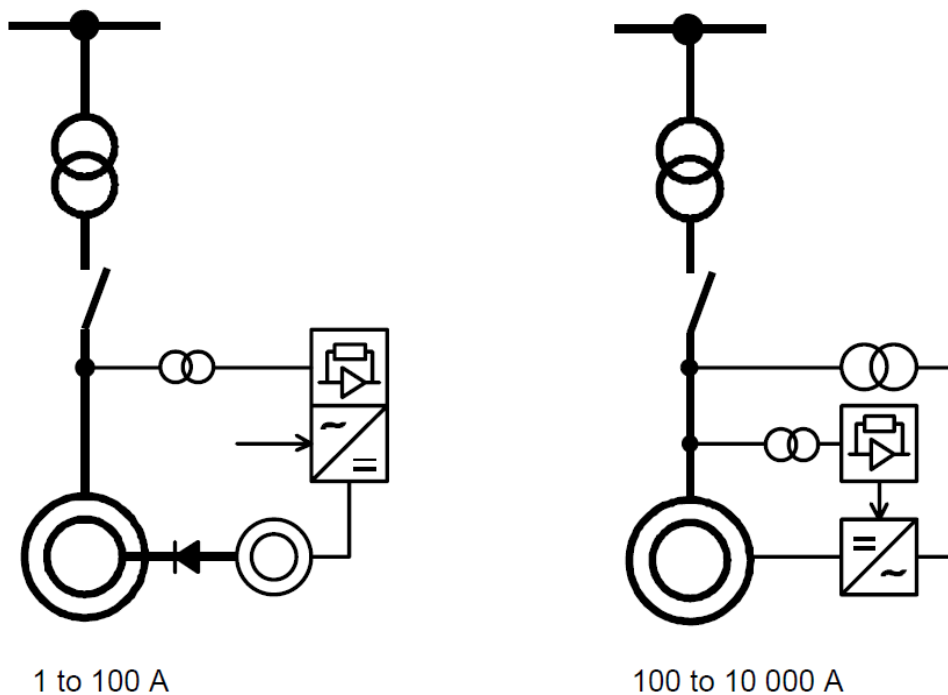
La regulación de carga reactiva únicamente es posible en modo automático.

3.5.4 SISTEMA DE EXCITACION ABB

3.5.4.1 SISTEMAS DE EXCITACION PARA MÁQUINAS SINCRONAS

Para crear un flujo magnético en el rotor de una máquina sincrónica, este se tiene que energizar con una fuente de corriente. La corriente de excitación deberá de variar rápidamente y con pequeñas pérdidas y amplios límites para adaptarse a diferentes condiciones de operación. El dispositivo que puede cumplir con todas estas condiciones técnicas, es el sistema de excitación.

Los sistemas de excitación, que hasta la fecha son más usados, se dividen en dos grandes grupos; siendo el primero, con máquina rotatoria de excitación, conocida como excitación indirecta y el otro caso, sin máquina rotatoria de excitación conocida como excitación directa o estática.



Sistema de Excitación sin Escobillas Sistema de Excitación Estático
Figura 3.5.4.1.1 DISEÑO DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN.

3.5.4.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN TIPO ESTÁTICO.

Un sistema de excitación estático, regula el voltaje en terminales y el flujo de Potencia Reactiva de la máquina sincrónica por medio del control directo de la corriente de campo del generador, utilizando para esto puentes de tiristores. El sistema de excitación o regulador de tensión puede ser dividido dentro de cuatro grandes grupos:

- Transformador de Excitación
- Unidad de Control
- Unidad Convertidora
- Equipo de parpadeo y supresión de campo

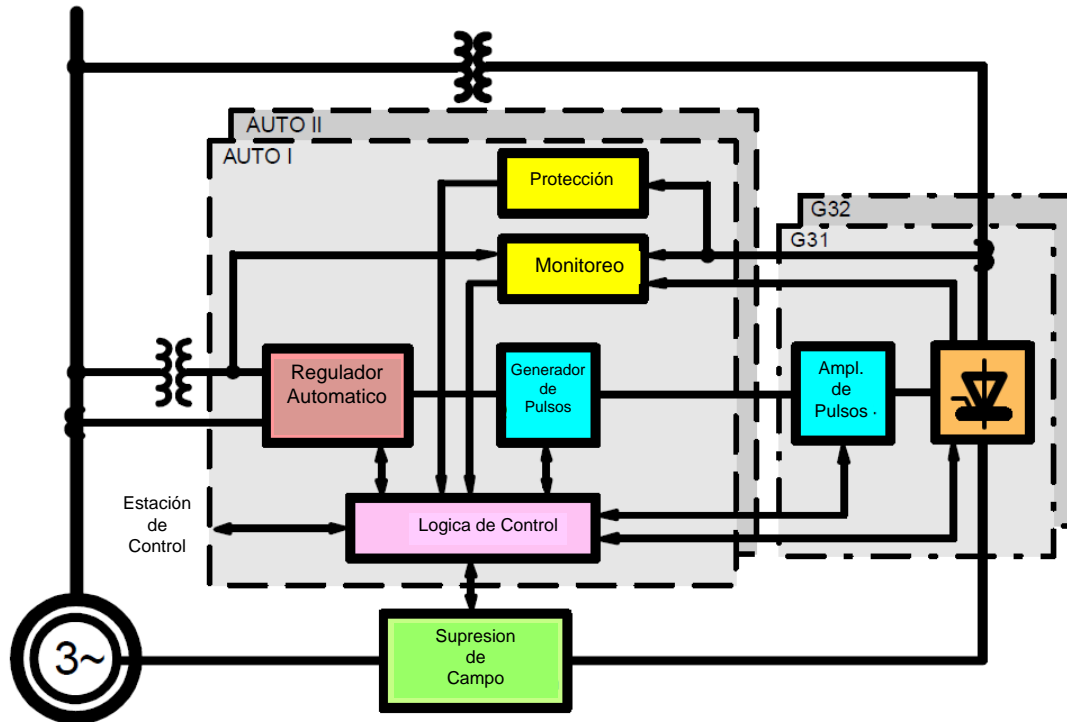


Figura 3.5.4.2.1 DIAGRAMA A BLOQUES DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN

Para el conocido como excitación “Paralelo” (también conocido como excitación propia), la potencia para la excitación se toma de las terminales del generador. La corriente de campo de la máquina sincronía fluye a través del transformador de excitación, al convertidor de potencia y la quebradora de campo. El transformador de excitación reduce el voltaje en terminales del generador para el voltaje requerido de entrada al convertidor, proporciona el aislamiento galvánico entre las terminales de la máquina y el cableado del campo; y actúa al mismo tiempo como reactancia conmutada para el puente convertidor de tiristores.

El puente convertidor de potencia, convierte la corriente de CA. dentro de una corriente de CD. controlada.

Para el tipo de sistemas de excitación o regulador de tensión paralelo, la máquina no proporciona el suficiente voltaje residual en el campo del generador para poder construir o excitar al generador hasta llegar al voltaje nominal de terminales.

El circuito conocido como “parpadeo de campo”, suministra una fuente de potencia de CD. (Banco de Baterías), el cual tiene conectado una resistencia en serie para limitar la corriente que suministra al campo del generador. Si la alimentación es tomada de una fuente auxiliar deberá ser al nivel requerido del circuito de “parpadeo de campo”.

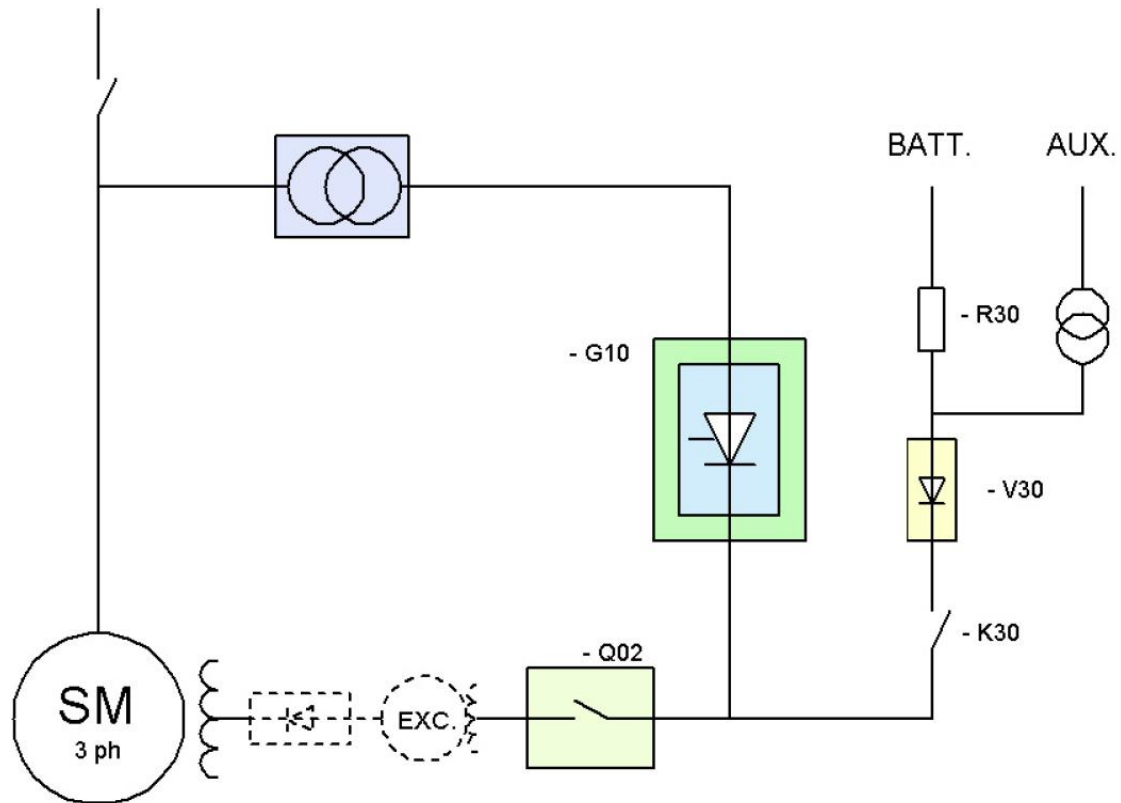


Figura 3.5.4.2.2 Sistema de Excitación o Regulador Automático de Voltaje con alimentación paralela

La máquina es excitada al cerrarse la quebradora de campo seguida por el interruptor del circuito de “parpadeo de campo”. Una corriente inicial fluye la cual excita al generador entre un 15 a 30 % del rango del voltaje de terminales, el convertidor electrónico y el convertidor de potencia están listos para operar y contribuir al proceso de excitación del generador.

El diodo instalado en la entrada del interruptor del circuito “parpadeo de campo”, protege de una corriente inversa cuando el voltaje de campo del generador exceda su voltaje. Cuando el voltaje de la máquina excede aproximadamente 40 % del voltaje en terminales, (U_t), el circuito de “parpadeo de campo” es abierto y la corriente de este circuito se hace cero.

3.5.4.3 CARACTERISITICA DEL CONTROL DE EXCITACIÓN

GENERAL

La figura nos muestra las diferentes partes que integran a un sistema de excitación.

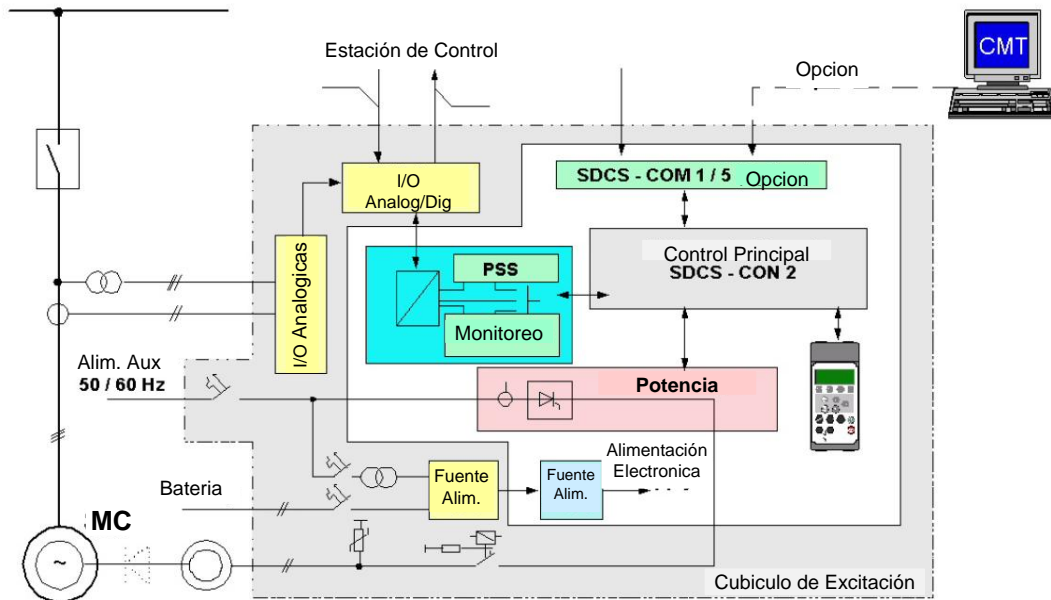


Figura 3.5.4.3.1 Diagrama a bloques con configuración de simple canal

La alimentación al puente de tiristores del sistema de excitación o regulador de tensión, por lo general se toma de terminales del generador. El puente de tiristores suministra la corriente de CD a través de la quebradora de campo al campo del generador síncrono.

El control del voltaje de salida del generador es dada por un controlador de alta velocidad. Una herramienta de PC llamada "Commissioning and Maintenance Tool" (CTM) puede aplicarse para modificación de parámetros, en línea, para ser grabados o ser vistos.

La conexión del controlador a la PC es dado por medio de enlace óptico y una caja de interface.

Las señales analógicas, tal como el voltaje de generación, corriente de generación y medición a través de una interface analógica la cual es conectada al controlador.

El controlador procesa las señales de acuerdo a las funciones de software requeridas para señales de control. Estas señales son enviadas a la unidad de control de disparo de tiristores, la cual es parte de la tarjeta de control, que genera pulsos al puente de tiristores.

Además cuenta con las funciones de regulación de voltaje, control de protecciones, y funciones de monitoreo son procesadas por el controlador.

Un panel de operación, montado en la parte frontal del gabinete del sistema de excitación, despliega las alarmas y el estado del sistema de excitación.

La conexión al controlador es por un puerto serie RS-485.

Además de la propia función reguladora de voltaje (canal automático), el mismo controlador permite la regulación de la corriente de campo (canal manual).

El canal manual normalmente es utilizado para fines de prueba, commissioning y sirve como canal de respaldo para cuando el canal automático tiene falla, permitiendo un cambio suave entre ambos canales; de automático a manual.

La configuración dispone de un sistema doble de canales, el cual se ilustra en la figura 3.5.4.3.2.

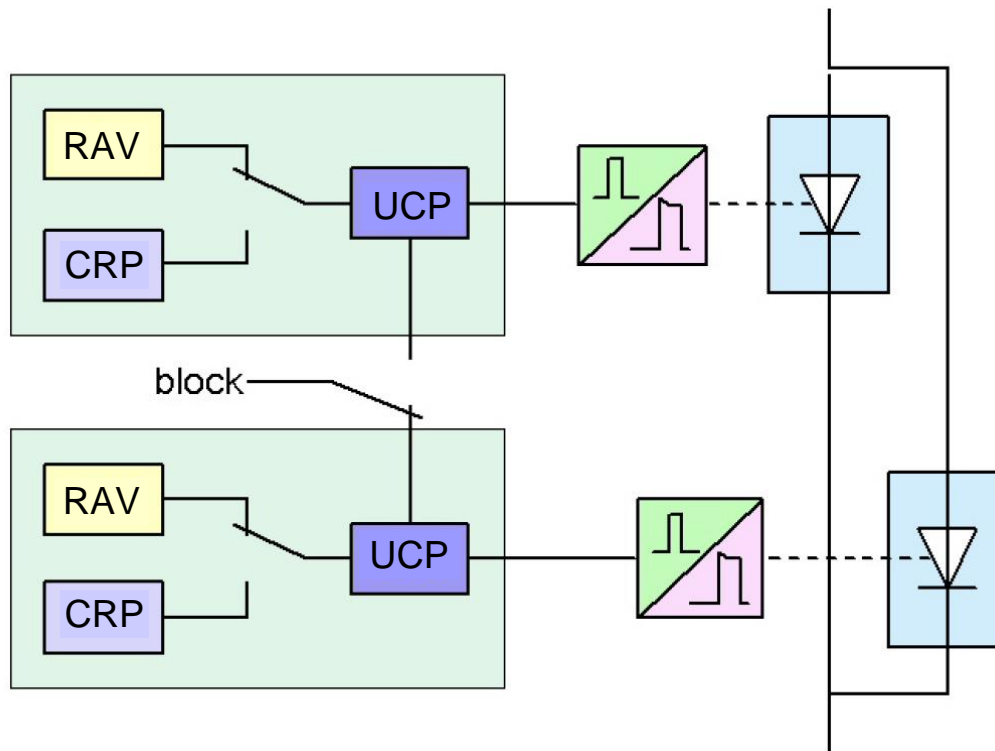


Figura 3.5.4.3.2 Diagrama a Bloques de configuración de doble canal

En tal sistema, ambos canales operan en forma paralela y son alimentados simultáneamente con la misma información. Si un canal falla, se realizará un cambio al otro canal, no importa cual canal falle. No hay una sucesión jerárquica entre los dos canales, el canal “disponible” sigue automáticamente al canal que se encuentra en línea.

3.5.4.4 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN.

- Ajuste del Regulador Automático de Voltaje
- Limitadores
- Control de Voltaje del Generador
- Regulador de Corriente de campo
- Control del seguidor

3.5.4.5 AJUSTE DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN.

Los ajustes del sistema consisten en ajustes al regulador y de variables que influyen, lo cual depende de condiciones de operación.

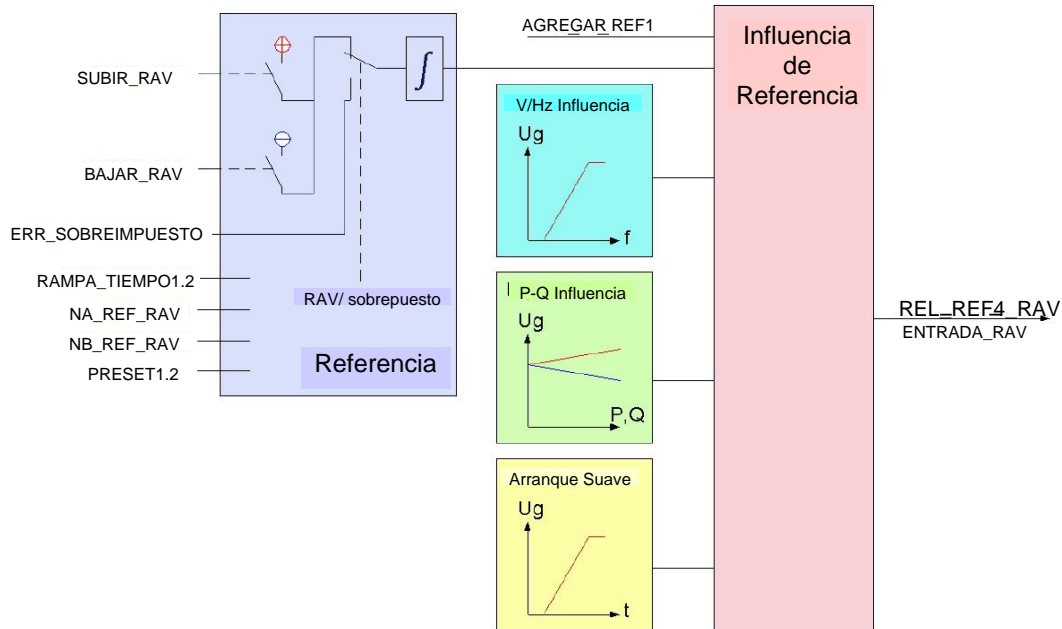


Figura 3.5.4.5.1 Diagrama a bloques de variables que afectan a la referencia del regulador

Ajuste de referencia del RAV.

Ajustes:

- | | |
|---------------------------|---|
| * Rango (Min ... Max) | 90 ... 110 % del rango del voltaje de de terminales 100 % |
| * Valor inicial de ajuste | 100 % |
| * Tiempo (Min ... Max) | 60 seg |
| * Min/Max. Posición | Indicación en el cuarto de Control |

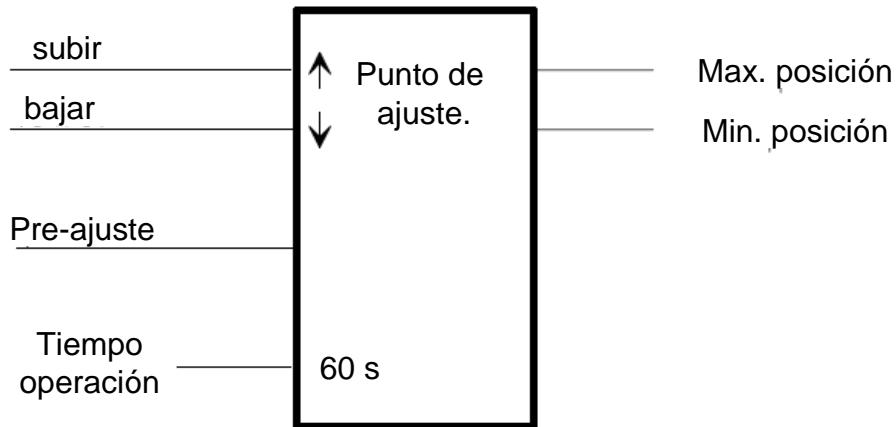


Figura 3.5.4.5.2 Bloque de programación del ajuste de referencia

3.5.4.6 COMPENSACIÓN DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA

Los siguientes dos bloques en la fig. 3.5.4.5.1 P_estático y Q_estático, se agregan como señales adicionales proporcionales a la potencia activa y reactiva del valor del punto de ajuste. La razón es por la compensación de la caída de voltaje causada por la potencia activa y reactiva a través de la unidad del transformador y/o de la línea de transmisión. La señal de Potencia Reactiva Q es también necesaria para la operación paralela de dos o más generadores conectados al mismo bus. En este caso, la señal de Q_estático, deberá reducir el ajuste de la referencia del sistema de excitación proporcionalmente al incremento de la potencia reactiva. El rango del cambio del ajuste de referencia por medio de la función de potencia activa o reactiva debe ser ajustada de acuerdo a la siguiente Tabla. La influencia estática del sistema de excitación es aplicada cuando el interruptor del generador esté en posición cerrado.

Rango (Min ... Max)	-20% ... +20 %
Ajuste	8 %

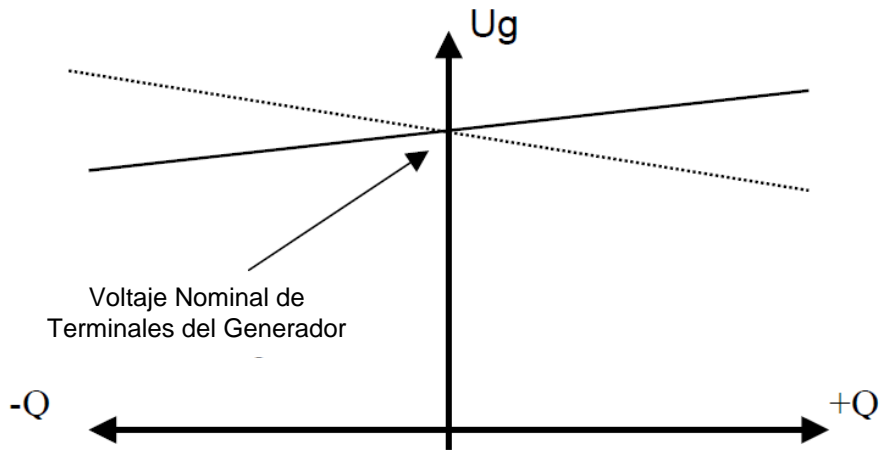


Figura 3.5.4.6.1 Curva de Ajuste.

3.5.4.7 REGULADOR SOBRE-IMPUESTO.

El regulador sobre-impuesto puede trabajar como regulador de potencia reactiva ($Q_{\text{regulador}}$) o regulador de Factor de Potencia ($\cos\Phi_{\text{regulador}}$).

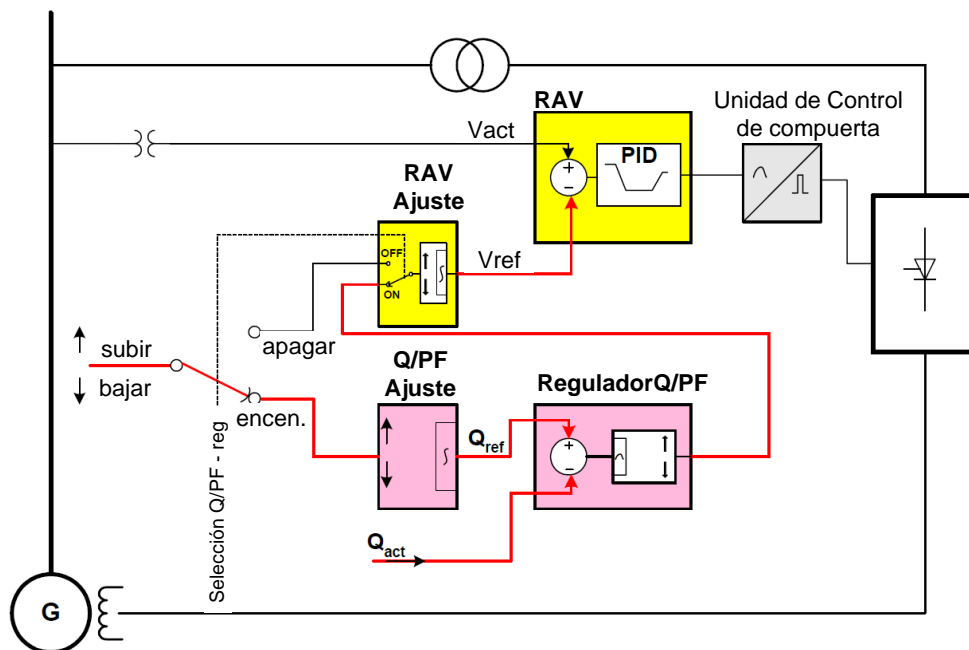


Figura 3.5.4.6.2 Diagrama a bloques del Regulador de Potencia Reactiva.

El regulador de Potencia Reactiva (Q) o el regulador de factor de potencia (CosPhi) puede ser conmutado en modo automático y el generador es sincronizado a la Red. La función reguladora de potencia reactiva o de factor de potencia, es sobre-impuesto en la referencia del sistema de excitación y reacciona solamente en forma suave a los cambios de las condiciones de operación. Pequeñas fallas en la red eléctrica, no tienen influencia en el comportamiento del sistema de excitación.

Todos los límites del modo automático del regulador están habilitados y debe ser una señal considerable para tomar el control de la operación del regulador.

La función reguladora de potencia reactiva o de factor de potencia, tienen su propio ajuste de referencia. Cuando el regulador opera con señal sobre-impuesta y esta es apagada, el punto de ajuste siempre sigue al valor actual (Potencia de corriente reactiva o corriente de factor de potencia $\cos\Phi$).

Esto significa que la transición del regulador de voltaje a regulador de señal Sobre-Impuesta no tiene efecto inmediato en el punto de operación del generador. Solamente cuando el ajuste de referencia puede ser ajustado posteriormente por medio de comandos de subir/bajar hacen que la potencia reactiva o el factor de potencia puedan cambiar.

3.5.4.8 FUNCIONES DEL SOFTWARE DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN ABB

A continuación se describen las funciones del software que se encuentran implementadas en el sistema de excitación o regulador automático de voltaje, marca ABB del tipo digital.

Estas se describen a nivel de Bloques las cuales son:

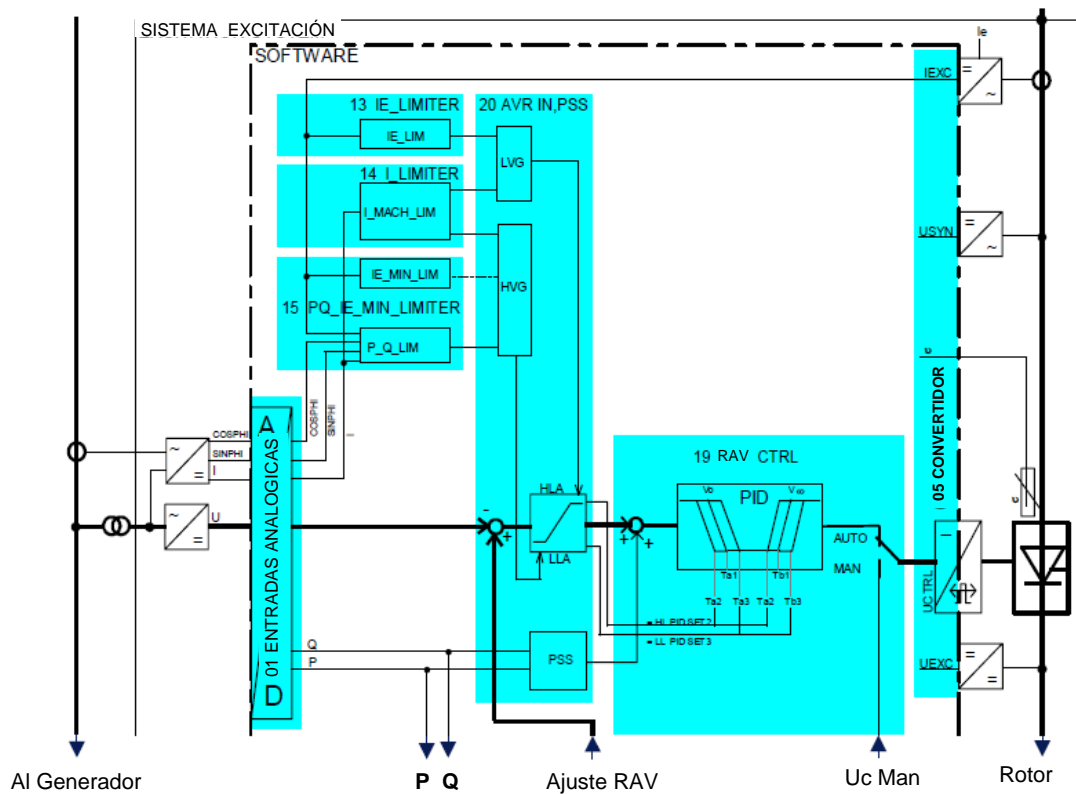


Figura 3.5.4.8.1 Sistema de Excitación Digital

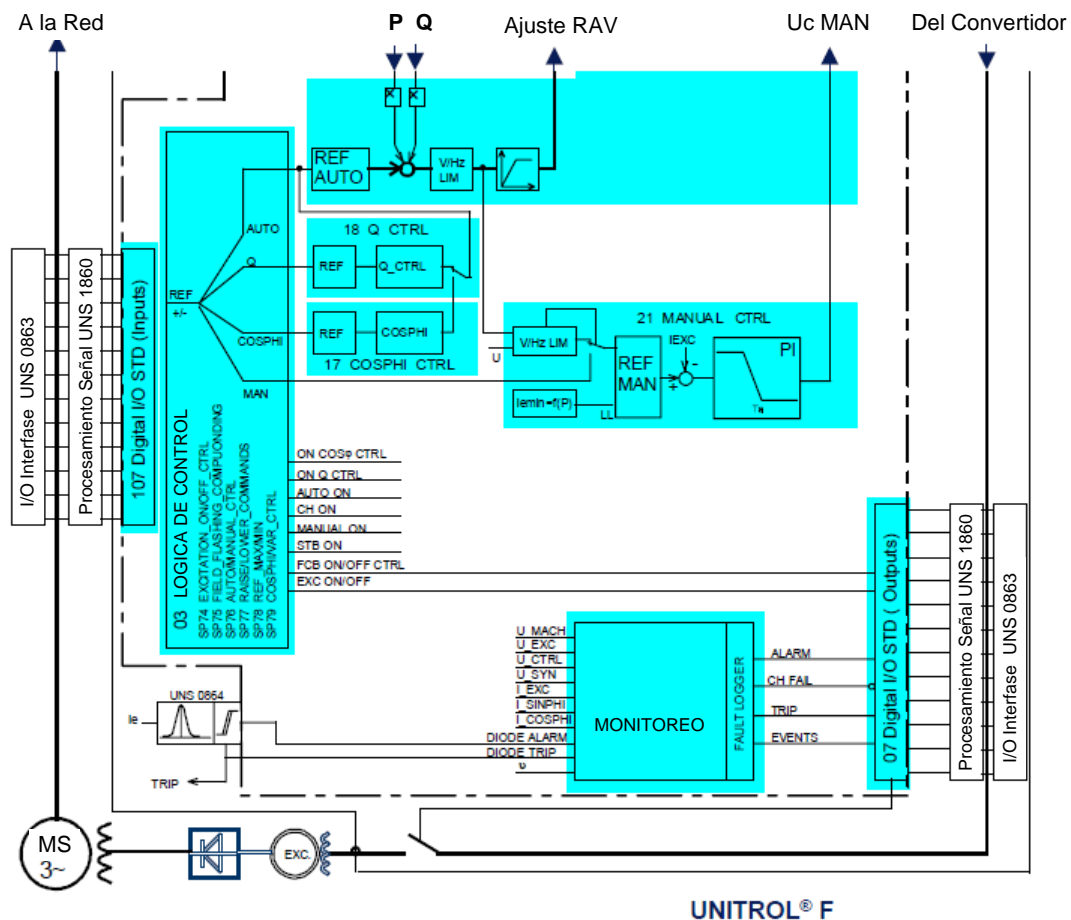


Figura 3.5.4.8.2 Sistema de Excitación Digital con funciones limitadoras

En la figura se puede observar en los diferentes bloques que integran al sistema de excitación las diferentes funciones que lo integran, la lógica de control; la cual verifica que las condiciones elementales para la operación del regulador estén presentes, ante una falla de una de ellas, se presenta disparo del regulador o transferencia de canal de regulación (auto-manual).

Se puede observar que las funciones adicionales del regulador como son: Mínima Excitación, Máxima Excitación, Estabilizador de Potencia, Volts/Hertz, etc., están integradas en bloques representando una programación.

También se puede observar como las funciones con las que está integrado el regulador, como son control de Q y COSPHI modifican la referencia del regulador de voltaje.

Se observa también la separación entre el canal automático y el canal manual del sistema, y que son completamente independientes.

Cuenta con la función de monitoreo para establecer niveles de alarma, condiciones de disparo y registro de eventos, esto para condiciones de operación del regulador.

