

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



UBICACION OPTIMA DE BANCOS DE CAPACITORES
EN SISTEMAS DE POTENCIA

T E S I S
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA
PRESENTA:
SERGIO ARRIETA TAMEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. FEBRERO, 2002

URRICACCIÓN OPTIMA DE BANCOS DE CAPACIDADES

EN SISTEMAS DE POTENCIA

TM

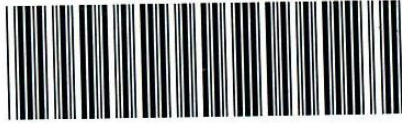
Z5853

M2

FIME

2002

A7



1020147514

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



UBICACION OPTIMA DE BANCOS DE CAPACITORES
EN SISTEMAS DE POTENCIA

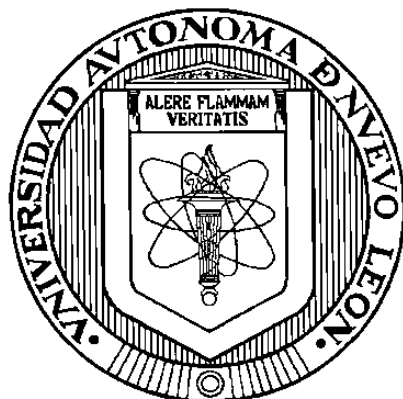
T E S I S
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA
PRESENTA:
SERGIO ARRIETA TAMEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. FEBRERO, 2002

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**UBICACIÓN ÓPTIMA DE BANCOS DE CAPACITORES EN
SISTEMAS DE POTENCIA**

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA

SERGIO ARRIETA TAMEZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.

FEBRERO 2002

975 627

TM
Z5853
.M2
FIME
2002
.A7

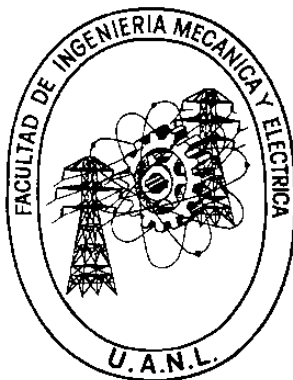


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**UBICACIÓN ÓPTIMA DE BANCOS DE CAPACITORES EN
SISTEMAS DE POTENCIA**

TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

PRESENTA

SERGIO ARRIETA TAMEZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.

FEBRERO, 2002

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Postgrado

Los miembros de comité de tesis recomendamos que la tesis **UBICACIÓN ÓPTIMA DE BANCOS DE CAPACITORES EN SISTEMAS DE POTENCIA**, realizada por el alumno Sergio Arrieta Tamez, matrícula 0448954 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.


El Comité de Tesis



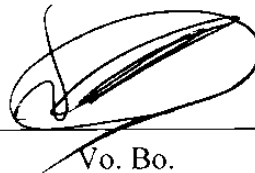
Asesor
Dr. Salvador Acha Daza



Coasesor
Dr. Rogelio Ramírez Barradas



Coasesor
M. C. Juan José Guerrero Garza



Vo. Bo.
M. C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Postgrado

A MI ESPOSA

Bertha Rosa Meza de Arrieta

Por su paciencia, gran apoyo y fuente de superación

A MIS HIJOS

Sergio
Alfredo
Vanessa

Por tenerlos siempre en
mi pensamiento

UBICACIÓN ÓPTIMA DE BANCOS DE CAPACITORES EN SISTEMAS DE POTENCIA

Sergio Arrieta Tamez, Ing.

Profesor Asesor: Salvador Acha Daza, Ph. D.

RESUMEN

Tanto en sistemas de potencia como de distribución, se vuelve muy importante la selección adecuada y la correcta ubicación de la potencia reactiva necesaria, ya sea para corregir el factor de potencia de la carga o para reducir las pérdidas por efecto Joule en las líneas de transporte de la energía eléctrica.

Debido a lo anterior, se hace necesaria la realización de estudios de Ingeniería Eléctrica para encontrar una solución acertada y precisa que conduzca a la localización óptima de los equipos ya mencionados, evitando así problemas graves como son la resonancia y los sobrevoltajes en ciertos puntos del sistema eléctrico. Un factor determinante para llevar a cabo éstos estudios es la modelación de todos los elementos del sistema, habiendo establecido con anterioridad el alcance de los estudios a efectuar. Una modelación adecuada deberá incluir el comportamiento eléctrico de equipos y elementos, como son los generadores, las líneas de transmisión, los transformadores, los reactores y los bancos de capacitores.

Una vez obtenidos los modelos anteriores, se efectúan estudios de resonancia y sobretensión, así como la aplicación de métodos o procedimientos que indiquen el mejor lugar para la ubicación del banco o bancos de capacitores.

En caso de tener compensación serie, con capacitores en las líneas de transmisión, se analizan sus efectos sobre la regulación, así como su impacto en la resonancia del sistema eléctrico. Para el análisis se deben usar métodos que faciliten el desarrollo de los estudios, con el apoyo de técnicas computacionales que agilicen la obtención de la solución al problema. El modelo involucra una serie de ecuaciones cuyo número y complejidad dependerán del tamaño y elementos de la red eléctrica estudiada.

Es importante enfatizar que los estudios mencionados tienen como objetivo primordial el conocer la localización óptima de los bancos de capacitores, para así poder obtener el máximo beneficio posible derivado éste de la instalación apropiada y cumpliendo con las restricciones operativas del sistema eléctrico que se esté analizando.

El trabajo de investigación reporta la experiencia lograda al analizar la problemática de colocar óptimamente capacitores en redes de distribución y redes de subtransmisión, presentando ejemplos de porciones de la red de la División Golfo Norte de la CFE.

ÍNDICE

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.- | Introducción | 1 |
| 1.1.- | Antecedentes del problema | 1 |
| 1.2.- | Importancia del tema | 2 |
| 1.3.- | Investigaciones relevantes realizadas con anterioridad | 4 |
| 1.4.- | Efectos provocados por la aplicación inadecuada de bancos de capacitores | 9 |
| 1.5.- | Resumen | 10 |
| 2.- | Análisis de resonancia y sobretensión por efecto de capacitores shunt | 11 |
| 2.1.- | Resonancia debida a bancos de capacitores shunt | 11 |
| 2.2.- | Determinación del voltaje esperado al conectar bancos de capacitores shunt | 12 |
| 2.3.- | Determinación de la primer frecuencia de resonancia en bancos de capacitores shunt | 16 |
| 2.4.- | Resumen | 19 |
| 3.- | Efectos provocados por bancos de capacitores serie | 20 |
| 3.1.- | Efecto sobre la regulación de voltaje | 20 |
| 3.2.- | Efecto sobre la potencia transmitida | 22 |
| 3.3.- | Efecto sobre las frecuencias de resonancia del sistema | 25 |
| 3.4.- | Resumen | 29 |
| 4.- | Estudio del barrido de frecuencia en sistemas de potencia | 30 |
| 4.1.- | Alcance del modelado del sistema | 30 |
| 4.2.- | Modelado del generador | 30 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.- Modelado de la línea de transmisión | 31 |
| 4.4.- Modelado del transformador | 32 |
| 4.5.- Modelado de bancos de capacitores en derivación | 34 |
| 4.6.- Modelado de bancos de capacitores serie | 34 |
| 4.7.- Métodos simplificados para el barrido de frecuencia | 35 |
| 4.8.- Resumen | 38 |
| 5.- Modelos incrementales para la ubicación óptima de bancos de capacitores | 40 |
| 5.1.- Planteamiento del modelo | 40 |
| 5.2.- Ecuaciones de flujo de potencia real y reactiva | 41 |
| 5.3.- Modelo incremental para bancos de capacitores shunt | 42 |
| 5.4.- Modelo incremental para bancos de capacitores serie | 52 |
| 5.5.- Aplicación de los modelos incrementales de potencia en sistemas eléctricos | 62 |
| 5.6.- Resumen | 69 |
| 6.- Conclusiones y recomendaciones | 70 |
| Referencias | 72 |
| Indice de Figuras | 74 |
| Apéndice A: Catálogo de estructuras utilizadas en líneas | 76 |
| Apéndice B: Incremento de voltaje y orden de resonancia al conectar bancos de capacitores shunt | 79 |
| Apéndice C: Nomenclatura | 82 |

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1.-ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.

La compensación reactiva utilizando bancos de capacitores es una práctica común en los sistemas eléctricos de potencia, estableciendo su problemática principal la determinación del sitio óptimo para su localización, así como el valor en términos de la potencia reactiva, para posteriormente considerar el beneficio técnico-económico.

Este problema ha sido estudiado desde décadas pasadas, efectuando ciertas consideraciones idealizadas, como es el caso de la regla de los 2/3 [7] aplicable a sistemas radiales con el objetivo de minimizar pérdidas y que considera una carga uniformemente distribuída y un calibre de conductor constante a lo largo de la red. Las consideraciones anteriores dan como resultado una localización óptima del banco de capacitores situada a 2/3 partes de la distancia total de la red contada a partir de la fuente. Sin embargo, si ésta regla es aplicada en la práctica, se puede observar un error de hasta un 90% en distancia para ciertos casos extremos y de un 10% para otros casos más cercanos a las consideraciones hechas en el estudio. Esta regla fue mejorada posteriormente por Grainger y Salama [1], desarrollando equivalentes normalizados en los cuales consideraban secciones con diferentes calibres de conductor, pero manteniendo la segunda consideración de carga uniformemente distribuída a lo largo de la red. Pese a esto, continuó arrojando errores cercanos a los mencionados anteriormente.

Un planteamiento más complejo del problema es para aquéllos sistemas de potencia anillados o enlazados con otros, en los cuáles ya no es posible aplicar la regla mencionada en el párrafo anterior y que requiere de una serie de estudios especializados para la determinación de la localización óptima del compensador de potencia reactiva, considerando la regulación, el problema de resonancia y la minimización de pérdidas en el sistema eléctrico.

1.2.-IMPORTANCIA DEL TEMA.

Diversos estudios han indicado que de un 2% a un 4% de la potencia real total generada en los sistemas eléctricos de potencia es consumida como pérdidas I^2R debido al efecto Joule. Las corrientes debidas al flujo de potencia reactiva contribuyen considerablemente con éste efecto, sin embargo; las pérdidas producidas por las corrientes reactivas pueden ser reducidas por la instalación de capacitores shunt o en derivación. En adición a la reducción de pérdidas, una instalación efectiva de bancos de capacitores libera capacidad adicional de potencia aparente en los elementos del sistema además de proveer un mejor perfil de voltaje.

Alrededor del 90% de las pérdidas totales de los sistemas eléctricos es generada a través de las líneas de transporte de la energía eléctrica, y aproximadamente un 40% del 90% mencionado es causado por el flujo de potencia reactiva. La Figura 1.1 muestra la variación de las pérdidas debidas al flujo de reactivos a través de las líneas como una función del voltaje en el nodo de recepción y del desfase angular entre los nodos de envío y de recepción; considerando que el voltaje en el nodo de envío es igual a 1p.u., 3 fases de conductor 795 ACSR y 1 hilo de guarda AG-5/16".

Si se conocen los resultados del estudio de flujos de potencia, se está en posibilidad de estimar las pérdidas por efecto del flujo de reactivos utilizando la

gráfica correspondiente a las características de la línea de transmisión bajo estudio.

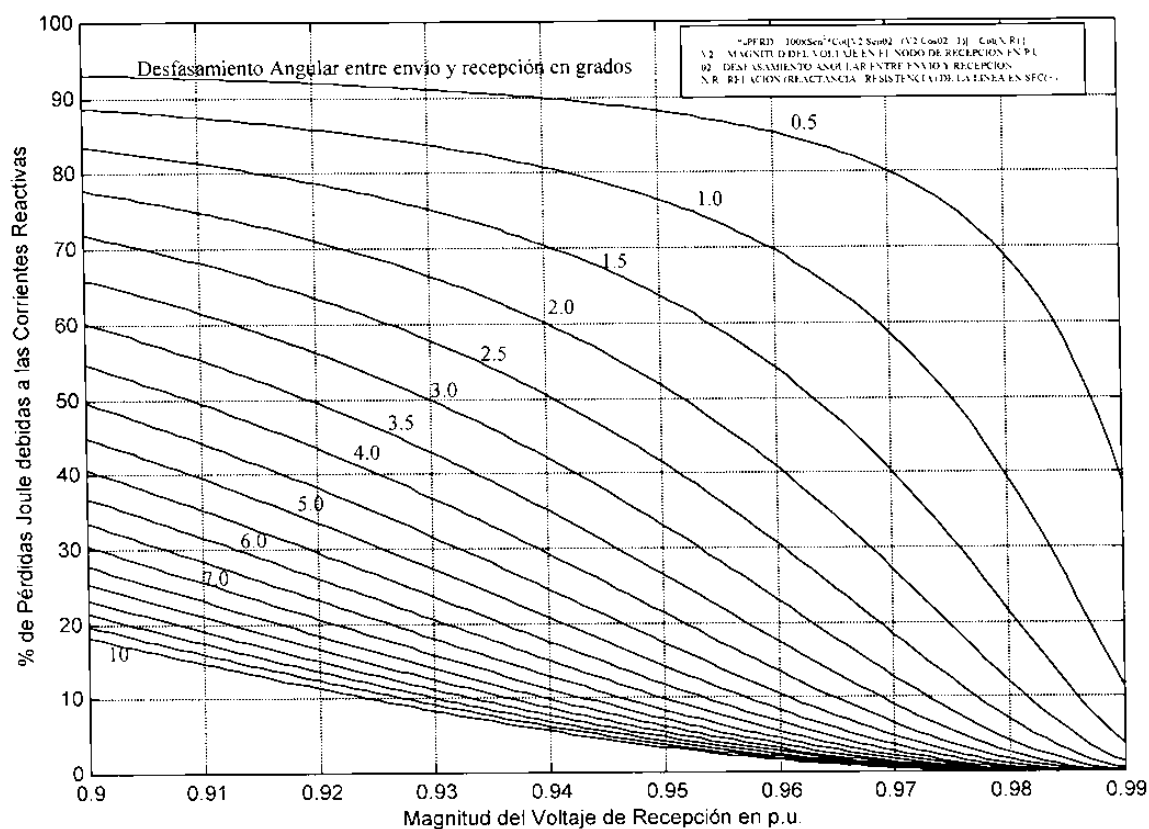


Fig. 1.1 Variación de las Pérdidas debidas a las Corrientes Reactivas

Se puede tomar como ejemplo los siguientes resultados:

KV1=114.7 ang(-2⁰) Voltaje en el nodo de envío

KV2=110.1 ang(-5⁰) Voltaje en el nodo de recepción

Pérdidas totales en la línea= 0.65 MW

Línea de Subtransmisión 115KV 3Fases 795ACSR 1Hilo de Guarda AG-5/16"

Para hacer uso de la gráfica, se deben cambiar las referencias de ángulos y voltajes tomando como base los valores correspondientes al nodo de envío:

$$KV1 = 1 \text{ p.u. ang}(0^0)$$

$$KV2 = (110.1/114.7) \text{ p.u. ang}[-5^0 - (-2^0)] = 0.9598 \text{ p.u. ang}(-3^0)$$

Entrando a la gráfica de la Figura 1.1 con $KV2 = 0.9598 \text{ p.u.}$ y $\theta_2 = 3^0$

% Pérdidas debido al flujo de potencia reactiva = 24%

Por lo tanto, las pérdidas producidas por el flujo de la potencia reactiva a través de la línea es de:

$$(0.24)(0.65) = 0.156 \text{ MW}$$

La diferencia de $(0.65 - 0.156) = 0.494 \text{ MW}$ son pérdidas producidas por el flujo de potencia activa a través de la línea.

1.3.-INVESTIGACIONES RELEVANTES REALIZADAS CON ANTERIORIDAD.

La literatura publicada describiendo algoritmos para la localización de capacitores es abundante. El Subcomité de Capacitores del Comité de Transmisión y Distribución del IEEE ha publicado 10 bibliografías en capacitores de potencia de 1950 a 1980. Por otro lado, el grupo de trabajo encargado de la administración de VARs del Subcomité del IEEE de Control del Sistema ha publicado otras bibliografías de Potencia Reactiva y Control de Voltaje en Sistemas de Potencia. El número total de publicaciones obtenido de la lista de éstas bibliografías es alrededor de 400, y muchos de éstos documentos tratan específicamente sobre el problema de la localización óptima de capacitores.

Por lo tanto, el estudio detallado de toda la literatura sobre localización de capacitores se convierte en un problema de grandes dimensiones.

En éste trabajo de tesis se listan las técnicas de solución para el problema de la localización de capacitores [1], las cuales han sido clasificadas en cuatro categorías: analíticas, de programación numérica, heurísticas, y las basadas en inteligencia artificial.

Categoría I: Métodos Analíticos

Los métodos analíticos involucran el uso de cálculos para determinar el máximo beneficio de la localización de un capacitor. La función de beneficio puede ser encontrada como:

$$S = K_E \Delta E + K_P \Delta P - K_C C \quad (1.1)$$

donde $K_E \Delta E$ y $K_P \Delta P$ expresan respectivamente el ahorro de energía y la reducción de pérdidas para una determinada localización del capacitor, y $K_C C$ representa el costo de instalación del capacitor. Según [1] los pioneros de la localización óptima de capacitores, Neagle y Samson en 1956, Cook en 1959, Schmill en 1965, Chang en 1969, y Bae en 1978, todos usaron métodos analíticos para maximizar el beneficio de la función de costo mencionada arriba. A pesar de que se obtenían resultados con formas de solución cortas, éstos métodos se basaban en consideraciones irreales de alimentadores con calibre de conductor constante y carga uniformemente distribuída. Esto dio paso a que la famosa regla de los "dos tercios" fuera establecida. La regla de los "dos tercios" para una máxima reducción de pérdidas, establece que un capacitor con rango de 2/3 del pico de carga reactiva debe instalarse a una posición de 2/3 de la distancia total a lo largo del alimentador.

Esos métodos analíticos son relativamente sencillos de estudiar e implementar. A pesar de las consideraciones irreales hechas en la regla de los "dos tercios", algunas compañías hoy en día tienen implementados diversos programas para la localización de capacitores basados en ésta regla, y algunos fabricantes de capacitores mencionan ésta regla en sus guías de aplicación.

Con el fin de obtener resultados más exactos, el modelo del alimentador fue modificado. Grainger en el año 1981 y Salama en 1985 desarrollaron modelos equivalentes de alimentadores normalizados en los cuales consideraban secciones con diferentes calibres de conductor y un modelo de la carga que no estaba uniformemente distribuída. Grainger incluyó también en publicaciones posteriores algoritmos que consideraban la conexión/desconexión de capacitores, proporcionando un modelo más realista de alimentadores radiales en el cual se consideraba la variación de carga en el sistema.

Grainger demostró la importancia del modelo apropiado para el sistema y de la consideración de variación de carga, indicando cómo la regla de los "dos tercios" podía ser altamente inexacta y dando como respuesta, en ciertas ocasiones, resultados adversos.

Los métodos analíticos más recientes son más exactos que los primeros métodos utilizados, pero requieren de mayor información del sistema eléctrico, así como de un mayor tiempo de estudio e implementación.

Categoría II: Métodos de Programación Numérica.

