

CAPÍTULO II

INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE FACTS.

2.1 Introducción.

Debido a que en la actualidad no todos los sistemas de potencia son controlados de manera automática se puede decir que la capacidad de respuesta de dichos sistemas es lenta y genera altos costos de mantenimiento, por lo tanto son inflexibles y poco controlables. A pesar de estas limitantes, los ingenieros, operadores y proyectistas trabajan en conjunto empleando una variada gama de ingeniosas técnicas para hacer que los sistemas trabajen eficientemente, pero a un precio que implica una mayor inversión en infraestructura y más gastos de operación.

En años recientes la demanda de transmisión de energía continua aumentando, por lo cual se ha presentado la necesidad de buscar nuevas formas de optimizar la capacidad de los sistemas de transmisión existentes, manteniendo los niveles de seguridad y estabilidad dentro de los márgenes preestablecidos. Una de las posibilidades que se tienen para lograr lo anterior son los controladores basados en electrónica de potencia, los cuales han demostrado ser sustitutos potenciales de las soluciones convencionales basadas en elementos electromecánicos. A pesar de que los primeros son más costosos, ofrecen un gran número de funciones de control que no pueden ser logrados con equipos tradicionales.

Las definiciones precisas dadas por el Capítulo de Potencia del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE-PES, USA), [3], para esta tecnología es:

- Flexibilidad de Transmisión de la Potencia Eléctrica :

Es la habilidad de acomodar y reajustar los cambios en el sistema de transmisión eléctrico o en las condiciones operativas, mientras se mantiene suficiente margen de estabilidad transitoria y de régimen permanente.

- Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS) :

Son sistemas de transmisión de corriente alterna basados en dispositivos de electrónica de potencia cuyas técnicas de control aumentan la controlabilidad e

incrementan la capacidad de transferencia de potencia de los sistemas eléctricos de potencia. A estos dispositivos se les denomina Controladores FACTS y son representados tal y como se muestra en la Figura 2.1

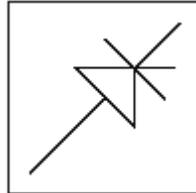


Figura 2.1 Símbolo general para un controlador FACTS.

Como se mencionó, la tecnología FACTS hace uso de los últimos avances de la electrónica de potencia en alto-voltaje y alta-corriente para lograr un control efectivo de los parámetros de un sistema eléctrico (ej. potencia y voltaje). Estos dispositivos permiten resolver algunas de las dificultades más comunes en un SEP, permitiendo a las empresas optimizar el uso de los recursos de transmisión y reforzar la confiabilidad de la red.

Lo que resulta interesante es que los dispositivos basados en este concepto abren una nueva oportunidad para controlar la potencia transmitida, haciendo que una línea pueda incrementar su capacidad de conducción aproximándose a su límite térmico y de esta manera aumentar las capacidades de transmisión tanto en condiciones de operación normales como de contingencias. Estas oportunidades aumentan cuando se tiene la habilidad para controlar los parámetros que rigen la operación de los sistemas de transmisión, los cuales serán tratados posteriormente.

FACTS son una más de las herramientas usadas en el diseño y operación de un SEP y representan una tecnología alternativa y no substituye uno a uno los actuales conmutadores mecánicos o la construcción de nuevas líneas y plantas de generación.

2.2 Principio de Operación.

Los equipos FACTS se desarrollan a partir de una combinación de equipos convencionales, es decir; transformadores, capacitores, reactores, elementos semiconductores de alta potencia, microelectrónica y equipos de telecomunicaciones, lo que posibilita una operación coordinada y de mayor flexibilidad en los distintos dispositivos presentes en el sistema.

La motivación para la creación de nuevos equipos FACTS es la de tener sistemas capaces de transportar mayor potencia y así dar un uso más eficiente a la energía proporcionada por las plantas generadoras. Un factor determinante en la aparición y evolución de los controladores fue el desarrollo de la electrónica de potencia; en especial la de los tiristores, algunos de los cuales poseen una habilidad de bloqueo de más de 10 kV y una capacidad de conducción por sobre los 5kA. Los llamados GTO (Gate Turn-off Thyristor) e IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) son un ejemplo de estos semiconductores, los cuales ofrecen ventajas adicionales, como el control de encendido y apagado.