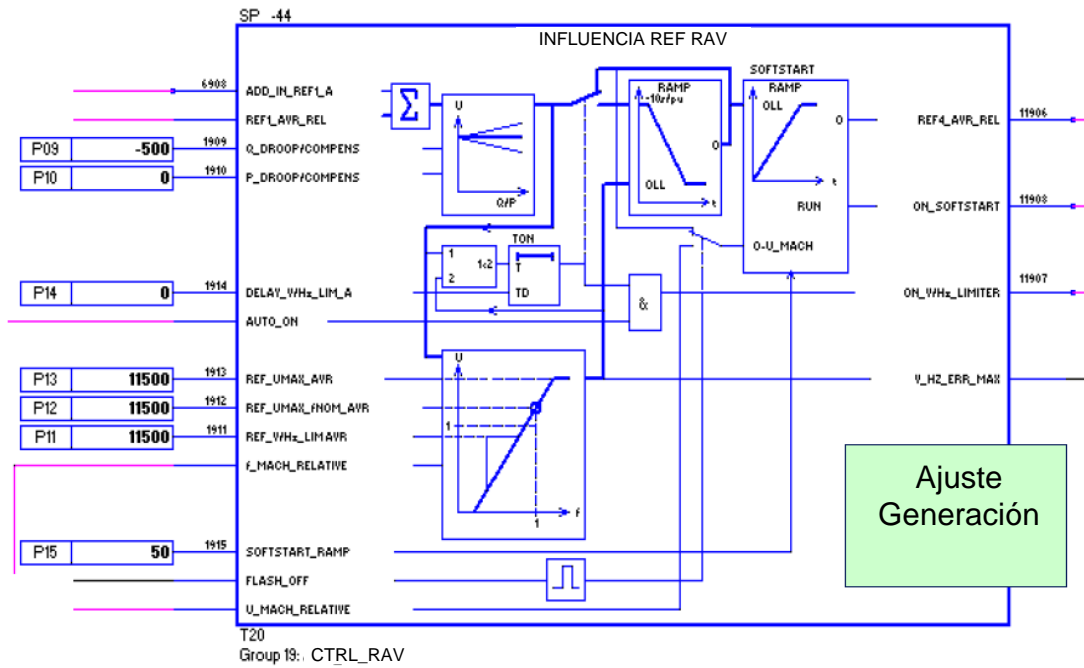


Figura 3.5.4.8.3 Variables que afectan la característica de la referencia del sistema de excitación

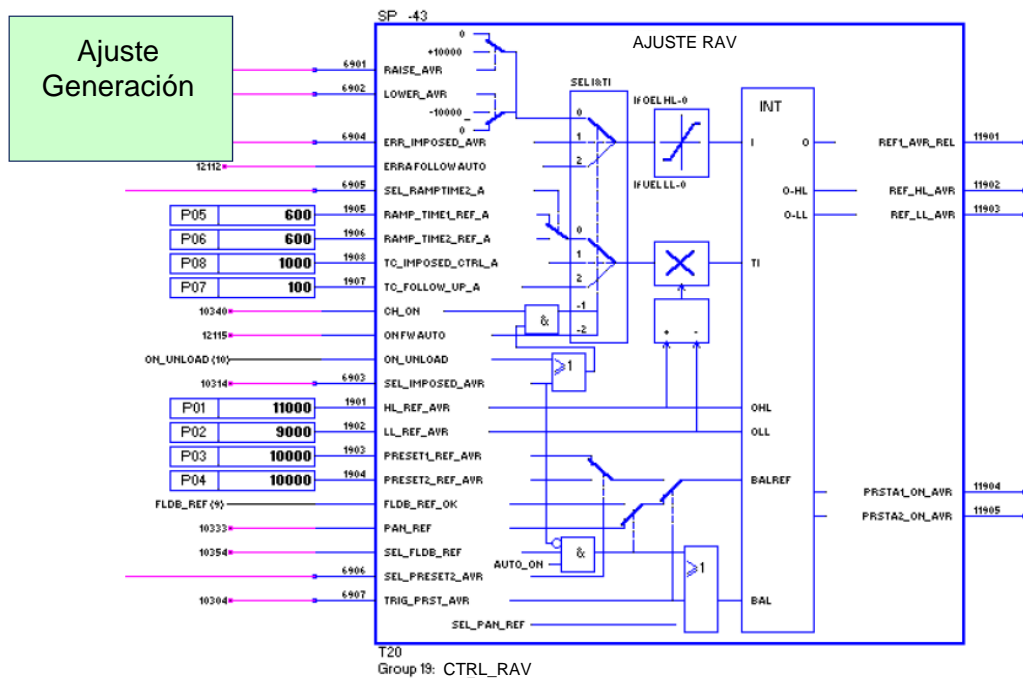


Figura 3.5.4.8.4 Variables que afectan la referencia del sistema de excitación

Figuras donde se puede observar a bloques como está conectada la referencia del sistema de excitación y las señales que intervienen para modificar esa referencia.

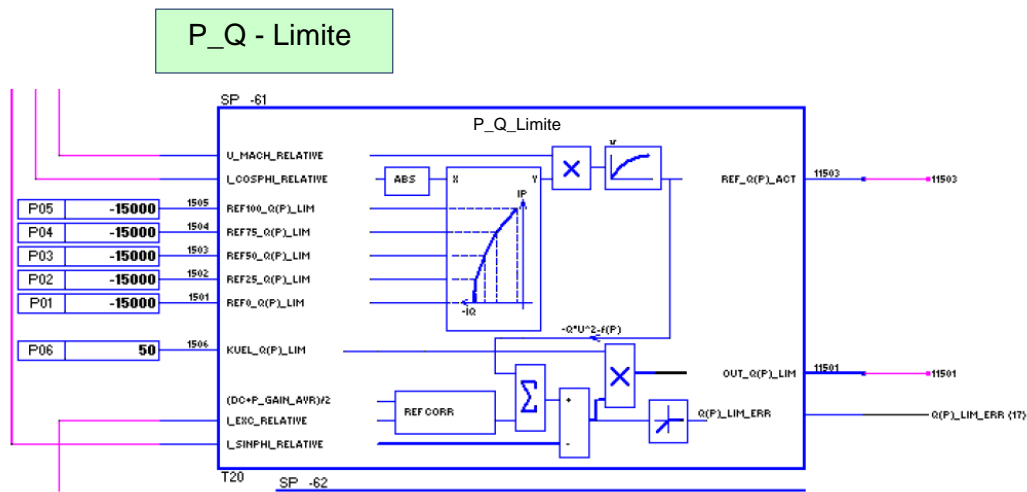


Figura 3.5.4.8.5 Función limitadora de P_Q

En la figura se puede observar las señales que influyen en la programación del regulador de la función limitadora P-Q del sistema de excitación.

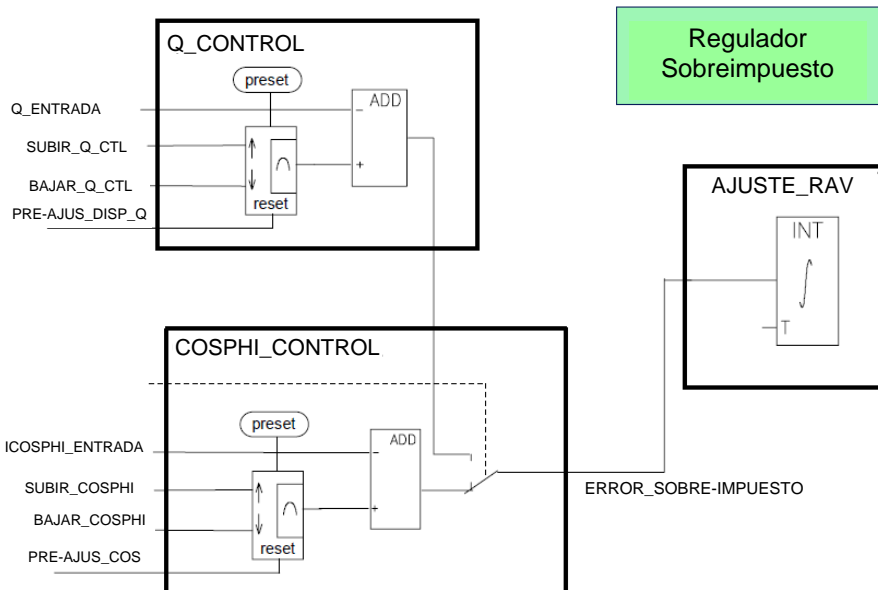


Figura 3.5.4.8.6 Funciones Q_CONTROL y COSPHI_CONTROL

Disposición a bloques de las funciones Q_CONTROL y COSPHI_CONTROL del regulador y cómo influyen en la referencia.

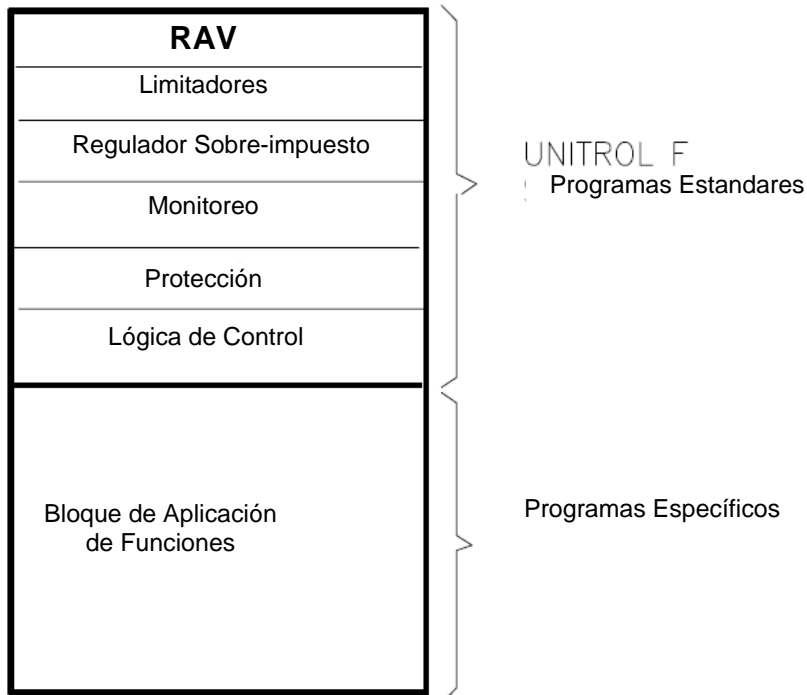


Figura 3.5.4.8.7 Programación a bloques del sistema de excitación

Representación a bloques de los programas con los que cuenta el sistema de excitación

Localización de Tareas

Tarea 1	5 ms	25 bloques
Tarea 2	20 ms	100 bloques
Tarea 3	200ms	250 bloques

Tabla 3.5.4.1 Tiempos de ejecución de diferentes tareas del sistema de excitación

Representación de los tiempos que emplea el procesador del regulador en realizar tareas y la cantidad de bloques que integran a cada tarea.

3.5.4.9 CONTROL DE POTENCIA REACTIVA ENCENDIDO/APAGADO

La carga reactiva(Q) puede ser activada si el modo Auto es seleccionado y la máquina es conectada a la red. Este modo de operación es sobre-impuesto sobre el regulador de voltaje y solo reacciona despacio para cambios en condición de operación. Fallas de corto tiempo en la red no influyen la regulación sobre-impuesta y son compensadas por el sistema de excitación. Todas las limitaciones del modo Auto están activas.

Cuando está conectado el regulador sobre-impuesto, el ajuste del valor de referencia se determina por el parámetro RELEASE FOLLOW Q (1801)(en seguimiento). Si el parámetro es ajustado (1), entonces el valor de referencia siempre sigue al valor actual cuando el regulador es desconectado. La tensión desde el regulador de voltaje al regulador sobre-impuesto, no afecta directamente el punto de operación. Solo si el valor de referencia es ajustado utilizando el comando ALTO/BAJO, la potencia reactiva cambia. Si el comando de seguimiento es desconectado, (valores de parámetro), entonces el valor de referencia permanece con el ultimo valor cuando el regulador estaba apagado. Solo cuando se enciende la excitación, el valor de referencia asume así un valor predeterminado denominado (preset), el cual puede programarse vía parámetro.

3.5.4.10 COMANDOS ALTO/BAJO CON SEÑALES DE RECONOCIMIENTO MIN/MAX.

Existen entradas comunes Higher(Subir)/Lower(bajar) para todos los modos de operación como Auto, Manual y si está disponible, CospHI o regulación-Q. Solo el valor de referencia del modo de operación seleccionado es ajustado con esas entradas.

a).- En Modo Auto.

En modo Auto, el valor de referencia para el voltaje del generador es ajustado utilizando los comandos de subir/bajar.

En operación en vacío, el ajuste altera el voltaje del generador, en operación de carga, la potencia reactiva. Si los límites de operación del rotor y generador han sido alcanzados, los limitadores correspondientes del regulador actúan bloqueando el efecto de los comandos de subir/bajar.

Si el valor de referencia para el voltaje del generador alcanza un valor ajustable mínimo o máximo, la señal del regulador activo MIN o MAX, se ilumina. Si se dan al mismo tiempo los comandos de subir/bajar, no cambia el ajuste del valor de referencia. Cuando la excitación es encendida, el valor de referencia para el voltaje del generador se ajusta automáticamente por medio del valor preset.

b).- En Modo Manual.

En modo manual, el valor de referencia para la corriente de campo es ajustado utilizando los comandos subir/bajar.

En operación en vacío, el ajuste altera el voltaje del generador, en operación de carga, la potencia reactiva.

Los mismos limitadores habilitados en modo Auto, no son habilitados en modo Manual, debe asegurarse que al asumir comandos de subir/bajar que los límites de operación para el rotor y el generador (conforme al diagrama de capacidad), no sean excedidos.

Si el valor de referencia para la corriente de campo alcanza un valor ajustable mínimo o máximo, la señal del regulador activo Min. o Max, se ilumina.

Si se dan al mismo tiempo los comandos de Subir/Baja, no hay cambio del valor de referencia. Cuando la excitación es encendida o cuando el disyuntor principal se abre, el valor de referencia para la corriente de campo es ajustada automáticamente para el valor de corriente de excitación en vacío (Ifo).

c).- Regulación Q.

Para el ajuste del valor de referencia en este modo, se debe tomar en cuenta que la reacción del regulador sobre-impuesto es muy lenta (ver 3.5.4.10.1), por este motivo es recomendable, indicar el valor de referencia del regulador sobre-impuesto en la sala de mando.

El despliegue Min/Max indica que el ajuste de los límites del valor de referencia han sido alcanzados.

Una alternativa es el uso de una entrada analógica (4 a 20 ma) en vez del valor de referencia interno. En este caso, el valor remoto determina directamente el valor de referencia interno deseado. El valor Max/Min es desplegado si el valor de referencia externo alcanzó los límites del valor de referencia interno. Un valor de referencia remoto fuera de los rangos internos del generador será limitado.

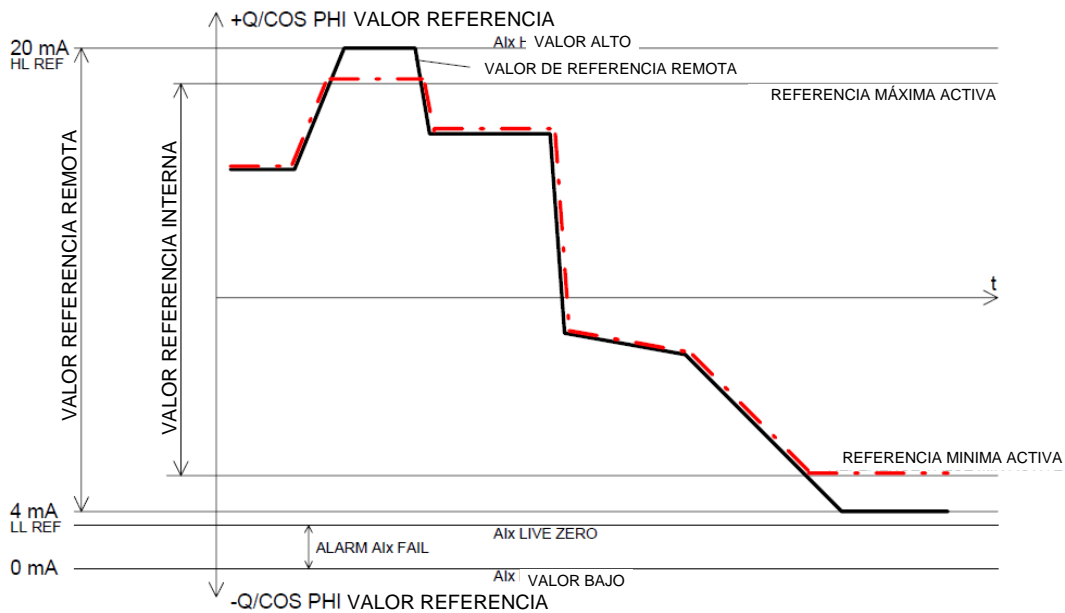


Figura 3.5.4.10.1 Rango de variación del valor de referencia

3.5.5 OPCIONES DE SISTEMAS DE CONTROL EN SISTEMAS DE EXCITACIÓN.

La implementación de la tecnología digital en los sistemas de excitación, ha permitido una mayor versatilidad de opciones de operación en dichos sistemas, lo cual permite al generador tener una mayor eficiencia en su operación reflejándose en una mejor utilidad para el sistema de potencia. Estas opciones de operación se describen en forma breve a continuación.

3.5.5.1 CONTROL DE VAR Y FACTOR DE POTENCIA

Un sistema de excitación típico está diseñado para operar en condición paralela con respecto a otros generadores y proveer una caída de voltaje de 5% a un factor de potencia de 0.8 y de 8% de caída de voltaje a un factor de potencia de 0, asegurando un buen manejo de carga entre múltiples generadores y/o el bus infinito. El circuito de compensación de potencia reactiva, minimiza la corriente circulante que fluye entre múltiples fuentes de potencia.

En un sistema normal, donde el voltaje de bus cambia por una cantidad relativa pequeña, el circuito interno de compensación de caída de corriente reactiva, es capaz de prevenir cambios grandes en la corriente reactiva.

Sin embargo, cuando cambios grandes de voltaje ocurren en el bus infinito, el sistema de excitación, siguiendo su curva característica de ajuste, lleva al generador a condiciones de sobre o baja excitación.

En la figura 3.5.5.1 ilustra a un generador que es equipado con un sistema de excitación de estado sólido el cual tiene habilitado la compensación reactiva de caída de voltaje, la gráfica ilustra el efecto de los cambios en el voltaje de bus y de la carga de corriente reactiva en el generador.

Si el voltaje de Bus cae un 6% la corriente de carga reactiva del generador cambiará desde 0 a 75%. Un decremento posterior en el voltaje de bus excede un 4% quizá sobrecargue al generador causando excesivo calentamiento en los devanados de campo, así como en los elementos semiconductores que integran al regulador automático de voltaje. El calentamiento del campo del generador, es aproximadamente igual al porcentaje del incremento de la corriente reactiva de la carga.

Un controlador de Var/PF regula un punto de operación programado y es insensible a los cambios que se den en el voltaje del bus.

La figura 3.5.5.1 también ilustra la condición donde el voltaje de Bus quizá se incrementa causando una condición de factor de potencia en adelanto en el generador.

Aquí, el sistema de excitación incrementa la excitación siguiendo la curva característica de la compensación de corriente reactiva, mantendrá al sistema en sincronismo. Si el voltaje de bus crece excesivamente; sin embargo, la regulación normal de voltaje resultará una reducción de la excitación previendo una posible pérdida de sincronismo de la máquina.

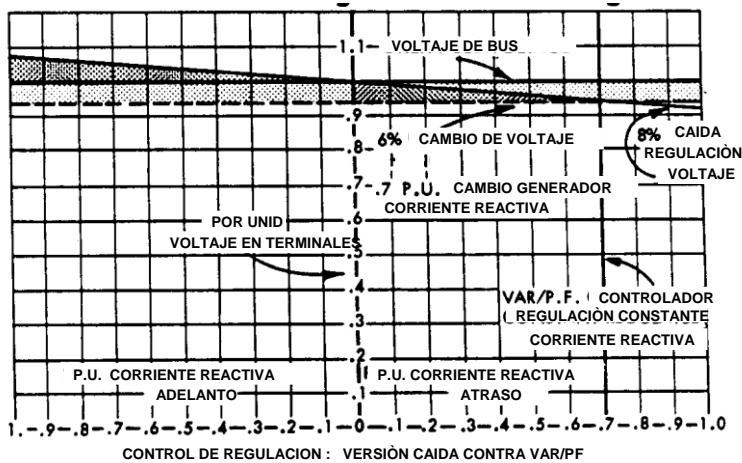


FIGURA 3.5.5.1 REGULACIÓN DE VOLTAJE VERSIÓN: CAIDA Y VAR/PF

resultará una reducción de la excitación previendo una posible pérdida de sincronismo de la máquina.

El controlador de Var/PF, regula una cantidad programada de Var's o factor de potencia para asegurar la excitación suficiente en el campo a través de todos los tipos de carga.

La figura 3.5.5.2 es utilizada para describir la operación del controlador. Un vector O-D es usado para representar un factor de potencia de 0.8 de salida en el generador. Con regulación de "Var's" si los Kw son decrementados progresivamente, el vector O-D se moverá de manera horizontal a O-C', O-B' y finalmente O-A' regulando la magnitud de la potencia reactiva sin importar los cambios en la potencia real.

Un cambio del regulador a control de factor de potencia, causa que el $\cos \theta$ sea regulado. Así como la potencia real disminuye, el punto de operación automáticamente es modificado en forma proporcional de D a D', de D' y finalmente a D'' decrementando el componente de la potencia reactiva, pero manteniendo un ángulo θ constante.

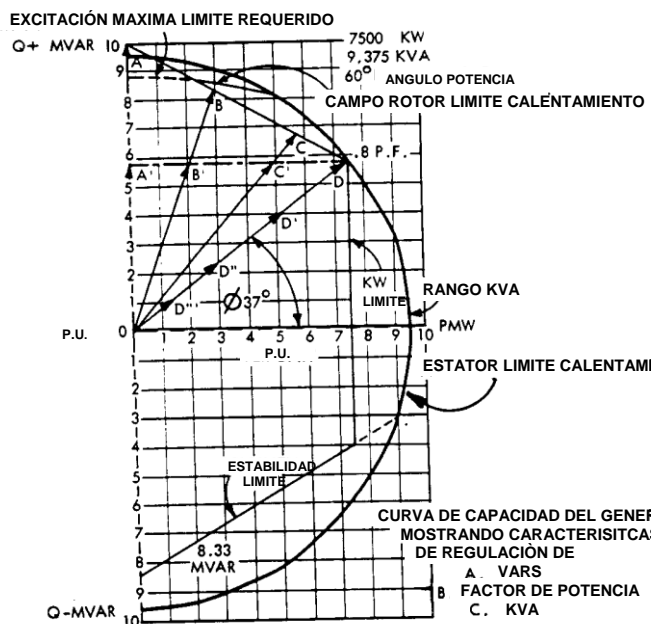


FIGURA 3.5.5.2 Curva de capacidad de un generador

3.5.5.2 COMPENSACIÓN DE LINEA

La compensación es utilizada para modificar el voltaje de salida del generador en un bus aislado para compensar la caída de voltaje causado por la corriente de la componente reactiva y/o resistiva en líneas de transmisión largas.

Básicamente hay dos tipos de compensación: de impedancia y resistiva, ambos dispositivos miden la salida de voltaje del generador y obtienen un muestra de corriente del generador proporcional respecto al ángulo de fase de la carga.

Dependiendo de la aplicación, tal como un incremento de la carga, una señal al sistema de excitación causa que la salida del generador suba o disminuya. (ver fig 3.5.5.2.1)

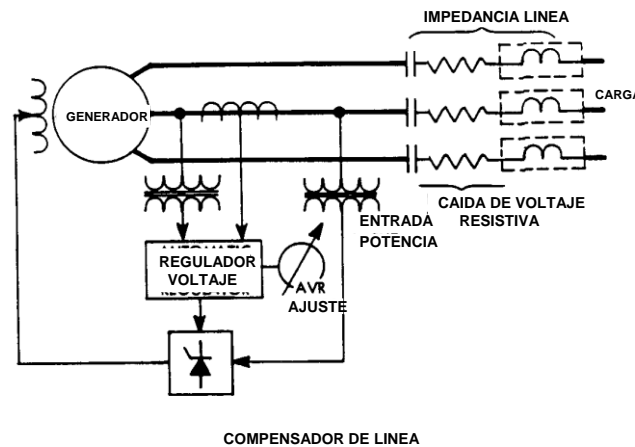


FIGURA 3.5.5.2.1 Representación de un sistema con impedancia en la línea

3.5.5.3 COMPENSACIÓN RESISTIVA

Este tipo de compensación es grandemente utilizada dependiendo de la aplicación. El compensador resistivo es conectado con señales de voltaje y corriente del generador, pero en fase. Esto resulta en un incremento de voltaje en la máquina, tal como se incrementa el flujo de potencia real en la línea el generador incrementa su excitación.

3.5.5.4 COMPENSACIÓN DE IMPEDANCIA

Una compensación de impedancia toma en consideración ambos parámetros. La reactancia y la resistencia del sistema intentando nulificar la impedancia de la línea. Esto es la causa que el generador incremente en la entrada del sistema de excitación el parámetro de la línea haciendo que el voltaje sea más constante en la carga.

Cuando el sistema está operando en paralelo y con bus infinito, la impedancia del compensador necesita ser definida. La compensación se opone al circuito paralelo, internamente del sistema de excitación, atenta con nulificar la impedancia del bus infinito. Esto da como resultado una corriente circulante y una operación inestable del generador.

CAPITULO IV.-SIMULACIÓN DIGITAL DE COMPENSACION REACTIVA POR MEDIO DEL PSS/E®.

4.1.- Introducción

Hoy en día, se dispone de muy buenos programas informáticos que permiten resolver una gran variedad de problemas de forma eficiente y rápida en sistemas eléctricos. En todas las ramas de la ingeniería es necesario utilizar programas informáticos para resolver los problemas reales que se presentan.

Se pueden encontrar programas comerciales específicos para simular circuitos eléctricos como PSPICE o PSCAD, programas para simular flujos de potencia en redes eléctricas como PSS/E o EDSA, programas para simular mediante elementos finitos el funcionamiento de máquinas eléctricas como ANSYS o COMSOL, etc. Estos programas están dedicados a objetivos específicos y aunque muy potentes, su aprendizaje es largo.

La economía y la confiabilidad mejoradas se reconocieron hace más de medio siglo como los beneficios de usar una red interconectada para el transporte de potencia eléctrica. Pero lo fundamental para su realización fue (y aún es) la capacidad para predecir los voltajes y flujos en los componentes de la red. A medida que se transformaron las redes, el problema fue desarrollar una herramienta que permitiera producir esta información crítica. El flujo de carga (o flujo de potencia), conforme se fue conociendo dicha herramienta, predice los flujos y voltajes de la red.

Los primeros flujos de carga se resolvieron usando lo que se conocía como tarjetas de cálculo. Estos tableros eran un tipo de computadora analógica, ya que emulaban un sistema específico por medio de la síntesis física de resistor-inductor-capacitor de parámetros agrupados del sistema real, con los componentes conectados en la misma topología. Para un sistema real, estos tableros llenaban varias habitaciones, consumían una cantidad importante de energía y se tenían que cablear de nuevo cuando se deseaba realizar cualquier modificación. Puesto que los estudios a menudo requerían equipos de ingenieros trabajando simultáneamente, ajustando perrillas y posiciones y leyendo los resultados en voz alta, era evidente la necesidad de una alternativa flexible.

Luego vino la moderna computadora digital, que, de hecho debe mucho del ímpetu en su desarrollo original a la necesidad de los ingenieros de potencia por contar con una mejor forma de resolver los flujos de carga. En los primeros días de la computación, el negocio de la energía eléctrica era por mucho el usuario comercial más grande (e incluso promotor) de las máquinas digitales. No era extraño que una empresa gastara varios millones de dólares en el desarrollo de hardware y software. En tanto que IBM Corp. Avanzaba en los diseños de máquina con unidad central, los teóricos estaban publicando los primeros documentos sobre algoritmos de flujo de carga.

Los primeros algoritmos se basaban en el método de Gauss-Seidel, que hizo posible, por vez primera, resolver el problema de flujo de carga para sistemas relativamente grandes. Sin embargo, adolecía de pequeñas características de mala convergencia.

Luego se desarrollo el algoritmo de Newton para mejorar la convergencia del método de Gauss-Seidel, pero al principio se pensó que era impráctico para sistemas de dimensiones reales debido a los problemas de cálculo con redes grandes. El problema subyacente para el método iterativo de Newton es la solución de una ecuación matricial de gran dimensión.

En la década de 1960, Bill Tinney y colaboradores en la Bonneville Power Administration observaron que, aunque la matriz principal del sistema era muy grande, era también muy dispersa (lo cual significaba que tenía una proporción muy pequeña de valores distintos de cero). Esta observación dio lugar al desarrollo de los métodos de dispersidad. El concepto hizo posible aplicar el método de Newton a sistemas de tamaño arbitrario, para obtener por primera vez, velocidad así como características excelentes de convergencia.

Desde la década de 1960, se hicieron numerosos avances y extensiones a los métodos de flujo de carga. En la década de 1970 llegó el flujo de carga desacoplado rápido, el cual incrementó la velocidad de cálculo. Las ampliaciones al flujo de carga fueron la representación de componentes, como líneas de transmisión de corriente directa de alta tensión (HVDC); mejores métodos para el cálculo de pérdidas, solución del flujo de potencia óptimo y problemas de estimación de estado; métodos de continuación del flujo de potencia y desarrollo de mejoras formas de visualizar y presentar los resultados de flujo de carga.

4.2.- MODELADO

4.2.1 FLUJOS DE POTENCIA.

Para tener una operación exitosa de los sistemas de potencia en condiciones normales balanceadas de estado estable trifásico, se requiere lo siguiente:

- 1.- La generación abastece la demanda (carga) más las pérdidas
- 2.- Las magnitudes de voltaje en las barras permanecen cercanas a sus valores nominales
- 3.- Los generadores operan dentro de límites especificados de potencia real y reactiva.
- 4.- Las líneas de transmisión y los transformadores no están sobrecargados.

El programa de computadora de flujos de potencia (conocido como flujos de carga) es la herramienta básica para investigar estos requerimientos. Con este programa se calcula la magnitud del voltaje y el ángulo en cada barra o bus en un sistema de potencia en condiciones balanceadas en estado estable. También permite calcular los flujos de potencia real y reactiva para los equipos que se interconectan a las barras, así como sus pérdidas.

El análisis nodal común, o de mallas, no es adecuado para estudios de flujos de potencia porque los datos de entrada para las cargas por lo general se dan en términos de potencia, no de impedancia. Asimismo, se considera a los generadores como fuentes de potencia, no fuentes de voltaje o corriente. El problema de flujos de potencia, por lo tanto, se formula como un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales adecuado para resolverlo por computadora.

Se suponen condiciones balanceadas de estado estable trifásico, en las simulaciones de flujos, sus ecuaciones y los datos de entrada y salida se dan en por unidad.

La solución del problema de flujos de potencia es básica para la mayoría de los análisis que se realizan en sistemas eléctricos, considerando que el sistema está en estado estacionario. Esto ha dado como resultado que el esfuerzo que se ha dedicado al desarrollo de métodos de solución sea notable. Tales métodos se aplican en una variedad de problemas en grandes redes asociados a la planeación, operación y control de sistemas eléctricos de potencia y distribución, donde los flujos de potencia se resuelven para diferentes casos. Por ejemplo, los estudios de flujos son necesarios en la evaluación de la seguridad, donde se requiere resolver situaciones ante contingencias, o como auxiliar en la resolución de problemas de reconfiguración de redes de distribución, localización de capacitores en las mismas, o para evaluar las condiciones iniciales en estudios de fallas, entre otros.

Dependiendo del tipo de estudio, así serán las características del modelo de flujos de potencia aplicado, entre las cuales puede mencionarse la exactitud en la solución, el grado de complejidad del modelado de cada componente del sistema eléctrico de potencia, la eficiencia y robustez del método de solución, entre otras. La Tabla 1 muestra los tipos de solución posibles de obtener para diferentes estudios, mientras que la Tabla 2 muestra algunas propiedades y su aplicación en diversos estudios y situaciones.

Tabla 1. Tipos de solución de estudios de flujos de potencia

EXACTA	APROXIMADA
SIN AJUSTES	CON AJUSTES
FUERA DE LÍNEA	EN LÍNEA
SOLUCIÓN DE CASO ÚNICO	SOLUCIÓN DE CASOS MÚLTIPLES

Tabla 2. Propiedades de un método de solución para el problema de flujos de potencia.

PROPIEDAD	APLICACIÓN/SITUACIÓN
Alta Velocidad (Eficiencia Computacional)	En tiempo real en grandes redes, casos múltiples e interactivos.
Economía en Memoria de Computadora (Técnicas de Dispersidad)	Análisis de grandes redes, computadoras con memoria restringida
Confiabilidad	Problemas mal condicionados, análisis de contingencias, aplicaciones en tiempo real, reconfiguración de redes de distribución.
Versatilidad	Manejo de distintos modelos matemáticos de componentes en redes eléctricas (modelos monofásicos y trifásicos), ajustes, capacidad para usarse como rutina en estudios más complejos.
Simplicidad	Facilidad para codificación, mantenimiento y actualización del algoritmo y su programa de computadora.

Cada estudio en particular, requiere de una buena combinación de tipos de solución y propiedades de los métodos, tratándose de obtener un buen compromiso entre estos factores.

De acuerdo a lo anterior, los métodos se han desarrollado paralelamente con el progreso en la tecnología de computadoras digitales, herramientas de programación y técnicas de dispersidad y descomposición. Antes de su aparición, el problema se resolvía en analizadores de redes con muchas limitaciones. Al desarrollarse las computadoras digitales, los métodos iterativos de Gauss y Gauss-Seidel usando la matriz de admitancias nodal resultaron adecuados, ya que el espacio de memoria de computadora requerida es mínima, aunque presentan problemas de convergencia lenta y, en varios casos, divergencia. Una manera de reducir este problema fue usando los métodos iterativos anteriores partiendo de una formulación con la matriz de impedancias nodal, pero con el inconveniente de requerimientos excesivos de memoria de computadora.

Durante esta época (fin de los años cincuenta y principios de los sesenta), se muestra que las propiedades de convergencia del método de Newton-Raphson son superiores que los métodos iterativos de Gauss, pero tiene la desventaja de usar mucha más memoria de computadora. Sin embargo, unos años después, al desarrollarse las técnicas de dispersidad, el método de Newton-Raphson se convierte en un método de uso general. Intentando hacer más eficiente su proceso iterativo, al final de los años sesenta y principio de los setenta, se estudia las propiedades numéricas del Jacobiano, obteniéndose las llamadas versiones “deshonestas” y “desacopladas”, hasta evolucionar en la obtención del método desacoplado rápido.

Sin embargo, debido a que estos métodos numéricos no son infalibles, para resolver el problema de flujos de potencia convencional, se ha continuado con la búsqueda de alternativas, tratando de lograr algoritmos eficientes y confiables. Al mismo tiempo, se ha analizado el proceso de convergencia de los métodos derivados del Newton-Raphson, propiedades de las matrices de coeficientes, así como los tipos de soluciones que se obtienen en estudios de flujos convencionales, entre las cuales puede mencionarse a los métodos de segundo orden, los que calculan factores óptimos de aceleración para dirigir la convergencia y, en este mismo sentido, los métodos de continuación con aplicaciones en la solución del problema de inestabilidad de voltaje. Durante la década de los ochenta, se desarrolló varias metodologías para determinar índices de colapso de voltaje en base a obtener soluciones múltiples de casos de sistemas eléctricos sobrecargados, así como aproximaciones de soluciones no convergentes y causas que originan este problema.

Con respecto al modelado, durante la época de los años setenta, se inició la realización de trabajos sobre los métodos de Newton-Raphson y de Gauss para la resolución de estudios de flujos de potencia en sistemas eléctricos desbalanceados, considerando modelos de componentes en el marco de referencia de fases. Por otra parte, durante los ochenta y los noventa, se ha desarrollado el modelado de dispositivos de electrónica de potencia, tales como compensadores estáticos de potencia reactiva, compensadores serie variables, desfases y controladores unificados de flujos de potencia, entre otros. Este modelado de sistemas trifásicos se extendió de manera natural al análisis de flujos de potencia en sistemas eléctricos de distribución.