A medida que la capacidad de cómputo se ha incrementado para el ingeniero de planeación y de análisis, los métodos de programación numérica son formulados para resolver problemas de optimización. Los métodos de programación numérica generalmente utilizan técnicas iterativas para maximizar

o minimizar una función objetivo que contempla distintas variables de decisión. Los valores de las variables de decisión deben satisfacer, además; una serie de restricciones. Para la localización óptima de capacitores, la función de ahorro puede ser la función objetivo, y las localizaciones, capacidades, número de capacitores, voltajes en las barras, y las corrientes serían las variables de decisión; las cuales deben cumplir con ciertas restricciones operativas. Usando métodos de programación numérica, el problema de localización de capacitores puede ser formulado como sigue:

$$\begin{aligned} \text{MAX } S &= K_L \Delta L - K_c C & (1.2) \\ \text{Sujeto a } \Delta V &\leq \Delta V_{\text{MAX}} \end{aligned}$$

donde $K_L \Delta L$ es el ahorro total que incluye ahorro de energía, reducción de pérdidas y capacidad liberada, $K_c C$ es el costo de instalación de los capacitores, y ΔV es el cambio en el voltaje al conectar el capacitor que no debe exceder un máximo de ΔV_{MAX} .

Duran [1], en el año 1968, fue el primero en usar una aproximación de la técnica de programación dinámica para el problema de localización de capacitores. La formulación es simple y sólo considera la reducción de pérdidas de energía y listados de capacitores para los tamaños factibles. En 1983, Fawzi [1], continuó el trabajo de Duran, incluyendo la liberación de capacidad en KVA en la función de ahorro. En ese mismo año, Ponnaivaikko y Rao [1], usaron un método numérico llamado "Método de Variaciones Locales", que expandió el problema a incluir los efectos de crecimiento de carga, y capacitores switchables para la variación de la misma. El nivel de sofisticación y la complejidad de los modelos se incrementó en orden cronológico con base al desarrollo de la capacidad computacional. Hoy en día, el poder computacional es relativamente

barato y muchos paquetes de programación numérica permiten la implementación de algoritmos como los mencionados anteriormente.

Categoría III: Métodos Heurísticos.

Los métodos heurísticos son desarrolladas por medio de intuición y experiencia. Las reglas heurísticas proporcionan estrategias rápidas y prácticas que reducen el exhaustivo espacio de búsqueda que puede requerir un método analítico de optimización, permitiendo llegar a una solución muy cercana a la óptima obtenida con un método más sofisticado. En 1994, Abdel-Salam [1], propuso una técnica heurística que consistía en identificar secciones del sistema que tuvieran las pérdidas más altas debido a las corrientes de carga reactiva y después identificar los nodos más sensibles, en los cuales debería tenerse el efecto más grande de reducción de pérdidas del sistema. Los tamaños de los capacitores instalados en los nodos más sensibles eran determinados maximizando la reducción de pérdidas de potencia utilizando compensación reactiva con capacitores. En 1997, M. Chis [1], mejoró el método de Abdel-Salam determinando los nodos más sensibles directamente, considerando la configuración completa de todo el sistema, y optimizando los tamaños de los capacitores con base en la maximización del ahorro neto consistente en ahorro de energía y la reducción de pérdidas. Además, Chis también incluyó en sus estudios la variación de carga del sistema eléctrico.

A pesar de que los métodos heurísticos son fáciles de estudiar y simples para ser implementados, en comparación con los métodos analíticos y de programación numérica, los resultados obtenidos no garantizan que sean la solución óptima al problema.

Categoría IV: Métodos Basados en Inteligencia Artificial.

La reciente popularidad en el uso de técnicas de inteligencia artificial ha proporcionado recursos para investigar su uso y aplicaciones a la ingeniería de potencia. Algunas otras aplicaciones son por medio de los algoritmos genéticos, los sistemas expertos y las redes neuronales artificiales, entre otras. En 1993, Boone y Chiang [1], desarrollaron un método basado en un algoritmo genético para determinar la localización óptima y el tamaño óptimo de los capacitores. En 1995, Salama [1], desarrolló un sistema experto para el control de potencia reactiva que incluye la localización de capacitores basado en sus métodos analíticos desarrollados en 1985. En 1990, Santoso y Tan [1], usaron una red neuronal artificial para el control óptimo de capacitores switchables. En dicho trabajo se usaron dos redes neuronales, una para pronosticar el perfil de carga con base en una serie de valores de carga medidos previamente en varias barras, y la segunda red era usada para seleccionar la posición óptima de los taps de los bancos de capacitores basada en el perfil de carga predecido por la primera red neuronal. Cualquiera de los métodos anteriores de inteligencia artificial pueden implementarse utilizando herramientas ya desarrolladas y que se encuentran disponibles comercialmente.

1.4.- EFECTOS PROVOCADOS POR LA APLICACIÓN INADECUADA DE BANCOS DE CAPACITORES.

Antes de instalar un capacitor en un sistema eléctrico es necesario determinar su tamaño y localización óptimos, ya que de no hacerlo se podrían producir efectos graves que pueden llegar a dañar tanto al banco de capacitores como a equipos cercanos a él.

Los efectos que pueden producirse debido a lo mencionado en el párrafo anterior son: la resonancia con el sistema eléctrico, las sobretensiones arriba del

máximo permisible, resonancia con frecuencias de corrientes armónicas que estén siendo inyectadas al sistema, incremento de pérdidas "Joule" con beneficios contrarios para el ahorro de energía. Para que la instalación del capacitor sea óptima y adecuada, debe preverse que no se presenten los efectos mencionados garantizando así que su operación será eficiente y confiable. Así mismo, es necesaria la revisión de las condiciones operativas de los capacitores instalados en el sistema cada vez que se realicen cambios en la topología de la red y en el tipo de carga, ya que éstos cambios pueden producir condiciones de operación indeseables sobre capacitores que en un principio fueron instalados óptimamente.

El análisis de los efectos producidos por la selección y aplicación inadecuada de capacitores requiere de una serie de estudios elaborados y sistematizados, los cuáles son el objeto de ésta tesis y se presentan detalladamente en capítulos posteriores.

1.5.-RESUMEN.

En éste capítulo se ha presentado de manera sucinta la importancia que representa la compensación reactiva con base a bancos de capacitores en los sistemas eléctricos de potencia. Se han repasado metodologías desarrolladas a través de las últimas cuatro décadas y se ha analizado la problemática que se puede presentar debido a la instalación, con base a procedimientos intuitivos, de capacitores sin un respaldo teórico que indique el punto óptimo para su localización.

También se enfatiza el beneficio obtenido en los últimos años a raíz del crecimiento del poder computacional a un menor costo, lo cual ha permitido contar con importantes herramientas para el desarrollo en el campo de la ingeniería eléctrica de potencia.

CAPITULO 2

ANÁLISIS DE RESONANCIA Y SOBRETENSIÓN POR EFECTO DE CAPACITORES SHUNT

2.1.-RESONANCIA DEBIDA A BANCOS DE CAPACITORES SHUNT.

En los sistemas eléctricos de potencia se utilizan bancos de capacitores para efectuar la compensación reactiva y mejorar el perfil de voltaje en determinados nodos de la red, sin embargo; la conexión en derivación de éstos equipos puede dar lugar a condiciones de resonancia en serie o en paralelo lo que eventualmente amplifica los problemas de armónicas presentes en el sistema.

La resonancia en paralelo [9] se manifiesta como una impedancia grande al flujo de armónicas y ocurre cuando la reactancia inductiva del sistema equivalente, en el punto de conexión del capacitor, es igual a la reactancia del propio capacitor para un valor de frecuencia determinado. Si la combinación del capacitor y la impedancia equivalente del sistema da como resultado una condición de resonancia en paralelo a una frecuencia cercana o igual a alguna armónica inyectada a la red, ésta corriente armónica excitará el circuito "tanque" dando origen a una corriente oscilatoria amplificada, reflejo del intercambio de la energía almacenada en la inductancia y la energía almacenada en el capacitor. Esta alta corriente oscilatoria puede causar la distorsión del voltaje en algunos puntos del sistema eléctrico, así como provocar interferencia telefónica cuando las líneas de transmisión estén próximas a circuitos de telecomunicaciones.

La resonancia en serie [9] es el resultado de la combinación serie del capacitor y la inductancia de alguna línea o de algún transformador. Esta característica de resonancia presenta una trayectoria de baja impedancia a las corrientes armónicas y tiende a "atrapar" algunas corrientes armónicas con las cuales esté sintonizado el circuito LC resultante. La resonancia serie puede ocasionar niveles altos de distorsión del voltaje en el sistema, sin embargo, éste tipo de resonancia es menos común que la resonancia paralelo y cuando se presenta está mas relacionada con el problema de ferresonancia o con el de resonancia subsíncrona.

En la Figura 2.1 se muestran los diagramas de impedancias correspondientes a los dos tipos de resonancia descritos.

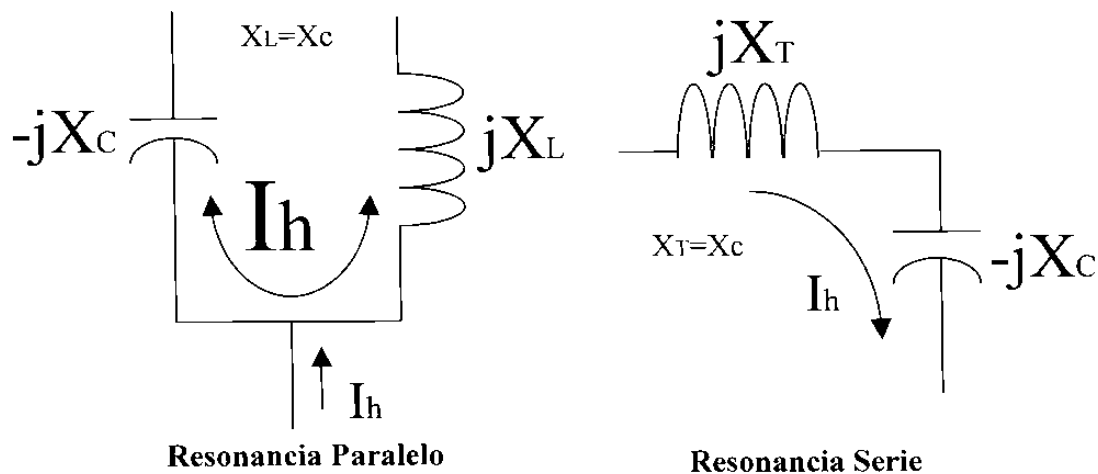


Fig. 2.1 Circuitos para análisis de resonancia

2.2.-DETERMINACION DEL VOLTAJE ESPERADO AL CONECTAR BANCOS DE CAPACITORES SHUNT.

En el Capítulo 1 se analizó la reducción de pérdidas por efecto Joule como resultado de la compensación reactiva en un sistema eléctrico. Esta

reducción de pérdidas en las líneas de transmisión hace que el perfil de voltaje en los distintos puntos del sistema eléctrico se incremente, sobre el valor inicial que se tenía antes de conectar el capacitor. Se alcanza la máxima elevación de tensión en el punto de conexión del capacitor mismo. Debido a lo anterior, es importante estudiar éste fenómeno para asegurar de que no se sobrepasa el límite máximo de elevación de tensión permitido en el sistema, una vez conectado el capacitor. Para esto es necesario obtener una expresión que ayude a determinar, en forma rápida y sencilla, el máximo voltaje que se presentará en la red; el cual corresponderá, como ya se mencionó, al punto donde se conectará el capacitor. Si se supone el equivalente Thévenin, de la Figura 2.2, en el punto de conexión del capacitor:

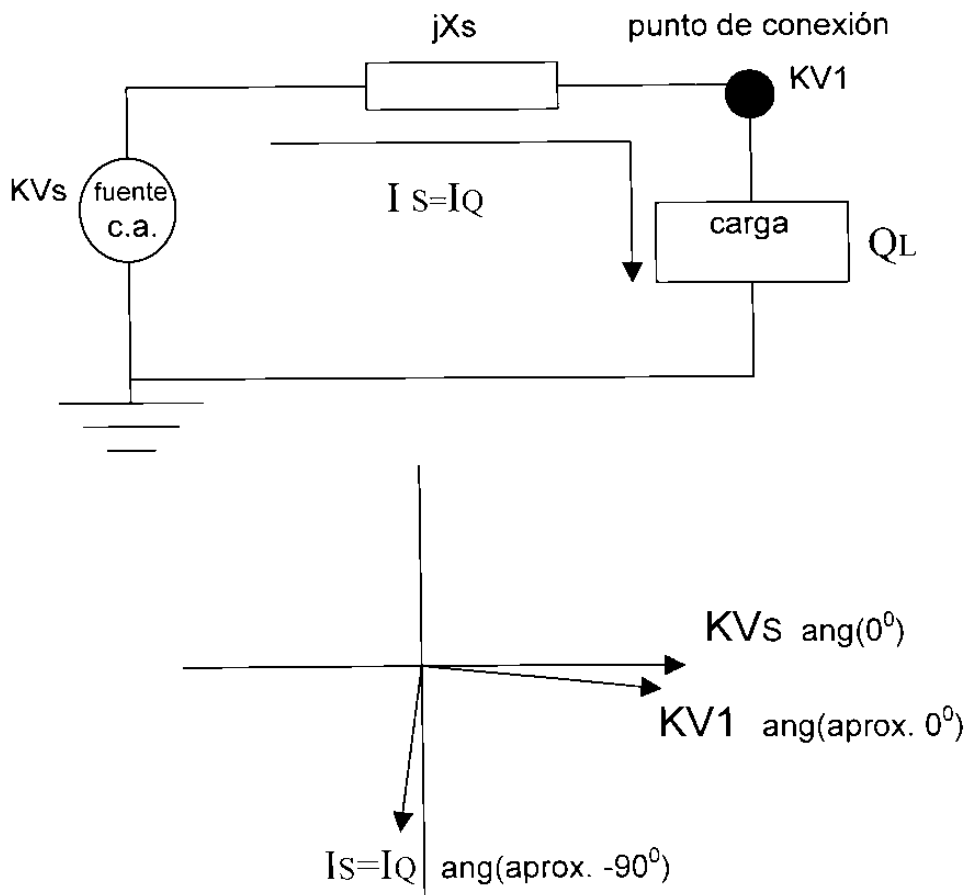


Fig. 2.2 Equivalente de Thévenin en el punto de conexión del capacitor

KVs = Voltaje de la fuente de línea a tierra en kilovolts

$KV1$ = Voltaje de línea a tierra en el punto de conexión, antes de conectar el capacitor expresado en kilovolts.

jXs = Reactancia del sistema equivalente de Thévenin en el punto de conexión

Del diagrama unifilar se puede obtener:

$$KV1 = KVs - (-jI_s jXs/1000) = KVs - (I_s/1000)(KVLL^2/MVA_{cc3f}) \quad (2.1)$$

Donde: $KVLL$ = Voltaje de línea a línea del sistema en kilovolts

Una vez conectado el capacitor se tiene lo siguiente:

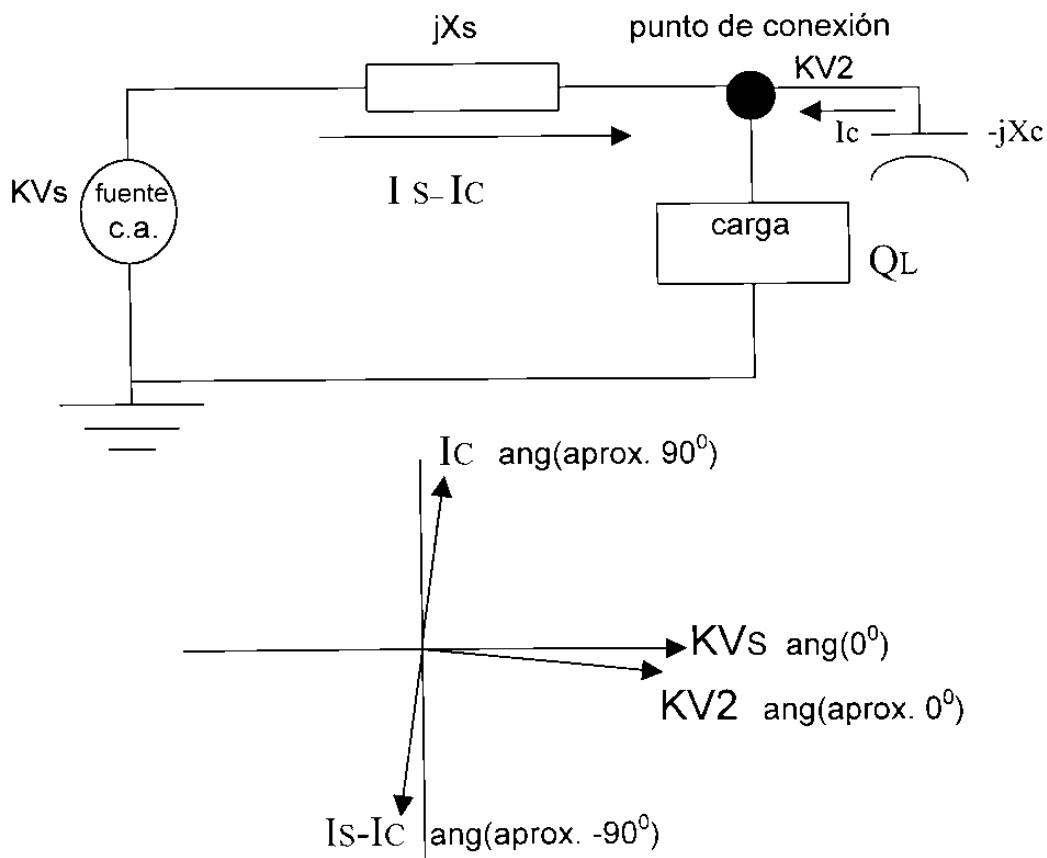


Fig. 2.3 Circuito equivalente con capacitor conectado

Se considera que la reactancia equivalente del sistema, al conectar el capacitor, no cambia significativamente respecto a la que se tiene sin el capacitor, ya que la reactancia del banco es mucho más grande que la del sistema equivalente de Thévenin.

También se podrá observar en el siguiente desarrollo, que sólo se analiza el flujo de la corriente reactiva por ser la que afecta significativamente el voltaje. Se obtiene, por lo tanto, una ecuación que en la práctica arroja resultados muy cercanos a los reales, pero en forma rápida y sencilla y con un grado de error mínimo.

$$KV2 = KV_s - (-jI_s + jI_c)(jX_s/1000)$$

$$KV2 = KV_s - (I_s)(X_s/1000) + (I_c)(X_s/1000) \quad (2.2)$$

Sustituyendo (2.1) en (2.2)

$$KV2 = KV1 + (I_c)(X_s/1000)$$

$$KV2 = KV1 + (1/1000)[(MVA_{cap} \times 1000)/(1.732 \times KV_{LL})](KV_{LL}^2/MVA_{cc3f})$$

$$KV2 = KV1 + (KV_{LL} / 1.732)(MVA_{cap}/MVA_{cc3f}) \quad (2.3)$$

En la ecuación (2.3) se observa que al voltaje KV1 el cual se tiene antes de conectar el capacitor se le suma otro voltaje, el cual es representado como un porcentaje del voltaje de línea a tierra del sistema. Este porcentaje del voltaje está dado por la relación que resulta de dividir la potencia trifásica del capacitor, entre la potencia de corto circuito trifásico del sistema equivalente de Thévenin en el punto de conexión.

Por lo tanto, si se desea saber el porcentaje de incremento de voltaje máximo en el sistema eléctrico al conectar un banco de capacitores, se puede utilizar la expresión (2.4).

$$\% \Delta V = (MVA_{cap}/MVA_{cc3f}) \times 100 \quad (2.4)$$

donde:

MVA_{cap} = Potencia trifásica del banco de capacitores en MVA.

MVA_{cc3f} = Potencia de corto-circuito trifásico en el punto de conexión del banco de capacitores expresada en MVA.