La combinación con los métodos de control y los recursos computacionales ha facilitado el perfeccionamiento de los compensadores, lo que permite controlar de forma dinámica el parámetro a ser compensado en la red [4]. Esto se logra con el óptimo control de los ángulos de encendido alfa (α), el ángulo de apagado beta (β) y el ángulo de conducción gama (γ) propios de los tiristores, los cuales deben ser considerados en el diseño de los controladores, el cual dependerá definitivamente de parámetros de la red donde se pretende instalar.

Otra posibilidad que poseen estos equipos es la utilización de fuentes de almacenamiento de energía no convencionales, como medio para interactuar activamente inyectando potencia activa como se ilustra en la Figura 2.2.

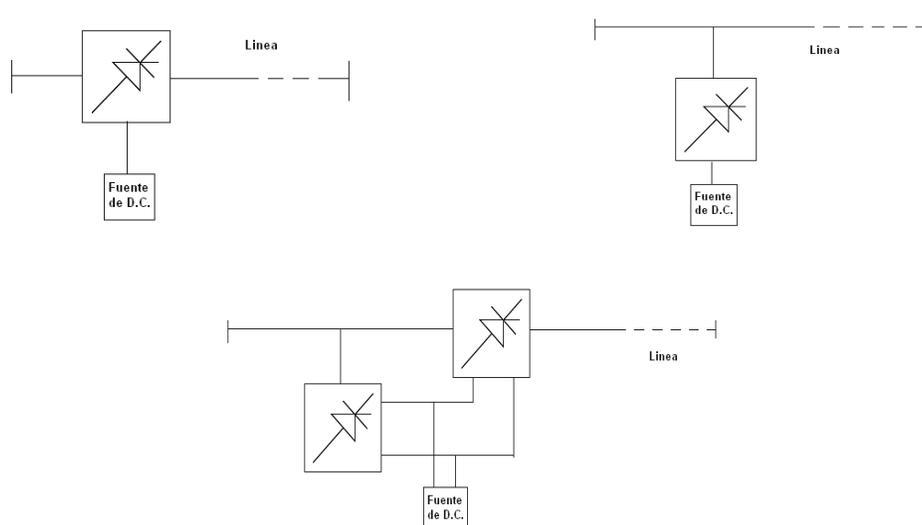


Figura 2.2 Controladores con equipo no convencional de almacenamiento.

En la actualidad podemos encontrar un ejemplo de ésta tecnología en el denominado: STATCOM/BESS. [5]

Los beneficios de añadir generación de potencia activa al controlador son muy significativos. Un controlador de este tipo es mucho más efectivo para el control del sistema dinámico en comparación con los controladores sin respaldo de energía.

2.3 Tipos de Compensación, Controladores y Parámetros.

Los controladores FACTS proporcionan un control directo y un manejo de los parámetros que se encuentran directamente interrelacionados dentro de las líneas de transmisión tales como: la impedancia en serie, la impedancia en derivación, la corriente, el voltaje, el ángulo de fase y el amortiguamiento de las oscilaciones a frecuencias distintas de la frecuencia nominal.

La base tecnológica de estos dispositivos no es un simple interruptor de alta potencia que conecta o desconecta un determinado elemento activo, sino un conjunto de controladores, los cuales pueden ser activados individualmente o en coordinación con otros para controlar uno o más de los parámetros del sistema.

Una buena elección del controlador FACTS se deriva primordialmente de las limitaciones, características y parámetros específicos de una línea de transmisión, puesto que todos los controladores FACTS están basados en una tecnología similar, de este modo la adecuada implementación del compensador depende propiamente del sistema en el cual ha de ser instalado.