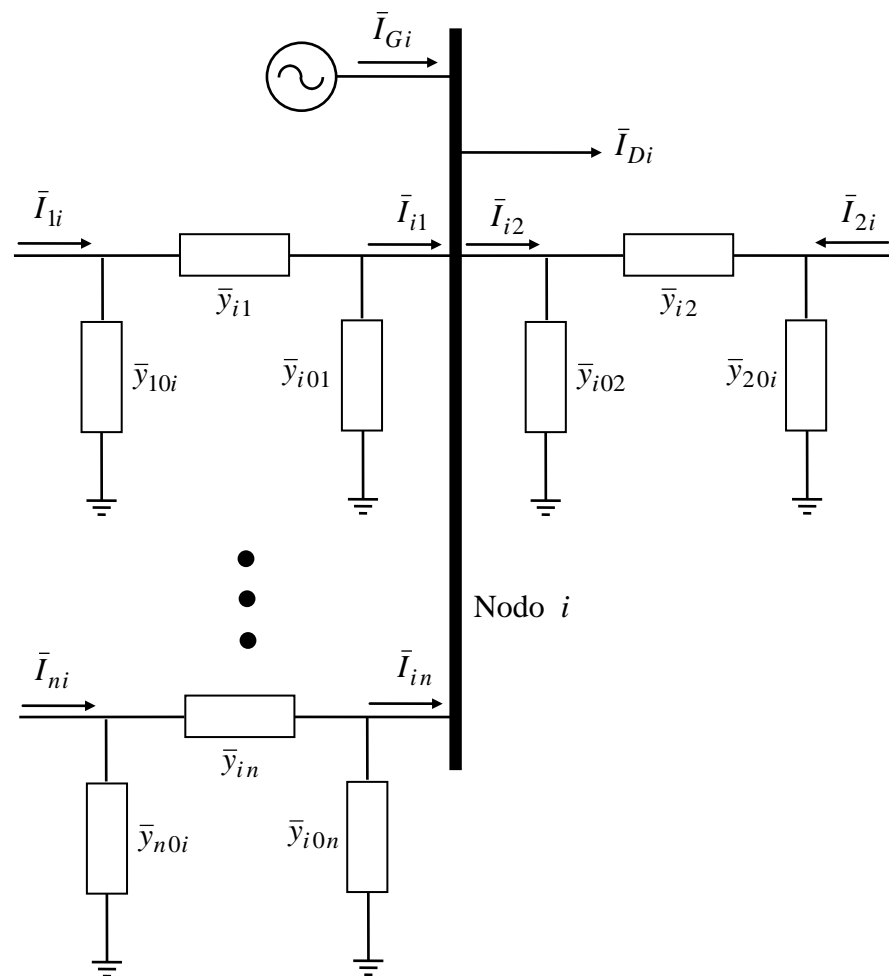


Fig 4.2.1 Representación de un sistema con admitancias

4.2.2 EL PROBLEMA DE FLUJO DE POTENCIA

El problema de flujo de potencia es calcular la magnitud del voltaje y el ángulo de fase en cada bus de un sistema de potencia en condiciones de estado estable trifásico. Como subproducto de este cálculo, se pueden calcular flujos de potencia real y reactiva en equipos como son líneas de transmisión y transformadores, así como las pérdidas..

El punto de partida para un problema de flujo de potencia es un diagrama unifilar del sistema de potencia, a partir del cual se pueden obtener los datos de entrada para las soluciones por computadora. Los datos de entrada consisten en datos de buses, datos de líneas de transmisión y de los transformadores.

Como se muestra en la figura 4.2.1, las cuatro variables siguientes están asociadas con cada bus k: magnitud de voltaje V_k , ángulo de fase δ_k , potencia neta real P_k y potencia activa Q_k abastecida al bus. En cada bus, dos de las variables se especifican como datos de entrada y las otras dos son incógnitas que se calcularán mediante el programa de flujos de potencia.

Por conveniencia, la potencia entregada al bus k en la figura 4.2.2 se separa en generación y carga.

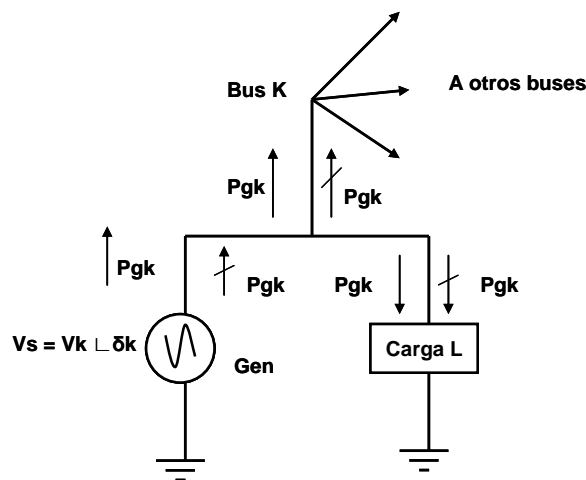


Figura 4.2.2 Potencia entregada al bus K

$$P_k = P_{gk} - P_{lk}$$

$$Q_k = Q_{gk} - Q_{lk}$$

Es decir, cada bus k se clasifica en uno de los tres tipos siguientes:

1.- Bus compensador: Solo hay un bus compensador, que por conveniencia por lo general se le asigna el numero 1. El bus compensador es una referencia para la cual el voltaje V_1 y el ángulo δ , son conocidos y por lo común los valores son 1.0 y 0 grados por unidad respectivamente para cada uno, esto es un dato de entrada. El programa de flujo de potencia calcula P_1 y Q_1 .

2.- Bus de carga: P_k y Q_k son datos de entrada. El programa de flujo de potencia calcula V_k y δ_k . Representan la mayor parte de los buses en un programa normal de flujos de potencia.

3.- Bus de voltaje controlado: P_k y Q_k son datos de entrada. El programa de flujos de potencia calcula Q_k y δ_k . Como ejemplos están los buses a los que están conectados los generadores, capacitores en derivación desconectables, o sistemas compensadores estáticos de var's. Los límites de VAR's máximo y mínimo Q_{gkmax} y Q_{gkmin} que este equipo puede suministrar son también datos de entrada. Otro ejemplo es un bus al que está conectado un transformador con cambiador de derivaciones; el programa de flujo de potencia calcula entonces la posición del cambiador.

Cuando el bus k es un bus de carga sin ninguna generación, $P_k = -P_{lk}$ es negativo; es decir que la potencia real suministrada al bus k en la figura 4.2.2 es negativo. Si la carga es inductiva, $Q_k = -Q_{lk}$ es negativa.

Las líneas de transmisión están representadas por el circuito π equivalente. Los transformadores también se representan por circuitos equivalentes, para un transformador con tres devanados, o bien, para un transformador con un cambiador de derivaciones.

Los datos de entrada para cada línea de transmisión son la impedancia serie Z' y la admitancia en derivación Y' del circuito π equivalente por unidad, los dos buses a los que está conectada la línea y la capacidad máxima en MVA.

De manera similar, los datos de entrada para los transformadores con cambiador de derivación incluyen también las posiciones máximas del cambiador.

La matriz de admitancia de Bus Y_{bus} se puede construir a partir de los datos de entrada de transformadores y líneas. Los elementos de Y_{bus} son:

Elementos de la diagonal: Y_{kk} = suma de las admitancias conectadas
Al bus k

Elementos fuera de la diagonal : Y_{kn} = -(suma de admitancias conectadas
a los buses k y n)

$k \neq n$

4.2.3 CONTROL DE FLUJOS DE POTENCIA

Los siguientes medios se utilizan para controlar los flujos de potencia en un sistema eléctrico de potencia:

- 1.- Control de la turbina (Primo-Motor) y de la excitación de generadores.
- 2.- Conexión de los bancos de capacitores en derivación, reactores en derivación y sistemas estáticos de Var's.
- 3.- Control de transformadores con cambiador de derivación y de regulación

Un modelo simple de un generador que opera en condiciones balanceadas de estado estable es el circuito equivalente de Thévenin mostrado en la figura 4.2.3.1. V_t es el voltaje terminal del generador, E_g es el voltaje de excitación, δ es el ángulo de potencia y X_g es la reactancia síncrona de secuencia positiva.

De la figura 4.2.3.1 la corriente del generador es

$$I = \frac{E_g e^{j\delta} - V_t}{jX_g} \quad (6)$$

Y la potencia compleja entregada por el generador es

$$\begin{aligned}
 S = P + jQ &= V_t I^* = V_t \left(\frac{E_g e^{-j\delta} - V_t}{-jX_g} \right) \\
 &= \frac{V_t E_g (j \cos \delta + \text{Sen } \delta) - jV_t^2}{X_g} \quad (7)
 \end{aligned}$$

Entonces, las potencias real y reactiva entregadas son

$$P = R_e S = \frac{V_t E_g}{X_g} \text{Sen } \delta \quad (8)$$

$$Q = I_m S = \frac{V_t}{X_g} (E_g \cos \delta - V_t) \quad (9)$$

La ecuación (8) muestra que la potencia real P se incrementa cuando aumenta el ángulo de potencia δ . Desde el punto de vista operacional, cuando

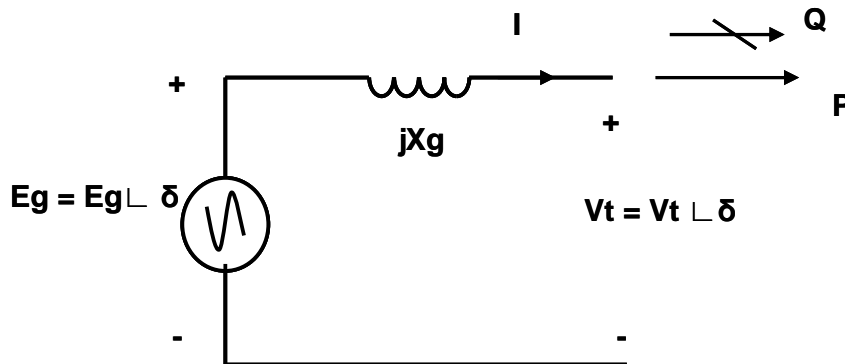


Fig 4.2.3.1 Generador equivalente de Thévenin

La turbina incrementa la entrada de potencia al generador manteniendo constante el voltaje de excitación, se incrementa la velocidad del rotor. A medida que aumenta la velocidad del rotor, también crece el ángulo de potencia δ , con lo cual se logra que aumente la salida de potencia real P del Generador. También hay una disminución en la salida de potencia reactiva Q , dada por la ecuación (9). Sin embargo, cuando δ es menor de 15 grados, el incremento de P es mucho mayor que la disminución de Q . Desde la perspectiva del flujo de potencia, un incremento en la potencia de la turbina (primo-motor) corresponde a un aumento en P en el bus de voltaje constante al que está conectado el generador.

El programa de flujos de potencia calcula el incremento en δ junto con el pequeño cambio en Q .

La ecuación (9) muestra que la salida de potencia reactiva Q se incrementa cuando aumenta el voltaje de excitación E_g . Desde el punto de vista operacional, cuando aumenta la salida excitatriz del generador mientras se mantiene constante la potencia de la turbina, la corriente del rotor crece. A medida que se incrementa la corriente del rotor, el voltaje de excitación E_g también aumenta, lo cual da lugar a un aumento en la salida de potencia reactiva Q del generador. También hay una pequeña disminución en el ángulo de potencia δ requerido para mantener constante a P en la ecuación (8). Desde el punto de vista del flujo de potencia, un aumento en la excitación del generador corresponde a un incremento en la magnitud del voltaje en el bus de tensión constante al cual está conectado el generador. El programa de flujo de potencia calcula el aumento de potencia reactiva Q que suministra el generador junto con el pequeño cambio de δ .

En la figura 4.2.3.2 se ilustra el efecto de añadir un banco de capacitores en derivación a un bus del sistema de potencia. El sistema se modela mediante su equivalente de Thévenin. Antes de que se conecte el banco de capacitores, el interruptor está abierto y el voltaje de bus es igual a E_{th} . Después que se conecta el banco, se cierra el interruptor y la corriente del capacitor I_c adelanta 90 grados al voltaje de bus V_t . El diagrama fasorial muestra que V_t es mayor que E_{th} cuando se cierra el interruptor. Desde la perspectiva del flujo de potencia, añadir un banco de capacitores en derivación a un bus de carga equivale a agregar una carga reactiva negativa, puesto que un capacitor absorbe potencia reactiva negativa.

El programa de flujo de potencia calcula el incremento en la cantidad de voltaje del bus junto con el pequeño cambio en δ . De forma similar, la adición de un reactor en derivación equivale a agregar una carga positiva negativa, en donde el programa de flujo de potencia calcula la disminución de la magnitud del voltaje.

Los transformadores que regulan la magnitud del voltaje, y los de cambiador de derivaciones se emplean para controlar los voltajes de bus así como los flujos de potencia reactiva en las líneas que están conectados. De la misma manera, los transformadores que regulan el ángulo de fase se emplean para controlar los ángulos de voltaje de bus así como los flujos de potencia real en las líneas a las que están conectados. Tanto los transformadores de regulación como los cambiadores de derivaciones se modelan mediante un transformador con una relación de número de vueltas no nominal. Desde el punto de vista del flujo de potencia, un cambio en la posición del cambiador de derivaciones o la regulación de voltaje corresponde a un cambio en c . El programa de flujos de potencia calcula los cambios en Y_{bus} , las magnitudes de los voltajes de bus y los ángulos y los flujos en cada rama.

Además de los controles anteriores, el programa de flujos de potencia se puede utilizar para investigar el efecto de conectar o desconectar líneas, transformadores, cargas y generadores. Asimismo, se puede investigar los cambios de sistema propuestos para satisfacer el crecimiento de carga futura, como son transmisión, generación y transformadores nuevos. Los estudios de diseño de flujos de potencia por lo general se llevan a cabo por prueba y error.

Con base en criterios de ingeniería se realizan ajustes en los niveles de generación y los controles hasta que se obtienen las cargas de equipo deseadas y el perfil de voltaje.

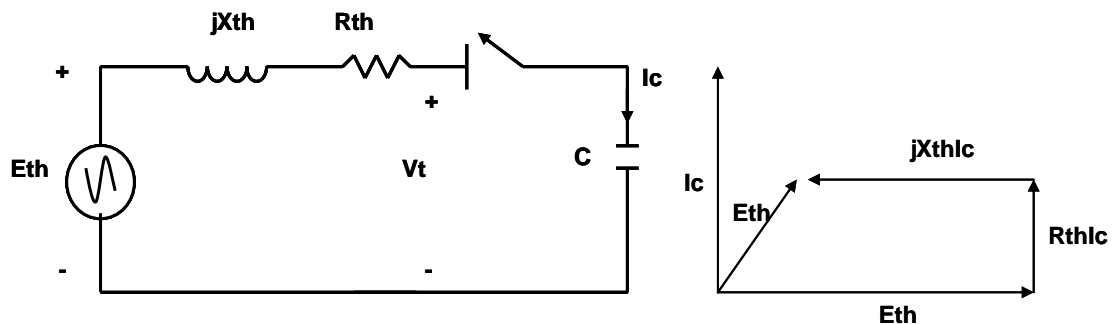


Fig 4.2.3.2 Circuito de potencia con banco de capacitores

Efecto de añadir un banco de capacitores en derivación a un sistema de potencia.

4.3.- PSS/E[®]

El PSS/E[®] es uno de los paquetes de software más utilizados por las compañías eléctricas, fue una de las primeras herramienta de software usado por las empresas de servicio eléctrico. Sus análisis probabilísticos y capacidad avanzada en modelado dinámico, provee a los ingenieros de operación y planeación de la red de transmisión contar con un amplio rango de metodologías en la simulación para diseñar y establecer esquemas de operación confiable de la Red de Potencia.

Desde su introducción en 1976, el simulador de sistemas de potencia para ingenieros (Power System Simulator for Engineering; PSS/E[®]), ha sido el más comprendido, el más avanzado; técnicamente hablando y el más ampliamente utilizado, también es muy conocido por disponer de mayores tiempos de prueba; así como, por ser unos de los mejores programas.

PSS/E es un programa integrado e iterativo para simulación, análisis y optimización de desempeño de un sistema eléctrico de potencia. Proporciona al usuario lo más avanzado en herramientas para la simulación y evaluación de su operación.

Cuenta con los siguientes módulos:

MODULOS DEL PSS/E[®] Rev. 21.1

- Flujos de Potencia
- Equivalentes
- Corto Circuito
- Simulación Dinámica
- Simulación dinámica Termino Extendido
- Gráficas
- Digitalización
- Flujos de Potencia Termino Amplio

- Sistema de análisis lineal
- Convertidores WSCC
- Programa de constantes de líneas de Transmisión
- RECAP
- Flujos de Potencia Optimo
- Librería de modelado

De la anterior lista, los más utilizados incluyendo la evaluación de los controles existentes en el sistema de potencia, es el de flujos de potencia y simulación dinámica. Para el modelado del compensador de corriente reactiva, se utilizarán estos dos últimos.

4.4.- SIMULACIÓN DIGITAL DEL CCR.

Para obtener la característica y contribución de la función compensadora de reactivos, se realizaron dos tipos de simulaciones, una fue por medio del PSS/E[®] en el cual se implementó una red de potencia con una base de datos tanto de flujos como de dinámica, y otra se realizó en la aplicación de flujos desarrollada en "FORTRAN" donde solamente se implemento la base de datos de flujos, en esta última red, se integró la red de simulación del sistema Anderson en ambos sistemas, se implemento una impedancia con la finalidad de reflejar el comportamiento de esta función compensadora a nivel de flujos, y en el PSS/E se utilizó la función compensadora de librería.

La diferencia entre las dos simulaciones; es que en la primera, la simulación abarca hasta dinámica, para poder evaluar la función compensadora que existe a nivel de librería. Para el caso de simulación en Fortran, solamente fue a nivel de Flujos de Potencia.

La evaluación a nivel dinámica en el PSS/E[®] se considera un poco limitado, ya que esta aplicación evalúa el comportamiento de un sistema de potencia a nivel transitorio.

Se aclara que la simulación en el PSS/E[®] no se modificó la red de potencia como en el caso de de la Red de Anderson, el cual se explica en párrafos siguientes, solamente se implementó la función compensadora a nivel dinámica.

Para el caso de análisis a nivel de flujos con la red Anderson, hubo modificación de la red quedando como sigue.

A nivel de flujos, el generador es representado por un nodo convencional P_V , con límites de potencia reactiva, al agregar la impedancia se obtiene un nodo tipo P_Q (carga) para una mejor simulación de potencia reactiva.

Se mejora el modelado de pérdidas en el transformador de unidad referente a la potencia real y reactiva.

El modelado convencional del generador para estudios de flujos de potencia está compuesto por un nodo tipo P_V y está al nodo terminal tipo P_Q por medio de una impedancia con la idea de modelar la pendiente del compensador de reactivos.

El valor de esta impedancia es ajustada al valor de pendiente que se desea que opere el compensador de reactivos. (Si se implementa una pendiente del 5% el valor de la impedancia será $X_{sl} = 0.05$ % p.u.)

El nodo ficticio P_V del generador, con una determinada potencia y una magnitud de voltaje $V = V_{ref}$ para poder obtener o simular la operación del generador dentro de su curva de capacidad.

Modelado del Generador como nodo P_Q .

El modelado del generador como nodo P_Q , representa al compensador de reactivos como una susceptancia variable en función del voltaje en terminales que cambia su demanda o producción de la potencia reactiva reproduciendo la característica de operación en estado estacionario como se muestra en la fig. 4.4.1.

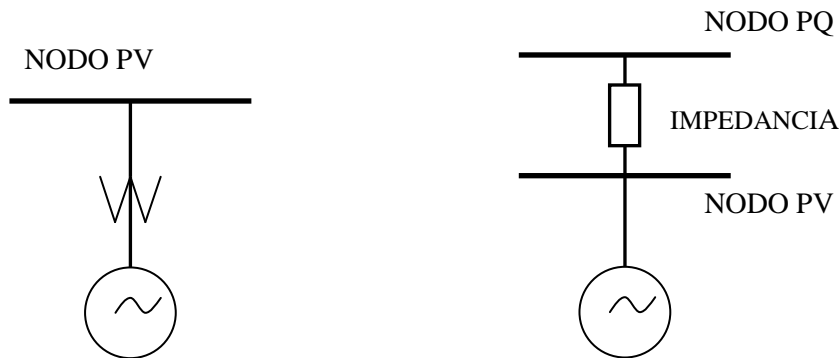


Fig 4.4.1 Modelado del generador como nodo P_V y P_Q

El modelado se expresa en términos de potencia reactiva, para ser compatible con el programa convencional de flujos de potencia, donde las ecuaciones principales del problema analizan los desbalances de la potencia activa y reactiva en cada nodo.

Las herramientas y/o técnicas más comúnmente empleadas para la simulación y evaluación de los SEP, son el estudio de flujos de potencia convencional y la simulación en el dominio del tiempo. Sin embargo, estas herramientas presentan ciertos inconvenientes cuando se emplean para evaluar la estabilidad de voltaje en periodos de largo plazo.

Los programas de flujos de potencia convencionales consideran simplificaciones que no son válidas en el marco del tiempo de largo plazo y no son capaces de manejar la evolución del SEP en el tiempo.

La técnica de simulación en el tiempo, al manejar la dinámica de corto plazo (transitoria) y de largo plazo en un solo sistema de ecuaciones, suele producir modelos matemáticos extremadamente rápidos que requieren utilizar métodos especiales de integración para obtener simulaciones eficientes.

El método de simulación cuasi-estacionaria en el tiempo, es una herramienta rápida que permite evaluar de manera dinámica la estabilidad de voltaje en el largo plazo de los SEP.

Este tipo de simulación en el tiempo, tiene su principal justificación en la necesidad de contar con una herramienta que permita analizar, de forma rápida, la estabilidad de voltaje en el largo plazo empleando un método dinámico complementario al método de flujos de potencia de continuación que evalúa los límites de estabilidad de voltaje en el largo plazo de forma estática.

Con el fin de poder modelar la función compensadora de corriente reactiva (CCR) a nivel de flujos, en estado estacionario, al generador, se modela formando nodos P_V y P_Q , donde el modelo del compensador estaría formado por una impedancia cuyos valores serían semejantes a los existentes en campo.

Este modelo de generador, es muy semejante al modelado para analizar el comportamiento del generador a nivel estado estacionario y reflejar la acción que tiene el sistema de excitación en las terminales del generador.

El modelo Q_{SS} (Quasi-steady-state), representa el modelo de la máquina por una característica $Q - V$, de una manera similar a la característica $Q - V$ del compensador de reactivos.

El modelo de la máquina sincronía usado en este trabajo, es similar al descrito en 4.4, puesto que este ha sido derivado de un modelo de estado estable, pero el modelo de inyección describe el desempeño de la máquina en términos de su característica $Q - V$.

A.- Modelo linealizado de la máquina sincronía alrededor de un punto de operación de estado estable.

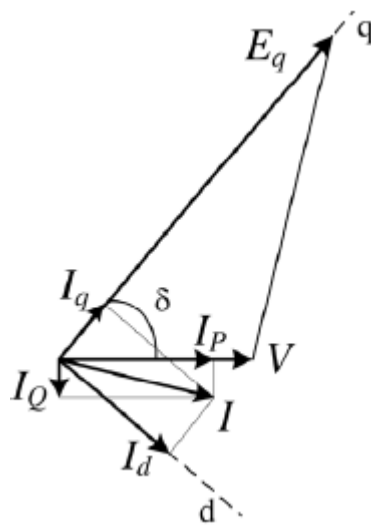


Fig. 4.4.2 Representación fasorial del generador síncrono

Un pequeño cambio en la potencia del sistema, se reflejará en la magnitud del voltaje en terminales del de la máquina sincronía V y el ángulo δ , como una consecuencia de las variaciones de la magnitud, de la corriente activa y reactiva (I_p e I_q) y el control de voltaje V_C .

La variación diferencial del voltaje en terminales y el ángulo debido a cambios en las variables independientes pueden ser descritas por las siguientes ecuaciones.

$$dV = \frac{dV}{dV_c} dV_c + \frac{dV}{dI_q} dI_q + \frac{dV}{dI_p} dI_p$$

$$d\delta = \frac{d\delta}{dV_c} dV_c + \frac{d\delta}{dI_q} dI_q + \frac{d\delta}{dI_p} dI_p$$

la variación diferencial de la magnitud del voltaje de terminales puede ser expresada mas explícitamente como:

$$dV = dV_c - X_{mQ} dI_Q - X_{mP} dI_P$$

X_{mQ} y X_{mP} son los sensitivos del cambio de magnitud del voltaje de terminal y de la corriente reactiva del generador I_Q (el cual es proporcional a la corriente reactiva) y la corriente activa I_P respectivamente, considerando la acción del sistema de excitación son definidos por:

$$X_{mQ} = \frac{X_d \cos \delta}{K_A + \cos \delta} + \frac{(X_d - X_q) I_q}{E_q} \frac{K_A K_A \cos \delta}{(K_A + \cos \delta)^2}$$

$$X_{mP} = \frac{X_d \sin \delta}{K_A + \cos \delta} + \frac{(X_d - X_q) I_q}{E_q} \frac{(1 + K_A \cos \delta) X_d}{(K_A + \cos \delta)^2}$$

Donde X_d y X_q son las reactancias síncronas en el eje directo y de cuadratura, respectivamente E_q es el voltaje atrás de X_q y K_A , es la ganancia de lazo abierto del sistema de excitación.

Las sensibilidad del ángulo δ del voltaje de terminales con respecto a la variación del control de voltaje V_c , y la corriente reactiva y activa I_q y I_p son dadas por las ecuaciones (12) a (14).

$$\frac{d\delta}{dV_c} = - \frac{K_A \sin \delta}{E_q (K_A + \cos \delta)} - \frac{(X_d - X_q) K_A \sin \delta}{E_q^2 (K_A + \cos \delta)} \left(I_d + \frac{I_q \sin \delta}{K_A + \cos \delta} \right)$$

$$\frac{d\delta}{dI_Q} = - \frac{X_d K_A \sin \delta}{E_q (K_A + \cos \delta)} + (X_d - X_q) \left[\frac{-X_d K_A \sin \delta}{E_q^2 (K_A + \cos \delta)} \left(I_d + \frac{I_q \sin \delta}{K_A + \cos \delta} \right) + \frac{\sin \delta}{E_q} \right]$$

$$\frac{d\delta}{dI_p} = - \frac{X_d(1 + K_A \text{sen } \delta)}{E_q(K_A + \text{cos } \delta)} + (X_d - X_q) \left[\frac{X_d(1 + K_A \text{sen } \delta)}{E_q^2(K_A + \text{cos } \delta)} \left(I_d + \frac{I_q \text{sen } \delta}{K_A + \text{cos } \delta} \right) - \frac{\text{cos } \delta}{E_q} \right]$$

El modelo $Q - V$ de la máquina síncrona es desarrollada usando sensibilidades linealizadas.

Para realizar la simulación digital del compensador de reactivos y evaluar su operación en el sistema eléctrico de potencia, se utilizó la aplicación del PSS/E®, en donde se implementó una pequeña red de potencia integrada por tres buses; dos de generación uno hidroeléctrico y el otro térmico, el tercer es de carga.

El nodo de generación hidroeléctrico esta integrado por 3 generadores cuya capacidad es de 5 MVA y este nodo es configurado como compensador.

El nodo de generación térmico consta de una sola unidad cuya capacidad es de 10 MVA's.

En los nodos 100,200 y 150, el nivel de voltaje es de 33 Kv's.

En los nodos 201 y 151, el nivel de voltaje es de 3.3 Kv's.

En el nodo 150 se tiene una carga de 5 Mw y 1.6 Mvar's

En el nodo 151 se tiene una carga de 15 Mw y 7.9 Mvar's

Las tres primeras maquinas tienen un despacho de 4 Mw y la cuarta tiene 8 Mw, para un total de 20 Mw correspondiente al total de carga entre los nodos 150 y 151, como se puede apreciar en la base de datos.

La base de datos de flujos está integrada por 4 partes, siendo estas:

- Primera: Datos de la Carga
- Segunda: Datos del Generador
- Tercera: Datos de los enlaces
- Cuarta: Datos de Transformadores

BASE DE DATOS DE FLUJOS

```

0 100
SMALL EXAMPLE SYSTEM
BOONDOCKS POWER AND LIGHT
100 3 0 0 0 1 1.05 0 'HYDRO' 33
150 1 5 1.56 0 0 2 1 0 'LOAD' 33          DATOS DE LAS CARGAS
151 1 15 7.9 0 0 2 1 0 'LOAD' 3.3
200 1 0 0 0 1 1 0 'STEAM' 33
201 2 0 0 0 1 1 0 'STEAM' 3.3
0
100 1 4 0 2 0 1.05 0 5 0 .25 0 .09 1.025
100 2 4 0 2 0 1.05 0 5 0 .25 0 .09 1.025  DATOS DE GENERADORES
100 3 4 0 2 0 1.05 0 5 0 .25 0 .09 1.025
201 1 8 0 4 0 1.05 200 10 0 .2
0
100 200 1 .02 .2 .03 15 17.5 20
100 150 1 .01 .1 .018 15 17.5 20          DATOS DE LOS ENLACES
150 200 1 .01 .1 .018 15 17.5 20
200 201 1 0 .8 0 10 12 15 1.05
150 151 1 0 .3 0 15 20 25 1.025
0
200 201 1 200 1.1 .9 1.1 .9          DATOS DE TRANSFORMADORES
150 151 1 151 1.1 .9 1.1 .9
0
0
0
0
0
0
0
```

En la base de datos de dinámica, se puede apreciar los modelos que se implementan.

BASE DE DATOS DE DINAMICA

100	'GENSAL'	1	5	.05	.06	5.084	1	1.5	1.2	.4	.25	.12	.03	.25/		
100	'GENSAL'	2	5	.05	.06	5.084	1	1.5	1.2	.4	.25	.12	.03	.25/		
100	'GENSAL'	3	5	.05	.06	5.084	1	1.5	1.2	.4	.25	.12	.03	.25/	DATOS DE GENERADORES	
201	'GENROU'	1	6	.05	1	.05	3	0	1.4	1.35	.3	.6	.2	.1	.03	.4/
202	'GENROU'	1	6	.05	1	.05	3	0	1.4	1.35	.3	.6	.2	.1	.03	.4/
100	'SCRX'	1	.1	10	200	.05	0	5	0	0/						
100	'SCRX'	2	.1	10	200	.05	0	5	0	0/						
100	'SCRX'	3	.1	10	200	.05	0	5	0	0/					DATOS DE EXCITADORES	
201	'SEXS'	1	.1	.1	100	.1	0	3/								
202	'SEXS'	1	.1	.1	100	.1	0	3/								
100	'HYGOV'	1	.05	.75	8	.05	.5	.2	1	0	1.3	1.1	0	.08/		
100	'HYGOV'	2	.05	.75	8	.05	.5	.2	1	0	1.3	1.1	0	.08/	DATOS REGULADORES VELOCIDAD	
100	'HYGOV'	3	.05	.75	8	.05	.5	.2	1	0	1.3	1.1	0	.08/		
201	'TGOV1'	1	.05	.5	1.	.3	1.	1.	0./							
202	'TGOV1'	1	.05	.5	1.	.3	1.	1.	0./							
201	'COMP'	1	0.0/													
202	'COMP'	1	0.0/												DATOS DE COMPENSADORES	

Así como el modelo del compensador de reactivos que se tiene dado de alta en la librería del PSS/E®.

Es de mencionar que todos estos modelos de dinámica, se tienen que sintonizar para que tengan una respuesta adecuada, para eso se utilizó dos aplicaciones que se tiene disponible por parte del PSS/E®, las cuales sirven para sintonizar los modelos de los reguladores de velocidad y sistemas de excitación en vacío, se efectúa por medio de la aplicación de una señal escalón en la referencia de dichos sistemas y se evalúa su respuesta.

La red en la cual se estuvo trabajando y desarrollando los casos del presente trabajo, se muestra en la figura 4.4.3.

Para esto se implementaron tres redes para fines de simulación; la primera fue el caso original, esto con la finalidad de observar el flujo de reactivos en dicha red.

En la segunda red, se consideró un generador adicional en el bus donde se localiza la unidad térmica (bus 202), siendo también un generador del tipo térmico.

Esta red se implementó para trabajar con el compensador de reactivos, simular su operación en el sistema eléctrico de potencia, como se puede apreciar en la base de datos de dinámica, buses 201 y 202 tienen implementado la función compensadora de reactivos.

Es de aclarar que por facilidades para trabajar y evaluar el comportamiento del sistema de potencia que se implementaron a nivel de flujos, se realizó la simulación del compensador a nivel de flujos de potencia por herramientas descritas anteriormente en la red Anderson, en donde en el nodo 3, se agregó un segundo generador nodo 4 para evaluar dicha función y obtener la repartición de potencia reactiva en los nodos donde se encuentran las otras unidades generadoras, nodos 5 y 8.

Más adelante se explicará los trabajos realizados en esta red de potencia Anderson.

Continuando con la red de potencia implementada en el PSS/E®; para el tercer caso, se le agregó una tercer línea entre el bus de generación de térmicas y el bus de carga (nodos 200 y 150); esto con la finalidad de agregar a los sistemas de excitación la función estabilizadora de potencia y evaluar la operación conjunta del compensador de reactivos y estabilizador.

En el archivo de base de datos de dinámica, se implementó la función compensadora, para ser evaluada sus ajustes y operación. Ver figura 4.4.3

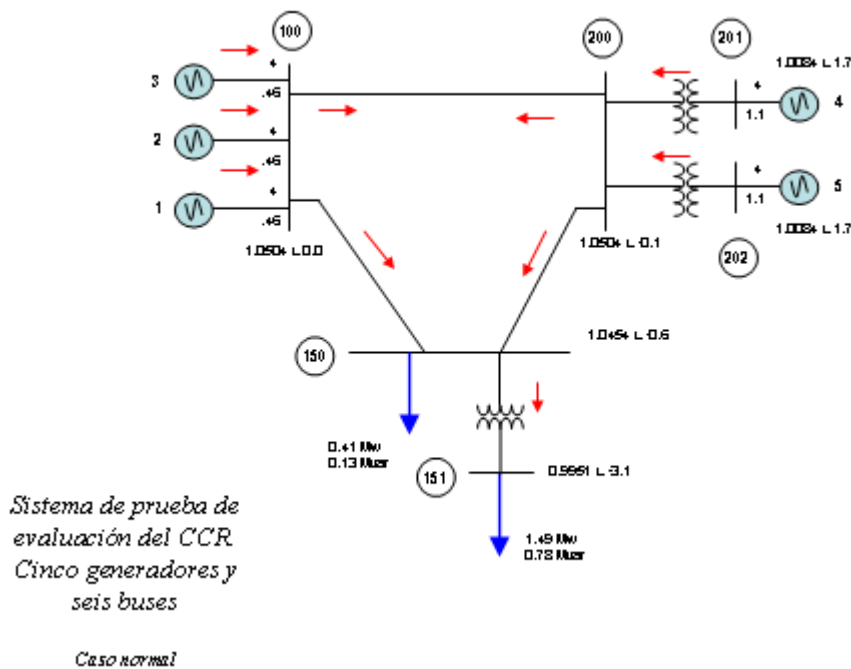


figura 4.4.3 Sistema de potencia en PSS/E

La Red que se muestra en la figura 4.4.3, se implemento en el paquete de simulación digital PSS, para poder evaluar la función compensadora de reactivos de los sistemas de excitación. Se puede apreciar que el sistema cuenta con 5 generadores, siendo tres del tipo hidro-eléctrico y dos del tipo térmico.

La capacidad de los generadores hidro-eléctricos son de 5 MVA y de los térmicos son de 10 MVA. Los generadores hidro-eléctricos están conectados directamente al bus marcado como 100, el cual está configurado como nodo de compensación.

Los buses 150 y 151 están configurados como nodos de carga; siendo sus valores de carga de 5 Mw y 1.6 Mvar's; y de 15 Mw y 7.9 Mvar's respectivamente.

Cuenta con tres líneas de enlace, la primera del nodo 100 al 200, la segunda del nodo 100 al 150 y la tercera del nodo 200 al 150.

Como se puede apreciar en la base de datos que se utiliza en dinámica, se observa los tipos de generadores que se están simulando, del bus 100, que corresponde a tres generadores de polos salientes.