2.3.-DETERMINACION DE LA PRIMER FRECUENCIA DE RESONANCIA EN BANCOS DE CAPACITORES SHUNT.

Cuando un capacitor shunt es conectado a un punto de un sistema eléctrico se puede producir una condición de resonancia para distintos valores de frecuencia [8], dependiendo éstas del contenido armónico del propio sistema, así como de los parámetros de impedancia tanto del sistema como del capacitor.

Como ya se mencionó en la Sección 2.1, la resonancia paralelo presenta un camino de alta impedancia al paso de las corrientes armónicas del sistema. Este comportamiento producirá múltiples incrementos de impedancia, en el punto de conexión del capacitor, para distintos valores de frecuencia de las corrientes armónicas manejadas por la red eléctrica; tal como lo muestra la Figura 2.4. Sin embargo, el principal interés del análisis es sobre los incrementos de impedancia a frecuencias cercanas a la fundamental, debido a los efectos indeseables que se producen sobre el sistema eléctrico.

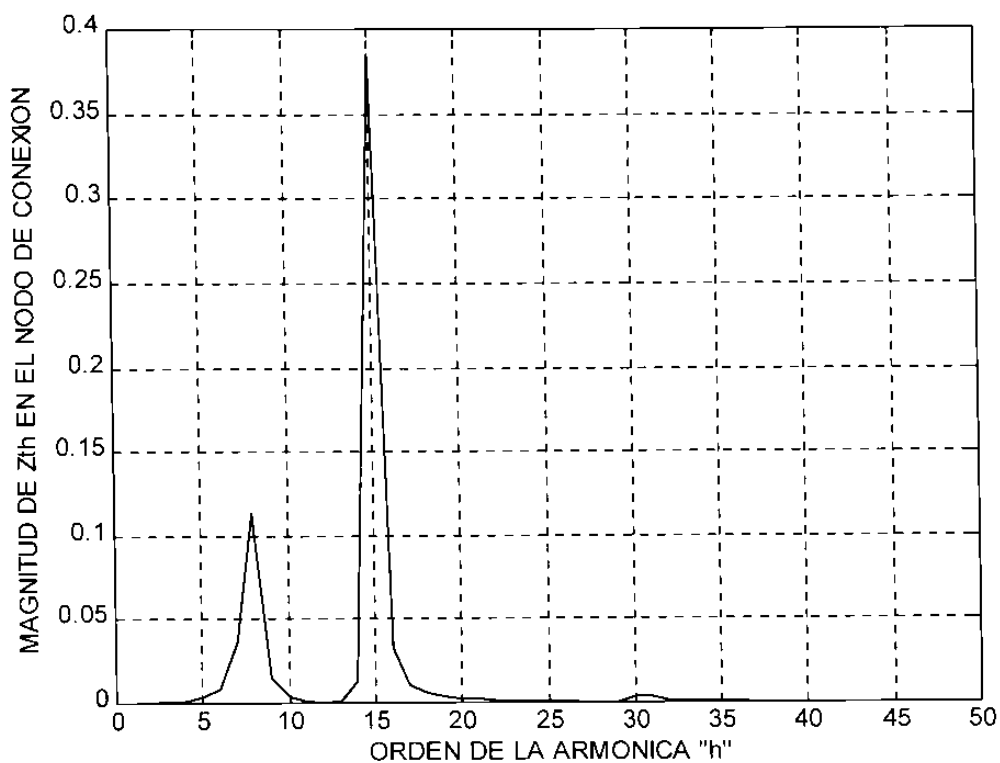


Fig. 2.4 Magnitud de impedancia equivalente en el nodo de conexión

Si se desea conocer la frecuencia correspondiente al primer pico de impedancia, se parte del concepto de que para una condición resonante la reactancia inductiva equivalente de Thévenin del sistema debe ser igual a la reactancia del capacitor [13].

$$X_{L_r} = X_{C_r}$$

$$\omega_r L = 1/\omega_r C$$

$$\omega_r^2 = 1/LC$$

$$\omega_r = \pm \sqrt{1/LC}$$

(2.5)

En la ecuación (2.5) se puede observar que se tienen dos raíces, pero se toma la de signo positivo para las condiciones reales de operación del sistema eléctrico.

$$\omega_r = \sqrt{1/LC} \text{ rad/seg} \quad (2.6)$$

Como $\omega_r = 2\pi f_r$

$$f_r = (\sqrt{1/LC})(1/2\pi) \text{ Hz} \quad (2.7)$$

Si lo que se desea conocer es la frecuencia de resonancia como un múltiplo de la frecuencia fundamental "f", la ecuación (2.7) queda como:

$$h_r = (\sqrt{1/LC})(1/2\pi f) \text{ p.u.} \quad (2.8)$$

Como $L = (X_L)/(2\pi f)$ y $C = 1/(2\pi f X_C)$

$$h_r = \sqrt{X_C/X_L} \text{ p.u.} \quad (2.9)$$

donde:

X_C = reactancia del banco de capacitores a frecuencia fundamental

X_L = reactancia equivalente de Thévenin a frecuencia fundamental en el punto de conexión del banco de capacitores

Las reactancias X_C y X_L pueden estar representadas en valores reales (Ω), o en p.u. referidos a la misma base de impedancia.

Además, como $X_c=(KVLL)^2/MVA_{cap}$ y $X_L=(KVLL)^2/MVA_{cc3f}$

$$h_r = \sqrt{(MVA_{cc3f} / MVA_{cap})} \quad \text{p.u.} \quad (2.10)$$

donde:

MVA_{cap} = Potencia trifásica del banco de capacitores en MVA.

MVA_{cc3f} = Potencia de corto-circuito trifásico en el punto de conexión del banco de capacitores expresada en MVA.

2.4.-RESUMEN.

En las Secciones 2.1 a 2.3 de éste capítulo se analizaron los efectos de resonancia y sobretensión que se producen en un sistema eléctrico tras la instalación de bancos de capacitores shunt o en derivación. También se desarrollaron expresiones analíticas que permiten, en una forma sencilla y rápida, conocer valores indicadores de la magnitud de dichos efectos, con lo cual se facilita mayormente la toma de decisiones para efectuar medidas preventivas y/o correctivas dentro de la operación y el control del sistema eléctrico analizado.

CAPITULO 3

EFFECTOS PROVOCADOS POR BANCOS DE CAPACITORES SERIE

3.1.-EFECTO SOBRE LA REGULACIÓN DE VOLTAJE.

Los capacitores serie se han utilizado durante años en una cantidad limitada de circuitos de subtransmisión y de distribución, ya que requieren de un diseño más especializado que los capacitores en derivación y además su rango de aplicación es más restringido.

Un capacitor serie compensa la reactancia inductiva de la línea en donde está insertado, provocando que la línea aparente ser más corta desde el punto de vista eléctrico. Este efecto del capacitor serie reduce la caída de tensión provocada por la reactancia inductiva de la línea al circular un flujo de potencia a través de ella.

Para ciertas aplicaciones, es mejor idealizar al capacitor serie como un regulador de voltaje que presenta una elevación de tensión proporcional a la magnitud y al factor de potencia de la corriente que maneja en un instante determinado. Esta es la diferencia fundamental entre los efectos de un capacitor serie y un capacitor shunt.

El efecto de un capacitor serie de reducir la caída de tensión [7] se muestra en las Figuras 3.1 y 3.2. La caída de tensión a través de una línea simplificada, Figura 3.1, se puede encontrar en forma aproximada como:

$$V \approx (I)(R) \cos(\varphi) + (I)(X_L) \sin(\varphi) \quad (3.1)$$

donde:

I = magnitud de la corriente a través de la línea
 R = resistencia de la línea
 X_L = reactancia inductiva de la línea
 φ = ángulo del factor de potencia de la corriente

Con un capacitor serie de reactancia X_C insertado en la línea, Figura 3.2, la ecuación (3.1) se modifica de la siguiente manera:

$$V \approx (I)(R) \cos(\varphi) + (I)(X_L - X_C) \sin(\varphi) \quad (3.2)$$

O simplemente $I R \cos(\varphi)$ para el caso en que la reactancia capacitiva X_C sea igual a la reactancia inductiva X_L , aunque en la mayoría de las aplicaciones X_C representa un porcentaje de X_L .

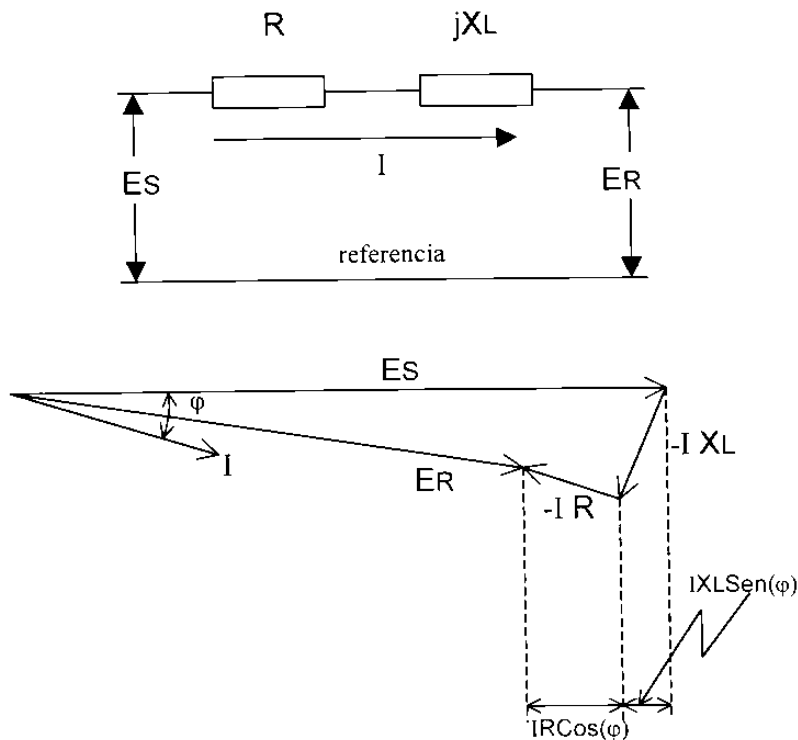


Fig. 3.1 Circuito de transmisión y diagrama fasorial

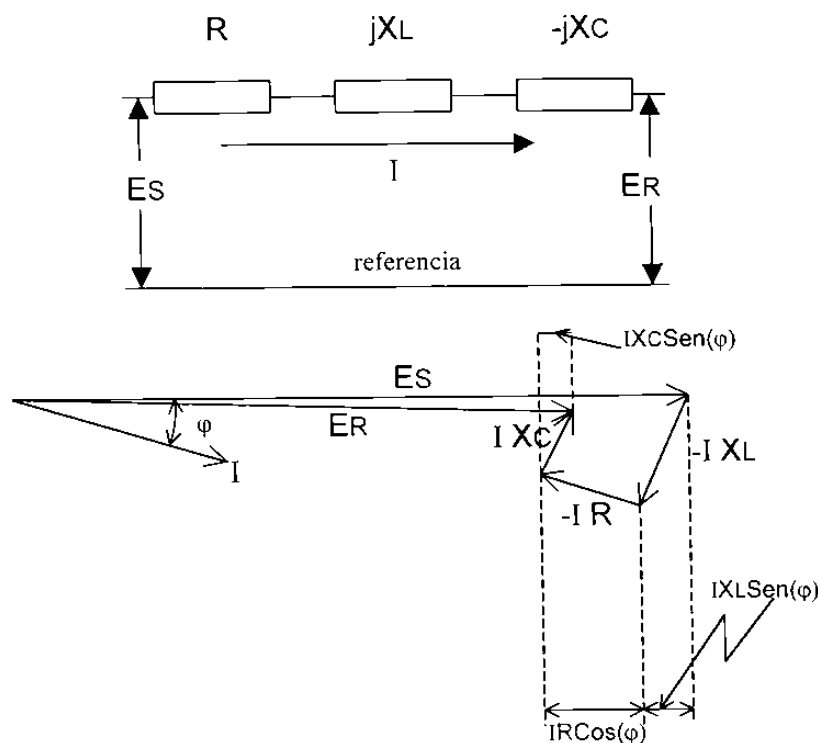


Fig. 3.2 Esquema de compensación serie y diagrama fasorial

3.2.-EFECTO SOBRE LA POTENCIA TRANSMITIDA.

Los capacitores serie además de producir una reducción del porcentaje de regulación de voltaje en las líneas, también pueden ser usados para cambiar la división de la carga entre líneas que se encuentran trabajando en paralelo.

El flujo de potencia que transportan dos líneas trabajando en paralelo se puede obtener mediante la siguiente expresión, con base en la Figura 3.3.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= S_{\text{total}} \left(\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) \\
 S_2 &= S_{\text{total}} \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

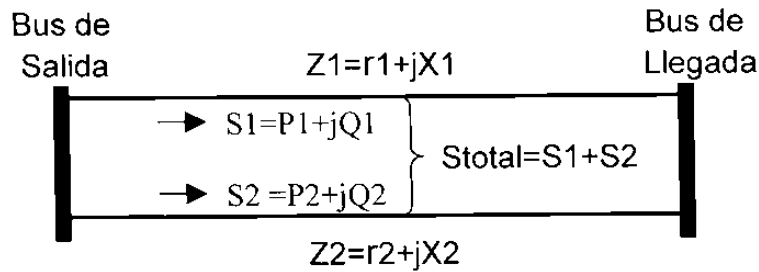


Fig. 3.3 Esquema de dos líneas trabajando en paralelo

Si se tiene una línea, con un conductor cuyo calibre es relativamente grande, trabajando en paralelo con otra que posee un conductor de calibre menor que la primera, resulta imposible cargar la segunda línea sin haber sobrecargado antes la línea con conductor mas grueso. En una situación como la anterior existen dos posibles soluciones, utilizar un transformador desfasador para regular la división del flujo de potencia real o también puede utilizarse un capacitor serie para compensar en un cierto valor la reactancia inductiva de la línea con conductor mas delgado; reduciendo así su reactancia inductiva. Este efecto tiende a igualar los flujos de potencia tanto real como reactiva en ambas líneas, dependiendo éste último del porcentaje de compensación serie que se aplique en el esquema.

El porcentaje de compensación serie es un indicativo del porcentaje de reactancia inductiva de la línea que está siendo compensada mediante la aplicación del capacitor serie y cuyo valor se puede obtener como:

$$FC(\%) = \frac{X_C}{X_L} \times 100 \quad (3.4)$$

Despejando para S_{total} de las ecuaciones en (3.3) e igualándolas entre sí se tiene la expresión (3.5):

$$S1 \begin{pmatrix} Z1 + Z2 \\ Z2 \end{pmatrix} = S2 \begin{pmatrix} Z1 + Z2 \\ Z1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Arreglando la ecuación (3.5) en forma adecuada se tiene que:

$$\frac{S1}{S2} = \frac{Z2}{Z1} \quad (3.6)$$

Si consideramos que las resistencias de los conductores de ambas líneas tienen valores pequeños como para ser despreciados, la ecuación (3.6) queda:

$$\frac{S1}{S2} = \frac{X2}{X1} \quad (3.7)$$

Si se conoce la relación de distribución de flujo deseada $S1/S2$ a través de las dos líneas, se conoce también la relación de reactancias $X2/X1$ necesaria para lograr la distribución de flujo en una proporción $S1/S2$. Una vez que se tiene la relación de reactancias necesaria, se puede obtener la reactancia correspondiente a la línea con mayor reactancia inductiva y si se resta el valor obtenido al de la reactancia original de la misma línea se obtiene la reducción en reactancia de la línea. Si ésta reducción de reactancia se divide entre la reactancia original de la línea, se tiene el factor de compensación serie necesario para lograr la distribución de flujo deseada. Este caso se puede ilustrar para los siguientes datos de la Figura 3.4.

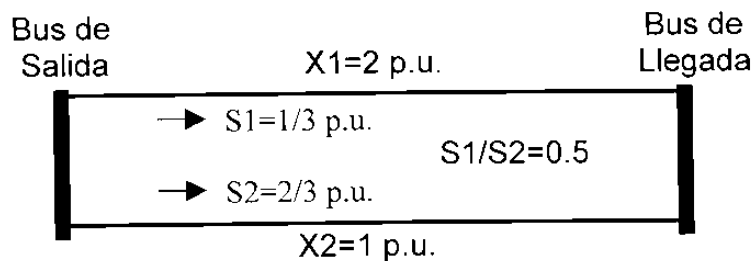


Fig. 3.4 Datos para ejemplo

Por ejemplo, si la distribución deseada de flujo tiene una relación de

$$\frac{S1}{S2} = 0.9, \text{ se tiene que:}$$

$$\frac{X2}{X1} = 0.9 \quad \text{relación necesaria de reactancias}$$

Despejando:

$$X1 = \frac{X2}{0.9} = \frac{1}{0.9} = 1.111 \text{ p.u}$$

De aquí se puede obtener el factor de compensación serie necesario en la línea 1:

$$FC = \frac{(2 - 1.111)}{2} = 0.4445 = 44.45\%$$

3.3.-EFECTO SOBRE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA DEL SISTEMA.

Un capacitor que es conectado en serie en una línea de transporte de energía y que forma parte de un sistema eléctrico, modificando en mayor o menor grado la reactancia inductiva de la línea, dependiendo del factor de compensación aplicado, dando como resultado que la magnitud de la impedancia serie de la línea también se vea modificada en una cantidad determinada. El circuito equivalente de la línea de transmisión una vez conectado el capacitor serie y que representa la variación de la impedancia en función de las frecuencias manejadas por la misma se muestra en la Figura 3.5. Se observa cómo la reactancia inductiva de la línea es directamente proporcional a su valor a frecuencia fundamental multiplicado por el orden de la frecuencia utilizada. En cambio, la reactancia capacitiva es directamente

proporcional al valor a frecuencia fundamental e inversamente proporcional al orden de la frecuencia utilizada.

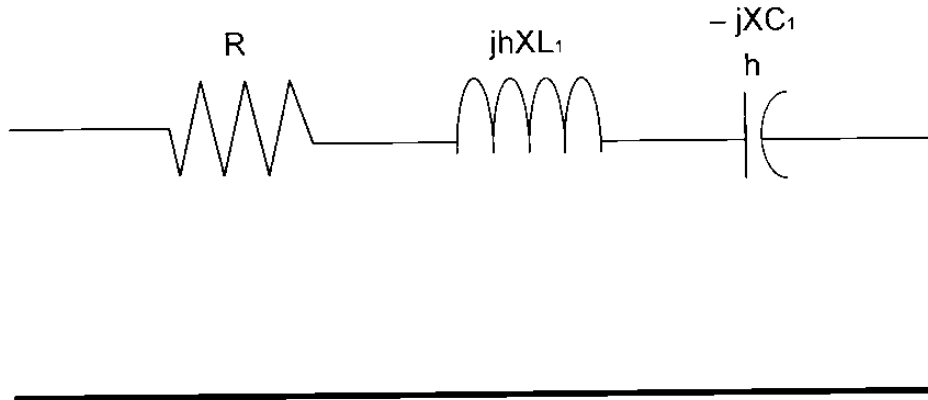


Fig. 3.5 Circuito equivalente de la línea de transmisión con capacitor serie y variación de la impedancia en función de las frecuencias.

La impedancia serie equivalente de la línea compensada, para cualquier valor de frecuencia se puede expresar como:

$$Z_h = R + jhXL_1 - j \frac{X_{C1}}{h}$$

Ordenando la ecuación se obtiene:

$$Z_h = R + jh \left(XL_1 - \frac{X_{C1}}{h^2} \right) \quad (3.8)$$

Cuando $X_c=0$, la ecuación (3.8) queda expresada únicamente por el valor de la resistencia "R", sumado al valor inductivo "jhXL". Se aprecia claramente en (3.8) un comportamiento no lineal de la impedancia de la línea a medida que se modifica el orden de la frecuencia "h", debido a la variación no lineal de la reactancia total de la línea. En la Figura 3.6 se muestra el comportamiento de

la reactancia para una línea compensada en serie como una función del orden de la frecuencia.