En general, la compensación de los controladores FACTS puede ser dividida en cuatro categorías [4], considerando el tipo de conexión y los parámetros sobre los cuales se tiene control, como se aprecia en la Figura 2.3, donde de manera esquemática se observa una interconexión entre dos sistemas y la potencia activa transmitida entre ellos es definida por la ecuación:

$$P = \frac{V_s V_r}{X} \text{sen}(\delta_1 - \delta_2) \quad (2.1)$$

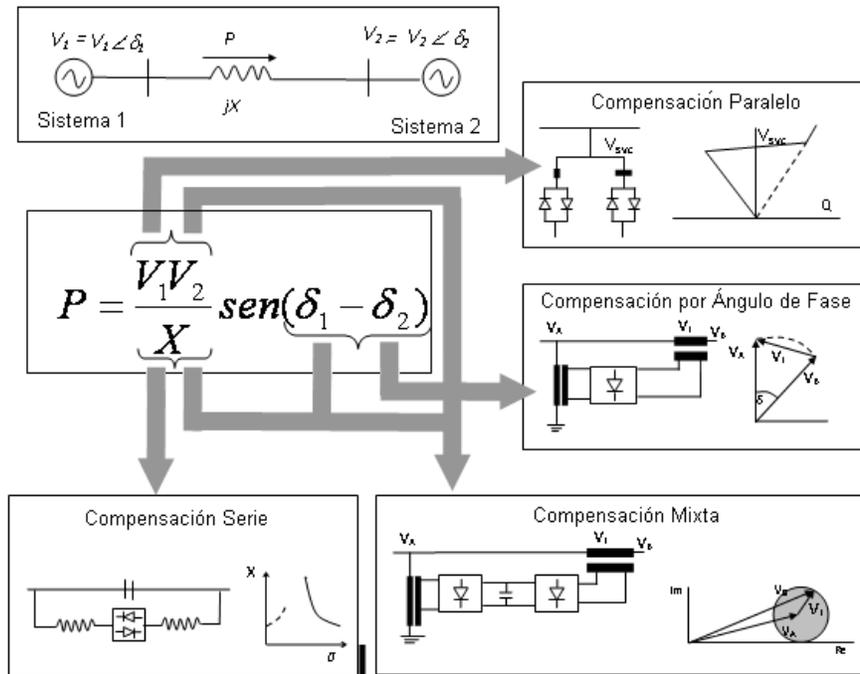


Figura 2.3 Tipos de compensación empleando tecnología FACTS.

a) Compensación en Paralelo:

En este tipo de compensación se conecta un compensador en paralelo con la línea, Figura 2.4, cuya función es manipular la magnitud de los voltajes en los extremos emisor y/o receptor. Esto se logra inyectando una corriente al sistema en el punto de conexión, se puede implementar variando una impedancia, una fuente de voltaje o una fuente de corriente, todos conectados en paralelo. Siempre que la corriente inyectada esté en cuadratura con el voltaje de línea, el compensador en derivación, o también conocido como compensador “shunt”, sólo suministrará o consumirá potencia reactiva.

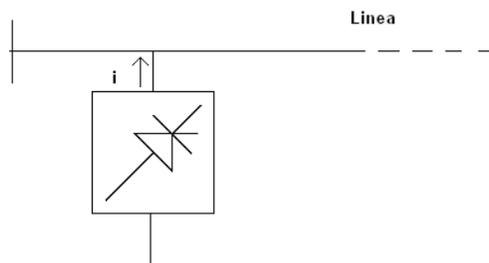


Figura 2.4 Símbolo de un controlador paralelo.

Los controladores usados para la compensación en paralelo son los siguientes:

- Reactor Controlado por Tiristor (TCR, Thyristor Controlled Reactor).
- Reactor Conmutado por Tiristor (TSR, Thyristor Switched Reactor).
- Reactor Controlado por Tiristores con Capacitor Fijo (TCR-FC Thyristor Reactor Controlled with Fixed Capacitor)
- Capacitor Conmutado por Tiristor (TSC, Thyristor Switched Capacitor).
- Compensador Estático de VAR (SVC, Static VAR Compensator),
- Compensador Estático (STATCOM, Static Compensator).
- Limitador de Voltaje Controlado por Tiristor.

b) Compensación Serie.