Los generadores de los buses 201 y 202 son de polos lisos. Los sistemas de excitación correspondientes a los cinco generadores son del tipo estático; siendo SCRX del bus 100 y SEXS de los buses 201 y 202.

Las unidades conectadas al bus 100 son hidroeléctricos; del bus 201 y 202, son térmicas.

Las unidades correspondientes al bus 201 y 202, tienen implementado el modelo de compensador de potencia reactiva.

Como premisa, a nivel de estudios de flujos de potencia, se obtiene la característica de operación del flujo de reactivos en los generadores y en el sistema, para lo cual, se efectúa variaciones del voltaje de terminales de los buses donde se encuentran las máquinas 4 y 5 (buses 201 y 202).

Para este caso de estudio, las simulaciones se desarrollaron hasta dinámica, pues a nivel de librería de este paquete, se tiene implementada una función compensadora de reactivos, la cual se anexa al final de este documento.

Las simulaciones a nivel de flujos se realizaron con la red de Anderson, debido a que se empleó el “programa de simulación digital de Sistemas Eléctricos de Potencia para estudios de Flujos de Potencia” desarrollado en Fortran por el Instituto Politécnico Nacional. Aquí también se realizaron implementaciones; en el nodo tres se convirtió en dos nodos, (3 y 4) implementándose la función compensadora de reactivos por medio de una impedancia entre los nodos 3 y 11; 4 y 12,

Como se puede apreciar en la figura 4.4.4.

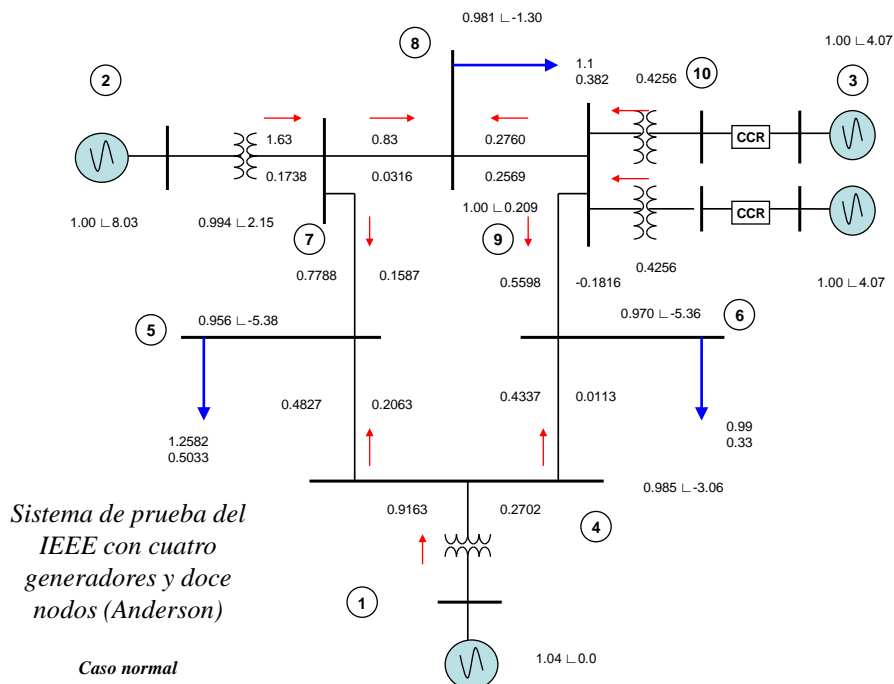


Figura 4.4.4 Sistema de potencia Anderson con diez nodos

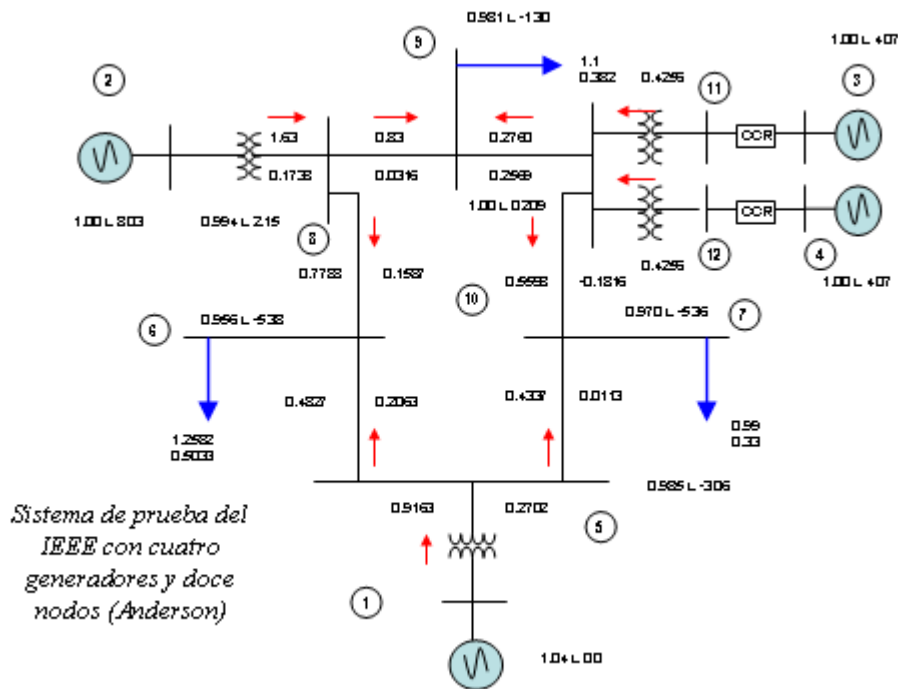


Figura 4.4.5 Sistema de potencia Anderson con doce nodos

Para poder evaluar la función compensadora de reactivos a nivel de flujos de potencia, esto es evaluar el comportamiento del flujo de potencia reactiva ante la variación del voltaje de los nodos de los generadores con el compensador se realizaron las siguientes simulaciones.

- 1.- Con función compensadora de reactivos en la unidad 3, se mueve el voltaje en la unidad 3
- 2.- Con función compensadora de reactivos en la unidad 3, se mueve el voltaje en la unidad 2
- 3.- Sin compensador de reactivos en la unidad 3, se mueve voltaje en la unidad 3
- 4.- Sin compensador de reactivos en la unidad 3, se mueve voltaje en la unidad 2
- 5.- Sin compensador de reactivos en la unidad 2, se mueve su voltaje
- 6.- Con compensador de reactivos en la unidad 3, se mueve voltaje en Unidad 2
- 7.- Con compensador de reactivos en la unidad 4, se mueve el voltaje en la unidad 2
- 8.- Con valores diferentes de compensación en unidades 3 y 4, se mueve el voltaje igual en ambas unidades.
- 9.- Con valores diferentes de compensación en unidades 3 y 4, se mueve el voltaje en la unidad 2

Tabla 4.4.1 Potencias y voltajes finales por nodo

Nomb	re	Voltaj	e(polar)	Pg	Qg	Po	Qo	Pm	Qm
		Mag.	Angulo						
Nodo	1	1.000.000	0.0000	0.916327	0.270174	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Nodo	2	1.000.000	80.339	1.630.000	0.173790	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Nodo	3	1.000.000	40.701	0.425000	0.006865	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Nodo	4	1.000.000	40.701	0.425000	0.006865	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Nodo	5	0.985852	-30.690	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Nodo	6	0.956574	-53.848	0.000000	0.000000	1.258.171	0.503268	0.000000	0.000000
Nodo	7	0.970937	-53.682	0.000000	0.000000	0.990000	0.330000	0.000000	0.000000
Nodo	8	0.994371	21.535	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Nodo	9	0.981438	-13.045	0.000000	0.000000	1.100.000	0.383000	0.000000	0.000000
Nodo	10	1.001.183	0.2097	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Nodo	11	1.000.217	16.348	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Nodo	12	1.000.217	16.348	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Flujos de potencia en los elementos de la red

DE 1 Nodo 1 P(pu) Q(pu) Vpolar= 1.0000 0.0000 1
 Generador 0.9163 0.2702
 A 5 Nodo 5 0.9163 0.2702 Tap = 1.0000

DE 2 Nodo 2 P(pu) Q(pu) Vpolar= 1.0000 8.0339 2
 Generador 1.6300 0.1738
 A 8 Nodo 8 1.6300 0.1738 Tap = 1.0000

DE 3 Nodo 3 P(pu) Q(pu) Vpolar= 1.0000 4.0701 3
 Generador 0.4250 0.0069
 A 12 Nodo 12 0.4250 0.0069

DE 4 Nodo 4 P(pu) Q(pu) Vpolar= 1.0000 4.0701 4
 Generador 0.4250 0.0069
 A 11 Nodo 11 0.4250 0.0069

DE 5 Nodo 5 P(pu) Q(pu) Vpolar= 0.9859 -3.0690 5
 A 1 Nodo 1 -0.9163 -0.2176 Tap = 1.0000
 A 6 Nodo 6 0.4827 0.2063
 A 7 Nodo 7 0.4337 0.0113

DE 6 Nodo 6 P(pu) Q(pu) Vpolar= 0.9566 -5.3848 6
 A Carga 1.2582 0.5033
 A 5 Nodo 5 -0.4794 -0.3446
 A 8 Nodo 8 -0.7788 -0.1587

DE 7 Nodo 7 P(pu) Q(pu) Vpolar= 0.9709 -5.3682 7
 A Carga 0.9900 0.3300
 A 10 Nodo 10 -0.5598 -0.1860
 A 5 Nodo 5 -0.4302 -0.1440

97

DE 8 Nodo 8 P(pu) Q(pu) Vpolar= 0.9944 2.1535 8
 A 6 Nodo 6 0.8000 -0.0258
 A 2 Nodo 2 -1.6300 -0.0058 Tap = 1.0000
 A 9 Nodo 9 0.8300 0.0316

DE 9 Nodo 9 P(pu) Q(pu) Vpolar= 0.9814 -1.3045 9
 A Carga 1.1000 0.3830
 A 8 Nodo 8 -0.8240 -0.1261
 A 10 Nodo 10 -0.2760 -0.2569

DE 10 Nodo 10 P(pu) Q(pu) Vpolar= 1.0012 0.2097 10
 A 9 Nodo 9 0.2773 0.0620
 A 12 Nodo 12 -0.4250 0.0218 Tap = 1.0000
 A 11 Nodo 11 -0.4250 0.0218 Tap = 1.0000
 A 7 Nodo 7 0.5727 -0.1056

DE 11 Nodo 11 P(pu) Q(pu) Vpolar= 1.0002 1.6348 11
 A 10 Nodo 10 0.4250 -0.0112 Tap = 1.0000
 A 4 Nodo 4 -0.4250 0.0112

DE	12	Nodo 12	P(pu)	Q(pu)	Vpolar=	1.0002	1.6348	12
A	10	Nodo 10	0.4250	-0.0112	Tap =	1.0000		
A	3	Nodo 3	-0.4250	0.0112				

El nodo con mayor desbalance
de potencia activa es el : Nodo 8
El valor del desbalance es de : 0.2966E-06 p.u.

El nodo con mayor desbalance
de potencia reactiva es el: Nodo 8
El valor del desbalance es de : 0.3176E-06 p.u.

Numero de nodos con problemas: 0

**CAPÍTULO V:
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN**

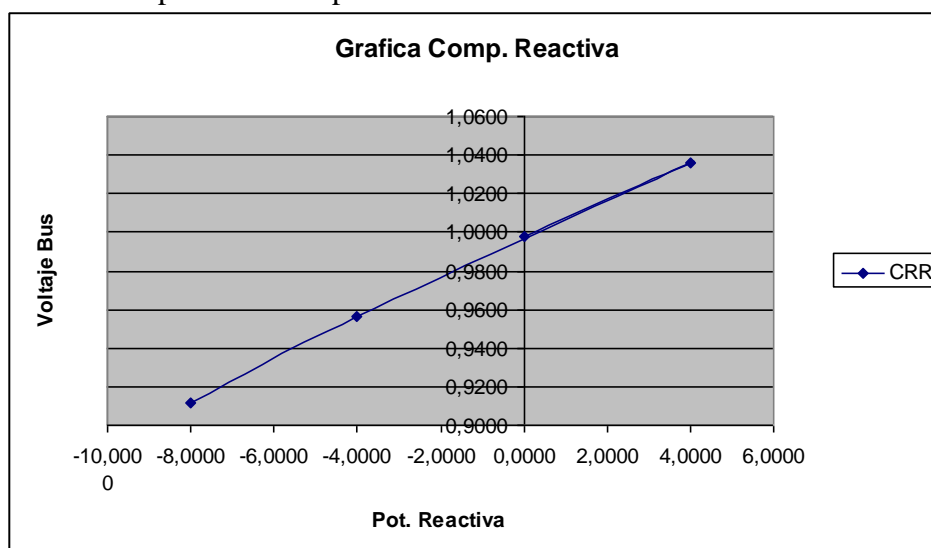
En este capítulo se presentan los resultados de las corridas realizadas a nivel de flujos de potencia tanto en la red de potencia que se integraron en el PSS/E como la red Anderson.

5.1.0.-Simulaciones realizadas en el PSS/E® con la red de potencia de tres nodos de generación creada para tal fin.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el estudio de flujos. Donde se puede apreciar las diferentes curvas como causa de la variación de la reactancia de las líneas o del sistema, para el primer caso se deja el valor original de la impedancia del enlace entre el nodo 201 y 200 el cual se puede verificar en la base de datos para flujos de potencia, valor de impedancia de enlaces, siendo igual a 0.8 p.u.

5.1.1.-Caso de impedancia igual a 0.8 pu. entre nodos 200 y 201.

Grafica 5.1.1.1 Compensación de potencia reactiva



Se puede observar la característica que se obtiene al estar variando el voltaje de terminales de los generadores de los nodos 201 y 202, esta característica la proporciona la impedancia del punto de conexión.

Se puede observar que es positiva cuando se está moviendo el voltaje del nodo que se grafica; esto es, el voltaje aumenta, y los reactivos aumentan; y viceversa.

CRR

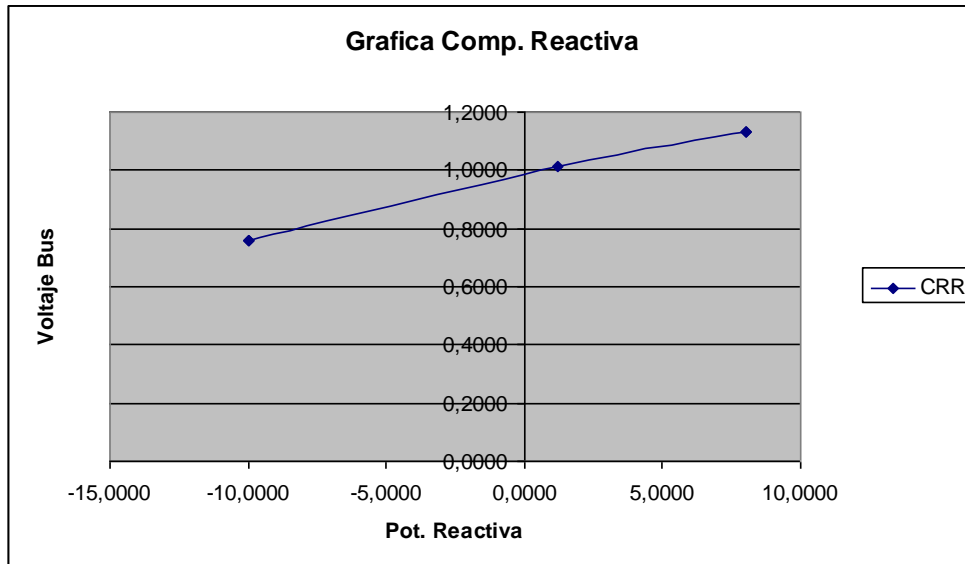
Voltaje Bus	Q reactiva
0,9112	-8,0000
0,9564	-4,0000
1,0356	4,0000
0,9975	0,0000

Tabla de datos 5.1.1.1 Voltaje y Potencia Reactiva

Para este caso, de acuerdo a la tabla de datos obtenida, se obtiene una pendiente de 1.03 % en el nodo en el cual se está variando el voltaje el nodo 201

5.1.2.-Caso de impedancia igual a 1.2 pu. entre nodos 200 y 201.

Caso de incremento de impedancia



Grafica 5.1.2.1 Compensación de Potencia Reactiva

Para este caso, para un incremento de la impedancia de la línea entre el bus 200 al 201, se observa el comportamiento de la potencia reactiva ante la variación del voltaje del nodo. Se están variando los voltajes de terminal de los generadores 3 y 4 (buses 201 y 202). Los valores que se modificaron son: de 0.8 a 1.2 p.u., la cual representa un 50 % mas del valor original. Se observa que la pendiente es positiva.

CRR

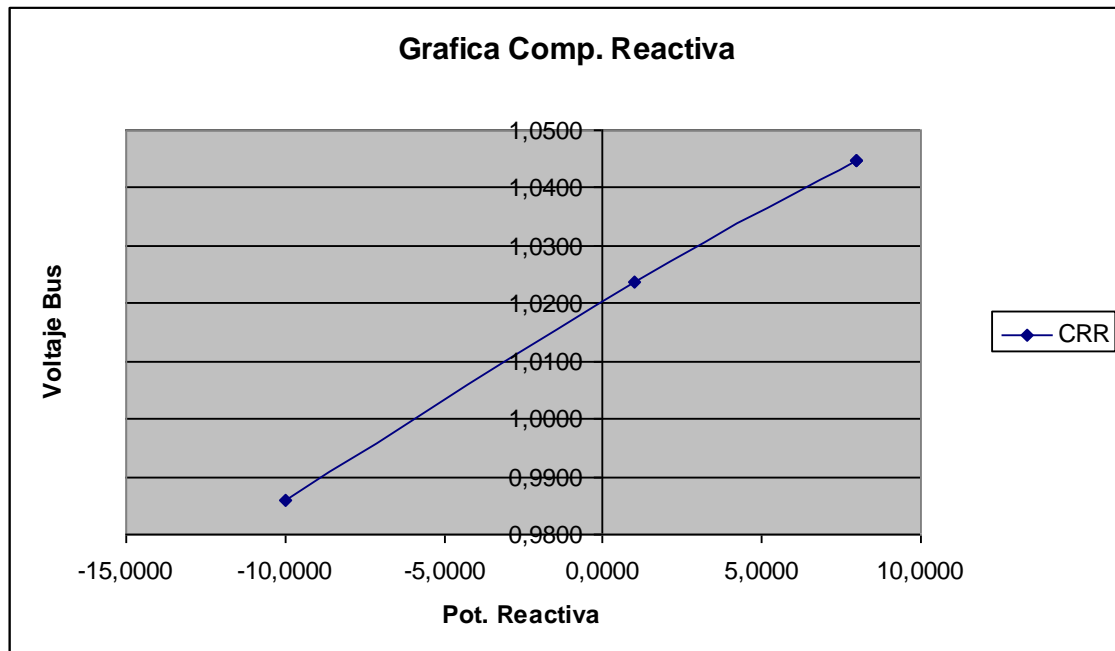
Voltaje Bus	Q reactiva
1,1343	8,0000
1,1343	8,0000
1,0156	1,2000
0,7591	-10,0000
0,7591	-10,0000

Tabla de datos 5.1.2.1 Voltaje y Potencia Reactiva

El incremento de la pendiente es del doble como se puede constatar por el valor obtenido, de pendiente de 2.08 % en el nodo en el cual se está variando el voltaje

5.1.3.-Caso de impedancia igual a 0.4 pu. entre buses 200 y 201.

Caso de disminución de impedancia



Grafica 5.1.3.1 Compensación Reactiva

Disminución de la reactancia de la línea entre el bus 200 y 201 de 0.8 a 0.4 p.u. en el nodo donde se está variando el voltaje (nodo 201).

La pendiente nos dice que para un incremento de voltaje, la potencia reactiva crece; y al revés, para una disminución de voltaje.

CRR

Voltaje Bus	Q reactiva
0,9858	-10,0000
1,0236	1,0000
1,0448	8,0000
1,0448	8,0000

Tabla de datos 5.1.3.1 Voltaje y Potencia Reactiva

Se tiene una pendiente de 0.327 % en el nodo en el cual se está variando el voltaje. La pendiente comparada con el caso anterior disminuye hasta el doble de su valor en comparación con la pendiente del caso anterior.

Como conclusión para este caso, es que en un sistema eléctrico de potencia entre mayor sea el valor de la impedancia del enlace entre dos nodos, menor será la variación de la potencia reactiva, y para el caso de una impedancia menor, la variación de la potencia reactiva será mayor.

Esto nos dice, que entre menor sea la impedancia entre dos nodos, las variaciones de parámetros eléctricos entre ellos; como son voltaje o potencia, se reflejarán en la misma magnitud o casi igual magnitud, debido a que eléctricamente los dos nodos están muy cercanos.

5.2.0.-EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN COMPENSADORA DE REACTIVOS DE LIBRERÍA DEL PSS/E®.

Para realizar la simulación de la operación de la función compensadora de reactivos de librería del PSS/E®, es necesario correr dinámica, ya que en esta aplicación es donde se da de alta la función compensadora en los sistemas de excitación y generadores que se desea tenerla implementada.

Para el caso de simulación dinámica, ya se incluyen los sistemas de control de los generadores, compensadores estáticos de var's, etc..

Las simulaciones de operación del compensador es en régimen dinámico con tiempos largos de simulación, para esto hay que ajustar el pequeño sistema para que su respuesta sea estable en los tiempos que se desea evaluar la función compensadora de reactivos.

El caso siguiente que se realizó en el PSS/E®, fue habilitar la función compensadora de reactivos en las unidades de los buses 201 y 202, se les dio un valor de 0.10 p.u. (10 %). Al correr dinámica se deshabilitó la función compensadora de reactivos para evaluar su efecto en el sistema.

Los resultados se muestran a continuación:

COMPENSADOR DE REACTIVOS

	U1	U2	U3	U4	U5	
$\Delta V_g =$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	Voltaje p.u.
$\Delta Q_g =$	0.005	0.005	0.005	0.03	0.03	Reactivos p.u.
% CR	10	10	10	1.67	1.6	

Tabla 5.2.1 Compensación reactiva

Se muestra la gráfica del comportamiento dinámico, donde se puede apreciar la respuesta de las unidades al quitar el compensador de potencia reactiva en las unidades del bus 201 y 2002.

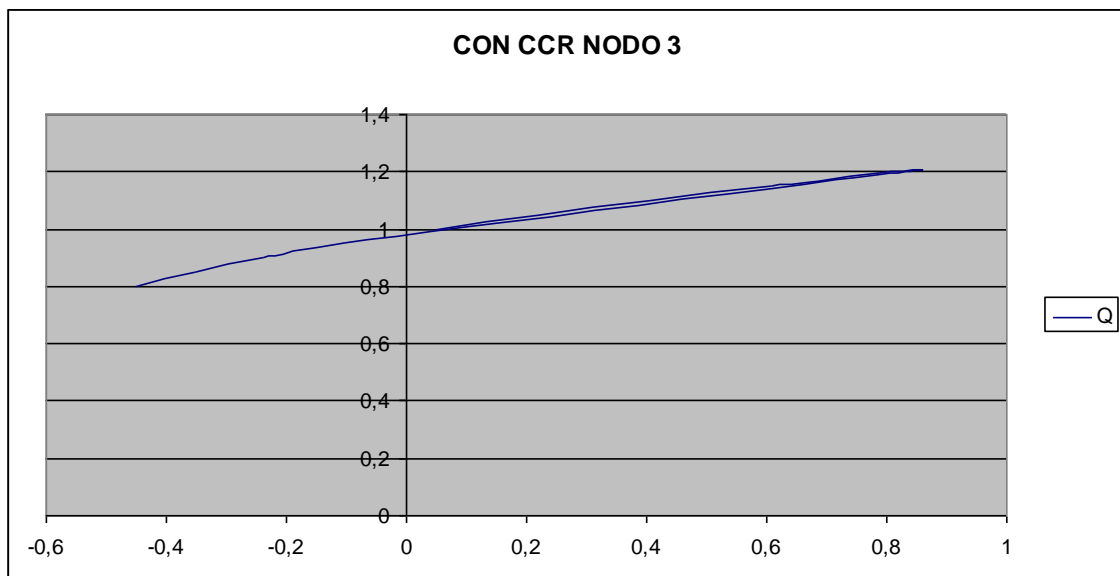
El comportamiento de los reactivos de las unidades 1, 2 y 3 del bus 100 son semejantes y se puede observar como varió la potencia reactiva en estas unidades, así como su voltaje en terminales. En comparación con las unidades de los buses 202 y 201; estas dos unidades también cuentan con una respuesta semejante entre sí. La respuesta del comportamiento de la potencia reactiva difiere con respecto al de las unidades conectadas al bus 100, esto se puede apreciar en la [gráfica CCR1](#),

5.3.0.-CORRIDAS REALIZADAS A NIVEL DE FLUJOS EN EL SISTEMA ANDERSON:

RED ANDERSON CON DIEZ NODOS

5.3.1 Flujo de reactivos entre nodo 3 y 10

Entre el nodo 3 y 10 se implementa una impedancia para simular la función compensadora de reactivos, la cual se le da un valor de 0.10 p.u., simulando un valor del 10 % de compensación para un dispositivo compensador. Se mueve el voltaje de la unidad 3 y se grafica los reactivos de los nodos 3 y 10 de la red de prueba.

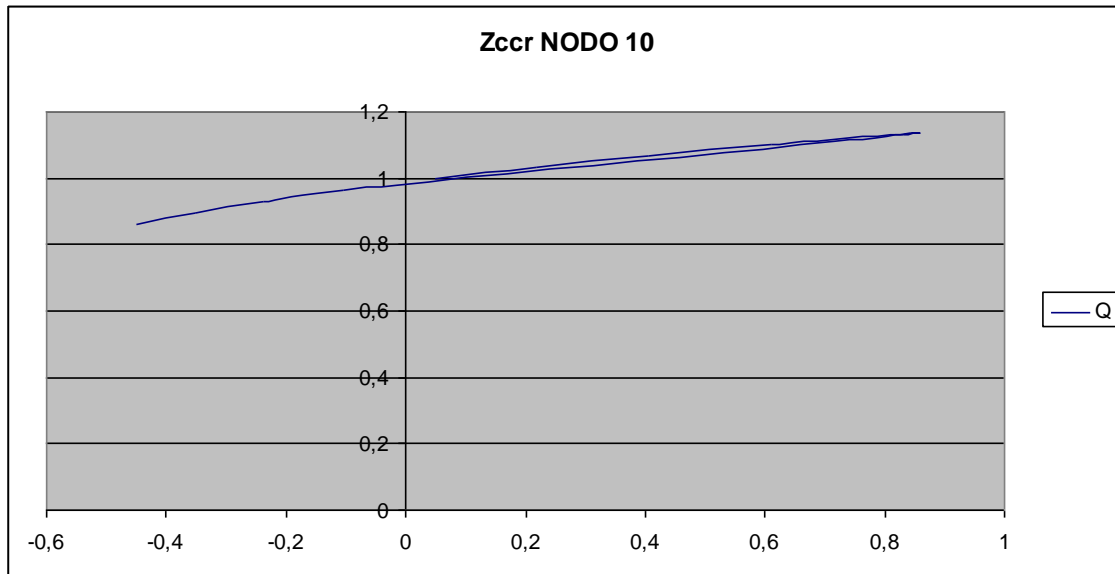


Grafica 5.3.1.1 Compensación Reactiva Nodo 3

Tabla de datos:

Tabla 5.3.1.1 Voltaje y potencia reactiva nodo 3

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1	8,714	0,85	0,0487
1,05	7,3305	0,85	0,218021
1,1	6,0157	0,85	0,404916
1,15	4,761	0,85	0,609402
1,2	3,5585	0,85	0,831448
0,95	10,1795	0,85	-0,102812
0,9	11,7392	0,85	-0,236617
0,85	13,4113	0,85	-0,352556
0,8	15,2181	0,85	-0,450492



Grafica 5.3.1.2 Compensación Reactiva entre Nodo 3 y 10

Tablas de Datos:

Tabla 5.3.1.2 Voltaje y potencia reactiva nodo 10

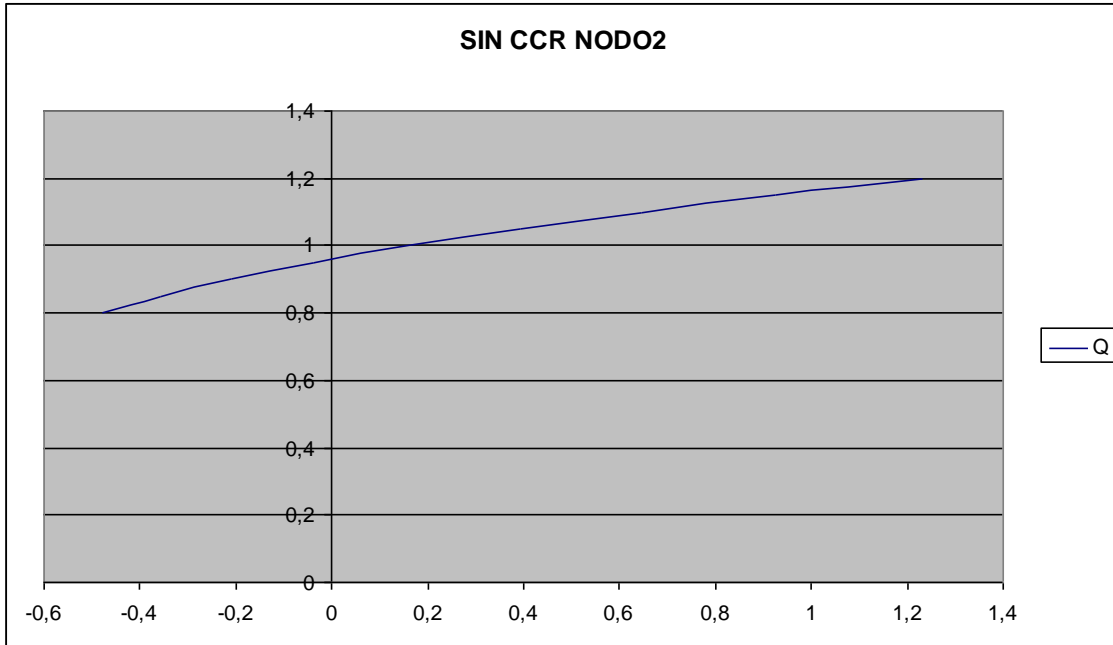
VOLTAJE	ANGULO	P	Q
0,9987	3,832	0	0
1,03241	2,8333	0	0
1,065994	1,8588	0	0
1,09949	0,9064	0	0
1,132929	-0,0261	0	0
0,964979	4,8593	0	0
0,931093	5,9174	0	0
0,897068	7,011	0	0
0,862878	8,1451	0	0

Tabla 5.3.1.3 Voltaje y potencia reactiva nodo 9

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,0038	0,9777	0	0
1,02514	0,1358	0	0
1,048803	-0,6947	0	0
1,072382	-1,5148	0	0
1,095883	-2,3254	0	0
0,977519	1,8324	0	0
0,953536	2,7013	0	0
0,929414	3,5861	0	0
0,905133	4,4887	0	0

5.3.2.-Compensador de reactivos entre nodo 3 y 10. Se mueve voltaje en Unidad 2
Gráfica de flujo de Reactivos en los nodos 2,3,10 y 9. Moviendo el voltaje en la unidad 2 y sin Compensador de reactivos en este nodo.

Grafica 5.3.2.1 Compensación Reactiva entre Nodo 2



Grafica 5.3.2.2 Compensación Reactiva entre Nodo 3

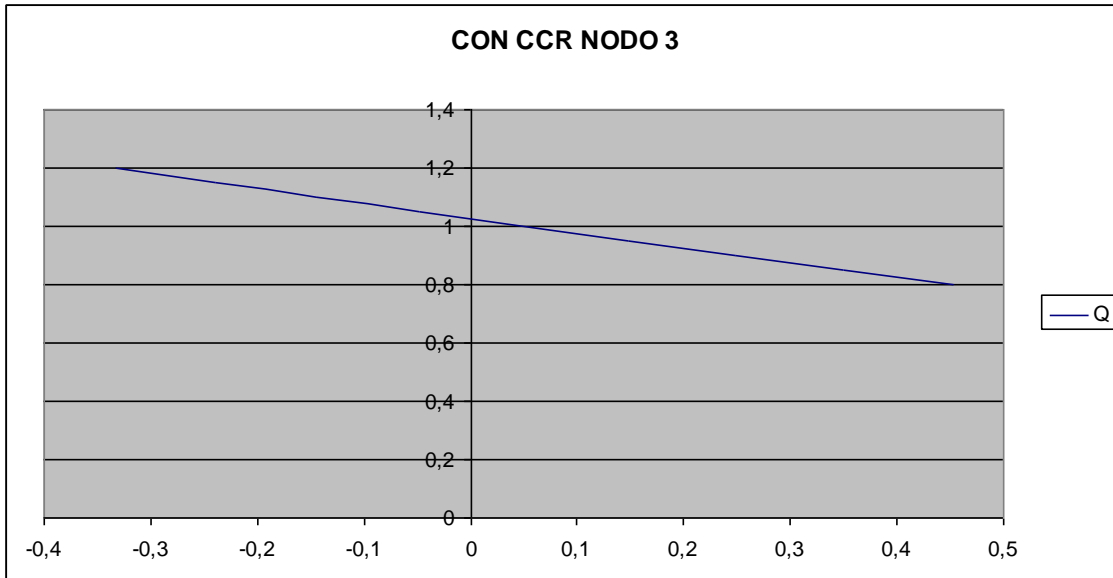


TABLA DE DATOS

Tabla 5.3.2.1 Voltaje y potencia reactiva nodo 2

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
0,8	18,7758	1,63	-0,478985
0,85	15,9651	1,63	-0,358628
0,9	13,3808	1,63	-0,210815
0,95	10,9814	1,63	-0,036104
1	8,7362	1,63	0,165197
1,05	6,6208	1,63	0,39287
1,1	4,5167	1,63	0,646762
1,15	2,7051	1,63	0,926773
1,2	0,8758	1,63	1,232836

Tabla 5.3.2.2 Voltaje y potencia reactiva nodo 3

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,00	14,5737	0,85	0,453405
1,00	13,0391	0,85	0,349484
1,00	11,5564	0,85	0,2476
1,00	10,1169	0,85	0,14743
1,00	8,7146	0,85	0,04876
1,00	7,3444	0,85	-0,04858
1,00	6,0021	0,85	-0,144724
1,00	4,6842	0,85	-0,239781
1,00	3,3877	0,85	-0,333841

Tabla 5.3.2.3 Voltaje y potencia reactiva nodo 10

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
0,958436	9,4857	0	0
0,968788	8,0056	0	0
0,978937	6,5752	0	0
0,988917	5,1861	0	0
0,998748	3,8324	0	0
1,008447	2,5093	0	0
1,018027	1,2126	0	0
1,0275	-0,061	0	0
1,036874	-1,3145	0	0

Tabla 5.3.2.4 Voltaje y potencia reactiva nodo 9

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
0,93783	6,309	0	0
0,954143	4,9167	0	0
0,970143	3,5688	0	0
0,985878	2,2576	0	0
1,001383	0,9777	0	0
1,016682	-0,2754	0	0
1,031798	-1,5054	0	0
1,046747	-2,715	0	0
1,061542	-3,9083	0	0

5.3.3.-Sin compensación de reactivos entre nodo 3 y 10. Se mueve voltaje en Unidad 3

Gráfica de flujo de Reactivos en el nodo 3 y moviendo el voltaje en la unidad 3. Sin compensador de reactivos.