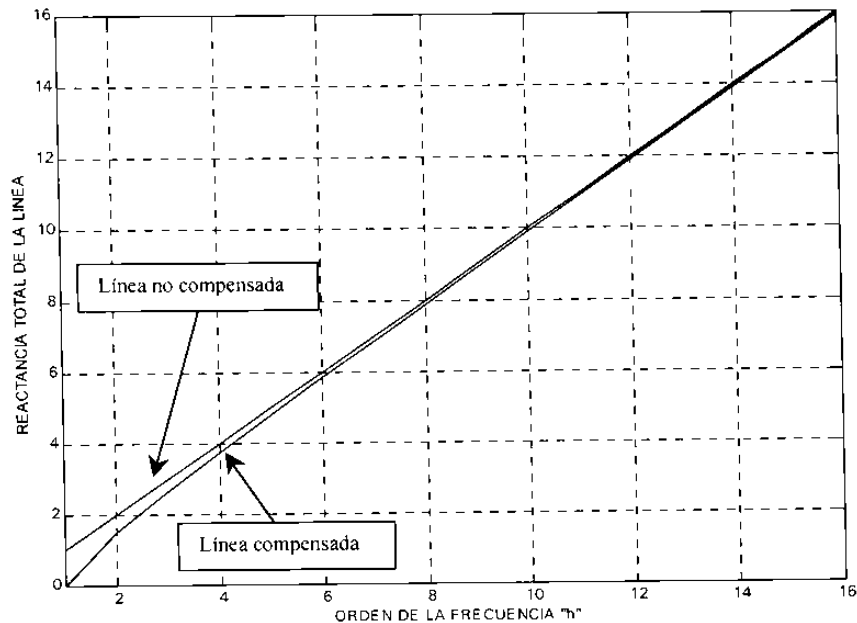


Fig. 3.6 Característica de reactancia en línea de transmisión compensada

De la Figura 3.6 se observa como la reactancia de la línea compensada tiene un comportamiento no lineal, el cual desaparece a un cierto orden de frecuencia, después del cual la reactancia de la línea toma un comportamiento tal como si ésta no tuviera compensación serie, de tal forma que su comportamiento se vuelve lineal.

Para conocer el orden de la frecuencia en el cual el comportamiento no lineal de la reactancia desaparece, es necesario obtener una ecuación que se deduce igualando la reactancia de la línea sin compensar con la reactancia de la línea con compensación serie, considerando que cuando la reactancia de la línea no compensada es 2% mayor que la de la línea compensada el efecto no lineal es despreciable.

$$jhXL_1 = 1.02jh \left(XL_1 - \frac{X_{C1}}{h^2} \right)$$

Despejando el orden de la armónica "h" se obtiene:

$$hs = 7 \left(\frac{X_{C1}}{XL_1} \right)$$

Sabiendo de antemano que $FC = \frac{X_{C1}}{XL_1}$, la ecuación anterior se puede escribir como:

$$hs = 7(FC) \tag{3.9}$$

Donde:

hs= Frecuencia serie de la línea

FC= Factor de compensación serie aplicado a la línea

El valor de la frecuencia serie puede llegar a tomar un valor máximo de siete, el cual se presenta cuando la reactancia inductiva de la línea es compensada al 100%, o lo que es lo mismo, cuando el factor de compensación es igual a uno.

Si se toma como base los factores de compensación aplicados en sistemas de potencia y que corresponden a compensaciones de 20% a 50% [7], los valores de la frecuencia serie estarán dentro del rango de 3 a 5. Por lo anterior la conexión de capacitores serie en los sistemas de potencia no afecta la característica de barrido de frecuencia en los nodos, ya que por lo general los picos de impedancia tienen un orden de frecuencia más arriba de 5. Sin embargo, si se sabe de la existencia de picos de impedancia con frecuencias por

abajo bajo del orden 5, el efecto de los capacitores serie deberá ser tomado en cuenta.

3.4.-RESUMEN.

En éste capítulo se analizan los efectos que se producen en los sistemas eléctricos de potencia cuando son conectados bancos de capacitores como compensación serie en las líneas de transporte de la energía eléctrica. Se presentaron ecuaciones importantes que permiten conocer la distribución de flujo de potencia en enlaces eléctricos de manera rápida, así como el calcular la caída de tensión en las líneas de transmisión. Cabe mencionar que en redes de baja y mediana tensión la estabilidad angular se ve rebasada por los problemas de capacidad térmica y de caída de tensión, mientras que en redes eléctricas de extra alta tensión los problemas de estabilidad angular y de caída de tensión son dominantes. Así mismo, la impedancia equivalente de Thévenin representa la robustez del nodo en el cual es calculada. Idealmente, una barra infinita es representada por una impedancia equivalente de Thévenin igual a cero, pero para el caso real será un valor que representa la capacidad de corto circuito y la caída de tensión será mayor. El valor de la impedancia equivalente de Thévenin es importante en sistemas débiles, y debe incluirse para obtener resultados correctos en el comportamiento del voltaje de la compensación serie.

También se analizó el efecto de los capacitores serie sobre las características del barrido de frecuencia en los nodos. Los procedimientos descritos proporcionan una herramienta que permite saber cuándo debe ser considerado el efecto de los capacitores serie en los problemas de resonancia. Básicamente, éste capítulo permite ver las diferencias de efectos y aplicación entre los bancos de capacitores tipo serie y en derivación.

CAPITULO 4

ESTUDIO DEL BARRIDO DE FRECUENCIA EN SISTEMAS DE POTENCIA

4.1.-ALCANCE DEL MODELADO DEL SISTEMA.

Es muy importante realizar estudios de barrido de frecuencia en todos los nodos de un sistema eléctrico antes de la instalación de elementos de compensación de reactivos, para poder visualizar su efecto y prevenir problemas futuros sobre el sistema eléctrico. Para ésto es necesario determinar primeramente cuales serán los elementos del sistema eléctrico que deberán ser modelados con base a las necesidades de información requerida como resultado del estudio.

Debido a lo mencionado en el párrafo anterior, se requiere especificar los modelos que se utilizan para cada uno de los elementos del sistema de potencia, facilitando así la realización de los estudios en forma sistemática y rápida. En las siguientes secciones de éste capítulo se presenta un resumen de los modelos utilizados para los elementos típicos que forman parte de un sistema eléctrico de potencia.

4.2.-MODELADO DEL GENERADOR.

Una planta de generación que es conectada a un bus de un sistema eléctrico se puede representar como una rama a tierra formada por una admitancia, cuyos valores dependerán de las características operativas y de diseño de la propia máquina a frecuencia fundamental. También interviene el

orden de la frecuencia "h" [15], como se muestra en la Figura 4.1 la cual representa el circuito equivalente para el modelo del generador que será usado en éste trabajo.

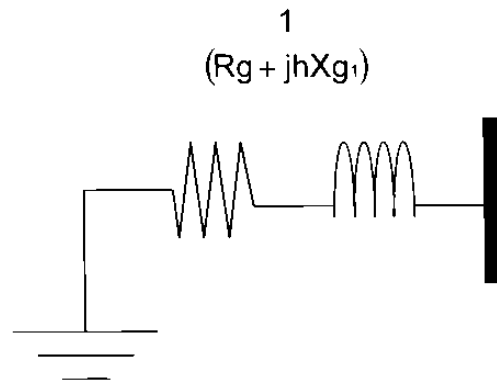


Fig. 4.1 Circuito equivalente para el modelo armónico del generador

4.3.-MODELADO DE LA LINEA DE TRANSMISION.

El modelo utilizado para la línea de transmisión es el circuito equivalente " π " [10], el cual es más conveniente para el análisis, ya que por ejemplo, si se utiliza el circuito equivalente " T " sería necesario utilizar un nodo adicional por cada línea modelada. Este modelo incluye la rama conectada entre los nodos de envío y de recepción, la cual está formada por la impedancia serie de la línea, así como el efecto capacitivo de la propia línea representado por dos ramas conectadas a tierra, una en el nodo de envío y la otra en el nodo de recepción, y cuyos valores son igual a la mitad de la susceptancia capacitiva total de la línea. En la Figura 4.2 se representa el circuito equivalente para el modelo de la línea de transmisión en función de sus parámetros a frecuencia fundamental y del orden de la frecuencia "h".

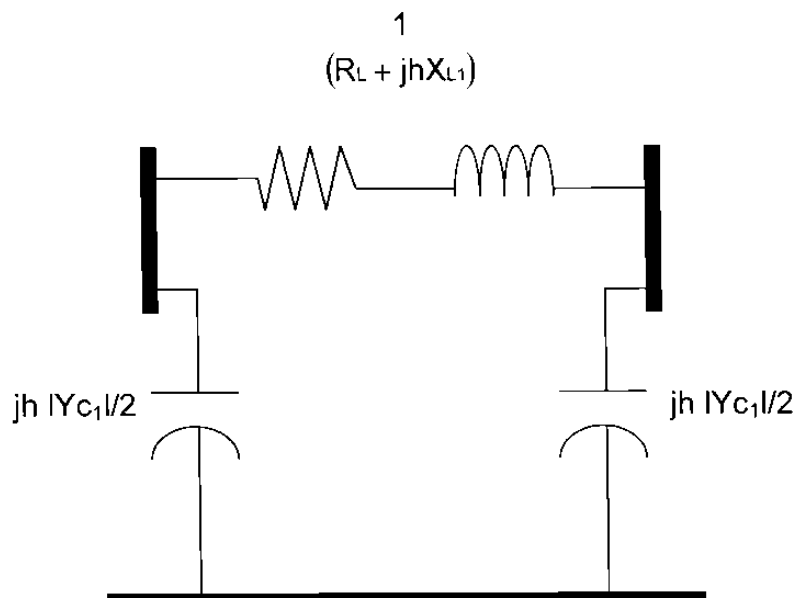


Fig. 4.2 Modelo de la línea de transmisión en función de sus parámetros a frecuencia fundamental y del orden de la frecuencia "h".

4.4.-MODELADO DEL TRANSFORMADOR.

Para incluir los transformadores en los estudios de barrido de frecuencia se usará un modelo complejo del tap [14], el cual es representado por un circuito equivalente cuyas ramas de conexión dependerán de la posición del cambiador de derivaciones. Se toma como referencia el tap nominal. Utilizando éste modelo y suponiendo que el lado primario del transformador se representa con el número 1 y el lado secundario con el número 2, los valores de las admitancias del circuito equivalente, en función de la impedancia del transformador a frecuencia fundamental y del orden de la frecuencia "h", se obtienen de la siguiente manera:

$$Y_{11} = \frac{(t)(t^*)}{R_T + jhX_{T1}}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{12} &= -\frac{(t^*)}{R_T + jhX_{T1}} \\
 Y_{21} &= -\frac{(t)}{R_T + jhX_{T1}} \\
 Y_{22} &= \frac{1}{R_T + jhX_{T1}}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Donde " t " es igual al voltaje en el lado secundario expresado en p.u. para una posición determinada del cambiador, referenciado al voltaje nominal en el mismo lado secundario del transformador. El modelo se puede representar como circuito siempre y cuando el tap no sea complejo, es decir, que no posea parte imaginaria. El circuito equivalente del modelo del transformador obtenido a partir de los valores calculados en (4.1) se muestra en la Figura 4.3. Para un tap complejo se tendrá el sistema de ecuaciones para calcular el comportamiento eléctrico del modelo, pero no se podrá representar su circuito equivalente.

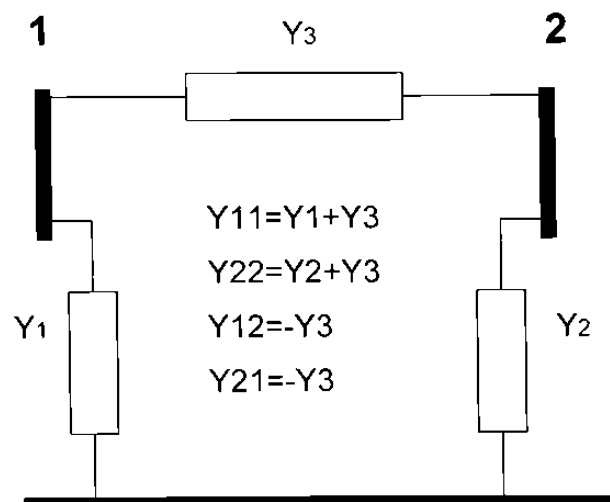


Fig. 4.3 Circuito equivalente para el modelo del transformador

4.5.-MODELADO DE BANCOS DE CAPACITORES EN DERIVACION.

Un banco de capacitores en derivación que es conectado a una barra de un sistema eléctrico se representa como una rama a tierra, formada por el valor de susceptancia del banco de capacitores, y cuyo valor dependerá de los valores de diseño del propio banco [15]. Si se conoce el valor de la reactancia capacitiva del equipo, la rama en derivación puede representarse en función de la reactancia del banco a frecuencia fundamental, así como del orden de la frecuencia. En la Figura 4.4 se representa el circuito equivalente para un banco de capacitores conectado en derivación a una barra de un sistema eléctrico.

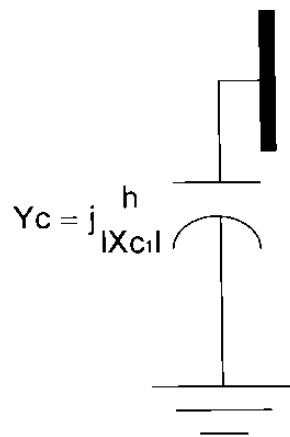


Fig. 4.4 Circuito equivalente para banco de capacitores conectado en derivación

4.6.-MODELADO DE BANCOS DE CAPACITORES SERIE.

Tal como se estudió en la Sección 3.3, para el modelado de un banco de capacitores serie es necesario que su efecto, en función del orden de la frecuencia, sea incluido dentro de la rama serie de la línea de transmisión en la cual se encuentra insertado. Por lo tanto, el modelo de la línea mostrado en la Figura 4.2 se transforma en un nuevo circuito equivalente que contiene el

comportamiento de la propia línea, así como del banco de capacitores serie. La Figura 4.5 muestra el circuito equivalente, el cual incluye el efecto de un capacitor serie en función de los parámetros característicos de la línea a frecuencia fundamental, del orden de frecuencia "h" y de los parámetros de diseño del capacitor serie también a frecuencia fundamental.

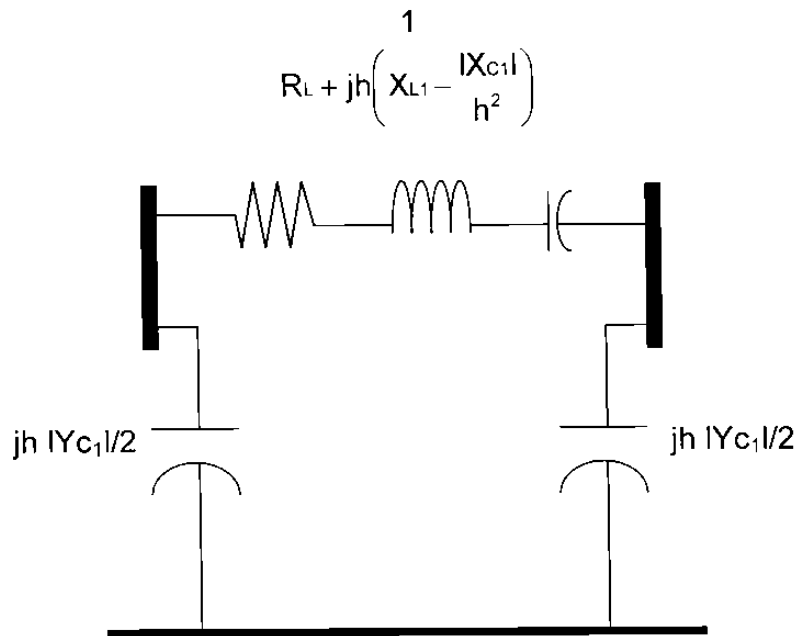


Fig. 4.5 Circuito equivalente de un capacitor serie en función de los parámetros de la línea a frecuencia fundamental y del orden de frecuencia "h".

4.7.-METODOS SIMPLIFICADOS PARA EL BARRIDO DE FRECUENCIA.

Para poder realizar un barrido de frecuencia en los nodos, es necesario formar la matriz de admitancias nodal del sistema eléctrico para cada una de las frecuencias dentro del barrido. El punto de partida es tomar cada uno de los modelos para los elementos presentados en las Secciones 4.2 a 4.6 de éste capítulo y que participan en el sistema a estudiar. Una vez construida la matriz

de admitancias nodal para un determinado valor de frecuencia, se invierte para conocer los valores de impedancia de los equivalentes de Thévenin en cada nodo y correspondiendo a la frecuencia utilizada. Sin embargo, éste procedimiento puede volverse computacionalmente lento para sistemas eléctricos de potencia de gran escala, por lo que se hace necesario utilizar procedimientos más sencillos que involucren una menor cantidad de cálculos y por consiguiente, menor tiempo computacional para su desarrollo.

Un procedimiento sencillo y rápido que puede utilizarse es el desarrollado por el Profesor G.T. Heydt de la Universidad de Arizona [8], y presentado en su libro "ELECTRIC POWER QUALITY" en el año de 1991. Este procedimiento se basa en el desacoplamiento de la matriz de admitancias nodal a la frecuencia fundamental, dando como resultado la suma de dos submatrices, de las cuales una está formada por admitancias y la otra por susceptancias capacitivas.

$$Y_{\text{nodal}(1)} = Yz_{(1)} + Bc_{(1)} \quad (4.2)$$

Donde:

$Yz_{(1)}$ es la matriz de admitancias nodal sin incluir capacitancias y calculada a frecuencia fundamental.

$Bc_{(1)}$ es una matriz diagonal formada solamente por susceptancias capacitivas sin incluir efectos resistivos e inductivos y calculada a frecuencia fundamental.

Si se invierte la matriz $Yz_{(1)}$, se obtiene la matriz de impedancias nodal del sistema eléctrico a frecuencia fundamental sin considerar capacitancias del sistema, y la ecuación (4.2) se puede escribir como:

$$Y_{\text{nodal}(1)} = [Z_{\text{nodal}(1)}]^{-1} + Bc_{(1)} \quad (4.3)$$

Como la matriz $Z_{nodal(1)}$ se compone de elementos resistivos sumados a elementos inductivos, la expresión (4.3) se convierte en:

$$Y_{nodal(1)} = [R_{nodal} + X_{nodal(1)}]^{-1} + B_{C(1)} \quad (4.4)$$

Si se requiere obtener la matriz de admitancias nodal a una frecuencia determinada, la ecuación (4.4) se transforma en:

$$Y_{nodal(h)} = [R_{nodal} + hX_{nodal(1)}]^{-1} + hB_{C(1)} \quad (4.5)$$

Donde:

R_{nodal} es la matriz de resistencias nodal del sistema eléctrico.

$X_{nodal(1)}$ es la matriz de reactancias inductivas nodal a frecuencia fundamental que incluye su representación imaginaria "j".

$B_{C(1)}$ es la matriz de susceptancias capacitivas a frecuencia fundamental que incluye su representación imaginaria "j".

h representa el orden de la frecuencia con respecto a la frecuencia fundamental.