En principio, un compensador conectado en serie con la línea, tal como se muestra en la Figura 2.5, inyecta un voltaje en cuadratura respecto a la corriente. De igual forma la impedancia variable multiplicada por su flujo de corriente representa un voltaje aplicado en serie en la línea. Siempre que el voltaje sea perpendicular con la corriente de línea, el compensador serie suministra o consume sólo potencia reactiva. En consecuencia, el compensador serie podría ser una impedancia variable, (ej. un capacitor o un reactor), o una fuente de voltaje.

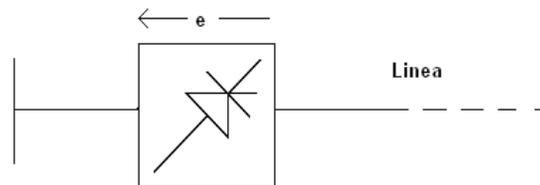


Figura 2.5 Símbolo de un controlador serie.

Algunos compensadores que realizan este tipo de compensación son los siguientes:

- Capacitor Serie Conmutado por Tiristor (TSSC, Thyristor Switched Series Capacitor).
- Capacitor Serie Controlado por Tiristor (TCSC, de Thyristor Controlled Series Capacitor).
- Compensador Estático de VAR en Serie (SSVC, Series Static VAR Compensator).

- Compensador Estático Síncrono en Serie (SSSC, Static Synchronous Series Compensator).
- Regulador de Voltaje Controlado por Tiristor con cambio de TAP.

c) Compensación de Ángulo de Fase.

La compensación de ángulo de fase es un caso especial del compensador serie. El flujo de potencia se controla mediante la manipulación de un ángulo de fase. El compensador de fase se inserta entre el generador en el extremo de transmisión, y la línea de transmisión. Este compensador es una fuente de voltaje de AC con amplitud y ángulo de fase controlables. Es capaz de manipular la diferencia de fases entre dos sistemas, y con ello puede controlar la potencia tanto activa como reactiva intercambiada entre los dos sistemas. El diagrama general es mostrado en la Figura 2.6. Este tipo de compensación es llevada a cabo por equipos tales como:

- Reguladores de Fase (PAR, Phase Angle Shifter)
- Transformadores de Cambio de Fase Controlados por Tiristores (TCPST, Thyristor Controller Phase Shift Transformer).

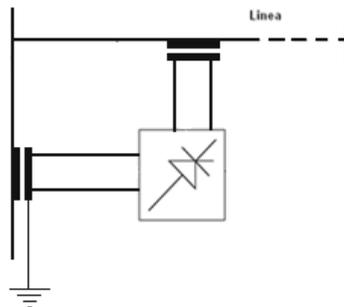


Figura 2.6 Compensador de ángulo de fase.

d) Compensación Mixta.

Para este tipo de compensación se parte de dos posibles combinaciones entre los anteriores tipos de compensación, es decir serie y paralelo:

- **Controladores Combinados Serie-Serie.**

Se implementan compensadores serie en líneas diferentes, los cuales son controlados mediante un sistema de transmisión multilínea, tal como lo muestra la Figura 2.7. Los controladores permiten un control de reactivos en la línea, y además transfieren potencia real entre las líneas mediante un enlace de CD. Esta capacidad de transferencia de potencia permite balancear tanto el flujo de potencia activa como reactiva, logrando maximizar la utilización de los sistemas de transmisión. Son conocidos como Interline Power Flow Controller.