Grafica 5.3.3.1 Compensación Reactiva entre Nodo 3

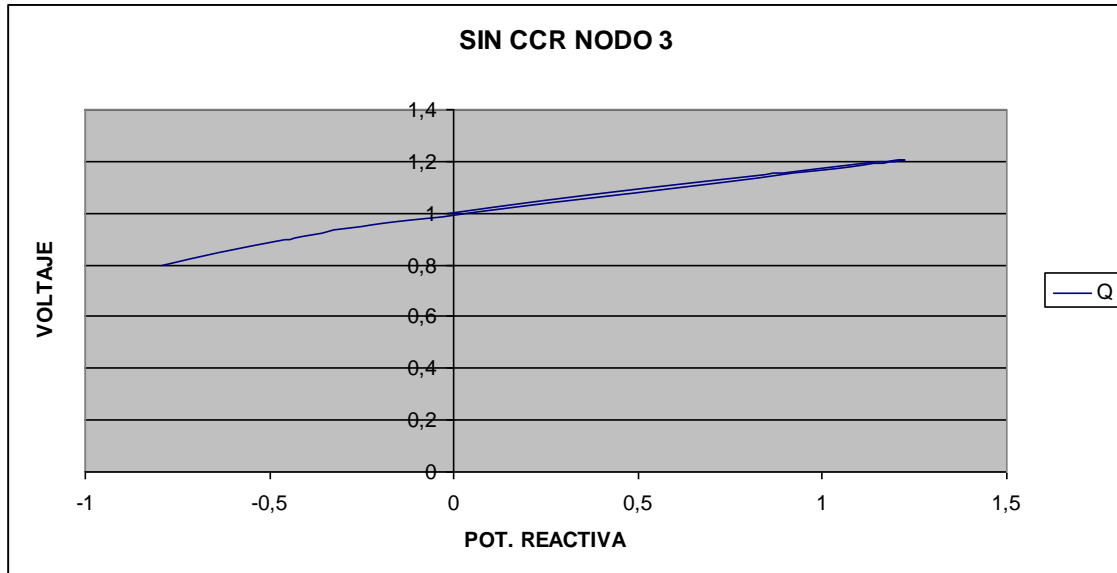


Tabla 5.3.3.1 Voltaje y potencia reactiva nodo 3

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1	3,7948	0,85	-0,017549
1,05	2,3203	0,85	0,242766
1,1	0,8922	0,85	0,529722
1,15	-0,4959	0,85	0,843375
1,2	-1,8495	0,85	1,18378
0,95	5,3235	0,85	-0,251269
0,9	6,9156	0,85	-0,458427
0,85	8,5827	0,85	-0,639043
0,8	10,3392	0,85	-0,793121

Tabla 5.3.3.2 Voltaje y potencia reactiva nodo 9

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,002267	0,9462	0	0
1,037536	-0,3003	0	0
1,072736	-1,5271	0	0
1,107872	-2,7365	0	0
1,142946	-3,9307	0	0
0,966922	2,2151	0	0
0,931494	3,5093	0	0
0,895975	4,8327	0	0
0,860352	6,1892	0	0

Tabla 5.3.3.3 Voltaje y potencia reactiva nodo 3 a 9

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
0	0	0,85	-0,0175
0	0	0,85	0,2428
0	0	0,85	0,5297
0	0	0,85	0,8434
0	0	0,85	1,1838
0	0	0,85	-0,2513
0	0	0,85	-0,4584
0	0	0,85	-0,639
0	0	0,85	-0,7931

5.3.4.-Sin compensación de reactivos entre nodo 3 y 10. Se mueve voltaje en Unidad 2

Gráfica de flujo de Reactivos en el nodo 3 y moviendo el voltaje en la unidad 2. Sin compensador de reactivos.

Grafica 5.3.4.1 Compensación Reactiva entre Nodo 3

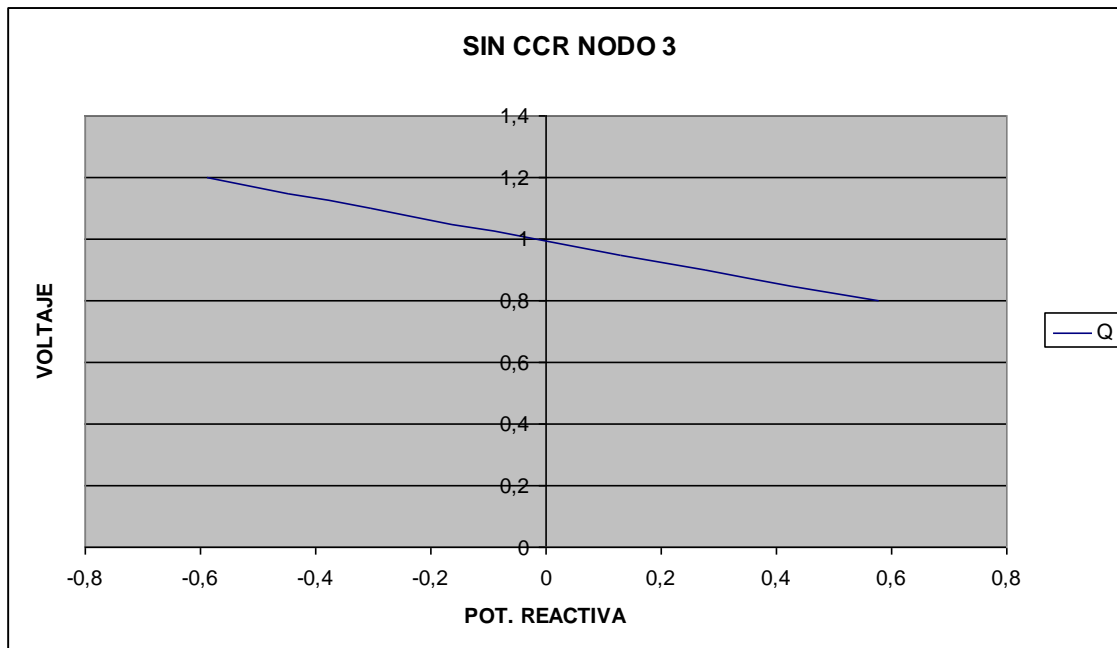


Tabla 5.3.4.1 Voltaje y potencia reactiva nodo 2

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
0,8	17,6617	1,63	-0,580358
0,85	15,1806	1,63	-0,438176
0,9	12,8814	1,63	-0,26691
0,95	10,7323	1,63	-0,06691
1	8,7095	1,63	0,161569
1,05	6,7924	1,63	0,418345
1,1	4,9655	1,63	0,703291
1,15	3,2159	1,63	1,016322
1,2	1,5328	1,63	1,357383

Tabla 5.3.4.2 Voltaje y potencia reactiva nodo 3

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,00	14,5737	0,85	0,577638
1,00	13,0391	0,85	0,425871
1,00	11,5564	0,85	0,276251
1,00	10,1169	0,85	0,128513
1,00	8,7146	0,85	-0,017549
1,00	7,3444	0,85	-0,162099
1,00	6,0021	0,85	-0,305267
1,00	4,6842	0,85	-0,447158
1,00	3,3877	0,85	-0,587856

Tabla 5.3.4.3 Voltaje y potencia reactiva nodo 9

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
0,967434	9,4857	0	0
0,976315	8,0056	0	0
0,985072	6,5752	0	0
0,993718	5,1861	0	0
1,002267	3,8324	0	0
1,010727	2,5093	0	0
1,019107	1,2126	0	0
1,027412	-0,061	0	0
1,035647	-1,3145	0	0

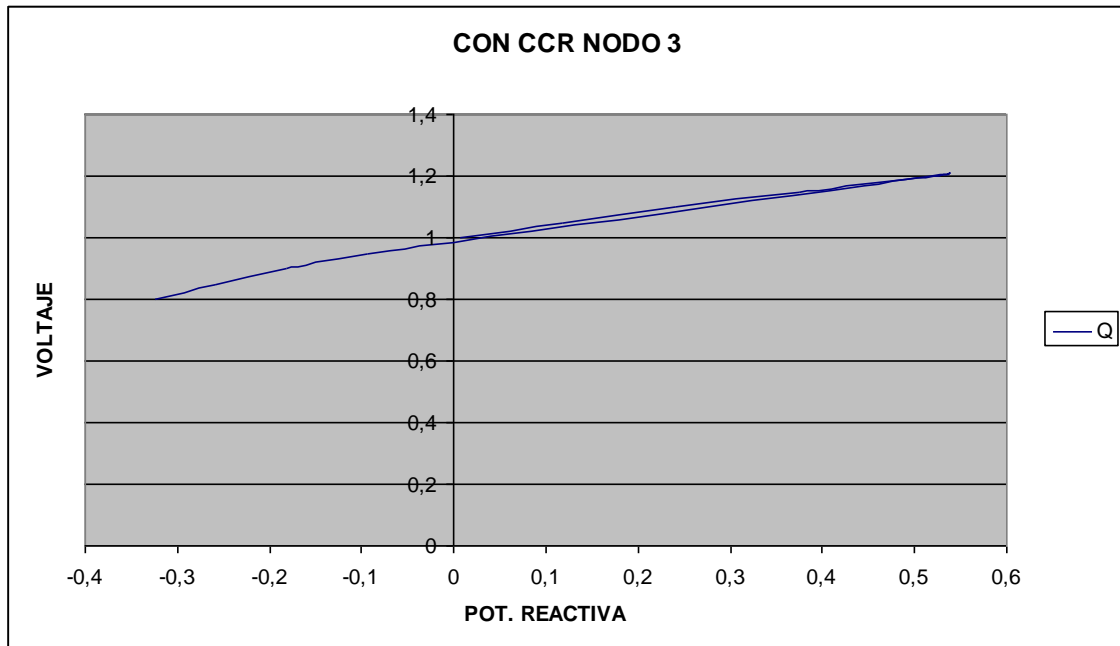
Tabla 5.3.4.4 Voltaje y potencia reactiva nodo 3 a 9

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
0	0	0,85	0,5776
0	0	0,85	0,4259
0	0	0,85	0,2763
0	0	0,85	0,1285
0	0	0,85	-0,0175
0	0	0,85	-0,1621
0	0	0,85	-0,3053
0	0	0,85	-0,4472
0	0	0,85	-0,5879

RED ANDERSON CON DOCE NODOS

5.3.5.-Con compensación de reactivos entre nodo 3, 11 y nodo 4, 12, impedancia 0.1 p.u. Se mueve con valores iguales el voltaje de Unidad 3 y 4

Gráfica de flujo de Reactivos en nodos 3 y 4, moviendo el voltaje en la unidad 3 y 4. Ambas unidades con compensador de reactivos.



Grafica 5.3.5.1 Compensación Reactiva entre Nodo 3

Tabla 5.3.5.1 Voltaje y potencia reactiva nodo 3

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1	4,0701	0,425	0,006865
1,05	3,2484	0,425	0,118267
1,1	2,4681	0,425	0,241026
1,15	1,722	0,425	0,375135
1,2	1,0079	0,425	0,520584
0,95	4,9408	0,425	-0,093168
0,9	5,8702	0,425	-0,181814
0,85	6,87	0,425	-0,259049
0,8	7,9552	0,425	-0,324841

Tabla 5.3.5.2 Voltaje y potencia reactiva nodo 4

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1	4,0701	0,425	0,006865
1,05	3,2484	0,425	0,118267
1,1	2,4681	0,425	0,241026
1,15	1,722	0,425	0,375135
1,2	1,0079	0,425	0,520584
0,95	4,9408	0,425	-0,093168
0,9	5,8702	0,425	-0,181814
0,85	6,87	0,425	-0,259049
0,8	7,9552	0,425	-0,324841

Tabla 5.3.5.3 Voltaje y potencia reactiva nodo 10

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,001183	0,2097	0	0
1,034131	-0,3107	0	0
1,067009	-0,8242	0	0
1,099827	-1,332	0	0
1,132589	-1,8349	0	0
0,968158	0,7381	0	0
0,935044	1,276	0	0
0,901829	1,8253	0	0
0,868495	2,388	0	0

Tabla 5.3.5.4 Voltaje y potencia reactiva nodo 11

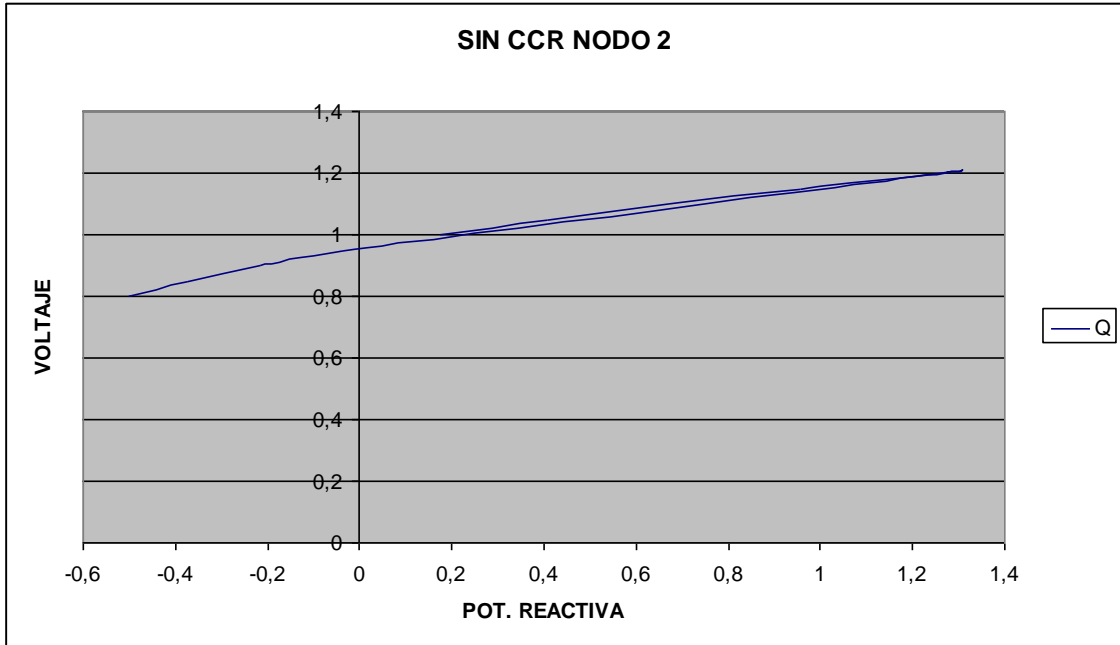
VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,000217	1,6348	0	0
1,039525	1,0169	0	0
1,078781	0,4156	0	0
1,117991	-0,1714	0	0
1,15716	-0,7461	0	0
0,960849	2,2722	0	0
0,921412	2,9325	0	0
0,881895	3,6198	0	0
0,842282	4,339	0	0

Tabla 5.3.5.5 Voltaje y potencia reactiva nodo 12

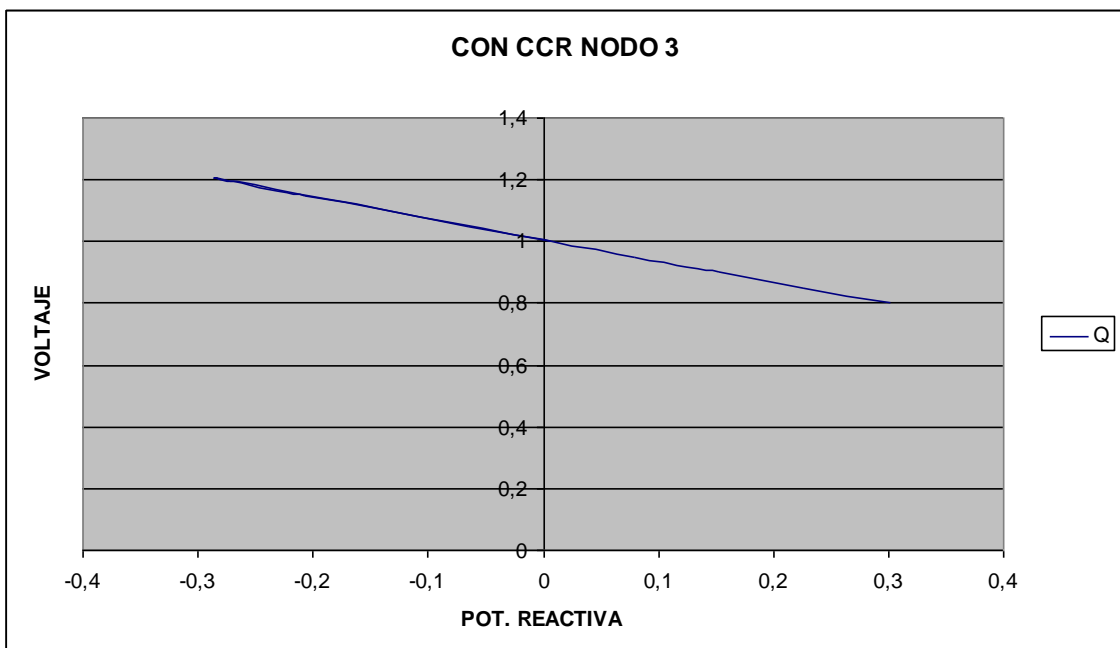
VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,000217	1,6348	0	0
1,039525	1,0169	0	0
1,078781	0,4156	0	0
1,117991	-0,1714	0	0
1,15716	-0,7461	0	0
0,960849	2,2722	0	0
0,921412	2,9325	0	0
0,881895	3,6198	0	0
0,842282	4,339	0	0

5.3.6.-Con compensación de reactivos entre nodo 3, 11 y nodo 4, 12, impedancia 0.1 p.u. Se mueve el voltaje de Unidad 2 la cual no tiene compensación.

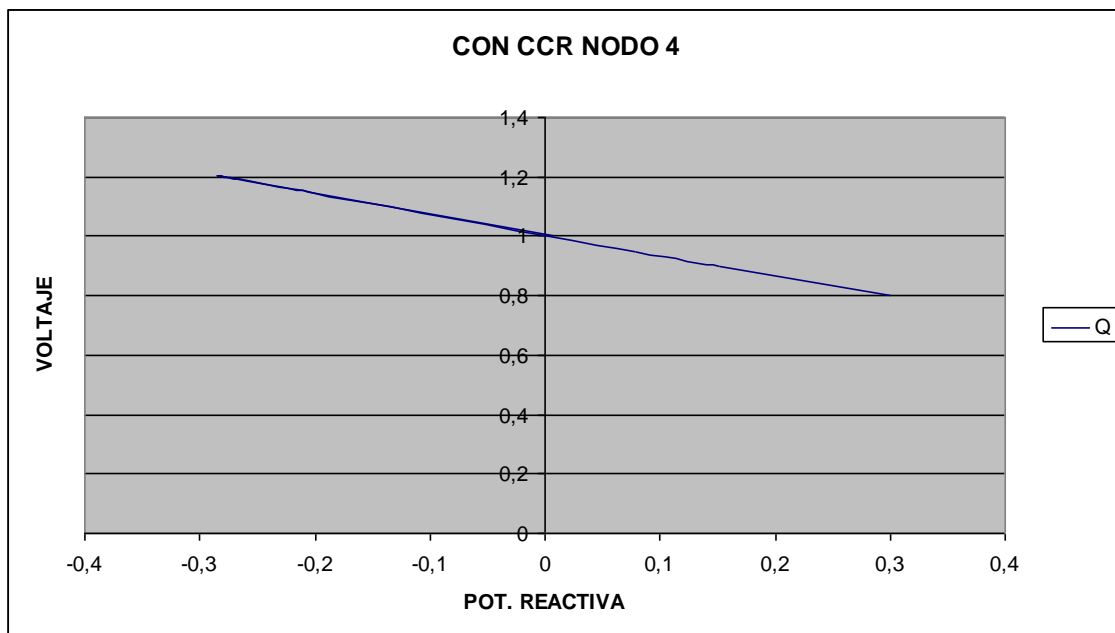
Gráficas de flujo de Reactivos en nodos 2,3,4,9,10,11 y 12, moviendo el voltaje en la unidad 2. Unidades 3 y 4 con compensador de reactivos. Unidad 2 sin compensador de reactivos



Gráfica 5.3.6.1 Compensación Reactiva entre Nodo 2



Gráfica 5.3.6.2 Compensación Reactiva entre Nodo 3



Gráfica 5.3.6.3 Compensación Reactiva entre Nodo 4

Tabla 5.3.6.1 Voltaje y potencia reactiva nodo 2

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1	8,0339	1,63	0,17379
1,05	6,7313	1,63	0,408673
1,1	5,5075	1,63	0,669472
1,15	4,3508	1,63	0,95603
1,2	3,2515	1,63	1,268217
0,95	9,4301	1,63	-0,03497
0,9	10,9383	1,63	-0,217342
0,85	12,5821	1,63	-0,372978
0,8	14,3916	1,63	-0,501426

Tabla 5.3.6.2 Voltaje y potencia reactiva nodo 3

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,00	4,0701	0,425	0,006865
1,00	3,6203	0,425	-0,064867
1,00	3,1634	0,425	-0,136061
1,00	2,6998	0,425	-0,206776
1,00	2,2298	0,425	-0,277061
1,00	4,5122	0,425	0,079205
1,00	4,9463	0,425	0,152245
1,00	5,3715	0,425	0,226098
1,00	5,7872	0,425	0,300911

Tabla 5.3.6.3 Voltaje y potencia reactiva nodo 4

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,00	4,0701	0,425	0,006865
1,00	3,6203	0,425	-0,064867
1,00	3,1634	0,425	-0,136061
1,00	2,6998	0,425	-0,206776
1,00	2,2298	0,425	-0,277061
1,00	4,5122	0,425	0,079205
1,00	4,9463	0,425	0,152245
1,00	5,3715	0,425	0,226098
1,00	5,7872	0,425	0,300911

Tabla 5.3.6.4 Voltaje y potencia reactiva nodo 10

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,001183	0,2097	0	0
1,012534	-0,1968	0	0
1,023801	-0,6116	0	0
1,034992	-1,0343	0	0
1,046116	-14,645	0	0
0,989736	0,6072	0	0
0,978179	0,995	0	0
0,966494	1,3723	0	0
0,954658	1,7384	0	0

Tabla 5.3.6.5 Voltaje y potencia reactiva nodo 11

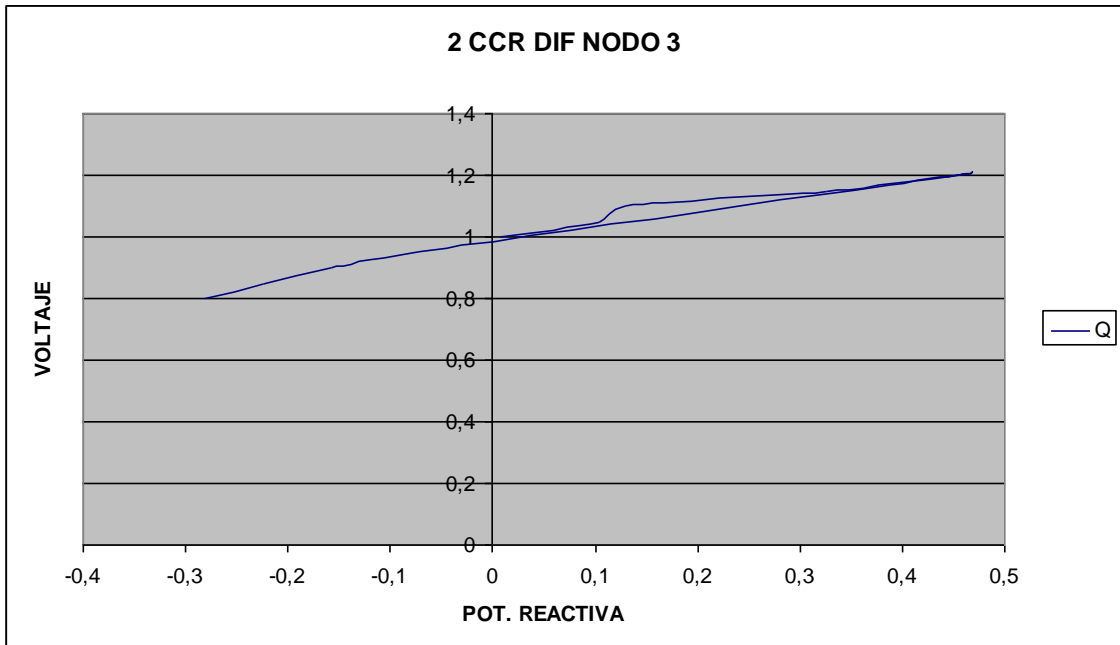
VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,000217	1,6348	0	0
1,007384	1,2023	0	0
1,014497	0,7624	0	0
1,021562	0,3154	0	0
1,028584	-0,1382	0	0
0,992989	2,0592	0	0
0,985692	2,4751	0	0
0,9783	2,8817	0	0
0,97084	3,2782	0	0

Tabla 5.3.6.6 Voltaje y potencia reactiva nodo 12

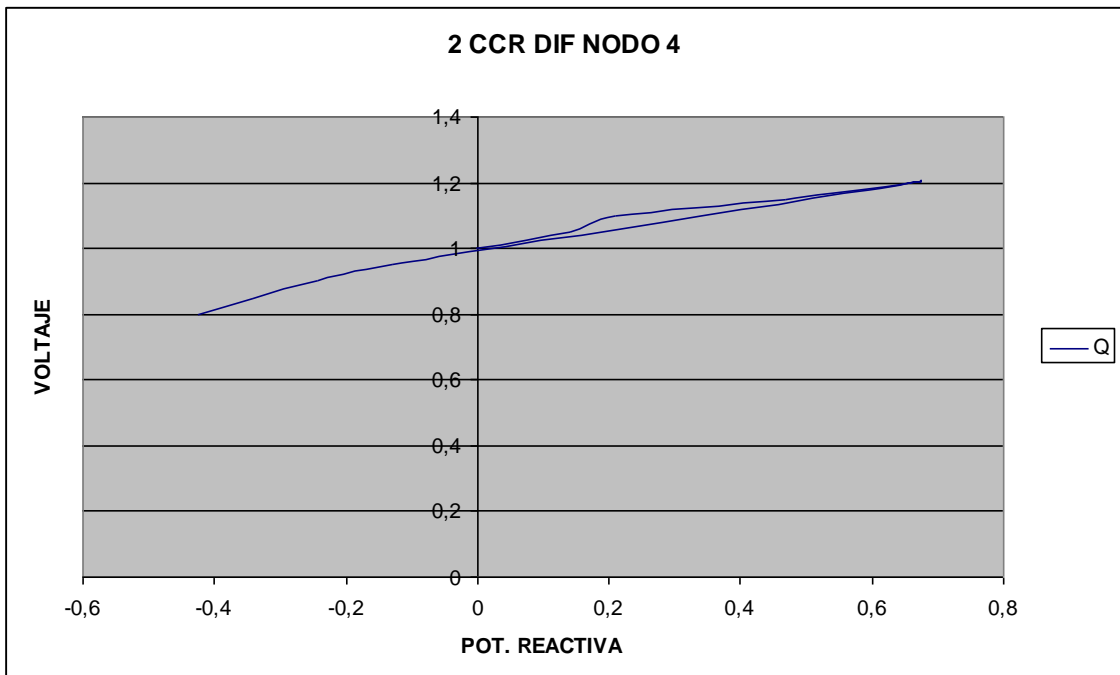
VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,000217	1,6348	0	0
1,007384	1,2023	0	0
1,014497	0,7624	0	0
1,021562	0,3154	0	0
1,028584	-0,1382	0	0
0,992989	2,0592	0	0
0,985692	2,4751	0	0
0,9783	2,8817	0	0
0,97084	3,2782	0	0

5.3.7.-Con compensación de reactivos entre nodo 3, 11 y nodo 4, 12. Se mueve igual el voltaje de Unidad 3 y 4.

Gráficas de flujo de Reactivos en nodos 2,3,4,9,10,11 y 12, moviendo el voltaje en las unidad 3 y 4. Diferentes valores de compensación de reactivos $U_3 = 0.1$ y $U_4 = 0.05$. El voltaje de Unidad 3 y 4 son iguales.



Gráfica 5.3.7.1 Compensación Reactiva entre Nodo 3



Gráfica 5.3.7.2 Compensación Reactiva entre Nodo 4

Tabla 5.3.7.1 Voltaje y potencia reactiva nodo 3

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1	4,0691	0,425	0,006555
1,05	3,205	0,425	0,103234
1,1	2,3845	0,425	0,12975
1,15	1,601	0,425	0,326363
1,2	0,8488	0,425	0,452789
0,95	4,9851	0,425	-0,080184
0,9	5,9634	0,425	-0,156954
0,85	7,0168	0,425	-0,223757
0,8	8,1617	0,425	-0,280528

Tabla 5.3.7.2 Voltaje y potencia reactiva nodo 4

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1	2,8511	0,425	-0,001542
1,05	2,0846	0,425	0,140546
1,1	1,3503	0,425	0,209841
1,15	0,6432	0,425	0,467882
1,2	-0,0408	0,425	0,653126
0,95	3,6558	0,425	-0,129233
0,9	4,5064	0,425	-0,242527
0,85	5,4123	0,425	-0,341418
0,8	6,3854	0,425	-0,4259

Tabla 5.3.7.3 Voltaje y potencia reactiva nodo 10

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,001232	0,2089	0	0
1,036397	-0,3462	0	0
1,071498	-0,8939	0	0
1,106544	-1,4354	0	0
1,141538	-1,9717	0	0
0,965996	0,7729	0	0
0,930679	1,3476	0	0
0,895269	1,9351	0	0
0,859752	2,5378	0	0

Tabla 5.3.7.4 Voltaje y potencia reactiva nodo 11

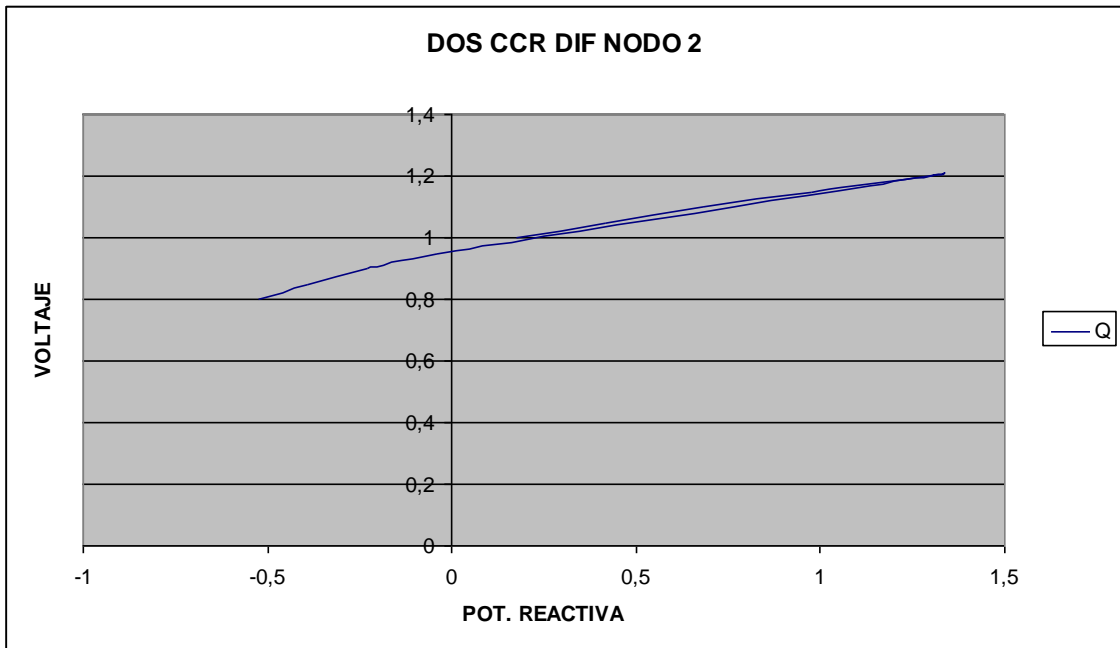
VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,000303	1,6338	0	0
1,043504	0,9733	0	0
1,086671	0,3317	0	0
1,129808	-0,2939	0	0
1,17292	-0,9059	0	0
0,957063	2,3166	0	0
0,913779	3,0258	0	0
0,870442	3,7665	0	0
0,827045	4,5449	0	0

Tabla 5.3.7.5 Voltaje y potencia reactiva nodo 12

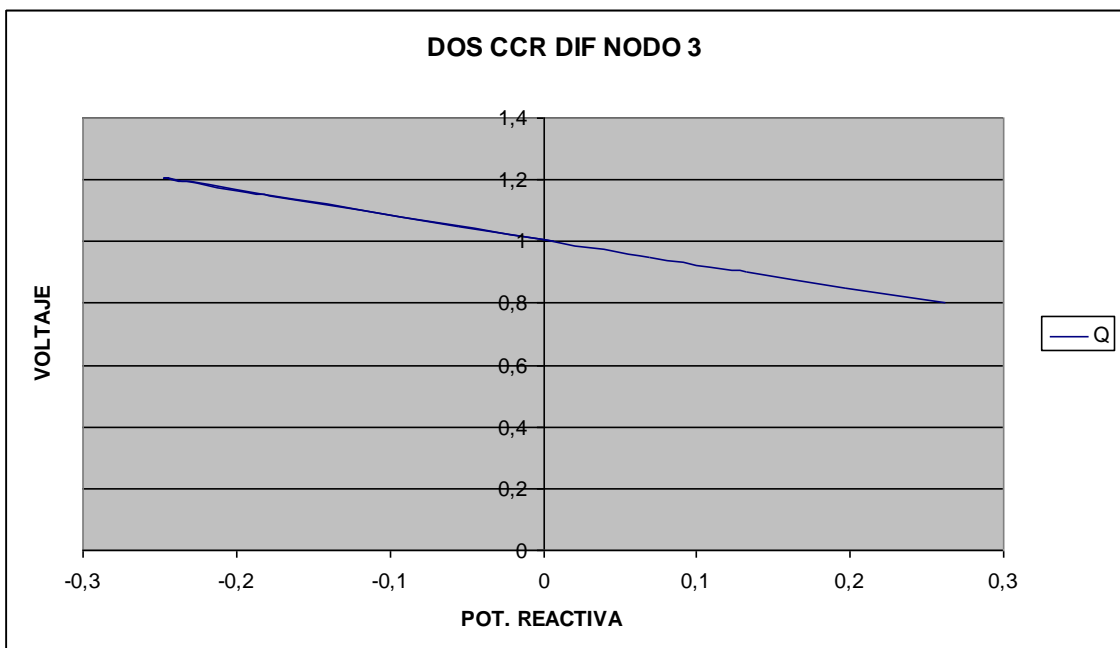
VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,000248	1,6339	0	0
1,040955	0,9766	0	0
1,081614	0,3374	0	0
1,122229	-0,2862	0	0
1,162807	-0,8966	0	0
0,959484	2,3127	0	0
0,918655	3,0169	0	0
0,87775	3,7512	0	0
0,836754	4,5216	0	0

5.3.8.-Con compensación de reactivos entre nodo 3, 11 y nodo 4, 12. Se mueve el voltaje de Unidad 2.

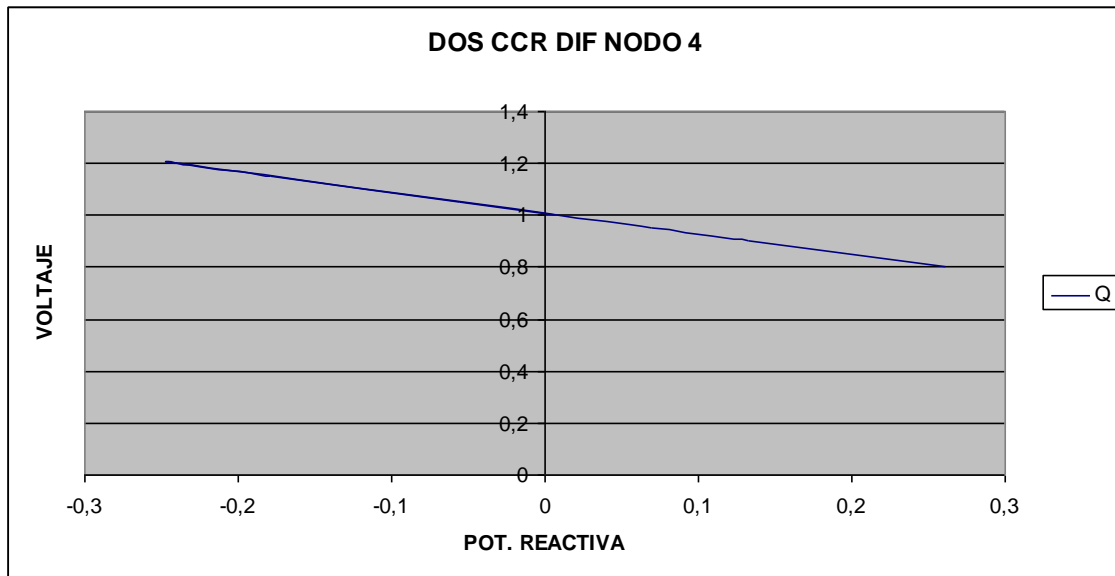
Gráficas de flujo de Reactivos en nodos 2,3,4,9,10,11 y 12, moviendo el voltaje en las unidad 2. Unidades 3 y 4 con diferentes valores de compensador de reactivos $U3 = 0.1$ y $U4 = 0.05$.