Se puede observar que para grandes valores en la frecuencia, el término R_{nodal} se puede despreciar y la ecuación (4.5) queda como:

$$Y_{nodal(h)} = [hX_{nodal(1)}]^{-1} + hB_{C(1)} \quad (4.6)$$

Si se invierte la matriz $Y_{nodal(h)}$ de la ecuación (4.5), se puede conocer la matriz $Z_{nodal(h)}$ y por consiguiente efectuar el barrido de frecuencias en cada uno de los nodos del sistema eléctrico para distintos valores de frecuencia.

$$Z_{nodal(h)} = \{[R_{nodal} + hX_{nodal(1)}]^{-1} + hB_{C(1)}\}^{-1} \quad (4.7)$$

Se puede ver que el algoritmo descrito por (4.7) es rápido y sencillo, y solamente basta con aplicarlo para los distintos valores de frecuencia "h".

Si se desea considerar el efecto de capacitores serie en el barrido de frecuencia, es necesario conocer el orden de la máxima frecuencia serie que se presentará en el sistema eléctrico. La máxima frecuencia se puede estimar aplicando la ecuación (3.9) de la Sección 3.3, donde el valor de "FC" será el máximo factor de compensación de todos los que estén siendo aplicados al sistema de potencia; con lo cual se asegura el incluir los efectos de la totalidad de capacitores serie insertados en el sistema.

$$h_{s_{max}} = 7 \left(\cdot FC_{max} \right) \quad (4.8)$$

Una vez conocido el orden de la máxima frecuencia serie, se puede efectuar en forma separada el barrido para cada orden de frecuencia menor o igual que $h_{s_{max}}$, a partir de los modelos estudiados en las Secciones 4.2 a 4.6. Posteriormente se aplica la ecuación (4.7) para todos los valores de frecuencia mayores al orden de $h_{s_{max}}$. Sin embargo, como se explicó en la Sección 3.3, si en las características de barrido de frecuencia sin capacitores serie no se observan picos de impedancia a frecuencias menores al orden 5, el efecto de los capacitores serie puede despreciarse y se aplicaría directamente el procedimiento de Heydt [8] a través de la ecuación (4.7).

4.8.-RESUMEN.

El análisis y el estudio de los temas tratados en éste capítulo, son de suma importancia para poder realizar estudios de barrido de frecuencia en un sistema eléctrico determinado. Se presentaron los modelos requeridos para cada uno de los elementos que intervienen en el sistema de potencia, facilitando así la construcción de la matriz de admitancias nodal correspondiente.

También se presentó una deducción del procedimiento de Heydt para estudios de barrido de frecuencia, así como la forma de adaptarlo a estudios en los cuales es necesario incluir los efectos de bancos de capacitores serie. Los capacitores serie son instalados en los sistemas eléctricos para compensar la reactancia inductiva en líneas de transporte de energía eléctrica y se requiere conocer su efecto sobre las frecuencias de resonancia del sistema.

CAPITULO 5

MODELOS INCREMENTALES PARA LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE BANCOS DE CAPACITORES

5.1.-PLANTEAMIENTO DEL MODELO.

Para el planteamiento de un modelo que indique la localización del punto óptimo de un sistema eléctrico para la instalación de un banco de capacitores, se deben considerar ciertas restricciones relacionadas con los efectos sobre la resonancia, el voltaje y las pérdidas del sistema eléctrico bajo estudio. Para tomar en cuenta el efecto sobre la resonancia no se tiene gran problema, ya que sólo basta con aplicar los procedimientos estudiados en las Secciones 2.3 y 3.3, así como lo visto en el Capítulo 4.

Sin embargo, el problema se complica un poco al tratar de incluir los efectos sobre el voltaje y las pérdidas del sistema, ya que al conectar un banco de capacitores, las variables nodales se ven modificadas unas en mayor y otras en menor grado. Debido a esto, en las siguientes secciones se desarrolla un modelo matemático que puede evaluar las alteraciones de las variables involucradas, al provocar un cambio en la topología de la red eléctrica debido a la inserción de bancos de capacitores. El método está basado en una formulación incremental de potencia a partir de los coeficientes de la serie de Taylor y despreciando términos de orden superior. Esto proporciona matrices de sensibilidad que indican cómo se alteran las distintas variables nodales al perturbar, por medio de inyecciones de potencia, los nodos del sistema eléctrico.

5.2.-ECUACIONES DE FLUJO DE POTENCIA REAL Y REACTIVA.

Para el desarrollo del modelo, se parte de la ecuación de flujo de potencia a través de una línea de transmisión de energía [11].

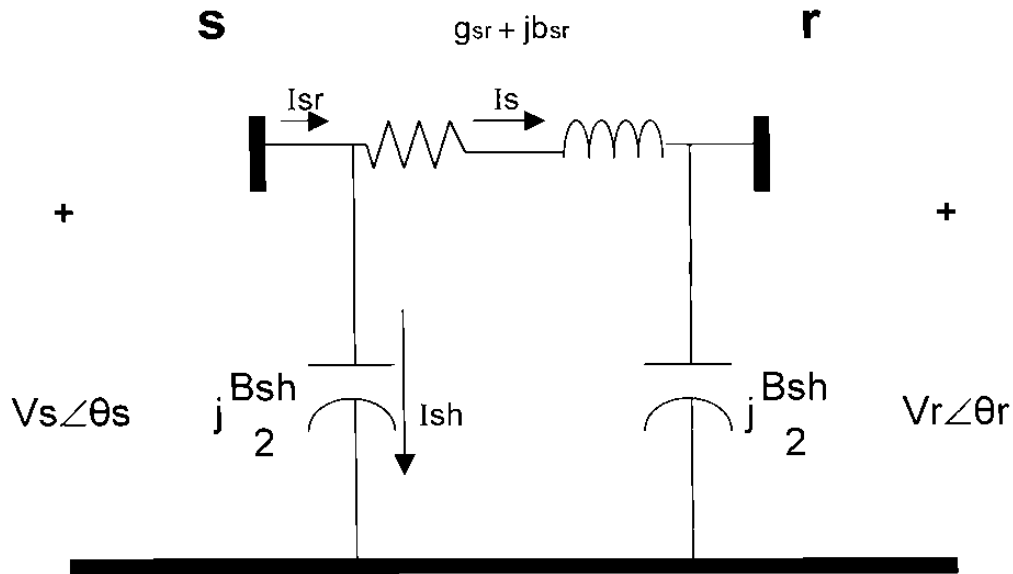


Fig. 5.1 Modelo de línea de transmisión para flujos de potencia

$$I_{sr} = I_{sh} + I_s = V_s \left(j \frac{B_{sh}}{2} \right) + Y_{sr}(V_s - V_r)$$

$$S_{sr} = V_s I_{sr}^* = V_s \left[Y_{sr}(V_s - V_r) + V_s \left(j \frac{B_{sh}}{2} \right) \right]^*$$

$$S_{sr} = V_s \left[(g_{sr} + j b_{sr})(V_s - V_r) + j \frac{B_{sh}}{2} V_s \right]^*$$

$$S_{sr} = V_s \left[(g_{sr} - j b_{sr})(V_s^* - V_r^*) - j \frac{B_{sh}}{2} V_s^* \right]$$

$$S_{sr} = V_s \angle \theta_s \left\{ (g_{sr} - j b_{sr}) \left[V_s \angle (-\theta_s) - V_r \angle (-\theta_r) \right] - j \frac{B_{sh}}{2} V_s \angle (-\theta_s) \right\}$$

$$S_{sr} = (g_{sr} - j b_{sr}) \left(V_s^2 - V_s V_r \angle \theta_{sr} \right) - j \frac{B_{sh}}{2} V_s^2$$

$$S_{sr} = (g_{sr} - j b_{sr}) \left[V_s^2 - V_s V_r (\cos \theta_{sr} + j \sin \theta_{sr}) \right] - j \frac{B_{sh}}{2} V_s^2$$

$$S_{sr} = (g_{sr} - j b_{sr}) \left(V_s^2 - V_s V_r \cos \theta_{sr} - j V_s V_r \sin \theta_{sr} \right) - j \frac{B_{sh}}{2} V_s^2$$

$$S_{sr} = g_{sr} \left(V_s^2 - V_s V_r \cos \theta_{sr} \right) - b_{sr} \left(V_s V_r \sin \theta_{sr} \right) + j \left[- \frac{B_{sh}}{2} V_s^2 - b_{sr} \left(V_s^2 - V_s V_r \cos \theta_{sr} \right) - g_{sr} \left(V_s V_r \sin \theta_{sr} \right) \right]$$

Como: $s=p+jq$

$$p_{sr} = g_{sr} \left(V_s^2 - V_s V_r \cos \theta_{sr} \right) - b_{sr} \left(V_s V_r \sin \theta_{sr} \right) \quad (5.1)$$

$$q_{sr} = \left[- \frac{B_{sh}}{2} V_s^2 - b_{sr} \left(V_s^2 - V_s V_r \cos \theta_{sr} \right) - g_{sr} \left(V_s V_r \sin \theta_{sr} \right) \right] \quad (5.2)$$

Las ecuaciones (5.1) y (5.2) se utilizan para el desarrollo de los modelos incrementales, los cuales a su vez permitirán la localización óptima de bancos de capacitores.

5.3.-MODELO INCREMENTAL PARA BANCOS DE CAPACITORES SHUNT.

Como se sabe, un capacitor en derivación que es conectado a una barra de un sistema eléctrico de potencia modifica el flujo de potencia reactiva a través de las líneas de transmisión, provocando que los voltajes en los nodos se vean afectados en mayor o menor grado respecto al voltaje que se tenía antes de la conexión del capacitor. Debido a lo anterior, la ecuación a utilizar será la (5.2), que está relacionada con el flujo de potencia reactiva a través de líneas de transmisión.

$$q_{sr} = \left[-\frac{B_{sh}}{2} V_s^2 - b_{sr}(V_s^2 - V_s V_r \cos \theta_{sr}) - g_{sr}(V_s V_r \sin \theta_{sr}) \right]$$

Aplicando la forma incremental a la ecuación anterior se tiene:

$$\Delta q_{sr} = \frac{\partial q_{sr}}{\partial V_s} \Delta V_s + \frac{\partial q_{sr}}{\partial V_r} \Delta V_r + \frac{\partial q_{sr}}{\partial \theta_s} \Delta \theta_s + \frac{\partial q_{sr}}{\partial \theta_r} \Delta \theta_r \quad (5.3)$$

Donde:

$$\frac{\partial q_{sr}}{\partial V_s} = -B_{sh} V_s - 2b_{sr} V_s + b_{sr} V_r \cos \theta_{sr} - g_{sr} V_r \sin \theta_{sr}$$

$$\frac{\partial q_{sr}}{\partial V_r} = b_{sr} V_s \cos \theta_{sr} - g_{sr} V_s \sin \theta_{sr}$$

$$\frac{\partial q_{sr}}{\partial \theta_s} = -g_{sr} V_s V_r \cos \theta_{sr} - b_{sr} V_s V_r \sin \theta_{sr}$$

$$\frac{\partial q_{sr}}{\partial \theta_r} = g_{sr} V_s V_r \cos \theta_{sr} + b_{sr} V_s V_r \sin \theta_{sr}$$

Aplicando las aproximaciones $V_s \approx V_r \approx 1 \text{ p.u.}$, $\cos \theta_{sr} \approx 1$ y

$\sin \theta_{sr} \approx 0$ se tiene:

$$\frac{\partial q_{sr}}{\partial V_s} = -B_{sh} V_s - b_{sr} V_s$$

$$\frac{\partial q_{sr}}{\partial V_r} = b_{sr} V_s$$

$$\frac{\partial q_{sr}}{\partial \theta_s} = -g_{sr} V_s$$

$$\frac{\partial q_{sr}}{\partial \theta_r} = g_{sr} V_s$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación (5.3):

$$\Delta q_{sr} = (-B_{sh} - b_{sr})V_s \Delta V_s + b_{sr} V_s \Delta V_r - g_{sr} V_s \Delta \theta_s + g_{sr} V_s \Delta \theta_r \quad (5.4)$$

Como el cambio de los ángulos de los voltajes en los nodos es despreciable al variar las inyecciones de reactivos, se considera que $\Delta \theta_s = \Delta \theta_r \approx 0$, por lo que la ecuación (5.4) queda como:

$$\Delta q_{sr} = (-B_{sh} - b_{sr})V_s \Delta V_s + b_{sr} V_s \Delta V_r$$

$$\frac{\Delta q_{sr}}{V_s} = -B_{sh} \Delta V_s - b_{sr} (\Delta V_s - \Delta V_r)$$

Igualando a cero la expresión anterior, se obtiene la ecuación característica del modelo de potencia reactiva de la línea de transmisión:

$$\frac{\Delta q_{sr}}{V_s} + (b_{sr} + B_{sh}) \Delta V_s - b_{sr} \Delta V_r = 0 \quad (5.5)$$

En la Figura 5.2 se representa un sistema eléctrico de potencia, el cual se toma como referencia para la construcción del modelo incremental de la potencia reactiva.

Aplicando la ecuación (5.5), se escribe las ecuaciones de las ramas serie:

$$(1) \quad \frac{\Delta q_{12}}{V_1} + (b_{12} + B_{sh1}) \Delta V_1 - (b_{12}) \Delta V_2 = 0$$

$$(2) \quad \frac{\Delta q_{23}}{V_2} + (b_{23} + B_{sh2}) \Delta V_2 - (b_{23}) \Delta V_3 = 0$$

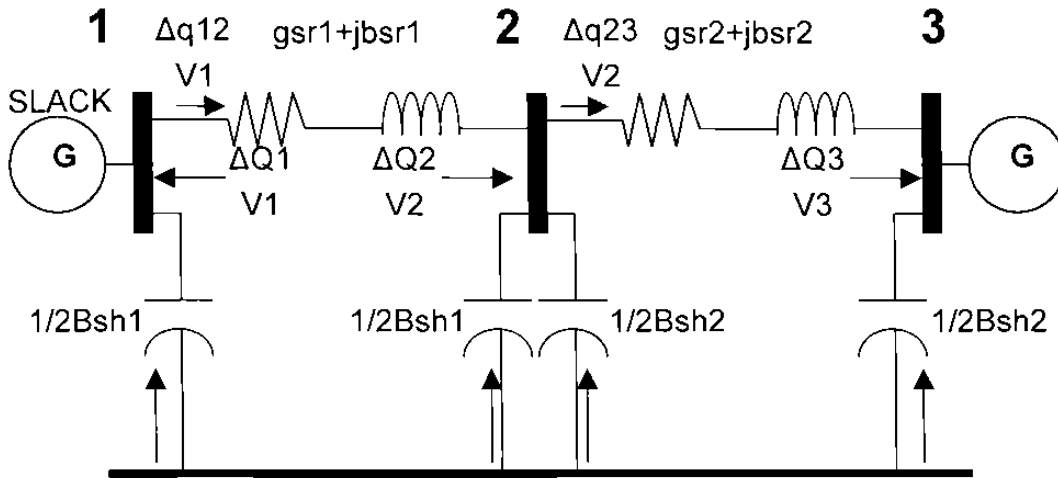


Fig. 5.2 Sistema eléctrico de potencia, para la construcción del modelo incremental de potencia reactiva

Ahora las ecuaciones de nodos:

$$1.- \frac{\Delta Q1}{V1} = \frac{\Delta q12}{V1} - \left(\frac{Bsh1}{2} \right) \Delta V1$$

$$2.- \frac{\Delta Q2}{V2} = \frac{\Delta q23}{V2} - \frac{\Delta q12}{V1} - \left(\frac{Bsh1}{2} + \frac{Bsh2}{2} \right) \Delta V2$$

$$3.- \frac{\Delta Q3}{V3} = - \frac{\Delta q23}{V2} - \left(\frac{Bsh2}{2} \right) \Delta V3$$

Las ecuaciones en forma matricial :

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & b12+Bsh1 & -b12 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b23+Bsh2 & -b23 \\ 1 & 0 & -\frac{Bsh1}{2} & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -\frac{Bsh1}{2} & -\frac{Bsh2}{2} \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -\frac{Bsh2}{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta q12 \\ V1 \\ \Delta q23 \\ V2 \\ \Delta V1 \\ \Delta V2 \\ \Delta V3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta Q1 \\ V1 \\ \Delta Q2 \\ V2 \\ \Delta Q3 \\ V3 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1+ & Bsh1 & -1 & 0 \\ b12 & & b12 & & & \\ 0 & 1 & 0 & 1+ & Bsh2 & -1 \\ & b23 & & b23 & & \\ 1 & 0 & - & Bsh1 & 0 & 0 \\ & 2 & & & & \\ -1 & 1 & 0 & - & Bsh1 & - & Bsh2 \\ & & & 2 & 2 & \\ 0 & -1 & 0 & & 0 & -Bsh2 \\ & & & & & 2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta q12 \\ V1 \\ \Delta q23 \\ V2 \\ \Delta V1 \\ \Delta V2 \\ \Delta V3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta Q1 \\ V1 \\ \Delta Q2 \\ V2 \\ \Delta Q3 \\ V3 \end{vmatrix}$$

Como $j_b = \frac{1}{jX}$, entonces $\frac{1}{b} = -X$ y sustituyendo en la matriz:

$$\begin{vmatrix} -X12 & 0 & 1+ & Bsh1 & -1 & 0 \\ & & b12 & & & \\ 0 & -X23 & 0 & 1+ & Bsh2 & -1 \\ & & & b23 & & \\ 1 & 0 & - & Bsh1 & 0 & 0 \\ & & 2 & & & \\ -1 & 1 & 0 & - & Bsh1 & - & Bsh2 \\ & & & 2 & 2 & \\ 0 & -1 & 0 & & 0 & -Bsh2 \\ & & & & & 2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta q12 \\ V1 \\ \Delta q23 \\ V2 \\ \Delta V1 \\ \Delta V2 \\ \Delta V3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta Q1 \\ V1 \\ \Delta Q2 \\ V2 \\ \Delta Q3 \\ V3 \end{vmatrix}$$

Se observa que la matriz tiene la estructura siguiente:

| | | | | | |
|-------|--------|-------|---|----------------|--------------|
| | elem | nodos | | | |
| elem | -Xelem | A+M | | $\Delta q/ V $ | |
| nodos | A^t | -Bc | | $\Delta V $ | |
| | | | = | | 0 |
| | | | | | ΔQ_V |

(5.6)

Donde:

A =Matriz de conectividad del sistema eléctrico.

A^t =Transpuesta de la matriz de conectividad.

Xelem =Matriz de impedancias primitiva de los elementos multiplicada por (1/j).

Bc =Matriz de susceptancias capacitivas conectadas a los nodos y multiplicada por (1/j) y que deberá incluir bancos de capacitores ya existentes.

M =Matriz que guarda las relaciones (Bsh/b) de cada elemento y cuyos valores son muy cercanos a cero.