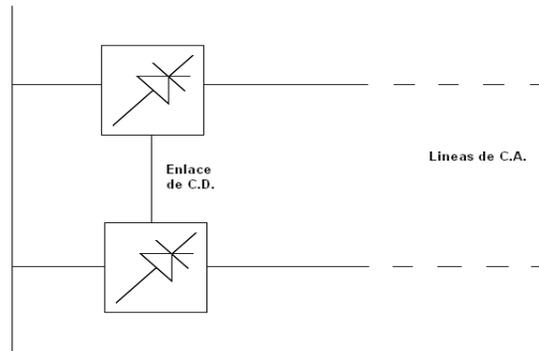


Figura 2.7 Símbolo de un controlador combinado serie-serie, (IPFC).

- **Controladores Combinados Serie-Paralelo:**

Se trata de una combinación entre un controlador serie y otro en paralelo, controlados en forma coordinada. Este dispositivo suministra corriente a la línea por el controlador paralelo y tensión por el controlador serie. Sin embargo, debido a un enlace de CD que existe entre ambos controladores, se presenta un intercambio de potencia activa entre ellos, pudiendo controlarse tanto la potencia activa como la reactiva. Ver Figura 2.8. Son conocidos como UPFC los cuales pueden controlar de manera individual o conjunta voltaje, ángulo y potencia.

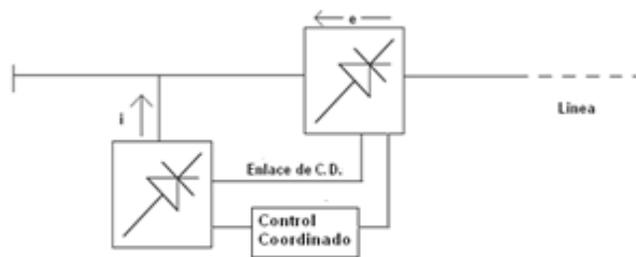


Figura 2.8 Controlador unificado serie-paralelo (UPFC).

La Figura 2.9 muestra las curvas características potencia-ángulo, para los diferentes tipos de compensación en un SEP.

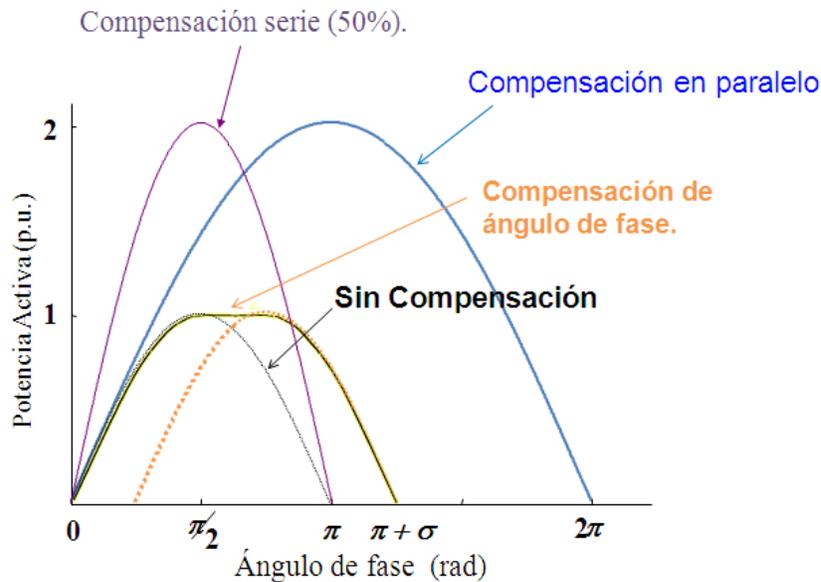


Figura 2.9 Curvas características para los diferentes tipos de compensación.

En resumen:

- Si las magnitudes de voltaje son compensadas se denomina compensación paralelo o shunt.
- Si la impedancia de línea es compensada se denomina compensación serie.
- Si dos o más parámetros son compensados estaremos hablando de compensación mixta.
- Si se alteran los ángulos se tratará de compensación de ángulo de fase.