Grafica 5.3.8.1 Compensación Reactiva entre Nodo 2



Grafica 5.3.8.2 Compensación Reactiva entre Nodo 3



Grafica 5.3.8.3 Compensación Reactiva entre Nodo 4

Tabla 5.3.8.1 Voltaje y potencia reactiva nodo 2

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1	8,0333	1,63	0,173578
1,05	6,7465	1,63	0,415217
1,1	5,5358	1,63	0,683294
1,15	4,3897	1,63	0,977654
1,2	3,2988	1,63	1,298176
0,95	9,4104	1,63	-0,041425
0,9	10,8957	1,63	-0,229535
0,85	12,5119	1,63	-0,390417
0,8	14,2883	1,63	-0,523635

Tabla 5.3.8.2 Voltaje y potencia reactiva nodo 3

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,00	4,0691	0,425	0,006555
1,00	3,6478	0,425	-0,055723
1,00	3,2171	0,425	-0,117554
1,00	2,7776	0,425	-0,178986
1,00	2,3297	0,425	-0,240057
1,00	4,4803	0,425	0,069338
1,00	4,8806	0,425	0,132701
1,00	3,6377	0,425	0,196736
1,00	5,6451	0,425	0,261562

Tabla 5.3.8.3 Voltaje y potencia reactiva nodo 4

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,00	2,8511	0,425	-0,001542
1,00	2,4417	0,425	-0,092385
1,00	2,0226	0,425	-0,182577
1,00	1,5944	0,425	-0,272189
1,00	1,1575	0,425	-0,361277
1,00	3,25	0,425	0,090035
1,00	3,6377	0,425	0,182455
1,00	4,0133	0,425	0,275853
1,00	4,3758	0,425	0,370403

Tabla 5.3.8.4 Voltaje y potencia reactiva nodo 10

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,001232	0,2089	0	0
1,011087	-0,1747	0	0
1,020872	-0,5687	0	0
1,030594	-0,9725	0	0
1,040259	-1	0	0
0,991297	0,5813	0	0
0,981271	0,9418	0	0
0,97114	1,2892	0	0
0,960883	1,6226	0	0

Tabla 5.3.8.5 Voltaje y potencia reactiva nodo 11

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,000303	1,6338	0	0
1,004844	1,23	0	0
1,009353	0,8163	0	0
1,013832	0,3934	0	0
1,018286	-0,0382	0	0
0,995725	2,0271	0	0
0,991105	2,4092	0	0
0,986436	2,7789	0	0
0,98171	3,1354	0	0

Tabla 5.3.8.6 Voltaje y potencia reactiva nodo 12

VOLTAJE	ANGULO	P	Q
1,000248	1,6339	0	0
1,00647	1,2277	0	0
1,012648	0,8118	0	0
1,018785	0,3867	0	0
1,024887	-0,0469	0	0
0,993975	2,0297	0	0
0,987645	2,4143	0	0
0,981247	2,7868	0	0
0,974771	3,1462	0	0

5.4.0.-COMPENSADOR DE REACTIVOS DE CRUCE DE CORRIENTE

Se implementó en la pequeña red de potencia; que se generó en el PSS/E®, en las unidades 1 y 2 del bus 100, el compensador de reactivos de corriente de cruce la cual se tiene disponible en la librería del PSS/E®, esto con la finalidad de analizar la acción que tiene en dichas unidades, evaluar su comportamiento ante una falla que se simuló con un periodo de duración de 120 mseg.

COMPENSADOR DE REACTIVOS cruce de corriente

	U1	U2	U3	U4	U5	
$\Delta P_g =$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Real p.u.
$\Delta Q_g =$	0.025	0.025	0.025	0.03	0.043	Reactivos p.u.
$\Delta E_t =$	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	Voltaje p.u.
$\Delta E_{fd} =$	0.7	0.7	0.7	1.0	1.0	V campo p.u.
% CR	2	2	2	0.046	0.046	

Tabla 5.4.1 Compensación reactiva cruce de corriente

Se puede observar en la gráfica el comportamiento de las unidades ante la falla trifásica que se aplica, el comportamiento de la potencia reactiva, del voltaje en terminales y del voltaje de campo son muy semejantes entre las unidades 1 y 2, a diferencia de la unidad 3, donde se observa una variación diferente de las variables anteriormente mencionadas. Se observa que la unidad 3 tiene una mayor variación en la potencia reactiva y el voltaje de campo de dicha unidad.

Se puede apreciar en la **gráfica CCR2** como las unidades 1 y 2 trabajan como una sola unidad, los movimientos de la potencia reactiva, los voltajes de E_t y E_{fd} , son semejantes a diferencia en la unidad 3.

El compensador intenta controlar el perfil de voltaje en las unidades 1 y 2; la unidad 3 hace todo lo contrario, inyecta reactivos cuando el voltaje se esta bajando.

5.5.0.-INFLUENCIA DE COMPENSADORES DE REACTIVOS EN EL SISTEMA DE POTENCIA ANTE UNA FALLA.

Con la misma red de potencia formada en PSS/E[®], se pretende observar y analizar a nivel de dinámica el comportamiento del CCR ante una falla trifásica, ver el comportamiento dinámico de las variables de interés del sistema de potencia. Observar y evaluar el comportamiento de la función compensadora de reactivos y que originará al ser deshabilitado durante una falla.

Como se indicó anteriormente, en el pequeño sistema de potencia, se implemento el modelo Compensador de Cruce de corriente en las unidades 1 y 2. El modelo compensador de reactivos normal se implementó en las unidades 4 y 5.

Para analizar su desempeño a nivel transitorio, al correr dinámica, como primer paso se deshabilita la función compensador de cruce de corriente en unidades 1 y 2.

Se observa el incremento de reactivos de las unidades 1 y 2, la disminución de los reactivos de las unidades 3,4 y 6.

El flujo de reactivos en las unidades 4 y 5 se ve que es de la misma magnitud; absorbiendo reactivos.

Se aplica falla y se observa que el sistema es estable, la potencia real presenta oscilaciones, pero se estabiliza a igual que las demás señales (E_t potencia reactiva y voltaje de campo).

Se procedió a incrementar la participación del compensador de reactivos de 0.1 a 0.4 p.u., donde se aprecia que la potencia real, oscila, también el voltaje de terminales así como la potencia reactiva de las unidades de los buses 201 y 202 tienen un considerable incremento.

Esto se debe a que el incremento del rango de 0.1 a 0.4 p.u. del compensador de reactivos de las unidades 4 y 5 es muy significativo para la pequeña red, representando un escalón muy significativo en la referencia del regulador de tensión, razón por la cual los parámetros eléctricos sufren variaciones.

En la **figura cpcc2** se puede apreciar que las oscilaciones de la potencia real; para el caso donde están habilitados los compensadores de reactivos; unidades 4 y 5, son mayores que para el caso donde se aplica la falla y se deshabilitan (unidades 4 y 5).

5.6.0.-ANALISIS DE DESEMPEÑO DEL COMPENSADOR DE REACTIVOS Y FUNCION ESTABILIZADORA DE POTENCIA DEL RAV.

La idea con esta simulación es observar y analizar con el caso realizado en dinámica del PSS/E[®], el comportamiento de ambas funciones; CCR y PSS ante una falla trifásica, ver el comportamiento dinámico de las variables del sistema de potencia. Observar y evaluar el comportamiento de las funciones (CCR y PSS), y posibles áreas de injerencia que en un momento determinado podrían tener al estar habilitados ambos dispositivos.

En el pequeño sistema de potencia, se implemento los estabilizadores de potencia en las unidades de los buses 201 y 202. El compensador de reactivos normal se dejó habilitado en las unidades 4 y 5.

Para analizar el comportamiento a nivel transitorio, se procede en dinámica habilitar la función del estabilizador de potencia en unidades 4 y 5.

Una vez cumplido esto, se procede a realizar la falla en el bus 200 de la pequeña red de potencia.

Se aplica falla y se observa que el sistema es estable, la potencia real presenta oscilaciones, pero se estabiliza a igual que las demás señales (E_t , potencia reactiva y voltaje de campo).

Durante el transitorio, se puede observar una mayor oscilación de la potencia real y del voltaje de campo en las unidades que se encuentran implementados los estabilizadores de potencia y la función CCR, esto se debe a la acción del PSS.

En la **figura pss1** se puede apreciar que las oscilaciones de la potencia real para el caso en el que están habilitados los compensadores de reactivos y la función estabilizadora de potencia, unidades 4 y 5, oscilan más las señales de potencia real y voltaje de campo del generador, esto es debido a la acción del PSS.

En seguida se deshabilita la función compensadora de reactivos de dichas unidades para verificar la estabilidad en la aplicación de la falla en el bus 200.

En la gráfica se puede observar que se tiene menores oscilaciones de la potencia real cuando se tiene implementada la función compensadora de reactivos.

Se observa que a pesar de la falta de sintonización del estabilizador de potencia, se tiene una mejora en el comportamiento durante el transitorio de la potencia real de las unidades.

5.7.0.-EVALUACIÓN DEL ESTABILIZADOR DE POTENCIA.

Lo que se pretende analizar a nivel dinámico, es el comportamiento del PSS en condición habilitado, como deshabilitado, ante una falla trifásica, ver el comportamiento dinámico de las variables de interés (Potencia real y Voltaje de campo) del sistema de potencia. Observar y evaluar el comportamiento de la función estabilizadora de potencia, evaluar; en un momento dado, las perturbaciones que nos puede estar originado tal función en el sistema de potencia.

En el pequeño sistema de potencia, se implementan los estabilizadores de potencia en las unidades de los buses 201 y 202 y se deshabilita las funciones compensadoras de todas las unidades.

Para analizar el comportamiento a nivel transitorio, se procede a nivel de dinámica habilitar la función del estabilizador de potencia en las unidades 4 y 5.

Una vez cumplido esto, se procede a realizar la falla en el bus 200 de la pequeña red de potencia.

Se observa que el sistema es estable, la potencia real presenta oscilaciones, pero se estabiliza a igual que las demás señales (E_t , potencia reactiva y voltaje de campo).

Durante el transitorio, se puede observar una mayor oscilación de la potencia real y del voltaje de campo en las unidades donde se encuentra implementada la función del PSS.

En la **figura pss2** se puede apreciar que las oscilaciones de la potencia real para el caso en el que están habilitados los estabilizadores de potencia, unidades 4 y 5, oscilan más las señales de potencia real y voltaje de campo del generador, se puede apreciar que es por la acción del PSS.

En seguida se deshabilita la función estabilizadora de potencia de dichas unidades para verificar la estabilidad al aplicar la falla en el bus 200.

En la gráfica se puede observar que se tiene menores oscilaciones de la potencia real que cuando se tiene implementada la función PSS.

Se observa que el estabilizador de potencia necesita ser ajustado para poder tener un beneficio en las amortiguaciones de la potencia real durante un transitorio.

5.8.0.-CONCLUSIONES DE LAS SIMULACIONES.

En las simulaciones realizadas se puede concluir que las características o pendientes de los nodos donde se grafique voltaje contra reactivos puede ser positiva si el incremento del voltaje se realiza en el nodo en el cual se está graficando.

La pendiente será negativa, si el voltaje se está moviendo en otro nodo, y la magnitud de los reactivos con respecto a la variación del nivel de voltaje, será mayor en cuanto la impedancia de conexión entre nodos sea menor.

La variación del voltaje será menor en el nodo que se grafique; y lo contrario, si la impedancia es mayor, las variaciones del voltaje serán mayores y la potencia reactiva será menor.

Desde el punto de vista de un nodo que cuente con generación y su regulador de voltaje tenga función compensadora de reactivos, al incrementar el voltaje en ese nodo, se incrementa la potencia reactiva del generador, la gráfica de las señales eléctricas de voltaje contra potencia reactiva, será positiva y su pendiente dependerá de la impedancia que presente el sistema eléctrico en ese nodo de conexión, lo cual impactará en la magnitud del flujo de potencia reactiva.

Por el contrario, al variar el nivel de voltaje en dicho nodo debido a variaciones del sistema eléctrico de potencia, la magnitud de la variación del voltaje dependerá de la impedancia que presente el sistema eléctrico en ese nodo de conexión y esto afectará a la magnitud de reactivos, la pendiente de la gráfica de las variables eléctricas del voltaje contra la potencia reactiva será negativa en este nodo de conexión.

Al contar con regulador de tensión, el generador de este nodo; y con la función compensadora de reactivos, se puede modificar esa característica, ya que el compensador de reactivos del regulador de tensión puede modificar esa característica de participación de potencia reactiva ante variaciones de voltaje que se presenten en dicho nodo.

La característica de la función compensadora de reactivos es negativa, lo que origina en el regulador de tensión que ante incrementos de voltaje en el nodo, la potencia reactiva disminuya, y al contrario ante disminuciones de voltaje.

También se concluye con las simulaciones realizadas, que entre más lejano este un nodo del punto donde se esté variando el voltaje, menor será la variación de su voltaje y que esto dependerá de la impedancia de la red vista desde ese punto. Entre menor sea, las variaciones de las magnitudes del voltaje y la potencia reactiva, será mayor; y todo lo contrario para el caso de magnitudes mayores de impedancia.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1.- CONCLUSIONES.

En la operación de sistemas eléctricos de potencia, el control de voltaje es relevante, el objetivo primordial es ajustar todos los voltajes nodales dentro de una banda operativa. Esto lo hace más complejo en comparación con el control de frecuencia en un sistema de potencia, ya que el valor de la frecuencia en la red eléctrica es igual en cualquier nodo, a diferencia con el voltaje: este puede variar en cada nodo del sistema.

Este tema se relaciona con el flujo de potencia reactiva con los perfiles de voltaje de la red de potencia, siendo muy importante la localización de fuentes de potencia reactiva y conocer la estructura del sistema de transmisión.

Otra característica interesante del problema, que agrega complejidad a la solución, es la generación y el consumo variable de potencia reactiva en los elementos de transmisión y transformación.

Se puede decir que el problema básico para evitar la degradación del perfil de voltaje es eliminar o reducir el flujo de potencia reactiva en el sistema.

Sin embargo, en sistemas reales las fuentes de reactivos no necesariamente están cerca de la carga, de ahí que se requiere de cierto transporte de potencia reactiva.

La primera fase en el control de voltajes es tener nodos de voltaje controlado que definan en forma general el perfil de voltaje de la red.

Este control de voltaje es de tipo local y trata de mantener el voltaje de un nodo en un valor específico. Esto se logra a través de cambios en la inyección de potencia reactiva, mediante la acción del sistema de excitación de generadores o la conexión continua de reactores, capacitores, o el caso de compensadores estáticos de var's.

La función primaria del sistema de excitación es la de regular el voltaje del generador, sin embargo, ayuda a un control del voltaje del sistema. Una de las características inherentes de un sistema de excitación y que no siempre es considerada, es la función compensadora de corriente reactiva. Esta función permite la regulación de voltaje en diferentes puntos de las terminales del generador; y como se ha visto, esto es realizado por medio de la medición del voltaje en terminales y la adición o substracción de un voltaje proporcional a la corriente.

Utilizando un ajuste adecuado de la función compensadora de reactivos, se puede implementar dos diferentes funciones:

- 1.- Compensación por caída de línea, la cual permite el regular el Voltaje en un punto determinado del transformador elevador o un poco mas allá, hasta la línea de transmisión
- 2.- El control de caída que regula el voltaje interno de la máquina, Permitiendo que las unidades que se encuentren en un mismo Bus se repartan el manejo de potencia reactiva.

El utilizar adecuadamente este dispositivo en la configuración que sea necesaria, inclusive en ambas a la vez, ofrece una opción alterna en vez de utilizar compensación shunt (paralelo) con capacitores, además del beneficio de ofrecer soporte transitorio debido al sistema de excitación.

En general, la pérdida de var's que se presentan en el sistema de potencia, deben ser suplidos por : generadores y condensadores sincronos; por varias fuentes estáticas de var's, tal como Capacitores switcheados, SVC, STATCON, etc. Las características de estas dos tipos de fuentes de var's son de diferente consideración.

Si un simple generador se conecta al sistema a través de un transformador elevador, la característica de compensación de caída de línea puede ser utilizada para regular el voltaje eficientemente en un punto del transformador elevador. Para poder regular el bus de alta, es necesario que la unidad proporcione más var's para soportar el bus de alto voltaje. Si el generador es relativamente pequeño, en comparación al sistema que se conectará, y la impedancia total después de la compensación es muy baja, la variación de la potencia reactiva de la unidad quizá sea excesiva en respuesta a los cambios de voltaje del sistema. Para el caso de condición de operación aislada de esta unidad, la función "compensadora de caída de línea" provee una buena forma de mejorar la regulación transitoria del voltaje, ya sea en la unidad o en el Bus de Alta Tensión.

Otra forma de utilizar el compensador de reactivos es por la repartición de la potencia reactiva entre unidades que se encuentran conectadas a un mismo nodo y se puede aplicar para generadores térmicos e hidroeléctricos los cuales comparten un transformador de conexión al sistema eléctrico. En este caso se requiere que le CCR este configurado como un control de "Caída" (valor positivo de X_C típicamente entre 5 a 6 %), para regular un voltaje interno del generador. Esto proporcionará una reactancia equivalente t el manejo compartido de la potencia reactiva del nodo en el cual están conectados. En forma adicional al control de "Caída", se puede aplicar la función de control de "compensadora de caída de línea", para regular la caída en la reactancia del transformador elevador (algunas veces tal como compensación reactiva diferencial o compensación de cruce de corriente).

Se puede observar los beneficios del compensador de reactivos en la estabilidad durante una falla trifásica, sin compensador de reactivos y con compensador de reactivos. Las oscilaciones disminuyen al tener el compensador de reactivos dentro.

Si el CCR contribuye en el amortiguamiento de las oscilaciones que se presentan después de una falla que se presente en el sistema de potencia, es conveniente simular su comportamiento con la función conocida como estabilizador de potencia (PSS) existente en el mismo sistema de excitación,

Se desarrollaron las simulaciones donde se pudo constatar que la función compensadora de reactivos no perturba la operación del Estabilizado de potencia.

Es recomendable realizar los estudios pertinentes para verificar el desempeño del CCR en regiones muy cercanas a la operación de los limitadores de Máxima excitación (OEL) y mínima excitación (MEL).

Comprobar la ausencia de oscilaciones en estas regiones de operación.

No es recomendable que el compensador maneje rangos superiores a los valores del 15 0 20 %, ya que se observo mediante corridas, que el sistema presenta perturbaciones de magnitud considerable (señales de potencia reactiva y voltaje), al estar habilitando la función compensadora de reactivos.

Se considera que esta acción, la habilitación de la función compensadora de reactivos en los generadores, es un inicio de esfuerzos a realizar para la mejora del flujo de la potencia reactiva que se presenta en un sistema de potencia. La función compensadora de reactivos es solamente una aportación local en el manejo de los reactivos, abarcando cuando máximo hasta el transformador elevador de conexión entre el generador y el sistema de potencia.

Las limitaciones de proporcionar potencia reactiva en un generador se pueden deber a las siguientes causas: calentamiento en el campo, limitaciones de máxima excitación, Control de regulador de voltaje al máximo, Voltaje de auxiliares al máximo, calentamiento del estator. Corriente de armadura o de campo excediendo los límites, calentamiento del núcleo de la armadura, limitación de mínima excitación, control del sistema de excitación al mínimo, voltaje de auxiliares al mínimo.

Es muy común tener limitaciones de potencia reactiva en el generador a causa de limitaciones por voltajes máximos y mínimos del bus de auxiliares de la planta.

6.2.- RECOMENDACIONES.

Con el fin de mejorar los rangos de abastecimiento de potencia reactiva del generador es recomendable realizar pruebas con los cambiadores de TAP's de los transformadores de Unidad y de Alimentación de Auxiliares.

Para tener un mejor control de la potencia reactiva en la red, es necesario contar con el equipo necesario que desarrolle una función secundaria reguladora automática del voltaje en los diferentes nodos de la red.

Esta contaría con el algoritmo necesario para desarrollar un control de voltaje en los diferentes nodos,

A este último tema se le conoce como "Regulación Secundaria de Voltaje", el cual es un tema complejo, ya que se estaría hablando del control del flujo de la potencia reactiva en el sistema eléctrico de potencia, a diferencia del control de potencia real, donde los generadores tienen clasificado un rango de estatismo, (termino descrito en la introducción que se hizo en este documento), muy semejante, a nivel de potencia reactiva es diferente, se cuenta en los sistemas de excitación con la función compensadora de reactivos; como ya se explicó, la cual representa el estatismo de reactivos, mas sin embargo es un poco diferente, ya que los niveles de voltaje en los diferentes nodos del sistema varían según sus impedancias; y por lo tanto, los voltajes son diferentes en los distintos nodos, el flujo de la potencia reactiva es mas compleja. Por lo cual es necesario desarrollar estrategias para obtener un adecuado control. (Ver anexo F sobre este tema)

REFERENCIAS:

- 1.- Olle I. Elgerd, **Basic Electric Power Engineering**, Addison Wesley Publ. Co., Reading, Mass., USA 1977
- 2.- Olle I. Elgerd **Electric Energy Systems Theory**, McGraw-Hill Book Co., New York, N.L. 1971. (A second edition due in Jan. 82).
- 3.- L. Fink and K. Carlsen, “Operating under Stress and Strain” **IEEE Trans, Power Apparatus and Systems**, vol. Pass-86, pp. 1449-1460, November 1967
- 4.- W.F. Tinney and C.E. Hart “Power flow solution by Newton’s method” **IEEE Trans. Power Apparatus and Systems**, vol. Pas-86, pp 1449-1460, November 1967.
- 5.- R.B. Squires “Economic dispatch of generation directly from power voltages and admittances” **AIEE Trans. (Power Apparatus and Systems)**, vol. 79, pp. 1235-1245, February 1961
- 6.- H. Dommel, “Digital methods for power system analysis” (in German), **Arch. Elektrotech.**, vol. 48, pp. 41-68, February 1963 and pp. 118-132, April 1963.
- 7.- H.M. Smith and S. Y. Tong. “Minimizing power transmission losses by reactive-volt-ampere Control” **IEEE Trans. Power Apparatus and Systems** vol. 82, pp. 542-544, August 1963.
- 8.- R. Baumann, “Power flow solution with optimal reactive flow” (in German), **Arch. Elektrotech.**, vol. 48, pp. 213-224, 1963.
- 9.- K. Zallen Kopf, “Tap setting on tap-changing transformers for minimal losse” (in German), **Elektrotech. Z.**, vol. 86, pt. A, pp. 590-595, 1965.
- 10.- F. Hellbronner, “The effect of tap changing transformers on system losses” (in German), **Elektrotech. Z.**, vol. 87, pp. 685-689, 1966
- 11.- J. Peschon, D.S. Piercy, W. F. Tinney, O.J. Tueit and M. Cuenod. “Optimum control of reactive power flow” **IEEE Trans. Power Apparatus and System**, vol. PAS.-87, pp. 40-48, January 1968.
- 12.- J.F. Dopazo, O.A. Klitin, G.W.Stagg, snd M. Watson “An optimization technique for real and reactive power allocation”, **Proc. IEEE**, vol. 55, pp. 1877-1885, November 1967.
- 13.- J.B. Ward and H.W. Hale, “Digital computer solution of power flow problems,” **Trans. AIEE (Power Apparatus and Systems)**, vol. 75, p. 398, June 1956.

- 14.- R.J. Brawn and W.F. Tinney, "Digital solution for large power networks" Trans. AIEE (Power Apparatus and Systems), vol. 76, P. 347, October 1957.
- 15.- A.F. Glimm and G.W. Stagg, "Automatic calculation of load flows" trans. AIEE (Power Apparatus and Systems), vol, 76, p. 817, October 1957.
- 16.- H.W. Hale and R.W. Goodrich, "Digital computation of power flow-some new aspects," Trans. AIEE (Power Apparatus and Systems), vol. 78AA p. 919, October 1959.
- 17.- Westinghouse Electric Corp., Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 4th Ed. Westinghouse, East Pittsburgh, PA, 1964.
- 18.- Naval Ships `Technical Manual, Chapter 310 Electric Power Generators and Conversion Equipment` (S9086-KN-STM-010/CH-310R2)
- 19.- J.L. Aguero, P.L. Arnera, R.E. Bianchi L., M.C. Beroqui "Synchronous Compensators. Models verified by Tests of : Automatic Regulator, Reactive Power Control and Voltage Joint Control"
- 20.- Alfred Engler, Nikos Soultanis, Droop control in LV-Grids
- 21.- Thomas W. Eberly, Richard C. Schaefer.
"Voltage versus VAR/Power Factor Regulation on Synchronous Generators"
- 22.- Eberly, T.W. Schaefer, R.C. , " Minimum/Maximum Excitation Limiter Performance Goals for small Generation", presented al IEEE Power Engineering Society 95.
- 23.- Jackson, J.Y. "Interpretation and Use of Generator Reactive Capability Diagrams", IEEE Transaction on Industry and General Applications, Vol. IGA-7, No. 6 Nov./Dec. 1971
- 24.- Godhwani, A., Kim, K., Baster, M.J., "Design, Test and simulation Results of a VAR/Power Factor Controller implemented in a Modern digital Excitation System", presented at 1998 IEEE Summer Meeting Panel Session.
- 25.- R.C. Schaefer, "Voltage Regulator Influence on Generator Stability", Presented at Waterpower Conference 1991.
- 26.- Parson W. Taylor, "Line drop compensation, high side voltage control, secondary voltage control why not control a generator like a static var compensator.
Panel session on Power Plant Secondary (High Side) Voltage Control IEEE/PES 2000 Summer Meeting 16-20 July 2000, Seattle.
- 27.- Voltage Regulator and Parallel Operation (Archivo: Com_Reac_Bat.pdf)

- 28.- T.J. Miller “Reactive Power Control in Electric Systems” New York Wiley 1982**
- 29.- E. Wanner, R. Mathys and M. Hausler, “Compensation Systems for Industry” Brown Boveri Rev., Vol. 70, pp. 330-340 Sep/Oct/1983**
- 30.- CIGRE WG 38-01 Static Var Compensators, CIGRE, Paris, 1986**
- 31.- P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1993.**
- 32.- IEEE Special Stability Controls Working Group “Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation” paper 93 WM 173-5 PWRs, IEEE/PES 1993 winter meeting**
- 33.- D. Dickmader, B. Thorvaldsson, G. Stromberg, D. Osborn, A. Poitras and D. Fisher, “Control System and performance verification for the chester maine Static Var Compensator” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp 1492-1503, July 1992.**
- 34.- Manual de Operación del Sistema de Excitación marca Mitsubishi
(Tipo Analógico)**
- 35.- Manual de Operación del Sistema de Excitación marca Westinghouse (Tipo Analógico y Digital)**
- 36.- Manual de Operación del Sistema de Excitación marca ABB
(Tipo Analógico y Digital)**
- 37.- Manual de Operación del Sistema de Excitación marca Sepac
(Tipo Analógico y Digital)**
- 38.- Manuales de Operación del Compensador Estático de Var’s de la marca ABB**
- 39.- Manuales de Operación I, II y III PSS/E**
- 40.- Guía de Aplicación I y II PSS/E**

Anexos

A. SISTEMA DE EXCITACIÓN DIGITAL MARCA ABB (modelo Unitrol)

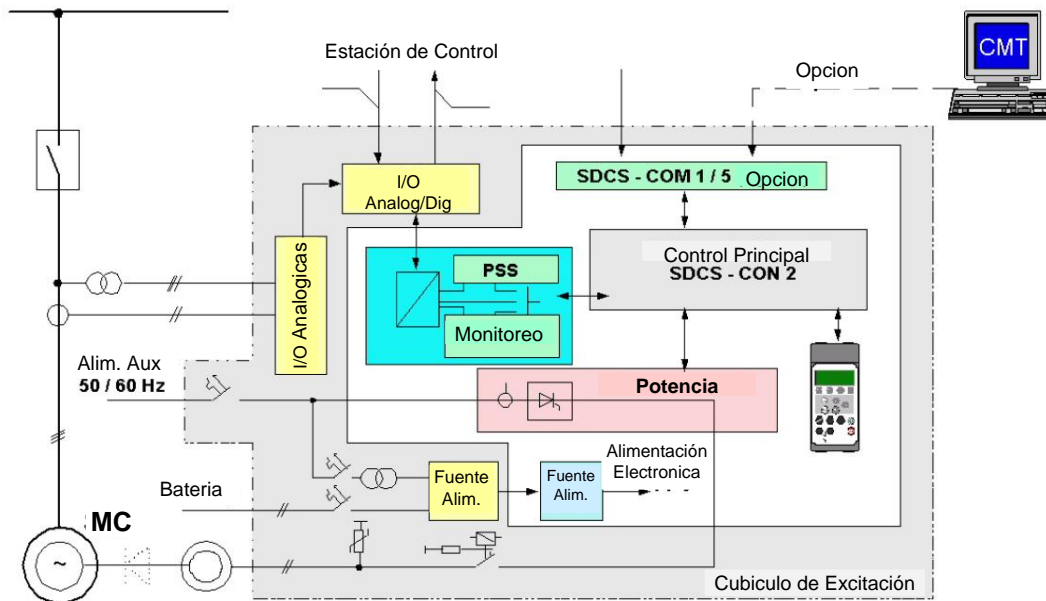


Fig. A.1 Diagrama a bloques de un sistema de excitación Digital

En el diagrama a bloques del regulador de voltaje digital, se puede apreciar que no existen acondicionadores de señal para las funciones adicionales, solamente se tiene las señales de voltaje y corriente de terminales del generador suficientes para realizar tales funciones.

Además; el sistema de excitación cuenta con dos sistemas los cuales son configurados como principal y de respaldo; esto es, ante una falla que se presente en el sistema principal, el sistema de excitación de respaldo tomará el control de la excitación del generador.

Esta conmutación se puede realizar por medio de comando o por el operador, cambiar del control principal al de respaldo.

La mayoría de estas funciones están desarrolladas mediante software y jerarquizadas en su ejecución por niveles de importancia. En la mayoría de los reguladores digitales de voltaje los rangos de la función compensadora de reactivos es mayor que en los analógicos, variando desde 0 % hasta 20 %.

Compensadores Digitales de Reactivos

En los dibujos se representa el software de la programación de un sistema de excitación Digital, siendo en este caso de la marca ABB modelo Unitrol F. El software de programación es tipo gráfico, y se puede apreciar las funciones que se realizan y las variables que utilizan.