Si se considera despreciable la matriz M por ser cercana a cero, la expresión (5.6) queda como:

$$\begin{array}{cc}
 & \begin{array}{cc} \text{elem} & \text{nodos} \end{array} \\
 \begin{array}{c} \text{elem} \\ \text{nodos} \end{array} & \begin{array}{|c|c|} \hline -X_{\text{elem}} & A \\ \hline A^t & -B_c \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta q/|V| \\ \hline \Delta |V| \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \Delta Q_V \\ \hline \end{array} \quad (5.7)
 \end{array}$$

Desarrollando las ecuaciones de (5.7):

$$(-X_{\text{elem}}) \begin{pmatrix} \Delta q \\ V \end{pmatrix} + (A) \Delta V = 0$$

$$\frac{\Delta q}{V} = [X_{\text{elem}}]^{-1} (A) \Delta V \quad (5.8)$$

$$(A^t) \begin{pmatrix} \Delta q \\ V \end{pmatrix} + (-B_c) \Delta V = \frac{\Delta Q}{V}$$

$$(A^t) \begin{pmatrix} \Delta q \\ V \end{pmatrix} = \frac{\Delta Q}{V} + (Bc)\Delta V \quad (5.9)$$

Sustituyendo (5.8) en (5.9):

$$(A^t) [X_{elem}]^{-1}(A)\Delta V = \frac{\Delta Q}{V} + (Bc)\Delta V$$

$$(A^t)(Y_{elem})(A)\Delta V = \frac{\Delta Q}{V} + (Bc)\Delta V$$

Considerando que $B_L = (A^t)(Y_{elem})(A)$, se tiene que:

$$(B_L - Bc)\Delta V = \frac{\Delta Q}{V} \quad (5.10)$$

Desarrollando la expresión $(B_L - Bc)$ se puede demostrar que el resultado que se obtiene es equivalente a $j(B_{nodal})$ [12], donde B_{nodal} es la parte imaginaria de la matriz de admitancias nodal del sistema y que deberá contener también su respectiva unidad imaginaria "j" para cada uno de sus elementos, por lo que (5.10) se puede escribir de la siguiente forma:

$$j(B_{nodal})\Delta V = \frac{\Delta Q}{V} \quad (5.11)$$

Se puede calcular los incrementos de voltaje ΔV como una función de las inyecciones de reactivos en los nodos $\frac{\Delta Q}{V}$:

$$\Delta V = [j(B_{nodal})]^{-1} \begin{pmatrix} \Delta Q \\ V \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

En la ecuación (5.12) se observa que el término $[j(Bnodal)]^{-1}$ representa una matriz de coeficientes de sensibilidad, que multiplicada por las inyecciones de reactivos en los nodos proporciona los incrementos de voltaje en cada uno de los nodos del sistema eléctrico.

Una vez deducida la expresión (5.12), se desarrollará el modelo incremental para las pérdidas en los elementos, partiendo de la siguiente ecuación (5.13) de pérdidas en las ramas de un sistema de potencia [11].

$$P_L = P_{sr} + P_{rs} = g_{sr}(V_s^2 + V_r^2) - 2g_{sr} V_s V_r \cos \theta_{sr} \quad (5.13)$$

Donde:

$$P_{sr} = g_{sr}(V_s^2 - V_s V_r \cos \theta_{sr}) - b_{sr}(V_s V_r \sin \theta_{sr})$$

$$P_{rs} = g_{sr}(V_r^2 - V_s V_r \cos \theta_{sr}) + b_{sr}(V_s V_r \sin \theta_{sr})$$

Aplicando la forma incremental a la ecuación (5.13) se tiene:

$$\Delta P_L = \frac{\partial P_L}{\partial V_s} \Delta V_s + \frac{\partial P_L}{\partial V_r} \Delta V_r + \frac{\partial P_L}{\partial \theta_s} \Delta \theta_s + \frac{\partial P_L}{\partial \theta_r} \Delta \theta_r \quad (5.14)$$

Donde:

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_s} = 2g_{sr} V_s - 2g_{sr} V_r \cos \theta_{sr}$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_r} = 2g_{sr} V_r - 2g_{sr} V_s \cos \theta_{sr}$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_s} = 2g_{sr} V_s V_r \sin \theta_{sr}$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_r} = -2g_{sr} V_s V_r \sin \theta_{sr}$$

Haciendo las aproximaciones $\text{Cos } \theta_{sr} \approx 1$ y $\text{Sen } \theta_{sr} \approx 0$ se tiene:

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_s} = 2g_{sr}(V_s - V_r)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_r} = 2g_{sr}(V_r - V_s)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_s} = 0$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_r} = 0$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación (5.14):

$$\Delta P_L = 2g_{sr}(V_s - V_r)\Delta V_s + 2g_{sr}(V_r - V_s)\Delta V_r \quad (5.15)$$

Aplicando la expresión (5.15) a los elementos del sistema de la Figura 5.2 se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\Delta P_{L12} = 2g_{12}(V_1 - V_2)\Delta V_1 + 2g_{12}(V_2 - V_1)\Delta V_2$$

$$\Delta P_{L23} = 2g_{23}(V_2 - V_3)\Delta V_2 + 2g_{23}(V_3 - V_2)\Delta V_3$$

Escribiendo las ecuaciones anteriores en forma matricial se tiene lo siguiente:

| | | | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|---|------------------|
| $2g_{12}(V_1 - V_2)$ | $2g_{12}(V_2 - V_1)$ | 0 | ΔV_1 | = | ΔP_{L12} |
| 0 | $2g_{23}(V_2 - V_3)$ | $2g_{23}(V_3 - V_2)$ | ΔV_2 | | ΔP_{L23} |
| | | | ΔV_3 | | |

Acomodando los elementos de la matriz:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline 2g_{12} & 0 \\ \hline 0 & 2g_{23} \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{|c|c|} \hline (V_1 - V_2) & \\ \hline & (V_2 - V_3) \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & -1 & \\ \hline & 1 & -1 \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{|c|} \hline \Delta V_1 \\ \hline \Delta V_2 \\ \hline \Delta V_3 \\ \hline \end{array}
 =
 \begin{array}{|c|} \hline \Delta P_{L12} \\ \hline \Delta P_{L23} \\ \hline \end{array}$$

De ésta última matriz se puede obtener una ecuación general que tiene la siguiente estructura:

$$\Delta P_{Lelem} = 2[(g_{sr})_{elem}] [(V_s - V_r)_{elem}] [A] [(\Delta V)_{nodos}] \quad (5.16)$$

Sustituyendo (5.12) en la ecuación (5.16) se obtiene:

$$\Delta P_{Lelem} = 2[(g_{sr})_{elem}] [(V_s - V_r)_{elem}] [A] [j(B_{nodal})]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta Q \\ V \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Donde:

$[(g_{sr})_{elem}]$ = Matriz diagonal con los valores de conductancias de cada una de las líneas y de dimensión (elementos x elementos).

$[(V_s - V_r)_{elem}]$ = Matriz diagonal con los valores de la diferencia de las magnitudes de los voltajes de envío y recepción de cada una de las líneas y con dimensión (elementos x elementos).

$[A]$ = Matriz de conectividad del sistema eléctrico que tiene una dimensión (elementos x nodos).

$[B_{nodal}]$ = Parte imaginaria de la matriz de admitancias nodal del sistema y que deberá contener también su respectiva unidad imaginaria "j" para cada uno de sus elementos. Su dimensión es (nodos x nodos).

$\begin{bmatrix} \Delta Q \\ V \end{bmatrix}$ = Vector que contendrá las inyecciones de potencia reactiva en los nodos del sistema. Su dimensión es (nodos x 1).

De (5.17) se puede ver que la matriz de sensibilidad para pérdidas en los elementos tiene la forma siguiente:

$$[S] = 2[(g_{sr})_{elem}] [(V_s - V_r)_{elem}] [A] [j(B_{nodal})]^{-1} \quad (5.18)$$

Esta matriz de sensibilidad tiene una dimensión que dependerá de la topología del sistema, ya que estará dada como (elementos x nodos). Los coeficientes de cada una de las columnas de la matriz de sensibilidad indicarán cuál de todos los nodos es el más sensible a la reducción o incremento de pérdidas del sistema, mientras que cada uno de los elementos de una determinada fila la cual corresponde a una línea de transmisión en particular, indicará el grado de reducción o incremento de pérdidas en la línea al inyectar reactivos en los nodos.

5.4.-MODELO INCREMENTAL PARA BANCOS DE CAPACITORES SERIE.

Cuando es insertado un capacitor serie en una línea de transmisión para compensar la reactancia inductiva de la línea, la distribución de flujos en todo el sistema se ve modificada debido al cambio de voltajes y ángulos en los nodos, modificando también las pérdidas totales de la red eléctrica.

La experiencia en sistemas eléctricos de potencia indica que el efecto de un capacitor serie sobre la reducción de pérdidas en el sistema es por lo general adverso, provocando que la nueva distribución de los flujos de potencia en un sistema mallado incremente la magnitud total de las pérdidas. Aún más ilustrativo, si el capacitor es insertado en una línea que alimenta una carga de una subestación radial, la reducción de pérdidas es tan pequeña que puede ser despreciada, ayudando en mayor medida a reducir el porcentaje de regulación de voltaje y mejorando el perfil de tensión en el nodo de recepción.

Lo mencionado en el párrafo anterior establece una mejor idea del porqué la aplicación de capacitores serie es tan limitada, comprendiendo principalmente mejoras en el nivel de cargabilidad de enlaces eléctricos y mejoras de regulación de voltaje en sistemas radiales. Sin embargo, en ésta sección se presenta un modelo desarrollado para poder conocer los efectos producidos sobre los voltajes y los ángulos nodales del sistema, sobre la transmisión de potencia real y de potencia reactiva a través de las líneas, así como el efecto que se experimenta sobre las pérdidas del sistema.

En la Figura 5.3 se muestra una línea compensada en serie, que servirá como referencia para desarrollar el modelo para los estudios de sistemas de potencia con líneas compensadas a través de bancos de capacitores serie.

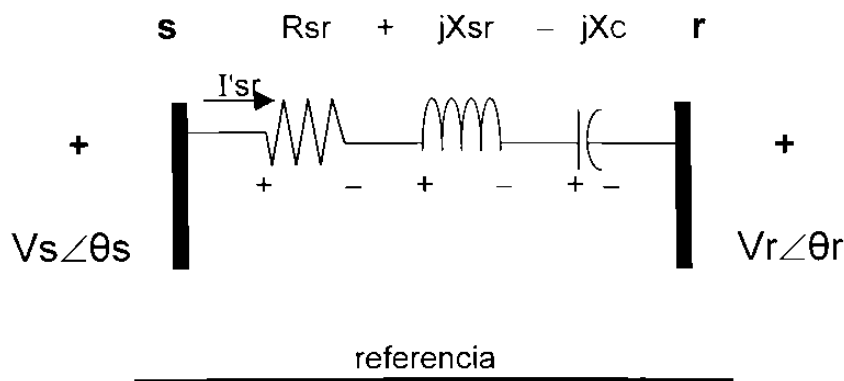


Fig. 5.3 Modelo de línea con compensación serie

El término I'_{sr} , representa la corriente que circula a través de la línea después de que es conectado el capacitor serie. Con base a estudios experimentales se ha encontrado que en sistemas radiales la corriente prácticamente permanece constante después de conectar el capacitor serie, mientras que en redes con estructura anillada se puede utilizar la siguiente expresión para calcular el valor de la corriente I'_{sr} .

$$I'_{sr} = 0.95I_{sr}(1+FC) \quad (5.19)$$

Donde:

I_{sr} =Corriente antes de conectar el capacitor serie

FC =Factor de compensación serie aplicado a la línea

El banco de capacitores serie puede ser representado como una fuente de voltaje cuyo valor dependerá de la corriente que circula por la línea una vez conectado, así como del valor de reactancia del banco de capacitores. Debido a que ésta fuente de voltaje equivalente queda conectada en serie con la impedancia de la línea, es posible hacer el cambio del circuito equivalente de Thévenin a uno tipo Norton. La Figura 5.4 muestra el circuito equivalente de Norton para línea compensada en serie.

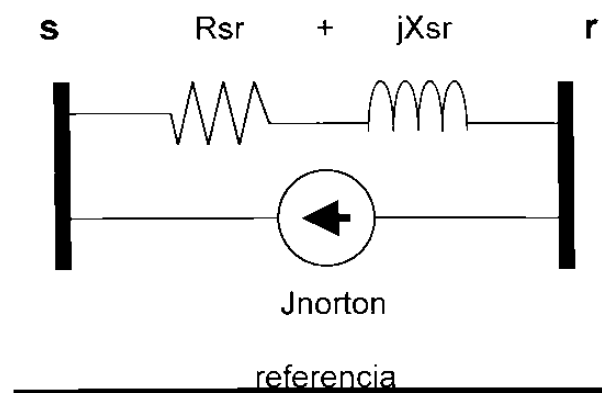


Fig. 5.4 Circuito equivalente Norton para línea compensada en serie

La fuente de corriente "Norton" puede ser calculada de la manera siguiente:

$$J_{\text{norton}} = \frac{V_c}{Z_{sr}} = \frac{(-jX_c)(I'_{sr})}{(R_{sr} + jX_{sr})} = \frac{0.95I_{sr}(1+FC)(-jX_c)}{(R_{sr} + jX_{sr})}$$

Si consideramos que el valor de la resistencia de la línea es despreciable, la ecuación para J_{norton} se puede escribir como:

$$J_{\text{norton}} = -0.95I_{sr}(FC + FC^2) \quad (5.20)$$

El circuito mostrado en la Figura 5.4 se puede representar con dos fuentes de corriente, una extrayendo corriente del nodo "r" y otra inyectando al nodo "s". En la Figura 5.5 se muestra el circuito equivalente.

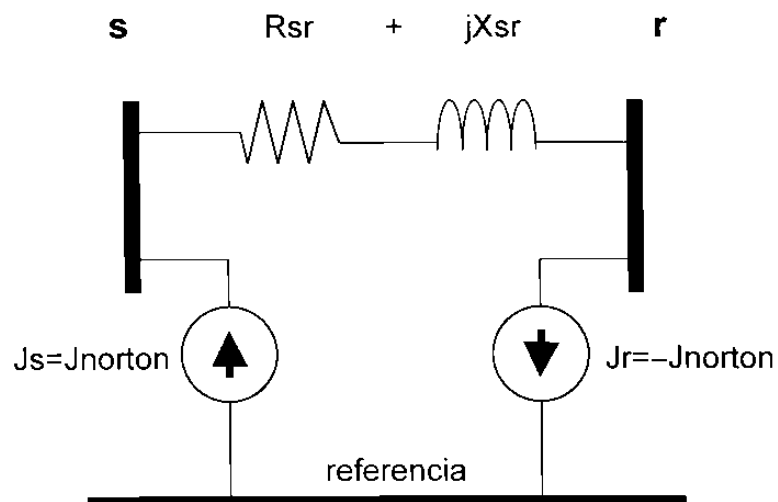


Fig. 5.5 Circuito equivalente para línea compensada en serie

Las dos fuentes de corriente J_s y J_r se pueden expresar como inyecciones o extracciones de potencia en los nodos de la siguiente manera:

$$S_s = V_s J_s^* \quad (5.21)$$

$$S_r = V_r J_r^* \quad (5.22)$$

Ambas fuentes de potencia estarán formadas por una parte real y otra imaginaria, por lo que en forma adicional al modelo de potencia reactiva se requiere un modelo para la potencia real que maneje las inyecciones de potencia en los nodos. A continuación se presenta el desarrollo del modelo incremental para la potencia real.

Partiendo de la ecuación (5.1) se tiene que:

$$p_{sr} = g_{sr}(V_s^2 - V_s V_r \cos \theta_{sr}) - b_{sr}(V_s V_r \sin \theta_{sr})$$

Aplicando la forma incremental a la ecuación anterior:

$$\Delta p_{sr} = \frac{\partial p_{sr}}{\partial V_s} \Delta V_s + \frac{\partial p_{sr}}{\partial V_r} \Delta V_r + \frac{\partial p_{sr}}{\partial \theta_s} \Delta \theta_s + \frac{\partial p_{sr}}{\partial \theta_r} \Delta \theta_r \quad (5.23)$$

Donde:

$$\frac{\partial p_{sr}}{\partial V_s} = 2g_{sr} V_s - g_{sr} V_r \cos \theta_{sr} - b_{sr} V_r \sin \theta_{sr}$$

$$\frac{\partial p_{sr}}{\partial V_r} = -g_{sr} V_s \cos \theta_{sr} - b_{sr} V_s \sin \theta_{sr}$$

$$\frac{\partial p_{sr}}{\partial \theta_s} = g_{sr} V_s V_r \sin \theta_{sr} - b_{sr} V_s V_r \cos \theta_{sr}$$

$$\frac{\partial p_{sr}}{\partial \theta_r} = -g_{sr} V_s V_r \sin \theta_{sr} + b_{sr} V_s V_r \cos \theta_{sr}$$

Haciendo uso de las aproximaciones $V_s \approx V_r \approx 1 \text{ p.u.}$, $\cos \theta_{sr} \approx 1$ y $\text{Sen } \theta_{sr} \approx 0$ se tiene:

$$\frac{\partial p_{sr}}{\partial V_s} = g_{sr} V_s$$

$$\frac{\partial p_{sr}}{\partial V_r} = -g_{sr} V_s$$

$$\frac{\partial p_{sr}}{\partial \theta_s} = -b_{sr} V_s$$

$$\frac{\partial p_{sr}}{\partial \theta_r} = b_{sr} V_s$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación (5.23):

$$\Delta p_{sr} = g_{sr} V_s \Delta V_s - g_{sr} V_s \Delta V_r - b_{sr} V_s \Delta \theta_s + b_{sr} V_s \Delta \theta_r \quad (5.24)$$

Como el cambio de los voltajes en los nodos es despreciable al variar las inyecciones de potencia real, se considera que $\Delta V_s = \Delta V_r \approx 0$, por lo que la ecuación (5.24) queda como:

$$\Delta p_{sr} = -b_{sr} V_s \Delta \theta_s + b_{sr} V_s \Delta \theta_r$$

$$\frac{\Delta p_{sr}}{V_s} = -b_{sr} \Delta \theta_s + b_{sr} \Delta \theta_r$$

Igualando a cero la expresión anterior, se obtiene una ecuación para el modelo incremental de potencia real de la línea de transmisión:

$$\frac{\Delta p_{sr}}{V_s} + b_{sr} \Delta \theta_s - b_{sr} \Delta \theta_r = 0 \quad (5.25)$$

En la Figura 5.6 se representa un sistema eléctrico de potencia, el cual se usa como referencia para la construcción del modelo incremental de la potencia real.

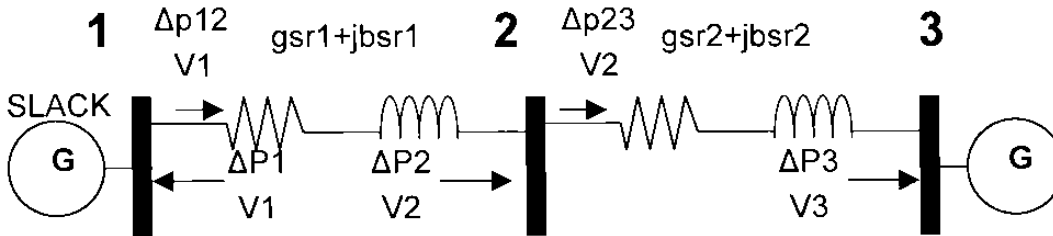


Fig. 5.6 Sistema eléctrico de potencia, referencia para el modelo incremental de potencia real

Aplicando la ecuación (5.25), se escriben las ecuaciones de las ramas:

$$(1) \quad \frac{\Delta p_{12}}{V_1} + b_{12} \Delta \theta_1 - b_{12} \Delta \theta_2 = 0$$

$$(2) \quad \frac{\Delta p_{23}}{V_2} + b_{23} \Delta \theta_2 - b_{23} \Delta \theta_3 = 0$$

Ahora se escriben las ecuaciones de nodos:

$$1.- \quad \frac{\Delta P_1}{V_1} = \frac{\Delta p_{12}}{V_1}$$

$$2.- \quad \frac{\Delta P_2}{V_2} = \frac{\Delta p_{23}}{V_2} - \frac{\Delta p_{12}}{V_1}$$

$$3.- \quad \frac{\Delta P_3}{V_3} = - \frac{\Delta p_{23}}{V_2}$$

Si se escribe las ecuaciones en forma matricial se tiene lo siguiente:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & b_{12} & -b_{12} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b_{23} & -b_{23} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta p_{12} \\ V_1 \\ \Delta p_{23} \\ V_2 \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta P_1 \\ V_1 \\ \Delta P_2 \\ V_2 \\ \Delta P_3 \\ V_3 \end{vmatrix}$$

Si se divide las dos primeras filas entre la susceptancia "bsr" correspondiente a cada fila, y aplicando la expresión $\frac{1}{b} = -X$, se tiene:

$$\begin{vmatrix} -X_{12} & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -X_{23} & 0 & 1 & - \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta p_{12} \\ V_1 \\ \Delta p_{23} \\ V_2 \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta P_1 \\ V_1 \\ \Delta P_2 \\ V_2 \\ \Delta P_3 \\ V_3 \end{vmatrix}$$

Se puede ver que ésta última matriz tiene la estructura siguiente:

| | | | | | | |
|-------|--------------------|-------|-------|---|---------|--------|
| | elem | nodos | | | | |
| elem | -X _{elem} | A | Δp/ V | = | 0 | |
| nodos | A ^t | 0 | Δθ | | ΔP V | (5.26) |

Donde:

A =Matriz de conectividad del sistema eléctrico.