2.4 Importancia de los Diferentes Tipos de Controladores.

Es importante apreciar que el controlador en serie impacta en el voltaje transmitido y por consiguiente directamente en la corriente y el flujo de potencia. Por lo tanto, si el propósito de la aplicación es el control de la corriente-flujo de potencia y estabilidad de oscilaciones, el controlador serie para una magnitud de MVA's dada es varias veces más potente que el controlador en paralelo.

El controlador en paralelo es como una fuente de corriente la cual inyecta corriente dentro de la línea. El controlador en paralelo es por lo tanto una buena manera de

controlar el voltaje alrededor de un punto de conexión a través de inyección de corriente reactiva (en atraso y adelanto), o una combinación de corriente reactiva o corriente real para un voltaje más efectivo y estabilidad de oscilaciones de voltaje.

Esto no quiere decir que el controlador en serie no puede ser usado para mantener el voltaje de la línea dentro del rango especificado. Después de todo, las fluctuaciones de corriente son una consecuencia de la caída de voltaje en impedancias serie de las líneas, transformadores y generadores.

Adicionando o sustrayendo el voltaje del controlador FACTS en serie a través de la manipulación de los siguientes parámetros: frecuencia, voltaje subsíncrono o armónico y la combinación de estos mismos puede ser la forma más costosa aunque más efectiva de mejorar el perfil de voltaje. Sin embargo, un controlador en paralelo es mucho más efectivo para mantener el voltaje requerido en el bus de una subestación a un menor costo.

Una ventaja importante del controlador en paralelo es que sirve al nodo de bus, independientemente de la línea individual conectada al bus.

Los argumentos anteriores sugieren que una combinación de controladores serie y paralelo pueden brindar una mejor efectividad en el flujo de potencia y corriente en la línea así como mejorar el control del voltaje. Para una combinación de los controladores en serie y en paralelo, el controlador shunt puede ser una sola unidad que funciona en coordinación con los controladores de línea individual. Este arreglo puede proporcionar beneficios adicionales (control de flujo de potencia reactiva) y puede realizarse mediante el uso del UPFC, [4].

2.5 Beneficios del empleo de Dispositivos FACTS.

Los dispositivos FACTS pueden ser usados para resolver los más comunes problemas que resultan de las limitaciones de transmisión en una red. El “*Electric Power Research Institute*” (EPRI), lanzó en 1986 un programa de investigación para reconocer y examinar los beneficios de los controladores con alta capacidad de respuesta en conjunto con avanzados sistemas de protecciones digitales, controles, comunicaciones integrales y avanzados centros de control con los siguientes objetivos:

- Obtener un mayor control sobre el flujo de potencia, dirigiéndolo a través de las rutas predeterminadas.
- El cargar de manera segura una línea a su máxima capacidad térmica.
- El mejoramiento de la estabilidad del sistema.
- Mayor capacidad de transferencia de potencia entre áreas controladas, con lo que el margen de reserva rodante puede reducirse considerablemente.
- Amortiguar oscilaciones del sistema de potencia, que dañan los equipos y limitan la capacidad de transmisión disponible.

Así mismo, los beneficios en usar controladores electrónicos de alta velocidad son definidos por EPRI como: [10, 21, 29].

- 1.- Incrementan la seguridad del sistema al aumentar el límite de estabilidad transitoria, limitando las corrientes de corto circuito y sobrecargas, previniendo salidas en cascada, y limitando el efecto de otras fallas en el sistema y equipos.
- 2.- Control de potencia en las rutas de flujos pre-establecidas.
- 3.- Cargar con seguridad las líneas de transmisión a niveles cercanos a sus límites térmicos.
- 4.- Mayor capacidad de transferencia de potencia de las líneas existentes que a su vez resulta en un ahorro de costos de construcción de nuevas líneas de transmisión.
- 5.- Reducción en el costo de operación por prescindir de re-despachar la generación.
- 6.- Incrementar la seguridad de los sistemas de potencia y los niveles de confiabilidad.
- 7.- Ahorros por la reducción de los márgenes de reserva de generación.
- 8.- Amortiguamiento de oscilaciones de sistemas de potencia que podrían dañar el equipo y /o los límites de uso de la capacidad de transmisión.