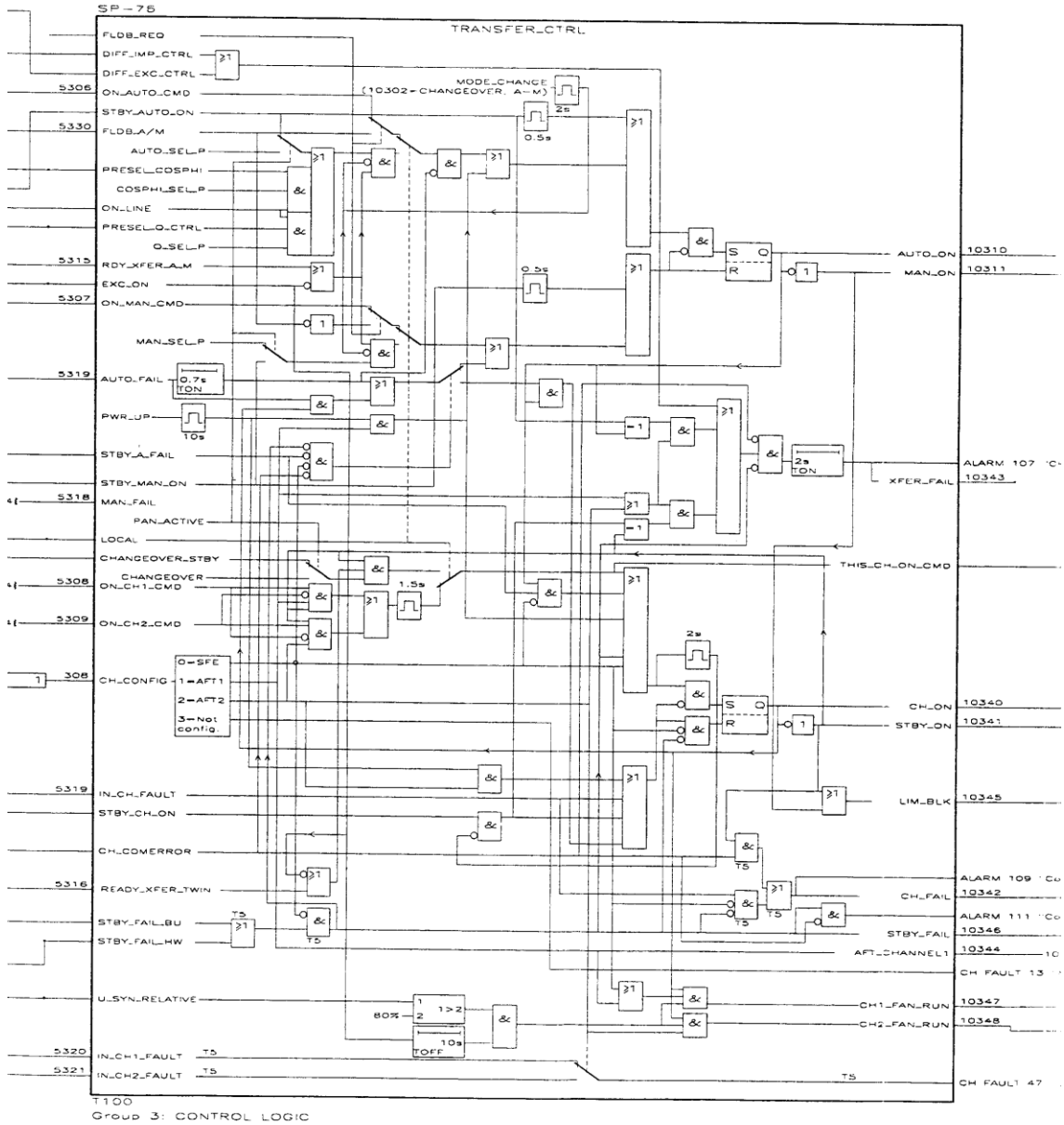


Fig A.2 Programación de un sistema de excitación Digital Transferencia de canales

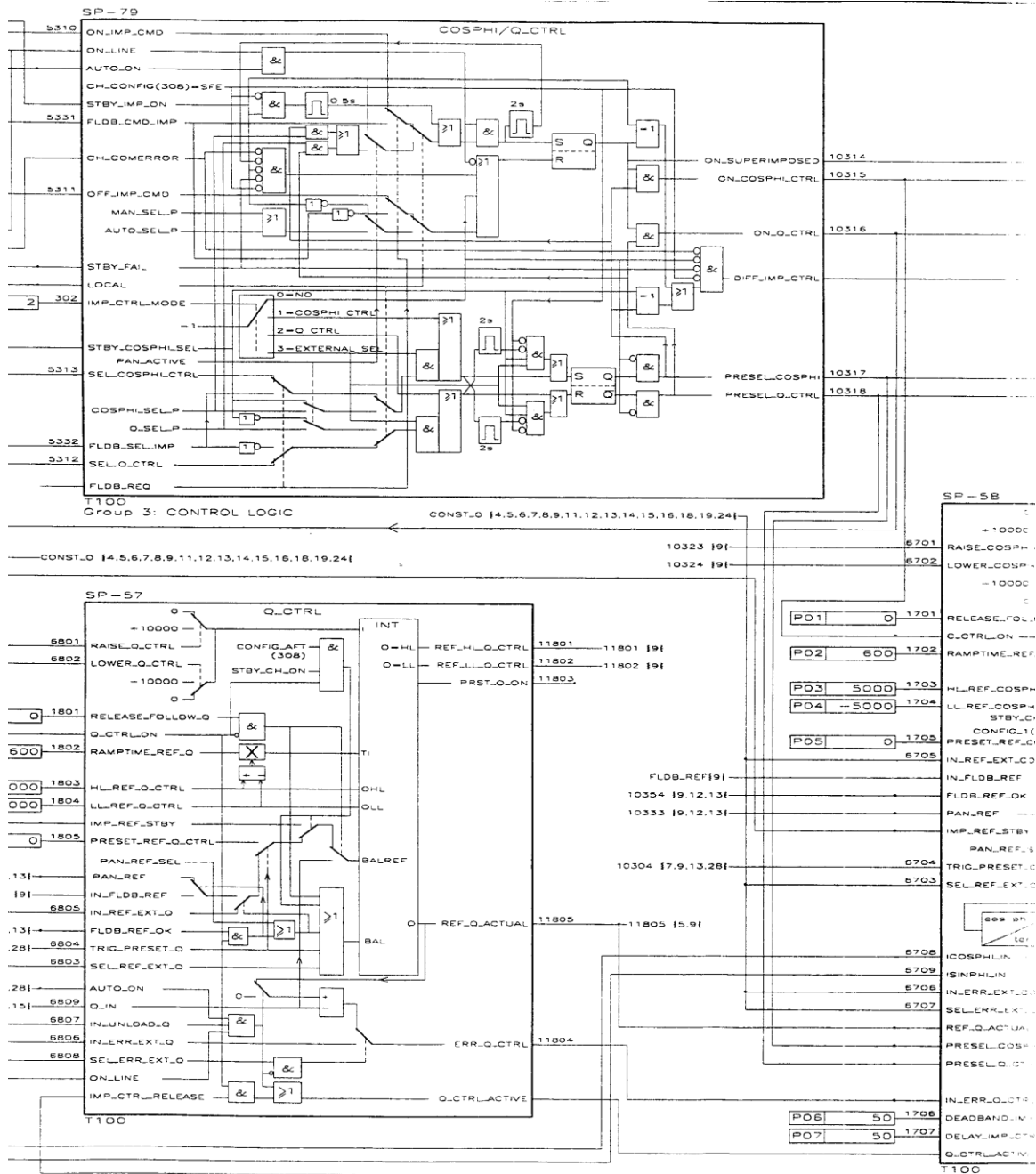


Fig A.3 Programación de un sistema de excitación Digital Estrategia de Control y Cos

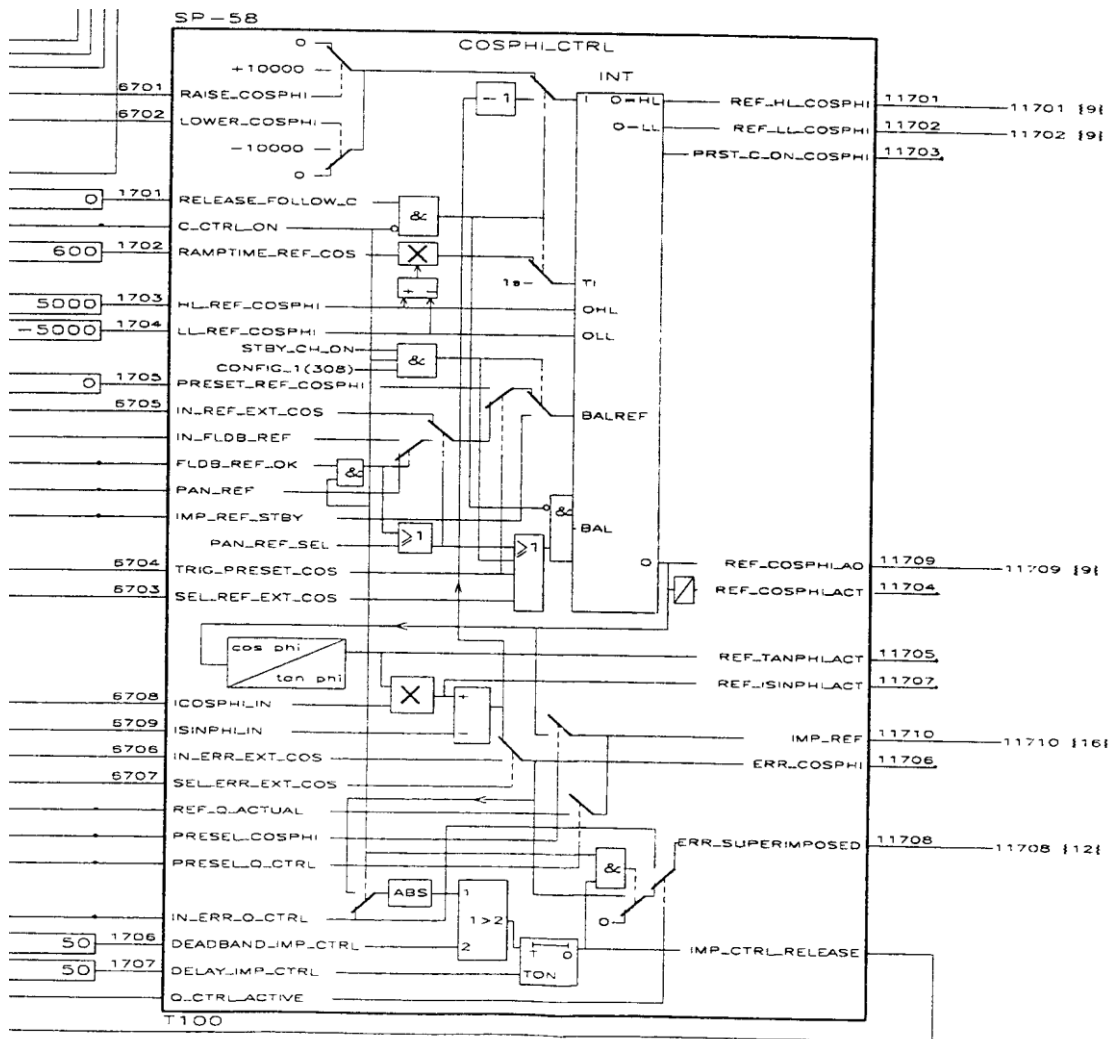


Fig A.4 Programación de un sistema de excitación Digital con respecto a la Estrategia $\cos p$

Las funciones del compensador de reactivos son las siguientes:

- 1.- Permite distribuir la carga reactiva existente en la red eléctrica, entre los generadores que estén operando en paralelo conectados al mismo bus sin transformador.
- 2.- La participación de cada unidad en la compensación de reactivos, estará definida por el porcentaje y pendiente seleccionados.
- 3.- El porcentaje puede seleccionarse entre 0 y 10 % para analógicos; para el caso de digitales se incrementa hasta 20 %
- 4.- La pendiente puede ser positiva o negativa, para que esto suceda, solamente hay que invertir la conexión de la corriente I_b del generador conectada al módulo del compensador, esto en base a la función que se desea que realice el compensador de reactivos (compensación resistiva, compensación por impedancia, compensación por caída de línea).

B. GRAFICA DE PRUEBAS REALIZADAS A UN COMPENSADOR DE REACTIVOS.

Se puede apreciar las posibles pendientes con las que puede operar; la línea roja representa una pendiente positiva, aumenta el voltaje en terminales del generador y se incrementa la potencia reactiva del generador debido a la acción del compensador de reactivos en el sistema de excitación.

Esta acción se puede considerar cuando el transformador de corriente tiene invertida su terminal de polaridad; o cuando el operador está manipulando la referencia del regulador de voltaje; en este caso, el operador desea que el generador incremente la potencia reactiva, esto es, el operador manipula la perrilla del generador conocida como 90 E, que es la que mueve la referencia del canal automático del sistema de excitación.

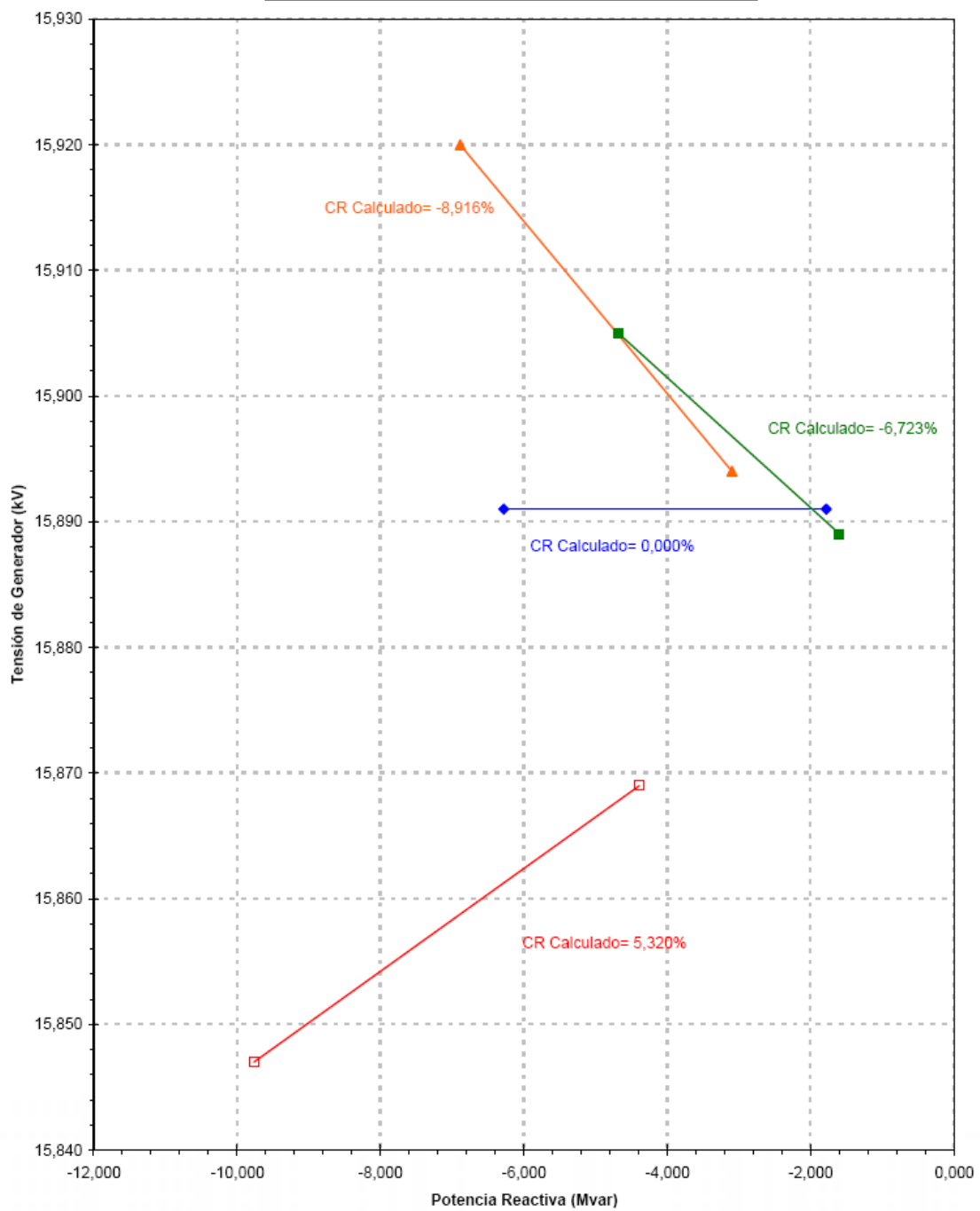
Pendiente negativa, la acción del compensador de reactivos es al revés, sube el voltaje de terminales del generador, y disminuye la potencia reactiva.

Esta acción es la que se considera habilitar, al subir el voltaje en terminales del generador, la potencia reactiva es disminuida por el sistema de excitación debido a la acción del compensador de reactivos.

COMPENSADOR DE REACTIVOS (C.R.)						
VALORES OBTENIDOS						
Posición %	P (MW)	Q (MVAR)	Vg (kV)	Vf (Vcd)	If (Acd)	OBSERVACIONES
0%	100,417	-6,279	15,891	131,506	1261,347	1:16 HRS
	101,230	-1,784	15,891	135,382	1286,419	CR Calculado= 0,000%
-5%	101,122	-1,594	15,889	134,070	1282,874	1:21 HRS
	101,433	-4,688	15,905	131,872	1267,298	CR Calculado= -6,723%
-10%	100,417	-3,097	15,894	132,757	1271,351	1:33 HRS
	98,513	-6,888	15,920	129,552	1249,824	CR Calculado= -8,916%
5.00	100,277	-9,766	15,847	126,377	1231,590	1:36 HRS
	101,217	-4,390	15,869	130,895	1265,526	CR Calculado= 5,320%

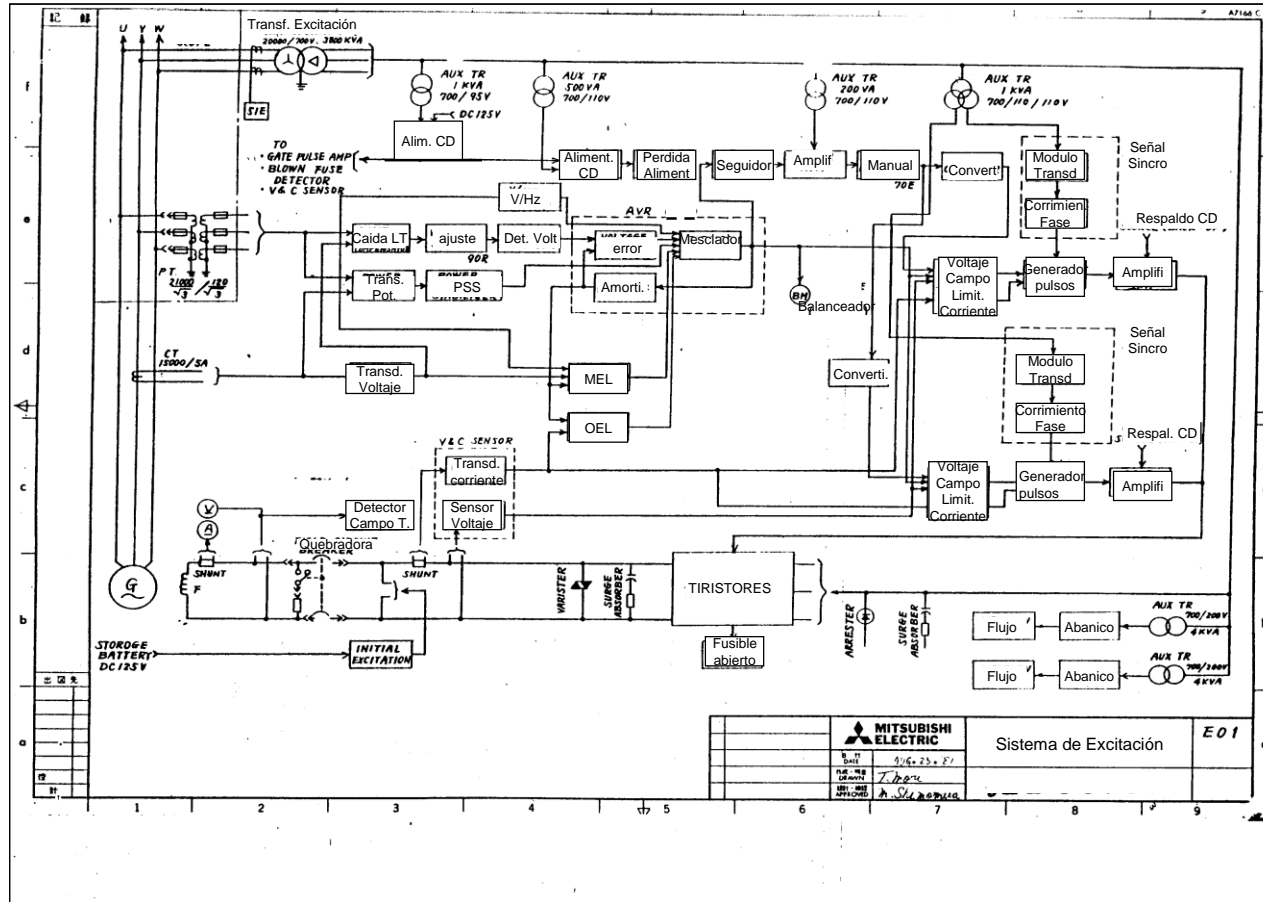
Tabla B.1 Datos de prueba de un Compensador de Reactivos

pendientes (positiva y negativa) que se estuvieron evaluando en una función compensadora de reactivos de un sistema de excitación.



Grafica B.1 Grafica de pruebas a un Compensador de Reactivos

C. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN
Figura C.1 (Sistema de excitación de unidades CT. Río Escondido)



D. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DE LAS UNIDADES DE RIO ESCONDIDO.

Como se puede apreciar en la figura C.1, el sistema de excitación está compuesto del canal automático el cual se encuentra en la parte superior izquierda de la figura, se identifican los TP's que están conectados a las terminales del generador y al compensador de reactivos. El compensador de reactivos está conectado en la retroalimentación del voltaje de terminales del generador.

Después se conecta al bloque conocido como voltaje de ajuste (voltage setter) que es el 90 E o R. siendo esta la referencia a la cual tiene acceso el operador.

Posteriormente, se conecta al detector de error de voltaje (voltage error detector), y en seguida con el mezclador de señales.

Es aquí, en el mezclador de señales donde se mezclan las señales de las funciones adicionales del sistema de excitación; y se puede identificar el estabilizador de potencia, los limitadores de mínima excitación, máxima excitación, volts/Hertz.

Para el caso de la limitación de máxima excitación, se observa que la señal de la variable de entrada es la corriente de campo del generador

En el bloque que se encuentra debajo de la señal mezcladora; el bloque conocido como red de amortiguamiento, (damping), es donde reside el control PID del sistema de excitación, este es el que proporciona la debida estabilidad dinámica al regulador.

En la parte superior derecha del dibujo, se encuentra el transformador de excitación, su relación de voltaje es de 20,000 volts a 800 volts y se observa la conexión de los transformadores que alimentan las fuentes del sistema, las cuales son dos, un es para condiciones de paro, ya que tiene alimentación dual; alterna y directa, la otra fuente es de respaldo, las dos están trabajando en paralelo, y forma redundante.

Se puede apreciar el transformador que alimenta al bloque amplificador y que proporciona la referencia al canal manual; esto es al 70 E o R.

Del secundario del transformador se aprecia la conexión del puente de tiristores, y se identifica que cuentan con disposición redundante del canal de pulsos de disparo a tiristores. También se aprecia la sincronización de los pulsos de disparo con la señal de voltaje del transformador.

La señal de corriente de campo es acondicionada para ser utilizada con fines de limitación en la operación del sistema de excitación, al alcanzar un valor limite de excitación.

En la parte inferior izquierda, se aprecia la conexión y alimentación del sistema de enfriamiento de los gabinetes de los puentes de tiristores.

El regulador cuenta con dos gabinetes de tiristores, cada gabinete tiene 18 tiristores para un total de 36 tiristores, esto es 6 tiristores por fase positiva y negativa. Implementan redundancia en su operación; esto es, puede fallar un tiristor por fase, tanto positiva como negativa; sin afectar la operación del equipo, en caso de la perdida de otro tiristor en la misma rama, se presenta disparo del sistema de excitación y por lo tanto del generador.

Cuenta con la función protectora de sobre-excitación, la cual tiene una característica de operación de tiempo inverso, la coordinación ante una condición de sobreexcitación, primero opera bloqueo del seguidor del canal automático; en segundo lugar, conmuta a canal manual si persiste la condición en un determinado tiempo de ajuste dicha condición, en caso de continuar la condición de sobre-excitación, se presenta el disparo del sistema de excitación; y por ende, disparo del generador.

E. CAIDA DE COMPENSACIÓN REACTIVA DIFERENCIAL

Hay dos formas de compensación reactiva paralela. El más usado es la compensación paralela con caída o diseño de IEEE, compensación reactiva por caída. El otro tipo de compensación de corriente es la de cruce o utilizando terminología de IEEE es la compensación diferencial reactiva, como se presenta en la fig. E.1.

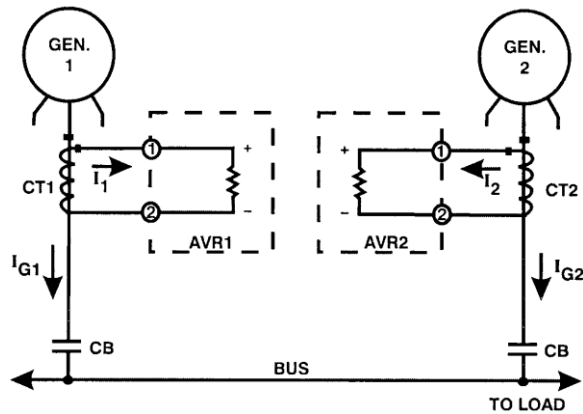


Fig. E.1 Circuito compensador de reactivos en dos unidades

Cuando la compensación reactiva por caída es utilizada en dos o más generadores, el circuito de caída paralela es independiente de los otros (fig. E.1). Un circuito típico de caída paralela es hecho con un transformador de corriente y módulos paralelos. El módulo paralelo consiste de una carga (burden) resistor y un interruptor (switch) conectado en corto en el primario del transformador (fig. E.2).

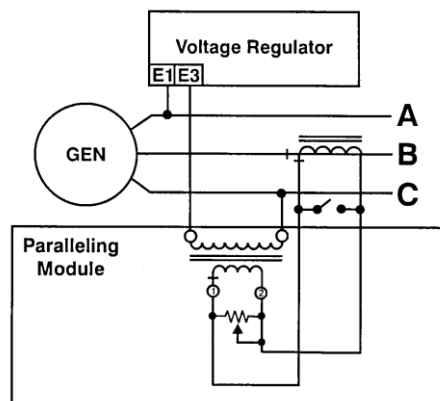


Fig. E.2 Circuito compensador de reactivos con interruptor

Un interruptor (switch) localizado en el primario del transformador, es usado para cortocircuitar la corriente del transformador y el resistor de carga (burden) para permitir al generador operar independientemente del circuito compensador.

El secundario del transformador de corriente es conectado al circuito paralelo. La conexión al circuito paralelo es una resistencia cuyo voltaje es sumado vectorialmente al voltaje de línea para producir una señal de error al sistema de excitación. El voltaje existente en el resistor es proporcional en magnitud y tiene la misma fase tal como la corriente de línea que circula en el primario del transformador.

La señal de error producida por la corriente del transformador en el resistor deberá ser aplicada cuando la carga tiene un factor de potencia unitario, no deberá tenerse señal correctiva y no habrá ningún cambio de excitación como consecuencia de la carga. Fig. E.3 muestra la representación del sistema de voltaje y del voltaje en el resistor necesario para producir la señal de error necesaria.

El voltaje trifásico, sin importar su conexión interna, produce voltaje a la salida el cual es desplazado 120 grados eléctricos, con esto, es posible monitorear el voltaje del sistema de línea a línea y producir un voltaje de línea que es desplazado del voltaje de fase 30 grados eléctricos. La señal de voltaje del resistor y el de la carga con factor de potencia unitario (carga resistiva), será desplazado por 90 grados eléctricos.

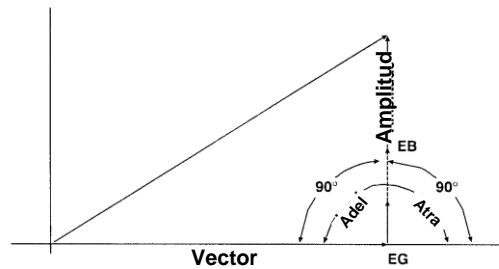


Fig. E.3 Vectores de Voltaje

Con factor de potencia unitario, el diagrama vectorial (fig. E.3), representación del voltaje del resistor (V_B) y el voltaje de monitoreo (V_{AC}) se puede observar los 90 grados de desfase cuando la carga reactiva es aplicada al generador el voltaje en el resistor, puede girar en el sentido del reloj o en sentido contrario dependiendo del tipo de carga, capacitiva o inductiva.

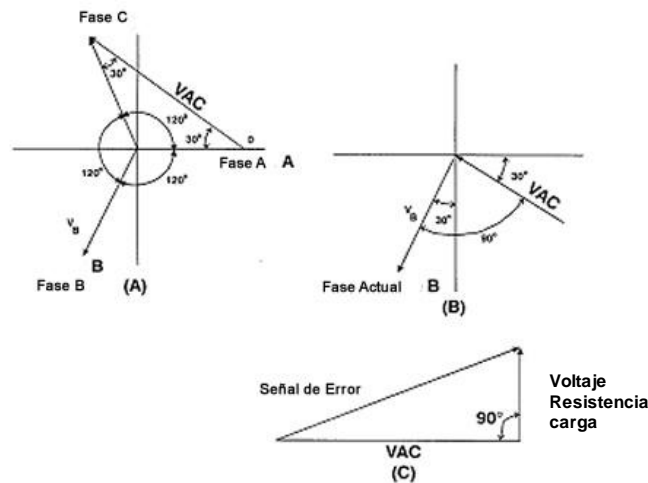


Fig. E.4 Representación vectorial de voltajes y corrientes

Si la carga del generador tiene un factor de potencia (capacitivo), el diagrama vectorial del voltaje del resistor rotará en sentido contrario de la posición del factor de potencia unitario. Fig. E.5. El ángulo de fase entre el voltaje de línea y el voltaje del resistor tendrá a estar cada vez fuera de fase, lo cual decrementará el voltaje de monitoreo del regulador. El regulador recibe una señal pequeña tal que incrementa la excitación del generador.

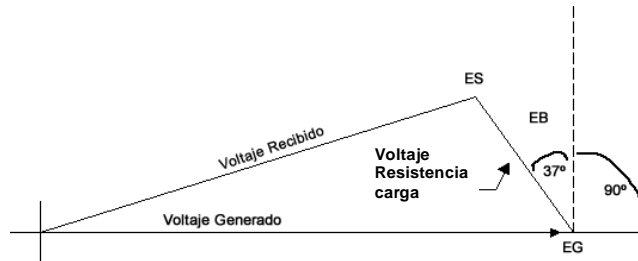


Fig. E.5 Diagrama Vectorial voltaje resistor

El módulo en paralelo proporcionará una señal de error la cual controlará el nivel del generador. Cuando el generador está en paralelo, el sistema de excitación responde a este pequeño incremento en el circuito monitor de voltaje de terminales y empieza a reducir la excitación en el campo del generador, el cual produce una caída en el voltaje del generador.

La cantidad de caída de voltaje en el generador puede ser ajustado por la resistencia y el radio de corriente del transformador. Una resistencia típica es de un valor de 1 ohm y tiene un variador ajustable, tal que el voltaje en el resistor puede ser ajustado. La cantidad de señal de error enviada al sistema de excitación, es proporcional a la magnitud del voltaje en la resistencia y el ángulo del vector del voltaje. La cantidad de voltaje en el resistor es determinado por la salida de corriente del secundario del transformador.

Típicamente el transformador de corriente es diseñado para en un máximo de 5 amperes de corriente secundaria, con 25 VA como rango máximo de carga (burden).

Cuando los generadores operan en paralelo, con compensación de caída reactiva, la mayoría de los generadores son ajustados para operar con una caída máxima.

El resistor es ajustado para máxima resistencia o máximo voltaje. Permitiendo al sistema del generador operar a máxima caída para un mejor control de corriente circulante. Un ajuste menor del 3 % en el sistema de caída de voltaje, quizá resulte un mal control de corriente circulante.

Los reguladores de voltaje con monitoreo de una simple fase proveen un 8 % de caída máxima con monitoreo de tres fases el regulador provee aproximadamente 6% de caída.

El monitoreo de una sola fase, provee mayor caída porque el valor promedio del error de la señal es mayor comparando el valor promedio del voltaje de tres fases.

Cuando el generador esta en paralelo en el mismo bus y tienen diferente tipo de voltaje en los resistores, deberá tenerse cuidado para compensar la diferencia en los valores de muestreo.

Desde que el voltaje en la resistencia es dependiente de la corriente del generador, a través del transformador de corriente, cualquier cambio en el factor de potencia debido a la carga, será reflejado en el resistor. Cuando se opera con un factor de potencia reactivo en atraso, la carga es incrementada, el voltaje se incrementará.

La magnitud de los voltajes depende de las magnitudes de la carga y del factor de potencia.

Para prevenir el incremento o decremento del voltaje, con el factor de potencia, otro circuito puede ser usado donde el transformador de corriente de los reguladores individuales son interconectados. Compensación de corriente de cruce (compensación reactiva diferencial) permite la operación en paralelo sin caída de voltaje causado por la señal de error.

Fig. E.6 muestra dos generadores en paralelo con compensación reactiva diferencial. Se puede observar la conexión interna de los transformadores. El generador número 1 la corriente del transformador (CT1) marcada con polaridad conectada al transformador de corriente (CT2) en el generador número 2 a la Terminal que no tiene polaridad.

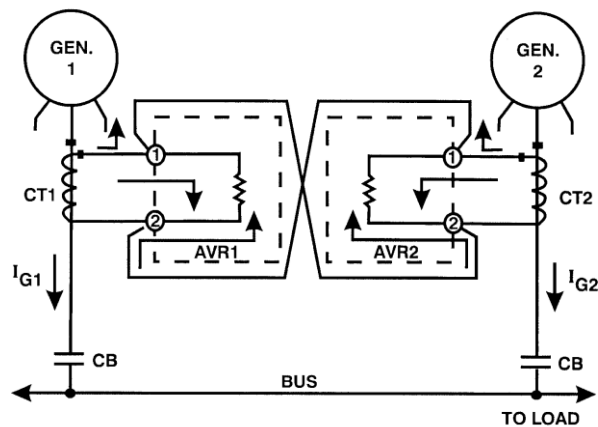


Fig. E.6 Lazo de Corriente

Aún aunque el voltaje, involucrado es de CA. Un mejor entendimiento de la operación del lazo (Loop) de corriente de cruce puede ser obtenido por el uso de voltaje en DC.

La corriente saliendo del punto marcado con polaridad en el transformador de corriente es dividido dentro de dos corrientes (Fig. E.6). Un circuito fluye a través del resistor en el módulo paralelo. El segundo circuito fluye a través del lazo de corriente de cruce, entra al resistor por la conexión paralela del circuito de corriente del transformador. La corriente resultante fluye por el resistor en cada circuito paralelo el cual será cero porque la corriente se opone cancelándose mutuamente. No se tendrá voltaje desarrollado cruzando el resistor y no habrá caída asociada con el voltaje de línea.

Si un generador asume más corriente reactiva que los otros generadores, la corriente de línea se incrementará y la corriente del secundario del transformador de corriente se incrementará. El resultado será un mayor voltaje de cruce en el resistor del circuito en paralelo, el cual causará que el sistema de excitación reduzca la excitación en el generador particular y por lo tanto, el decremento de la corriente del generador y en la línea.

Un incremento en la corriente a través de la corriente de cruce conectada al lazo causada por el desbalance del primer generador, desarrollará un voltaje de cruce en el resistor del segundo generador que se opone en polaridad al voltaje normal desarrollado por el segundo generador de su propia corriente. Causando una caída de voltaje de línea de polaridad opuesta el cual causará un incremento en el voltaje de línea.

El incremento en un generador y decremento en el otro causará que se obtenga una operación balanceada de ambos generadores.

Para que la compensación diferencial reactiva funcione adecuadamente, todas las corrientes de todos los generadores que entreguen potencia al bus deberán ser conectados y emparalelados dentro del lazo de corriente de cruce. El transformador de corriente conectado en el lazo deberá tener el mismo radio, tal que la corriente del transformador conectado en el lazo deberá tener el mismo radio, así la corriente proporciona la misma cantidad para cancelar el voltaje de cruce en el resistor. En el caso donde exista una capacidad de generación diferente, el radio de la corriente del transformador deberán ser cambiados para que las corrientes secundarias en ambos transformadores sean iguales. De otra forma, la cancelación de la corriente en el lazo de corriente de cruce no ocurrirá, y el desbalance de la corriente forzaría a los generadores tener corriente circulante entre ellos.

Además de tener el mismo radio de corriente, todos los generadores deberán tener el mismo resistor en el circuito paralelo, con el fin de balancear la carga reactiva del sistema.

**F. BASE DE DATOS IMPLEMENTADA EN EL PSS/E PARA
CORRER FLUJOS Y DINÁMICA (CASO DOS)**

Caso desarrollado en el PSS/E® para evaluar la función compensadora existente en la librería del paquete.

Tabla F.1 Base de datos de Flujos

```

100 3 0 0 0 0 1 1.05 0 'HYDRO' 33
150 1 5 1.56 0 0 2 1 0 'LOAD' 33
151 1 15 7.9 0 0 2 1 0 'LOAD' 3.3
200 1 0 0 0 0 1 1 0 'STEAM' 33
201 2 0 0 0 0 1 1 0 'STEAM' 3.3
202 2 0 0 0 0 1 1 0 'STEAM' 3.3
0
100 1 4 0 2 0 1.05 0 5 0 .25 0 .09 1.025
100 2 4 0 2 0 1.05 0 5 0 .25 0 .09 1.025
100 3 4 0 2 0 1.05 0 5 0 .25 0 .09 1.025
201 1 4 0 4 0 1.05 200 10 0 .2
202 1 4 0 4 0 1.05 200 10 0 .2
0
100 200 1 .02 .2 .03 15 17.5 20
100 150 1 .01 .1 .018 15 17.5 20
150 200 1 .01 .1 .018 15 17.5 20
200 201 1 0 .8 0 10 12 15 1.05
200 202 1 0 .8 0 10 12 15 1.05
150 151 1 0 .3 0 15 20 25 1.025
0
200 201 1 200 1.1 .9 1.1 .9
200 202 1 200 1.1 .9 1.1 .9
150 151 1 151 1.1 .9 1.1 .9
0
0
0
0
0
0
0

```

Tabla F.2 Base de datos de dinámica

BASE DE DATOS DE DINÁMICA

```

100 'GENSAL' 1 5 .05 .06 5.084 1 1.5 1.2 .4 .25 .12 .03 .25/
100 'GENSAL' 2 5 .05 .06 5.084 1 1.5 1.2 .4 .25 .12 .03 .25/
100 'GENSAL' 3 5 .05 .06 5.084 1 1.5 1.2 .4 .25 .12 .03 .25/
201 'GENROU' 1 6 .05 1 .05 3 0 1.4 1.35 .3 .6 .2 .1 .03 .4/
202 'GENROU' 1 6 .05 1 .05 3 0 1.4 1.35 .3 .6 .2 .1 .03 .4/
100 'SCRX' 1 .1 10 200 .05 0 5 0 0/
100 'SCRX' 2 .1 10 200 .05 0 5 0 0/
100 'SCRX' 3 .1 10 200 .05 0 5 0 0/
201 'SEXS' 1 .1 .1 100 .1 0 3/
202 'SEXS' 1 .1 .1 100 .1 0 3/
100 'HYGOV' 1 .05 .75 8 .05 .5 .2 1 0 1.3 1.1 0 .08/
100 'HYGOV' 2 .05 .75 8 .05 .5 .2 1 0 1.3 1.1 0 .08/
100 'HYGOV' 3 .05 .75 8 .05 .5 .2 1 0 1.3 1.1 0 .08/
201 'TGOV1' 1 .05 .5 1 .3 1. 1. 0./
202 'TGOV1' 1 .05 .5 1 .3 1. 1. 0./
201 'COMP' 1 0.0/
202 'COMP' 1 0.0/

```

Modelos de la librería de Compensadores de Potencia Reactiva que fueron implementados en las base de datos del PSS/E® para ser evaluados.