A^t =Transpuesta de la matriz de conectividad.

Xelem =Matriz de impedancias primitiva de los elementos multiplicada por (1/j).

Desarrollando las ecuaciones de (5.26):

$$(-X_{elem}) \begin{pmatrix} \Delta p \\ \mathbf{V} \end{pmatrix} + (A)\Delta\theta = 0$$

$$\frac{\Delta p}{\mathbf{V}} = [X_{elem}]^{-1}(A)\Delta\theta \quad (5.27)$$

$$(A^t) \begin{pmatrix} \Delta p \\ \mathbf{V} \end{pmatrix} = \frac{\Delta P}{\mathbf{V}} \quad (5.28)$$

Sustituyendo (5.27) en (5.28):

$$(A^t)[X_{elem}]^{-1}(A)\Delta\theta = \frac{\Delta P}{\mathbf{V}}$$

$$(A^t)(Y_{elem})(A)\Delta\theta = \frac{\Delta P}{\mathbf{V}}$$

Considerando que $B_L = (A^t)(Y_{elem})(A)$, se tiene el siguiente resultado:

$$(B_L)\Delta\theta = \frac{\Delta P}{\mathbf{V}} \quad (5.29)$$

Se puede demostrar que la estructura de la matriz B_L es equivalente a $j(B_{Xnodal})$ [12], donde B_{Xnodal} es la parte imaginaria de la matriz de admitancias nodal del sistema la cual es formada sin incluir las capacitancias en derivación del sistema y que deberá contener también su respectivo factor imaginario "j" para cada uno de sus elementos. Por lo anterior se tiene que (5.29) se puede escribir de la siguiente forma:

$$j(B_{Xnodal})\Delta\theta = \frac{\Delta P}{V} \quad (5.30)$$

De aquí se puede despejar los incrementos de ángulos $\Delta\theta$ como una función de las inyecciones de potencia real en los nodos $\frac{\Delta P}{V}$:

$$\Delta\theta = [j(B_{Xnodal})]^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ V \end{pmatrix} \quad (5.31)$$

En la ecuación (5.31) se observa que el término $[j(B_{Xnodal})]^{-1}$ representa una matriz de coeficientes de sensibilidad, factores que multiplicados por las inyecciones de potencia real en los nodos proporciona los incrementos en los ángulos de los voltajes nodales en cada uno de los nodos del sistema eléctrico.

Una vez que se ha desarrollado el modelo incremental para la potencia real, como se muestra en (5.31), se une con el modelo de la potencia reactiva de (5.12) dando como resultado el siguiente modelo incremental para capacitores serie:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline [j(B_{Xnodal})]^{-1} & 0 \\ \hline 0 & [j(B_{nodal})]^{-1} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta P/|V| \\ \hline \Delta Q/|V| \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \Delta\theta \\ \hline \Delta|V| \\ \hline \end{array} \quad (5.32)$$

Si se conocen las potencias de (5.21) y (5.22), se puede sustituir sus valores de potencia real y potencia reactiva en (5.32), obteniendo así los incrementos de voltaje y de sus respectivos ángulos. Sumando los incrementos calculados a los valores de voltajes y ángulos nodales que se tienen antes de conectar el capacitor serie, se puede conocer los voltajes y ángulos nodales después de la conexión del banco de capacitores.

Una vez conocidos los valores de los voltajes y sus ángulos después de la conexión del capacitor serie, se pueden calcular pérdidas en líneas así como los flujos de potencia real y reactiva en las mismas. Si lo que se desea es simplemente ver como se modifican los flujos de potencia real y reactiva en las líneas, se haría uso de (5.7) y (5.26) despejando para obtener $\Delta q/|V|$ y $\Delta p/|V|$ para cada uno de los elementos.

5.5.-APLICACIÓN DE LOS MODELOS INCREMENTALES DE POTENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS.

En ésta sección se estudiará la aplicación de los modelos de potencia incrementales desarrollados en las Secciones 5.3 y 5.4, con la finalidad de ubicar el punto óptimo para la localización de un banco de capacitores, tomando como objetivo principal la reducción de pérdidas en el sistema eléctrico, así como los efectos sobre la resonancia y los voltajes de la red eléctrica.

Como se mencionó con anterioridad la reducción de pérdidas es despreciable y en ocasiones contraproducente cuando se coloca capacitores serie en líneas de transmisión, también se provocan efectos despreciables sobre las frecuencias de resonancia del sistema eléctrico. Por ésta razón, un capacitor serie no puede ser utilizado para reducir pérdidas en el sistema, y su aplicación se ve limitada a resolver los problemas de cargabilidad de enlaces eléctricos o de regulación de voltaje en sistemas radiales demasiado largos.

Por lo tanto, no es necesario aplicar un modelo que indique la localización óptima de los capacitores serie, ya que de antemano se conoce la localización de los problemas operativos mencionados en las líneas anteriores.

Un banco de capacitores en derivación, a diferencia de uno serie, puede elevar o reducir las pérdidas en un sistema eléctrico en una forma considerable, lo anterior dependiendo del punto de instalación seleccionado. También se estudió como un capacitor shunt puede afectar considerablemente los voltajes en los nodos del sistema, así como sus características de barrido de frecuencia. Debido a todo esto, se hace sumamente necesario aplicar el modelo desarrollado en la Sección 5.3 de éste capítulo, con el objetivo de poder conocer cuál o cuáles son los óptimos puntos para la instalación de bancos de capacitores en derivación, tomando en cuenta la reducción de pérdidas del sistema y los efectos sobre el voltaje y la resonancia.

En las siguientes páginas de ésta sección, se muestra la forma de aplicar el modelo desarrollado, tomando como referencia el sistema eléctrico mostrado en la Figura 5.7. Para el sistema mostrado se obtuvo una corrida del simulador ASPEN Power-Flow, la cual muestra la corrida de flujos correspondientes antes de la instalación de los bancos de capacitores que se desean conectar.

A continuación se listan los datos de los elementos que componen el sistema eléctrico de potencia de prueba.

No. de Nodos = 8

No. de Líneas = 12

Voltaje del Sistema (KV) = 115

Potencia base del Sistema (MVA) = 100

Potencia de generación en NODO 7 = 30MW+j10MVAR

Líneas(3 Fases ACSR-795KCM 1 hilo de guarda AG-5/16" en estructura 08)

| Nodo sal. | Nodo lleg. | Resis.(pu) | React.(pu) | y/2 (pu) |
|-----------|------------|------------|------------|----------|
| 1 | 3 | 0.01618 | 0.09153 | 0.00587 |
| 3 | 2 | 0.05049 | 0.28558 | 0.01830 |
| 4 | 3 | 0.01359 | 0.07689 | 0.00493 |
| 4 | 5 | 0.01295 | 0.07322 | 0.00469 |
| 1 | 5 | 0.01812 | 0.10251 | 0.00657 |
| 1 | 2 | 0.01618 | 0.09153 | 0.00587 |
| 2 | 6 | 0.01165 | 0.06590 | 0.00422 |
| 6 | 5 | 0.01036 | 0.05858 | 0.00375 |
| 1 | 7 | 0.03884 | 0.21967 | 0.01408 |
| 7 | 5 | 0.03948 | 0.22334 | 0.01432 |
| 6 | 5 | 0.01165 | 0.06590 | 0.00422 |
| 2 | 8 | 0.02265 | 0.12814 | 0.00821 |

Impedancia del generador equivalente en nodo 1 = $(0.0022+j0.0111)$ pu
 Impedancia del generador conectado en el nodo 7 = $(0.006+j0.03)$ pu

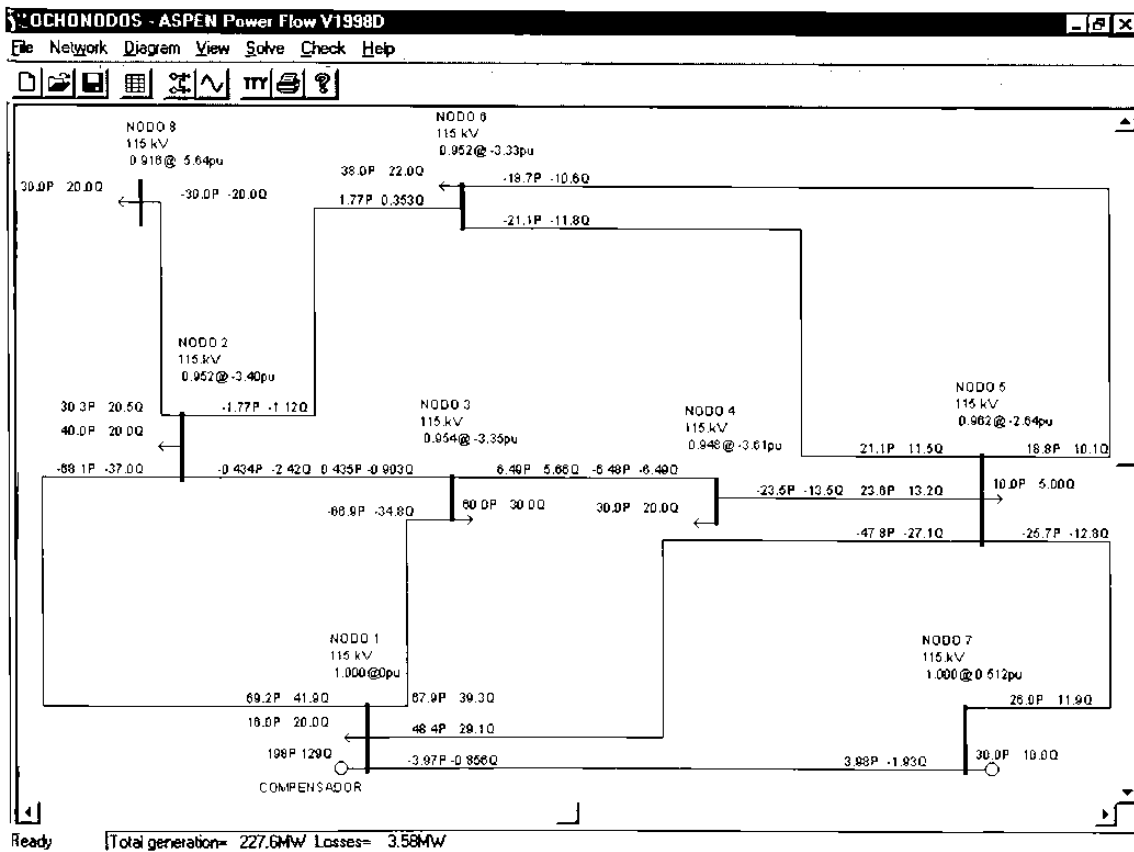


Fig. 5.7 Diagrama unifilar del sistema estudiado

Una vez conocidos los datos del sistema eléctrico, se puede aplicar la ecuación siguiente para conocer la matriz de coeficientes de sensibilidad del modelo de pérdidas incrementales.

$$[S] = 2[(g_{sr})_{elem}] [(V_s - V_r)_{elem}] [A] [j(B_{nodal})]^{-1}$$

Utilizando los datos del sistema eléctrico, se forma la matriz de coeficientes de sensibilidad [S] :

| | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.000104 | -0.002560 | -0.009724 | -0.006250 | -0.002937 | -0.002817 | -0.000301 | -0.002562 |
| 0.000000 | -0.000112 | 0.000126 | 0.000056 | -0.000010 | -0.000042 | -0.000001 | -0.000112 |
| 0.000013 | -0.000063 | 0.000541 | -0.000926 | -0.000349 | -0.000258 | -0.000035 | -0.000063 |
| -0.000030 | 0.000144 | -0.001243 | -0.002632 | 0.000799 | 0.000590 | 0.000081 | 0.000144 |
| 0.000204 | -0.002514 | -0.002063 | -0.003842 | -0.005534 | -0.004569 | -0.000567 | -0.002517 |
| 0.000132 | -0.009448 | -0.002678 | -0.003210 | -0.003714 | -0.005551 | -0.000381 | -0.009459 |
| -0.000002 | -0.000080 | 0.000003 | 0.000030 | 0.000056 | 0.000091 | 0.000005 | -0.000080 |
| -0.000015 | -0.000572 | 0.000023 | 0.000215 | 0.000398 | -0.001108 | 0.000040 | -0.000572 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0.000413 | -0.001495 | -0.001315 | -0.002022 | -0.002693 | -0.002310 | 0.001111 | -0.001496 |
| -0.000013 | -0.000508 | 0.000020 | 0.000191 | 0.000354 | -0.000984 | 0.000036 | -0.000508 |
| -0.000001 | -0.000006 | -0.000002 | -0.000002 | -0.000003 | -0.000004 | -0.000000 | -0.012443 |

(#Líneas) x (#Nodos)

Si se desea instalar un banco de capacitores de 20MVAR, simulando flujos de potencia con el programa ASPEN Power-Flow para cada localización del capacitor en cada uno de los nodos, se tiene los siguiente resultados dados en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Resultados de flujos para el sistema de prueba

| NODO DE CONEXION | PERDIDAS TOTALES DEL SISTEMA | ORDEN DE LA FREC. DE RESONANCIA | VOLTAJE EN EL NODO DE CONEXION |
|------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 3.580MW | 21.938 | 1.000 p.u. |
| 2 | 3.332MW | 9.262 | 0.962 p.u. |
| 3 | 3.360MW | 8.919 | 0.965 p.u. |
| 4 | 3.330MW | 8.063 | 0.962 p.u. |
| 5 | 3.381MW | 10.035 | 0.970 p.u. |
| 6 | 3.343MW | 9.014 | 0.963 p.u. |
| 7 | 3.581MW | 14.158 | 1.000 p.u. |
| 8 | 3.211MW | 5.260 | 0.952 p.u. |

Los valores del orden de la frecuencia de resonancia en el nodo de conexión se calcula aplicando la ecuación (2.10).

$$hr = \frac{MV_{Acc3F}}{MV_{Acap}}$$

Donde:

MV_{Acc3F} Es el valor de corto circuito trifásico en el nodo

MV_{Acap} Es el valor de la potencia trifásica del capacitor

Los valores de corto circuito obtenidos de "ASPEN One Liner" para cada uno de los nodos son:

Tabla 5.2 Valores de corto circuito para el sistema de prueba

| NODO | MV_{Acc3F} |
|------|--------------|
| 1 | 9625.7 |
| 2 | 1715.9 |
| 3 | 1591.0 |
| 4 | 1300.3 |
| 5 | 2014.1 |
| 6 | 1625.3 |
| 7 | 4009.5 |
| 8 | 553.5 |

Si se considera una restricción de voltaje de 3% arriba del valor nominal y una restricción de resonancia de orden 5 o mayor, se puede observar que todos los nodos cumplen con las dos restricciones, pero el nodo óptimo es el número ocho ya que en él se produce la máxima reducción de pérdidas para el sistema.

Si se analiza ahora el mismo problema anterior utilizando el modelo incremental presentado en éste capítulo, se puede realizar un barrido sobre la diagonal de la matriz de impedancias nodal del sistema eléctrico, aplicando las ecuaciones (2.4) y (2.10) para conocer en cada nodo el porcentaje de elevación de voltaje y su respectivo orden de resonancia. Todos los nodos que posean un orden de resonancia arriba de la restricción establecida y que además su voltaje antes de la conexión del capacitor sumado a su incremento correspondiente no sobrepase la restricción de 3% arriba del voltaje nominal, serán los posibles nodos óptimos para la localización del capacitor. Haciendo esto último, se encuentra que para el sistema de prueba usado todos los nodos del sistema cumplen con ambas restricciones.

Sin embargo, debe observarse que de todos los nodos seleccionados existe uno en el cual la disminución de pérdidas del sistema es máxima. Este dato se puede obtener de la matriz de coeficientes de sensibilidad, sumando los elementos de cada una de las columnas de dicha matriz. Una vez sumados los elementos de cada una de las columnas, se observa cuál de ellas posee el máximo valor negativo; que para éste caso resulta ser el nodo número ocho, lo cual coincide con lo obtenido efectuando las corridas de flujos con el simulador ASPEN Power-Flow.

En la Tabla 5.3 se muestran los valores de los coeficientes de sensibilidad en cada nodo del sistema eléctrico, correspondientes a la suma de los elementos de cada una de las columnas de la matriz de sensibilidad.

Tabla 5.3 Sensitividad en los nodos para el sistema de prueba

| NODO | COEFICIENTE |
|------|-------------|
| 1 | -0.00002137 |
| 2 | -0.01721760 |
| 3 | -0.01631399 |
| 4 | -0.01839386 |
| 5 | -0.01363399 |
| 6 | -0.01696507 |
| 7 | -0.00001055 |
| 8 | -0.02967334 |

Cabe mencionar que los coeficientes de la matriz de sensibilidad son constantes, a menos que se realicen estudios a distintos niveles de carga del sistema, ya que en general éstos coeficientes dependen de la condición de carga del sistema eléctrico. Esta matriz de sensibilidad tiene una aplicación muy importante si lo que se quiere es reducir el valor de pérdidas en una determinada línea. Por ejemplo, si se quiere reducir las pérdidas en la línea número doce, cuya información corresponde a la fila doce de la matriz, se puede observar que el máximo coeficiente negativo es el de la columna ocho, correspondiente al nodo número ocho, por lo que el nodo óptimo para la ubicación de la fuente de reactivos será el ocho logrando así reducir al máximo las pérdidas en la línea. Sin embargo, el efecto de la inyección de reactivos se deja sentir en los demás elementos del sistema incrementando o reduciendo sus pérdidas, de acuerdo a los coeficientes del nodo ocho de cada una de las filas de la matriz de sensibilidad.

También se observa que la fila correspondiente a la línea número nueve posee todos sus valores iguales a cero, ya que ésta línea está conectada entre los nodos uno y el siete, los cuales tienen la misma magnitud de voltaje en la corrida de flujos inicial y de cuya condición se obtuvieron los coeficientes de sensibilidad.

5.6.-RESUMEN

En éste capítulo se analizó la aplicación de los modelos incrementales en los sistemas eléctricos de potencia, comparando los valores obtenidos con las corridas de flujos llevadas a cabo mediante el simulador ASPEN Power-Flow. Se encontró que los resultados obtenidos son los óptimos, reduciendo con el método propuesto el trabajo de cálculo computacional especialmente para grandes sistemas, donde el número de ecuaciones para la solución de flujos de potencia es igualmente mayor.