2.6 Estudios para la Implementación de los Controladores FACTS.

La implementación de estos dispositivos requiere una serie de estudios y de una cuidadosa planeación y coordinación, no solo deben resolver problemas técnicos, también deben considerar el punto que tal vez sea el más relevante en el diseño, la cuestión económica, y políticas entre proyectistas y cuerpos regulatorios. Como un prerrequisito, es esencial haber preparado un plan apropiado en el cual se indique el propósito, objetivo, metodología y criterio para los estudios. Los resultados son típicamente interrelacionados y requieren un proceso de análisis que determinará la factibilidad de la implementación del controlador.

Para los estudios de aplicación los modelos más representativos para el sistema de transmisión, (ej. líneas de transmisión, transformadores, generadores, etc.), los controladores FACTS necesitan estar previamente establecidos, revisados y verificados.

El estudio de aplicación para los controladores FACTS lo podemos dividir dentro de las siguientes etapas: [9]

- a) Estudios de Planeación.
- b) Análisis de los Estudios.
- c) Estudios de Diseño.
- d) Estudios de Operación.
- e) Fases de la Implementación.

a) Estudios de Planeación.

Los estudios de planeación se llevan a cabo con el fin de evaluar los beneficios técnicos y económicos dentro de un amplio rango de soluciones alternativas, las cuales conducen a metas primarias y secundarias de un proyecto.

Durante el estudio de planeación inicial, los modelos simplificados del sistema de transmisión y la selección de los controladores FACTS son empleados para evaluar un sistema que permita su instalación en una cantidad razonable de tiempo y costo.

El objetivo primordial de los estudios de planeación, es determinar cuál es la solución más apropiada para la implementación del controlador contemplando los riesgos y consideraciones asociadas con las distintas alternativas propuestas.

Los estudios evalúan varias opciones con las cuales muestran la variación de nivel o grado del mérito técnico y económico. Es esencial que los resultados de estos estudios lleven las opciones más viables y disponibles que cumplan con las características primordiales del criterio básico para establecer un plan de acción a futuro. Un resumen del resultado del estudio de planeación debe cumplir y contener los siguientes puntos básicos:

- Una comparación de los beneficios técnicos y económicos de las alternativas propuestas.
- Identificar los puntos de interconexión en el sistema de transmisión y el arreglo para su conexión y desconexión.
- Identificar las contingencias críticas del sistema para condiciones de operación de emergencia normal y anormal.
- Establecer la capacidad de transferencia del sistema de transmisión.
- Asegurar que la representación del sistema y el criterio de fiabilidad pueda ser conocido.
- Identificar los costos del equipo principal y las pérdidas eléctricas.
- Establecer los límites térmicos aceptables y el perfil del voltaje para el sistema de transmisión.
- Identificar las características dinámicas y los límites en estado-estable del controlador FACTS para lograr las metas de estudio.
- Especificar las variables de control en estado-estable y dinámico e identificar su sensibilidad para determinar las metas del proyecto.
- Establecer estrategias para el restablecimiento de fallas en un controlador FACTS
- Proporcionar condiciones iniciales de la red para estudios adicionales.

b) Análisis de los Estudios.

Normalmente comienzan después de que el controlador ha sido seleccionado. Estos estudios brindan más información y confirman la etapa de “Planeación de Estudio” incorporando detalles dentro de modelos para el sistema de transmisión y el controlador que será instalado. La realización de estudios establece la necesidad funcional de diseño de parámetros para los FACTS y forma las bases de especificaciones de requerimientos en el cual se incluye lo siguiente:

- Análisis de estado estable.
- El análisis dinámico.
- Análisis transitorio
- Análisis de armónicos

c) Estudios de Diseño.

Los estudios de diseño requieren coordinación y cooperación cercana entre el operador y el proveedor durante la fase de diseño detallada de un proyecto. Estos estudios usan modelos expandidos del sistema de potencia y del compensador para verificar la función esperada del FACTS para varias condiciones de contingencia en el sistema.