COMPCC

Modelo de Regulador de Voltaje para unidades compuestas cruzadas

Este sistema se encuentra en el bus # _____ IBUS,

ID de Equipo # _____ I,

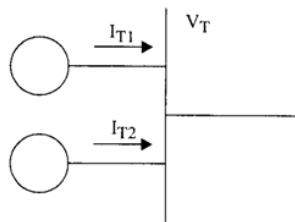
Y la maquina 2 # _____ M.

Este modelo utiliza los CON que # _____ J.
comienzan conv

CONs	#	Valor	Descripcion
J			R ₁ (system base)
J+1			X ₁ (system base)
J+2			R ₂ (system base)
J+3			X ₂ (system base)

Este modelo permite regular el voltaje de las maquinas 1 y M hacia el sensor de voltaje separado desde la maquina terminal

IBUS, 'COMPCC', I, M, R₁, X₁, R₂, X₂/



$$E_{COMP1} = V_T - \left(\frac{I_{T1} + I_{T2}}{2} \right) (R_1 + jX_1) + I_{T1} (R_2 + jX_2)$$

$$E_{COMP2} = V_T - \left(\frac{I_{T1} + I_{T2}}{2} \right) (R_1 + jX_1) + I_{T2} (R_2 + jX_2)$$

Fig. F.1 Modelo de librería de compensación reactiva de cruce

COMP

Modelo de un Regulador de Voltaje Actual

Este Bus del Sistema esta localizado en #_____ IBUS,

Maquina #_____ I.

Este modelo utiliza #_____ J.

CON	#	Valor	Descripcion
J			X _e (machine base)

Este modelo permite regular el voltaje de la maquina 1 a el senseon de voltaje en el punto de separacion en las terminales de la maquina por inperancia de Xe-

IBUS, 'COMP', I, X_e/

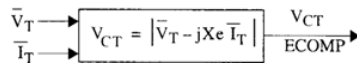


Fig. F.2 Modelo de Librería de compensación reactiva

IEEEVC

Modelo de Regulador de Voltaje para compensador

Este modelo esta localizado en el Bus del Sistema #_____ IBUS,

Maquina #_____ I.

Este modelo usa los Con que comienzan en #_____ J.

CONs	#	Valor	Descripcion
J			R _C (machine base)
J+1			X _C (machine base)

Este modelo permite regular el voltaje de la maquina 1 a el sensor de voltaje en el punto separado de la maquina terminal por una impedancia de R_c + jX_c-

IBUS, 'IEEEVC', I, R_C, X_C/

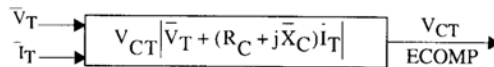


Fig. F.3 Modelo de Librería de compensación reactiva

G. CONTROL SECUNDARIO DE VOLTAJE

Con los Sistemas Eléctricos de Potencia actualmente operando con restricciones cada día mayores, cercanas algunas ocasiones a sus límites de operación, el tema de la optimización de sus márgenes de operación disponibles, está tomando más atención por parte de los ingenieros de la operación de los sistemas Eléctricos de Potencia, principalmente si se involucra su seguridad. Este tema de la seguridad, últimamente está tomando auge en lo referente a la estabilidad de voltaje así como el manejo tanto estático como dinámico de la compensación de la potencia reactiva.

Dependiendo de los países, diferentes estrategias son usadas para controlar y coordinar el “mapeo” de voltaje. El control primario del voltaje se realiza en las unidades generadoras, lo cual provee un control local, pero el control de voltaje; a gran escala, con capacidad de coordinar los sistemas de compensación, todavía no está muy difundido.

El comportamiento dinámico del sistema puede ser realizado por regulación rápida del voltaje de Transmisión.

En contraste a los generadores, los compensadores estáticos de Var's son designados especialmente en la regulación del voltaje de Transmisión. El voltaje de transmisión es directamente regulado a alta velocidad. El total del SVC (secondary voltaje control: control secundario de voltaje), y el rango de potencia reactiva que se encuentra disponible en niveles de voltaje medio, son referidos al lado de transmisión.

Básicamente, el control de voltaje de la red que se realiza en Francia, en extra alto-voltaje, opera en 3 diferentes niveles, los cuales son temporalmente y espacialmente independientes.

Temporalmente independientes significa que los tres mecanismos no interactúan entre ellos, si lo hicieran, esto generaría oscilaciones e inestabilidad.

El control primario abarca mantener el voltaje de los generadores a su valor de “referencia” (Set-Point), por medio de la alimentación de control a estas unidades. Esto realiza una corrección parcial automática, en unos cuantos segundos, para compensar también variación aleatoria en el voltaje de alta tensión. (EHV)

El control secundario es afectado por medio del control secundario de voltaje (SVC) del sistema, el cual tiene una constante de tiempo de algunos minutos y compensa aun variaciones lentas de voltaje. El control secundario comprende la división de la red en zonas, que no inter-actúan, con zonas donde el voltaje es controlado individualmente, el SVC ajusta automáticamente la potencia reactiva de ciertas unidades generadoras para controlar el voltaje en un punto específico (conocido como “punto piloto”) en la zona, y este es considerado como el voltaje representativo en todos los puntos de dicha zona. Sin embargo, un control secundario de voltaje coordinado (CSVC) a sido utilizado en el oeste de Francia en los dos últimos años, y se espera que sea ampliamente utilizado en los sistemas existentes de control secundario de voltaje (SVC).

En el nivel más alto, se encuentra el control terciario, el cual es aplicado para optimizar el mapeo del voltaje a nivel nacional. Este involucra determinados puntos de ajuste de voltaje para los “puntos piloto”, de tal forma alcanzar una operación segura y económica del Sistema. El control terciario normalmente es realizado manualmente, pero en forma automática, deberá de tener una constante de tiempo de alrededor de 15 minutos.

Las razones por lo cual tienen un sistema de control automático de voltaje en tiempo real en Francia e Italia pueden ser brevemente resumidos en una calidad de voltaje, seguridad en el sistema de potencia y una operación económica.

Los beneficios obtenidos son los siguientes:

- * Establece un perfil de voltaje a través del sistema de potencia y reduce las variaciones de voltaje alrededor del valor deseado.

Incrementa la seguridad del sistema con una mayor potencia reactiva de reserva, disponible para condiciones de emergencia e incrementa la capacidad de transferencia de potencia activa.

- * Reduce las pérdidas totales del sistemas de potencia por medio de la reducción de la potencia reactiva a través de la utilización de fuentes de potencia reactiva y un mejor perfil de voltaje.

Para mantener el perfil de voltaje en los rangos definidos implica una compensación de las variaciones de voltaje, resultado de las variaciones de las cargas de eventos particulares. Esto se realiza por medio del ajuste permanente de la compensación de la potencia reactiva de dispositivos y por la modificación de las referencia (Set-Point) de los reguladores de voltaje de los generadores. La organización de la acción de estos controles se puede definir como sigue:

La acción primaria coincide con las rápidas perturbaciones locales. Se necesita un tiempo de respuesta corto, con una constante de tiempo del orden de cientos de milisegundos. Esta acción es realizada por los sistemas de excitación de los generadores.

El segundo nivel, coincide o pertenece a variaciones lentas (debido a las variaciones de la carga), y con la coordinación de generadores de la misma área después de haberse realizado las acción primaria. Este control es realizado en distintas áreas regionales que tengan este control lento sobrepuesto en el lazo del control primario.

Las constantes de tiempo son seleccionadas para proporcionar el tiempo necesario de desacoplamiento de la acción primaria.

Finalmente, la acción terciaria, es llevada a cabo a nivel nacional, para asegurar la debida coordinación entre el control de zonas regionales.

El control secundario de voltaje en los países de Francia e Italia, es realizado por la división de la red eléctrica en distintas áreas geográficas; formando así, de alguna manera, subsistemas independientes, haciendo posible el control del perfil de voltaje separadamente en cada zona, esto por medio del ajuste de la referencia (Set-Point) de los sistemas de excitación de las unidades generadoras localizadas en esa zona. Este ajuste, adelanta las variaciones de potencia reactiva que controlan los generadores, esto es determinado por la referencia entre el voltaje deseado y el voltaje medido de un nodo especial en la zona, este nodo es conocido como “nodo piloto”. Este nodo es seleccionado cuidadosamente pues será el representativo de las variaciones del voltaje de la zona. La medición del voltaje del “nodo piloto” es enviado al control regional el cual produce un nivel de señal reactiva, este nivel es transmitido a la unidad controladora de la zona, la cual modifica la potencia reactiva en proporción a su capacidad y de acuerdo al nivel de la señal.

De esta forma, todas las unidades que están en control contribuyen con potencia reactiva de acuerdo a sus capacidades.

Figura G.1 muestra la estructura del sistema Francés el cual provee control simultaneo del perfil de voltaje y de la potencia reactiva en la zona de consideración.

La potencia reactiva de las unidades bajo control es ajustada por dos lazos de control, los cuales son sobre-puestos en el regulador de voltaje de los generadores. Una señal de control (de la zona, identificado como nivel “N”) es obtenido de la diferencia entre la medición del “nodo piloto” V_p y la referencia (Set-Point, determinado por el control de voltaje terciario), utilizando la siguiente expresión integral-proporcional.

$$N = \alpha \int_0^t \frac{V_c - V_p}{V_n} dt + \beta \frac{V_c - V_p}{V_n} \quad \text{con } -1 \leq N \leq +1$$

El nivel de la señal es procesada por una computadora localizada en el centro regional de control. Este valor digital es transmitido a cada unidad, el cual es clasificada como entrada de lazo de control secundario (lazo de control de potencia reactiva) el cual modificará la referencia del regulador de voltaje, dándose un factor de participación Q_r del generador, realizando una salida de potencia reactiva igual a $N \times Q_r$. Generalmente, $Q_r = 1.4 \times Q_n$, donde Q_n es el valor nominal de potencia reactiva. Para un estado final, tenemos $Q = 1.4 \times N \times Q_n$, el cual significa que el valor Q/Q_n es idéntico para cada unidad que está en control, asegurando así que cada unidad generadora aporta potencia reactiva proporcionalmente a su capacidad.

El voltaje del “Nodo Piloto” es medido, digitalizando y transmitido cada 10 segundos. Los parámetros de α y β son seleccionados para proveer una buena respuesta dinámica, generalmente los siguientes valores son usados.

$$10 \text{ s} \leq 1/\alpha \leq 20 \text{ s} \quad (1/\alpha : \text{ tiempo de integración } \beta/\alpha = 40)$$

Tomando en consideración los tiempos de retardo en la comunicación y los intervalos en los muestreos de las mediciones, esto da una constante de tiempo global de 2 a 3 minutos de acuerdo a como sea diseñado el sistema de comunicación global.

Características adicionales son previstas en el control; por ejemplo: si el sistema de comunicación falla, hace que la medición del voltaje del nodo piloto este indisponible, o si el nivel N alcanza el valor $+1$ o -1 , entonces el valor de N es “congelado”. Si todas las unidades controladoras han alcanzado su máxima capacidad de potencia reactiva, con $N \times (V_c - V_p)$ positivo, la parte integral de N es congelada. En tal caso, el control de despacho se realiza en forma manual.

En cualquier situación, el valor de N es una indicación de necesidad de potencia reactiva en toda la zona. Cuando N es positiva, la zona necesita potencia reactiva adicional. Cuando N es negativa, la zona produce potencia reactiva en exceso.

Las siguientes características deben ser satisfechas por las zonas, nodos-piloto y unidades controladoras para obtener un buen desempeño dinámico en el sistema de control de voltaje secundario.

- a).- La distancia eléctrica entre el nodo-piloto y los otros nodos de la zona deberán de ser cortos.
- b).- Suficiente potencia reactiva deberá estar disponible en la zona.

- c).- La distancia eléctrica entre el nodo-piloto y la más cercana zona deberá de ser grande para evitar posible influencias entre zonas.

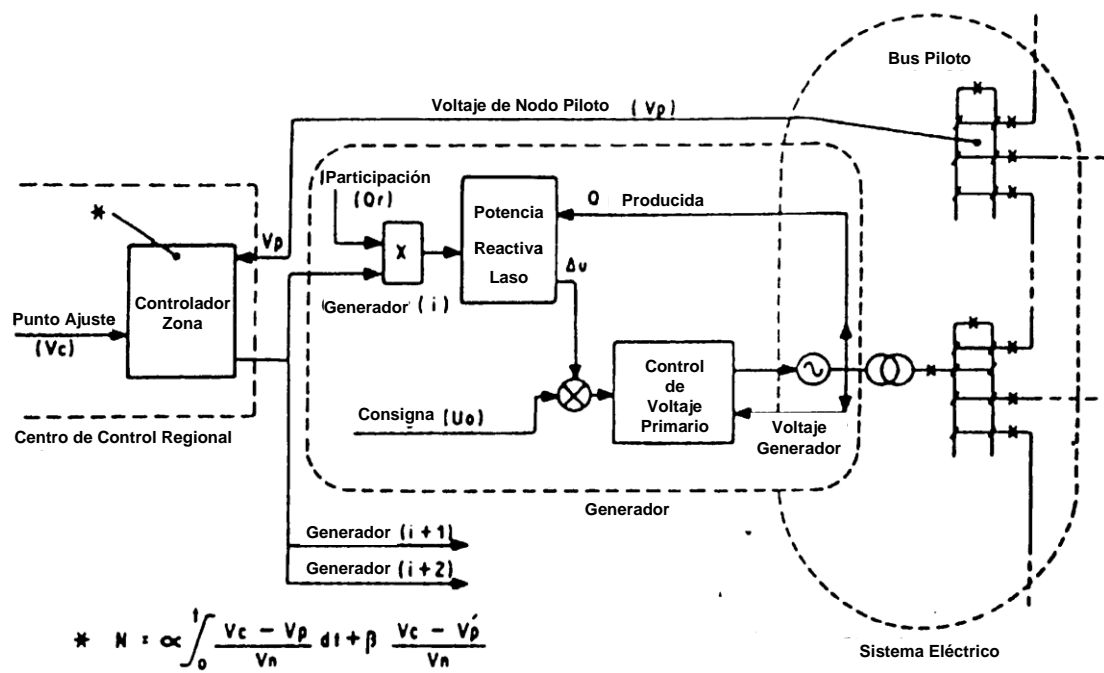


Fig. 1 Principios de un lazo de Control

DEPTO. ELECT. POT.

Fig. G.1 Lazo de Control Secundario de Voltaje

H. PRUEBAS ESTATICAS AL COMPENSADOR DE REACTIVOS

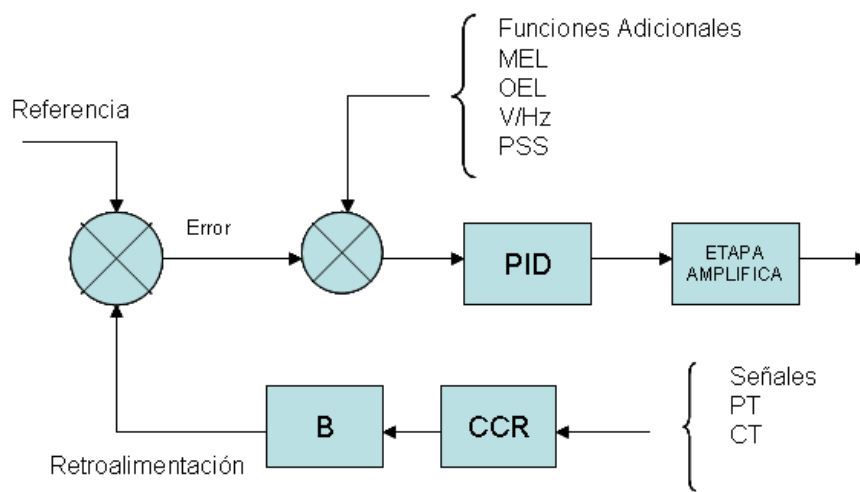
Las pruebas que se realizan hasta la fecha con el compensador de reactivos, es con la unidad sincronizada al sistema eléctrico de potencia. Como se describió en capítulos anteriores, lo que se hace es habilitar la función en el sistema de excitación para empezar a mover reactivos; esto es, se absorbe y se entrega reactivos para registrar la magnitud de la variación de estos con respecto al voltaje de terminales del generador.

Para el caso donde se encuentren más de una maquina conectada al nodo de la maquina que se desea probar su compensador, hay que tener la precaución de poner en manual el sistema de excitación para evitar que influya en los resultados de las pruebas.

Para el caso de pruebas estáticas, el regulador se encuentra fuera de línea, y por lo tanto se tienen que realizar las simulaciones de las señales necesarias para poder probarlo.

El sistema de excitación recibe la retroalimentación de los voltajes de terminales del generador por medio de los TP's,. Estos son dispositivos de instrumentación para fines de medición, el cual está compuesto de un devanado primario y un secundario a semejanza de un transformador de potencia, con la diferencia de disponer con altas cantidades de suministro de potencia. El devanado primario está conectado a las terminales del generador (VT de 13.8 a 21.0 Kv) y el devanado secundario entrega un nivel de voltaje de 115 a 120 volts de CA, el cual puede ser manejado por la electrónica del regulador.

DIAGRAMA DE DISPOSICIÓN DEL CCR PARA PRUEBAS ESTÁTICAS



CCR.- Compensador de Reactivos
PID.- Control Proporcional Integral Derivativo

Figura H.1 Diagrama esquemático de disposición del Compensador

La otra señal es la de corriente, siendo por lo general, la fase B en la mayoría de los generadores; conocido como TC, el cual a semejanza del TP antes descrito, consta de un devanado primario y un secundario, el devanado primario circula la corriente del generador (según la capacidad del generador: 1000, 5000, 15000 amperes), y en el devanado secundario circula corriente en un nivel menor, de 0 a 5 amperes, nivel que puede procesar la electrónica del sistema de excitación.(ver fig. H.1).

La idea es sustituir estas señales mediante un equipo que tenga la capacidad de manejarlas como los equipos que se utilizan para realizar pruebas a los relevadores de protección. Estos equipos tienen la capacidad de variar el voltaje, la corriente, la frecuencia y el ángulo entre la corriente y el voltaje, más conocido como factor de potencia (ver figura H.1).

Se identifican los puntos donde se conectara en el sistema de excitación, y se identifican los niveles adecuados de inyección de estas señales,

Verificar el tipo de conexión del voltaje secundario de terminales del generador (estrella o delta), y se procede a inyectar el voltaje y la corriente.

Con respecto a la corriente, esta será completamente reactiva esto es, cero la potencia real y la potencia reactiva depende del valor de la corriente, si es inductiva o capacitiva adelanta o atrasa 90 grados al voltaje.

Verificar los valores que se deberán de tener por parte del secundario del TP y TC. Se cita un ejemplo para mayor claridad.

Se tiene un generador con los siguientes datos:

Generador: 150 Mw ; Fp: 1

Voltaje Terminales: 13.8 Kv's

TP's : 14,400/120 = 120/1

TC's : 7000/5 = 1400/1

Corriente de fase a factor de potencia unitario:

$$P = \sqrt{3} V I \cos \theta$$

$$150,000,000 = \sqrt{3}(13800)I \cos 0$$

$$I = 150,000,000 / \sqrt{3}(13800)(1) = 6,275.54 \text{ amperes}$$

Corriente nominal máxima: 6,275.54 amperes

Considerando la relación del TC, se tiene en el secundario:

$$I_{sec} = 6,275.54 / 1400 = 4.48 \text{ amperes secundarios}$$

Voltaje secundario considerando la relación de los TP's de Máquina:

$$V_{sec.} = 13,800 \text{ Vff} / 120 = 115 \text{ Volts secundarios.}$$

El valor de 115 volt de CA. Y la corriente secundaria de 4.48 son los que se deberá de inyectar con el equipo, para simular la retroalimentación de señales de voltaje y corriente del generador.

La señal de corriente será la última que se inyecte. Se verifica el valor de la señal de referencia, una vez que se inyecte el nivel de voltaje, se verifica que en la señal de error del canal automático sea cero, significa que es el valor nominal del voltaje de alterna de retroalimentación es igual al de la referencia del canal automático del sistema de excitación.

Se procede a inyectar la señal de corriente (1 amper), y se toman datos de la señal de error. Esta debe de ser proporcional a la señal de corriente. Después se varía el porcentaje de ajuste del CCR, la señal de error deberá de incrementarse en igual proporción al porcentaje de incremento/decremento del ajuste del compensador.

I. SIMULACIÓN FLUJOS/DINÁMICA EN PSS/E DE UNA RED DE POTENCIA

El ingeniero o personal analista de Sistemas eléctricos de potencia que deseen utilizar la simulación en el paquete de software conocido como PSS/E® deberá de seguir un procedimiento específico para poder habilitar y analizar el Sistema Eléctrico de Potencia en el que está interesado en observar el desempeño ante ciertos eventos por medio del PSS/E. El primer paso para llevar esto, es identificar los archivos que serán utilizados; y esto abarca también para las subrutinas de CONEC y CONET.

MODELO DE FLUJOS.

Cada simulación dinámica es basada en un caso de “Carga de Flujos” que proporciona los datos requeridos de la red de transmisión como son: datos de las cargas, datos de secuencia positiva del generador.

El caso de flujos, primero es salvado de manera conveniente para establecer los valores de las condiciones iniciales de todos los voltajes de Buses, salida reactiva de generadores y fase de ángulos.

Para convertir el caso de flujos, y que sea válido para la simulación dinámica para las variables de estado, esta condición es manejada por la actividad CONL y CONG.

La actividad CONG, cambia todas las cargas de constante (MW, MVAR) a una característica compuesta en la cual el 60% de la potencia real es una característica de corriente constante. En potencia reactiva es designada como 50/50. Este re-arreglo de característica de la carga es realizado bus por bus.

La actividad CONG deberá ser siempre seguida por la actividad ORDR porque el cambio del modelado del generador de flujos a dinámica se cambian todos los generadores catalogados como tipo 3 (swing).

Todos los generadores serán representados en simulaciones por dinámicas por una impedancia y todas las cargas serán modeladas con dependencia de voltaje por la actividad CONL.

Las actividades FACT y TYSL son utilizados antes que el caso convertido sea salvado en un archivo.

Estos pasos dan un refinamiento a la solución de Flujos para obtener la más pequeña desviación en todos los buses.

Hasta que las subrutinas de CONEC y CONET han sido cargadas, la simulación dinámica del PSS/E solamente es un esqueleto. Primero la actividad LOFL encadena dinámica a flujos permitiendo su acceso, al caso convertido salvado, es recuperarlo con la actividad CASE y la actividad FACT es usada para establecer los factores requeridos de la red matriz de admitancia.

Una vez recuperado y preparado para complementar los datos de la red, la actividad RTRN le permite el acceso de nuevo a las actividades de dinámica.

Los comandos para correr flujos en PSS/E® son los siguientes:

\$ PSSLF

```
POWER TECHNOLOGIES INCORPORATED
1200 BUS POWER SYSTEM SIMULATOR -PSS/E-19.0
INITIATED AL LOAD FLOW ENTRY POINT ON FRI, JUL 05 1991 15:33
```

ACTIVITY? READ

ENTER INPUT FILE NAME (0 TO EXIT, 1 FOR TERMINAL): SMALL

ENTER IC, SBASE

ENTER TWO LINE HEADING

174

ENTER BUS DATA
 ENTER GENERATOR DATA
 ENTER BRANCH DATA
 ENTER TRANSFORMER ADJUSTMENT DATA
 ENTER AREA INTERCHANGE DATA
 ENTER TWO-TERMINAL DC LINE DATA
 ENTER SWITCHED SHUNT DATA
 ENTER TRANSFORMER IMPEDANCE CORRECTION DATA
 ENTER MULTI-TERMINAL DC LINE DATA
 ENTER MULTI-SECTION LINE DATA
 ENTER ZONE NAME DATA
 BUILDING TABLES—WAIT ...

ACTIVITY? SOLV

INTER	DELTA/TOL	BUS	REAL(DELTA V)	IMAG(DELTA V)
1	984.909	201	0.2840E-01	0.9431E-01
2	594.433	201	0.4574E-02	-0.5927E-01
3	491.449	151	-0.4901E-01	0.3633E-02
4	253.456	201	0.1110E-02	-0.2532-01

REACHED TOLERANCE IN 31 ITERATIONS
 LARGEST MISMATCH: 0.00 MW 0.01 MVAR 0.01 MVA-BUS 150 (LOAD 33.0)
 SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH:

ACTIVITY? ORDR

DIAGONALS - 4 OFF-DIAGONALS - 3 MAX SIZE - 6

ACTIVITY? FNSL

ENTER ITERATION NUMBER FOR VAR LIMITS

0 FOR IMMEDIATELY, -1 TO IGNORE COMPLETELY: 0

ITER	DELTA P	BUS	DELTA Q	BUS	DELTA V/	BUS	DELTA ANG	BUS
0	0.0000(	150)	0.0002(	200)	0.00017(	200)	0.00003(	201)
1	0.0000(	150)	0.0018(	201)	0.00135(	201)	0.00009(	201)
2	0.0000(	200)	0.0001(	201)				

REACHED TOLERANCE IN 2 ITERATIONS
 LARGEST MISMATCH: 0.00 MW -0.01 MVAR 0.01 MVA-BUS 200 (STEAM 33.0)
 SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH:

ACTIVITY? SAVE SME1

CASE SAVED IN FILE SME1.SAV ON FRI. JUL 05 1991 15:35

ACTIVITY? CONL ALL

ENTER % CONSTANT I, % CONSTANT G FOR REAL POWER : 100 0

ENTER % CONSTANT I, % CONSTANT B FOR REACTIVE POWER : 0 100

LOAD TO BE REPRESENTED AS:

REAL REACTIVE

0.00% 0.00% CONSTANT POWER

100.00% 0.00% CONSTANT CURRENT

0.00% 100.00% CONSTANT ADMITTANCE

ENTER 1 IF O.K., 0 OTHERWISE: 1

LOAD TO BE REPRESENTED AT 2 OF 2 LOAD BUSES

ACTIVITY? CONG

GENERATORS CONVERTED

ACTIVITY? ORDR

DIAGONALS - 5 OFF-DIAGONALS - 5 MAX SIZE - 10

ACTIVITY? FACT

5 DIAGONAL AND 5 OFF-DIAGONAL ELEMENTS

ACTIVITY? TYSL

ITER	DELTA/TOL	BUS	REAL(DELTA V)	IMAG(DELTA V)
1	1.941	200	0.1919E-04	-0.2881E-05
2	0.048	150	-0.4768E-06	0.9313E-09

REACHED TOLERANCE IN 2 ITERATIONS
 LARGEST MISMATCH: 0.00 MW 0.00 MVAR 0.00 MVA-BUS 100 (HYDRO 33.0)

ACTIVITY? SAVE SME2

CASE SAVED IN FILE SME2.SAV ON FRI. JUL 05 1991 15:35

Los Comandos para correr dinámica son los siguientes:

\$ PSSDS4

Running user's dynamics

**POWER TECHNOLOGIES INCORPORATED
1200 BUS POWER SYSTEM SIMULATOR --- PSS/E -19.0
INITIATED AT DYNAMICS ENTRY POINT ON THU, JUL 1991 15:42**

ACTIVITY? LOFL

ACTIVITY? RTRN TO RETURN TO DYNAMICS -- ACTIVITY? CASE SME2

**SMALL EXAMPLE SYSTEM
BOONDOCKS POWER AND LIGHT**

CASE SME2.SAV WAS SAVED ON THU, JUL 11 1991 15:10

**ACTIVITY RTRN TO RETURN TO DYNAMICS -- ACTIVITY? FACT
5 DIAGONAL AND 5 OFF-DIAGONAL ELEMENTS**

ACTIVITY RTRN TO RETURN TO DYNAMICS—ACTIVITY? RTRN

ACTIVITY? DYRE

**ENTER DYNAMICS DATA SOURCE FILENAME: SMEDD
ENTER FILENAME FOR SUBROUTINE CONEC: CC1
ENTER FILENAME FOR SUBROUTINE CONET: CT1**

NEXT AVAILABLE ADDRESSES ARE:

CON	STATE	VAR	ICON
1	1	1	1

ENTER STARTING CON, STATE, VAR, ICON OR CARRIAGE RETURN

OUT OF FILE DATA—SWITCH TO TERMINAL INPUT MODE

GENERATOR MODEL USE:

CONS	1-	50
STATES	1-	21

EXCITER MODELS USE:

CONS	51-	80
STATES	22-	29

GOVERNOR MODELS USE:

CONS	81-	123
STATES	30-	43
VAR	1-	7

SUMMARY OF MODELS READ:

GENS:	GENROU	GENSAL
	1	3

EXSYS:	SCRX	SEXS
	3	1

GOVS: TGOV1 HYG0V
1 3

NEXT AVAILABLE ADDRESSES ARE:
CON STATE VAR ICON
124 44 8 1

NO MODEL CALLS IN CONEC/CONET/USRXXX—DYNAMICS SKELETON MAY BE USED

ENTER FILENAME FOR COMPILING FILE (0 TO EXIT): COMPILE

ACTIVITY? CHAN

NEXT AVAILABLE ADDRESSES ARE:
CHANNEL VAR ICON
1 8 1

ENTER STARTING CHANNEL, VAR, ICON INDICES OR CARRIAGE RETURN

ENTER OUTPUT CATEGORY:

0 = EXIT	1 = ANGLE	2 = PELEC
3 = QELEC	4 = ETERM	5 = EFD
6 = PMECH	7 = SPEED	8 = XADIFD
9 = ECOMP	10 = VOTHSG	11 = VREF
12 = BSFREQ	13 = VOLTAGE	14 = VOLT & ANG
15 = FLOW (P)	16 = FLOW (P & Q)	17 = FLOW (MVA)
18 = RELAY2(R & X)	19 = VAR	20 = STATE: 1

ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,1
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,2
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 201,
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 0

ENTER OUTPUT CATEGORY:

0 = EXIT	1 = ANGLE	2 = PELEC
3 = QELEC	4 = ETERM	5 = EFD
6 = PMECH	7 = SPEED	8 = XADIFD
9 = ECOMP	10 = VOTHSG	11 = VREF
12 = BSFREQ	13 = VOLTAGE	14 = VOLT & ANG
15 = FLOW (P)	16 = FLOW (P & Q)	17 = FLOW (MVA)
18 = RELAY2(R & X)	19 = VAR	20 = STATE: 2

ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,1
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,2
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 201,
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 0

ENTER OUTPUT CATEGORY:

0 = EXIT	1 = ANGLE	2 = PELEC
3 = QELEC	4 = ETERM	5 = EFD
6 = PMECH	7 = SPEED	8 = XADIFD
9 = ECOMP	10 = VOTHSG	11 = VREF
12 = BSFREQ	13 = VOLTAGE	14 = VOLT & ANG
15 = FLOW (P)	16 = FLOW (P & Q)	17 = FLOW (MVA)
18 = RELAY2(R & X)	19 = VAR	20 = STATE: 4

ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,1
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,2
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 201,
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 0

ENTER OUTPUT CATEGORY:

0 = EXIT 1 = ANGLE 2 = PELEC
3 = QELEC 4 = ETERM 5 = EFD
6 = PМЕCH 7 = SPEED 8 = XADIFD
9 = ECOMP 10 = VOTHSG 11 = VREF
12 = BSFREQ 13 = VOLTAGE14 = VOLT & ANG
15 = FLOW (P) 16 = FLOW (P & Q) 17 = FLOW (MVA)
18 = RELAY2(R & X) 19 = VAR 20 = STATE: 5

ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,1
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,2
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 201,
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 0

ENTER OUTPUT CATEGORY:

0 = EXIT 1 = ANGLE 2 = PELEC
3 = QELEC 4 = ETERM 5 = EFD
6 = PМЕCH 7 = SPEED 8 = XADIFD
9 = ECOMP 10 = VOTHSG 11 = VREF
12 = BSFREQ 13 = VOLTAGE14 = VOLT & ANG
15 = FLOW (P) 16 = FLOW (P & Q) 17 = FLOW (MVA)
18 = RELAY2(R & X) 19 = VAR 20 = STATE: 6

ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,1
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,2
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 201,
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 0

ENTER OUTPUT CATEGORY:

0 = EXIT 1 = ANGLE 2 = PELEC
3 = QELEC 4 = ETERM 5 = EFD
6 = PМЕCH 7 = SPEED 8 = XADIFD
9 = ECOMP 10 = VOTHSG 11 = VREF
12 = BSFREQ 13 = VOLTAGE14 = VOLT & ANG
15 = FLOW (P) 16 = FLOW (P & Q) 17 = FLOW (MVA)
18 = RELAY2(R & X) 19 = VAR 20 = STATE: 13

ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,1
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 100,2
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 201,
ENTER BUS NUMER, MACHINE ID, "IDENTIFIER": 0

ENTER OUTPUT CATEGORY:

0 = EXIT 1 = ANGLE 2 = PELEC
3 = QELEC 4 = ETERM 5 = EFD
6 = PМЕCH 7 = SPEED 8 = XADIFD
9 = ECOMP 10 = VOTHSG 11 = VREF
12 = BSFREQ 13 = VOLTAGE14 = VOLT & ANG
15 = FLOW (P) 16 = FLOW (P & Q) 17 = FLOW (MVA)
18 = RELAY2(R & X) 19 = VAR 20 = STATE: 16

ENTER BUS, TO BUS, CIRCUIT ID, "IDENTIFIER": 100 200 1
ENTER SECOND "IDENTIFIER" :
ENTER BUS, TO BUS, CIRCUIT ID, "IDENTIFIER": 100 150 1
ENTER SECOND "IDENTIFIER" :
ENTER BUS, TO BUS, CIRCUIT ID, "IDENTIFIER": 200 150 1
ENTER SECOND "IDENTIFIER" :
ENTER BUS, TO BUS, CIRCUIT ID, "IDENTIFIER": 0

ENTER OUTPUT CATEGORY:

0 = EXIT	1 = ANGLE	2 = PELEC
3 = QELEC	4 = ETERM	5 = EFD
6 = PMECH	7 = SPEED	8 = XADIFD
9 = ECOMP	10 = VOTHSG	11 = VREF
12 = BSFREQ	13 = VOLTAGE	14 = VOLT & ANG
15 = FLOW (P)	16 = FLOW (P & Q)	17 = FLOW (MVA)
18 = RELAY2(R & X)	19 = VAR	20 = STATE: 0

NEXT AVAILABLE ADDRESSES ARE :

CHANNEL	VAR	ICON
25	17	13

ACTIVITY? SNAP SSN1

NUMBER OF ELEMENTS IN USE ARE:

CONS	STATES	VARS	ICONS	CHANNELS
123	43	16	12	24

ENTER NUMBER TO BE SAVED OR CARRIAGE RETURN FOR ABOVE VALUES

SNAPSHOT STORED IN FILE SSN1.SNP AT TIME = 0.00

ACTIVITY? STOP

```
                SUBROUTINE CONEC                FILE CC1
C
$INSERT COMON4
C
C
      RETURN
      END
      SUBROUTINE USERXXX(MC.SLOT.IT)
      INTEGER MC,SLOT,IT
      SELECT (IT)
      FIN
      RETURN
      END
```

```
                SUBROUTINE CONET                FILE CT1
C
$INSERT COMON4
C
C
      IF (.NOT. IFLAG) GO TO 9000
C
C NETWORK MONITORING MODELS
C
C
      9000 CONTINUE
C
      RETURN
      END
```