También se analizó la forma de controlar las pérdidas en las líneas de transporte de la energía eléctrica, utilizando el mismo modelo incremental, lo cual proporciona una herramienta de suma importancia en la operación eficiente y el control de los sistemas eléctricos de potencia.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como aportaciones generales en éste trabajo de tesis, se establece una metodología de estudio y análisis para la localización óptima de bancos de capacitores, usando modelos incrementales que fueron obtenidos con tal propósito. Además, se desarrolla el software basado en la metodología propuesta, usando las ecuaciones presentadas en el trabajo.

De manera particular, en el Capítulo 3 se presenta un procedimiento para calcular la frecuencia a la cual el efecto de los capacitores serie, sobre las características de barrido de frecuencia en los nodos, se hace despreciable; permitiendo así decidir sobre la inclusión de los bancos de capacitores serie dentro del estudio de barrido de frecuencia.

En el Capítulo 4, una aportación importante es el haber adaptado el procedimiento de barrido de frecuencia, desarrollado por Heydt, en aquellos sistemas en los cuales se tiene compensación serie en las líneas, evitando con esto la construcción de "h" número de matrices de impedancias armónicas en los estudios de barrido de frecuencia en los nodos, y en los cuales se analizan "h" frecuencias armónicas.

En lo correspondiente al Capítulo 5, las aportaciones se relacionan con el desarrollo de los modelos incrementales para estimar el efecto de capacitores serie y en derivación sobre las variables del sistema, como son voltajes nodales, flujos "p" y "q", y para el caso particular de los bancos de capacitores en

derivación, se presenta un procedimiento que permite calcular su localización óptima desde el punto de vista de pérdidas, resonancia y sobretensión.

Al aplicar los modelos desarrollados se obtienen resultados que nos indican en forma exacta la óptima ubicación del banco de capacitores, reduciendo ampliamente el espacio de búsqueda y el cálculo utilizado al hacer a un lado los procesos iterativos de las ecuaciones de flujo que en sistemas grandes se vuelven computacionalmente lentos, sustituyéndose por modelos de sensibilidad mas rápidos y sencillos.

También se estudia la aplicación de la matriz de coeficientes de sensibilidad como un control de pérdidas en las líneas que forman el sistema eléctrico de potencia, haciendo uso de fuentes de inyección de reactivos en los nodos. Esto permite poder disminuir las pérdidas totales del sistema reduciendo las pérdidas en ciertas líneas que se tengan identificadas como de altas pérdidas, elevando el efecto Joule en otras líneas en las que el monto de pérdidas es mucho menor, liberando así capacidad de transmisión en los elementos deseados.

Como recomendación para trabajos futuros se propone el estudio de los efectos sobre las protecciones del sistema al conectar bancos de capacitores serie, presentando técnicas que minimicen dichos efectos evitando la incorrecta operación de los relevadores.

Otro tema recomendado para trabajos futuros es el desarrollo de un algoritmo que en forma similar al presentado por Heydt nos permita la realización de estudios de barrido de frecuencia incluyendo los bancos de capacitores serie, eliminando el cálculo de la frecuencia serie "hs" presentado en la Sección 4.7 y que se base únicamente en la matriz de impedancias nodal a frecuencia fundamental.

REFERENCIAS

- [1] H.N.Ng, M.M.A. Salama, and A.Y. Chikhani, "Classification of Capacitor Allocation Techniques," *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, January 2000, pp. 387-392.
- [2] H.N.Ng, M.M.A. Salama, and A.Y. Chikhani, "Capacitor allocation by approximate reasoning: Fuzzy capacitor placement," *IEEE Trans. Power Systems*, Sept. 1998, submitted for publication.
- [3] H.C. Chin, "Optimal shunt capacitor allocation by fuzzy dynamic programming," *Electric Power Systems Research*, vol. 35, 1995, pp.133-139.
- [4] -----, "Optimizing the application of shunt capacitors for reactive-voltampere control and loss reduction," *AIEE Trans.*, vol. 80, Aug. 1961, pp. 430-444.
- [5] R.F.Cook, "Analysis of capacitor application as affected by load cycle," *AIEE Trans.*, vol. 78, Oct. 1959, pp. 950-957.
- [6] -----, "Electric Distribution Systems Engineering Handbook," *Ebasco Services Inc., Electrical World Magazine*, Chapter 7, 1987, pp. 189-212.
- [7] -----, "Electric Utility Engineering Reference Book, Distribution Systems" *Electric Utility Engineers of the Westinghouse Electric Corporation*, vol. 3, East Pittsburgh, Pennsylvania 1959, pp. 303-343.

- [8] G.T. Heydt, "Electric Power Quality," *Stars in a Circle Publications*, 1991, Chapter 4.
- [9] -----, "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants," *Power Systems Engineering Committee of the Industrial and Commercial Power Systems, Department of the IEEE Industry Applications Society, IEEE Standards Board*, Red Book, 1993, pp. 443-474.
- [10] J.J. Grainger, W.D. Stevenson Jr., "Análisis de Sistemas de Potencia," *Mc. Graw Hill, Inc.*, 1994, pp. 309-352.
- [11] Dr. Florencio Aboytes García, "Análisis de Sistemas de Potencia," *CENACE, UANL*, Monterrey, N.L., Febrero de 1990, pp. 216-308.
- [12] Dr. Salvador Acha Daza, "Análisis de Sensitividad," *Programa de Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León*, Monterrey, N.L., 1991, pp. 1-26.
- [13] Dr. Alfredo Navarro Crespo, "Corrientes Armónicas," *Técnica Salgar, S.A. de C..V.*, 1995, pp. 23-24.
- [14] William F. Tinney, Walter L. Powell, "Notes on Newton-Raphson Method for Solution of AC Power Flow Problem," *Bonneville Power Administration*, Portland, Oregon, April 1971, pp. 1-55.
- [15] Enrique Acha, Manuel Madrigal, "Power Systems Harmonics, Computer Modelling and Análisis," *John Wiley & Sons, Ltd.*, 2001, pp. 53-64.

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1.1 | Variación de las pérdidas debidas a las corrientes reactivas | 3 |
| 2.1 | Circuitos para análisis de resonancia | 12 |
| 2.2 | Equivalente de Thévenin en el punto de conexión del capacitor | 13 |
| 2.3 | Circuito equivalente con capacitor conectado | 14 |
| 2.4 | Magnitud de impedancia equivalente en el nodo de conexión | 17 |
| 3.1 | Circuito de transmisión y diagrama fasorial | 21 |
| 3.2 | Esquema de compensación serie y diagrama fasorial | 22 |
| 3.3 | Esquema de dos líneas trabajando en paralelo | 23 |
| 3.4 | Datos para ejemplo | 24 |
| 3.5 | Circuito equivalente de la línea de transmisión con capacitor serie y variación de la impedancia en función de las frecuencias | 26 |
| 3.6 | Característica de reactancia en línea de transmisión compensada | 27 |
| 4.1 | Circuito equivalente para el modelo armónico del generador | 31 |
| 4.2 | Modelo de la línea de transmisión en función de sus parámetros a frecuencia fundamental y del orden de la frecuencia "h" | 32 |
| 4.3 | Circuito equivalente para el modelo del transformador | 33 |
| 4.4 | Circuito equivalente para banco de capacitores conectado en derivación | 34 |
| 4.5 | Circuito equivalente de un capacitor serie en función de los parámetros de la línea a frecuencia fundamental y del orden de la frecuencia "h" | 35 |

ÍNDICE DE FIGURAS(Continuación)

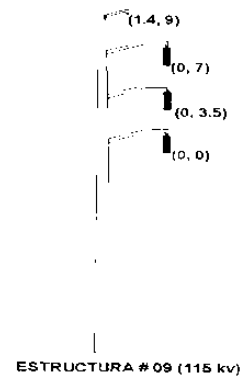
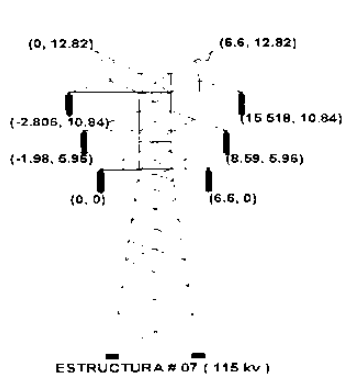
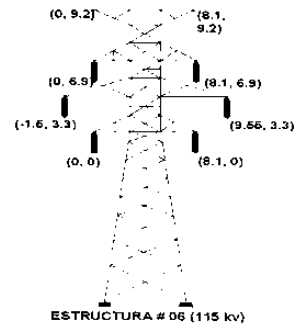
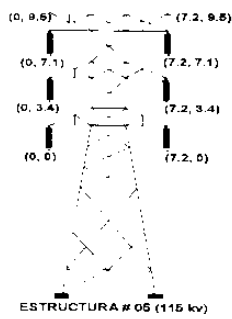
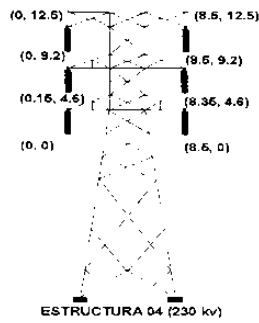
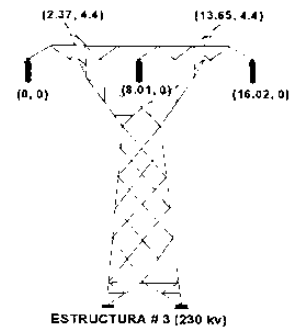
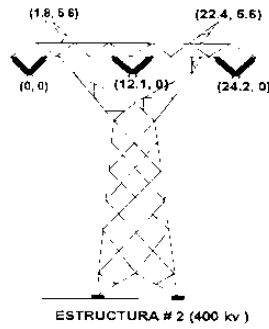
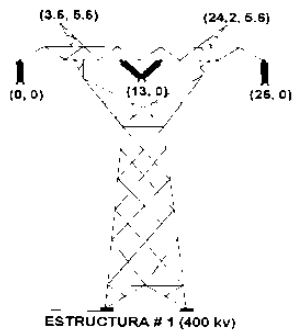
| Figura | | Página |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 5.1 | Modelo de la línea de transmisión para flujos de potencia | 41 |
| 5.2 | Sistema eléctrico de potencia, para la construcción del modelo incremental de potencia reactiva | 45 |
| 5.3 | Modelo de línea con compensación serie | 53 |
| 5.4 | Circuito equivalente Norton para línea compensada en serie | 54 |
| 5.5 | Circuito equivalente para línea compensada en serie | 55 |
| 5.6 | Sistema eléctrico de potencia, referencia para el modelo incremental de potencia real | 58 |
| 5.7 | Diagrama unifilar del sistema estudiado | 64 |

APÉNDICE A

CATÁLOGO DE ESTRUCTURAS UTILIZADAS EN LÍNEAS

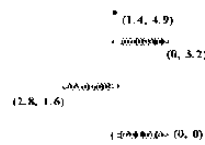
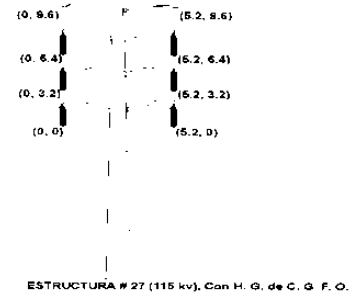
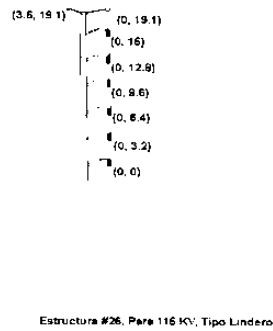
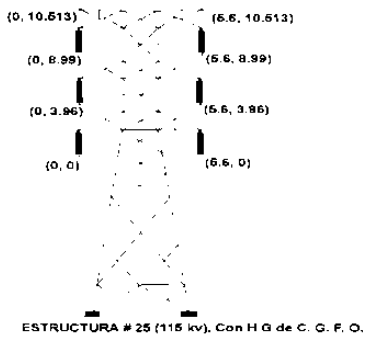
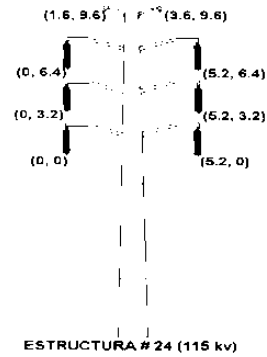
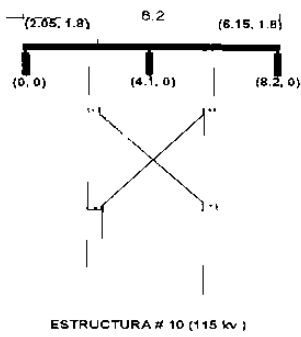
APÉNDICE A

CATÁLOGO DE ESTRUCTURAS UTILIZADAS EN LÍNEAS



APÉNDICE A

CATÁLOGO DE ESTRUCTURAS UTILIZADAS EN LÍNEAS(Cont.)

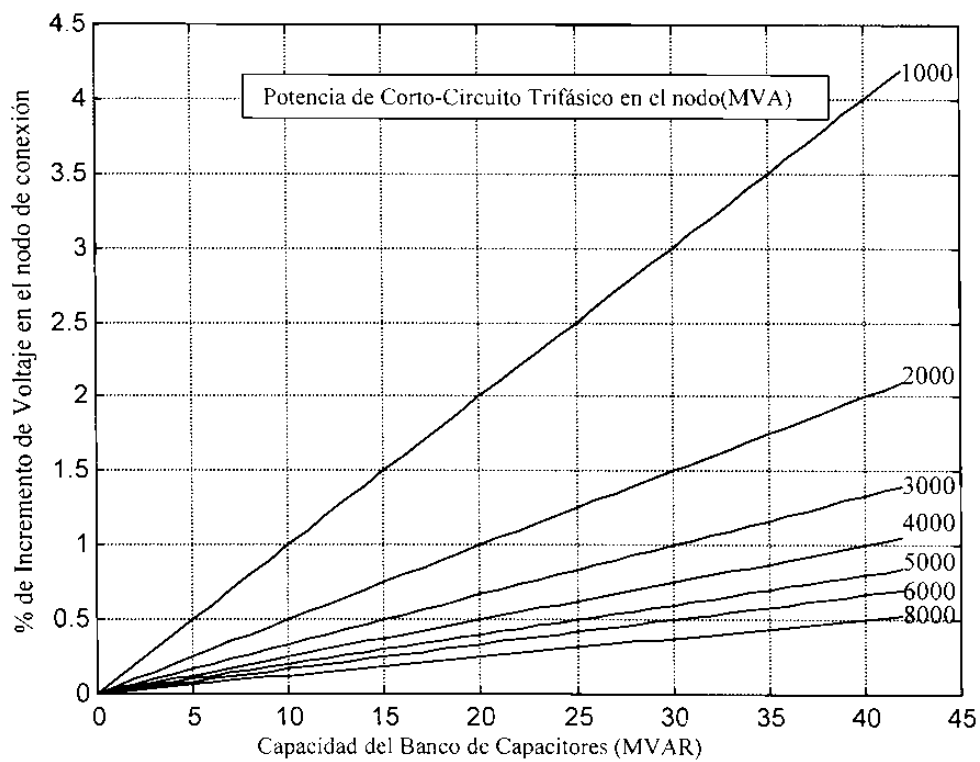


APÉNDICE B

INCREMENTO DE VOLTAJE Y ORDEN DE RESONANCIA AL CONECTAR BANCOS DE CAPACITORES SHUNT

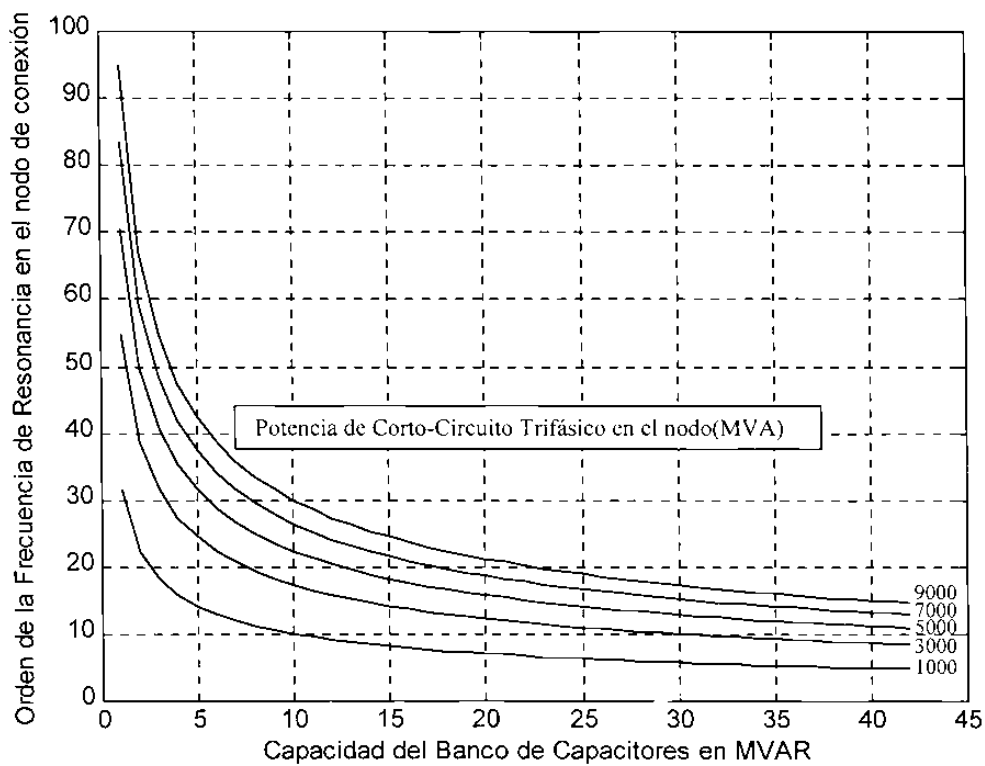
APÉNDICE B

INCREMENTO DE VOLTAJE Y ORDEN DE RESONANCIA AL CONECTAR BANCOS DE CAPACITORES SHUNT



APÉNDICE B

**INCREMENTO DE VOLTAJE Y ORDEN DE RESONANCIA AL
CONECTAR BANCOS DE CAPACITORES SHUNT
(Continuación)**



APÉNDICE C

NOMENCLATURA

APÉNDICE C

NOMENCLATURA

| | |
|----------------|--------------------------------------|
| V | Voltaje |
| KV | Kilovolts |
| I | Corriente |
| Z | Impedancia |
| R | Resistencia |
| L | Inductancia |
| C | Capacitancia |
| X | Reactancia |
| X _L | Reactancia inductiva |
| X _C | Reactancia capacitiva |
| Y | Admitancia |
| B | Susceptancia |
| b | Susceptancia de la línea |
| g | Conductancia de la línea |
| h | Orden de la frecuencia |
| h _r | Orden de la frecuencia de resonancia |
| h _s | Orden de la frecuencia serie |
| ϕ | Angulo del factor de potencia |
| θ | Angulo del voltaje |
| S | Potencia aparente |
| P | Potencia activa o real |
| Q | Potencia reactiva |
| p | Flujo de potencia activa en líneas |
| q | Flujo de potencia reactiva en líneas |
| FC | Factor de compensación |

APÉNDICE C**NOMENCLATURA(Continuación)**

| | |
|----------|------------------------------------------|
| Δ | Incremento |
| A | Matriz de conectividad |
| A^t | Transpuesta de la matriz de conectividad |
| PL | Potencia de pérdidas |
| [S] | Matriz de sensibilidad |
| J | Fuente de corriente |
| VARs | Volts ampere reactivos |