El operador debe verificar sobre la marcha de estos estudios todo lo relacionado con el diseño, incluyendo lo siguiente:

- Flujo de carga.
- Niveles de falla.
- Coordinación de aislamiento.
- Control, relevadores y cuestiones de instrumentación para interfaz.
- Criterios para la operación del diseño.
- Operaciones de arranque.
- Criterios de operación.

Los estudios realizados por el proveedor durante la fase de diseño incluirían lo siguiente:

- Armónicos- Rangos de operación del equipo.
- Comportamiento en estado-estable, dinámico y transitorio del controlador.
- Cuestiones de interfaz.
- Arranque.
- Clasificación de equipo y requerimientos.
- Sobre-tensiones: estado-estable, dinámico y transitorio.
- Fiabilidad
- Disponibilidad.
- Pérdidas.
- Operación en servicio.

d) Estudios de Operación.

Los estudios de operación establecen una pauta para determinar la óptima operación del controlador seleccionado bajo varias consideraciones de la red y son

desarrollados para asistir la operación cuando se presentan cambios en la red a la cual el controlador FACTS está conectado o desconectado.

Típicamente, los modelos simplificados de un controlador son desarrollados para reflejar su operación para estudios de flujo de potencia. Modelos más detallados son desarrollados para evaluar cambios dinámicos en el sistema sobre el transcurso del proyecto, los cuales incluyen:

- Adiciones al sistema.
- Operación en contingencia.
- Cambios en el restablecimiento de fallas.
- Análisis de las condiciones de flujo de potencia del sistema.
- Transferencia de potencia detallada y estrategias de restablecimiento del sistema en caso de disturbios.
- Identificación de los contrastes de operación.
- Acciones de recuperación.
- Pruebas de operación.
- Clasificación de pruebas de fallas.
- Monitoreo y pruebas periódicas.
- Restauración del sistema e implicaciones de fallas del controlador

Los estudios resumidos en las secciones anteriores proporcionan las bases para seleccionar un controlador FACTS específico, los cuales son similares a cualquier estudio de transmisión.

e) Fases de la Implementación.

Después de que la decisión ha sido tomada para instalar un controlador FACTS, la fase de implementación típicamente incluirá:

- Organización del proyecto.
- Programa del proyecto.
- Pre-especificación y factibilidad.
- Especificación técnica definitiva
- Análisis de ofertas.
- Contrato.
- Construcción del proyecto y pruebas operativas.

- Entrega del proyecto.
- Experiencia y retroalimentación de operación.

2.7 Conclusiones.

Este capítulo introduce la tecnología de Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna y los muestra como una de las múltiples alternativas que se tienen, para controlar los parámetros de un SEP con la finalidad de lograr su adecuada y óptima operación y aprovechamiento. Se presentó una descripción general de estos controladores, su clasificación, constitución y comparación con los dispositivos mecánicos convencionales con los que se cuenta para lograr los mismos cometidos. Se puede determinar que técnicamente hablando y totalmente fuera del contexto económico, los controladores basados en electrónica de potencia son una alternativa muy superior en todos los aspectos, (control, velocidad de respuesta, etc.), la cual se encuentran muy por encima de los dispositivos electromecánicos.

También se analizó como los distintos tipos de compensación son capaces de controlar simultanea o individualmente todos los parámetros que afectan el flujo de potencia en un sistema transmisión (voltaje, impedancia y ángulo de fase), logrando de esta manera el máximo aprovechamiento de una línea de transmisión, es importante la habilidad que poseen los controladores para mantener los márgenes de operación transitorios y de estado estable en dichos sistemas.

Cabe mencionar, que el uso de esta tecnología también presenta algunas desventajas, como la inminente generación de armónicos en todos sus modos de operación sobre la red. Por ello es imprescindible la realización de los estudios de implementación considerando a detalle cada una de sus etapas, para la toma de una adecuada decisión y de las consideraciones pertinentes para lograr obtener los resultados deseados.