

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA

DEL LITORAL

Escuela Superior Politécnica
del Litoral
Facultad de Ingeniería
Elaborada en
Guayaquil, Ecuador
1985
No. 007-061-1

FACULTAD DE INGENIERIA

ELECTRICA

" APLICACION DEL REACTIVO ESTATICO EN EL CONTROL Y
REGULACION DEL VOLTAJE EN CIRCUITOS DE DISTRIBUCION "

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACION POTENCIA

GUILLERMO FABARA TORRES

GUAYAQUIL 1985

Agradezco muy especialmente a la
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL
LITORAL, a quien debo mi forma-
ción profesional.

Dedico la presente Tesis de Grado a
mis padres, mi esposa y mis hijos.



Ing. Gustavo Bermudez F.



Ing. Alberto Hanze B.



Ing. Hernán Cutiérriz



Ing. Jorge Spiritoga V.

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL)



Guillermo F. Fabara Torres

RESUMEN

Este estudio es para analizar la conveniencia de ins talar reactivo estático, capacitores, en alimentado- ras de distribución a 13800 voltios para controlar y regular su voltaje.

En primer lugar se estudia teóricamente el comporta- miento de capacitores shunt en circuitos de distribu- ción, analizando sus efectos fundamentales como re- ducción de corriente de línea, aumento de nivel del voltaje, reducción de pérdidas, mejora del factor de potencia, reducción de carga en generadores y circui- tos fuente y reducción o postergación de inversiones. Luego se establecen métodos para calcular estos bene- ficios.

A continuación se analizan métodos para determinar los requerimientos en capacitores para circuitos de distribución.

En el capítulo 2 se analizan los posibles efectos se cundarios que podrían aparecer instalando capacitores en un circuito de distribución, y su evaluación

VII

para la alimentadora 25 de Julio está en el capítulo 4, sus resultados son totalmente favorables.

El capítulo 3 es el proceso para aplicar capacitores a alimentadoras de distribución, utilizando un programa de computación descrito en el capítulo 5, y sus resultados forman el anexo 2, empieza desde el levantamiento de las condiciones del circuito, continúan cálculos de los parámetros, valores límites para varias condiciones de carga y termina con la obtención de resultados tanto eléctricos como económicos. y finalmente sus conclusiones y recomendaciones.

INDICE GENERAL

RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE FIGURAS	XIII
INDICE TABLAS	XV
INTRODUCCION	16
CAPITULO 1	
GENERALIDADES	
1.1 FUNDAMENTOS	19
1.1.1 CAPACITORES SHUNT VS CONDENSADORES SINCRONICOS	21
1.1.2 UBICACION EN EL SISTEMA	24
1.2 EFECTOS FUNDAMENTALES DEL CAPACITOR SHUNT	26
1.2.1 REDUCCION DE CORRIENTE DE LINEA	27
1.2.2 AUMENTO DEL NIVEL DE VOLTAJE EN LA CARGA	30
1.2.3 REDUCCION DE PERDIDAS DEL SISTEMA	37
1.2.4 AUMENTO DEL FACTOR DE POTENCIA EN LOS CIRCUITOS FUENTE	39
1.2.5 REDUCCION DE CARGA EN LA FUENTE GENERADORA Y EN LOS CIRCUITOS	40
1.2.6 REDUCCION DE DEMANDA EN INTERCAMBIOS Y COMPRAS LOCALES DE ENERGIA	42

IX

1.2.7	REDUCCION DE LA INVERSION POR KILOVATIO DEL SISTEMA	45
1.3	BENEFICIO DEL USO DE CAPACITORES SHUNT	46
1.3.1	CAPACIDAD RELEVADA DEL EQUIPO Y DEL SISTEMA	49
1.3.2	LIMITACION DE LA CAIDA DE VOLTAJE	49
1.3.3	AUMENTO DE CAPACIDAD DEL LIMITE TERMICO	53
1.3.4	REDUCCION DE PERDIDAS EN EL EQUIPO Y EN EL SISTEMA	57
1.3.5	AUMENTO DE RENTAS DEBIDO A UN MAYOR VOLTAJE DEL SISTEMA	61
1.3.6	SUMARIO DE EVALUACION DE BENEFICIOS DE LOS CAPACITORES	64
1.4	DETERMINACION DE LOS REQUERIMIENTOS EN CAPACITORES	65
1.4.1	ESTIMACION DE LA MAGNITUD DE LA NECESI- DAD DE REACTIVO ESTATICO	65
1.4.2	LOCALIZACION DE CAPACITORES EN UN SISTEMA RADIAL	68
1.4.3	SATURACION DEL SISTEMA DE DISTRIBUCION	68
1.4.4	COMPARACION ECONOMICA	69
1.4.5	INSTALACION EN EL PRIMARIO VS INSTALACION EN EL SECUNDARIO	78
1.4.6	PRIORIDAD EN EMERGENCIAS	84
1.4.7	UBICACION DE CAPACITORES DENTRO DE SECCIONES DEL SISTEMA	85

1.4.8	CONEXION ELECTRICA DE CAPACITORES SHUNT AL SISTEMA	89
1.4.9	BANCOS DE CAPACITORES FIJOS O DESCONECTABLES	90
1.4.10	CONMUTADORES	91
1.4.11	CONTROL DE CONMUTACION	91
1.4.12	CONEXION Y PUESTA A TIERRA DE BANCOS DE CAPACITORES	94
1.4.13	PROTECCION DE BANCOS DE CAPACITORES	99
1.4.14	PROTECCION DE BANCOS GRANDES	99
1.4.15	PROTECCION DE BANCOS EN ALIMENTADORAS DE DISTRIBUCION	101
CAPITULO 2		
EFECTOS SECUNDARIOS DE LOS CAPACITORES		
2.1	INTERFERENCIA TELEFONICA	105
2.2	EFECTOS DE CAPACITORES SHUNT SOBRE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA	107
2.3	RESONANCIA	108
2.3.1	RESONANCIA DE UN TRANSFORMADOR MONOFASICO DE DISTRIBUCION	110
2.3.2	RESONANCIA EN TRANSFORMADORES TRIFASICOS DE DISTRIBUCION	111
2.3.3	SOBREVOLTAJES RESONANTES DIRECTOS	113
2.4	OPERACION DE CAPACITORES BAJO CONDICIONES ANORMALES DEL SISTEMA	116

CAPITULO 3

CALCULO DE APLICACION DE CAPACITORES A UN CIRCUITO
DE ALTA TENSION DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL

3.1	LEVANTAMIENTO DE CONDICIONES DEL CIRCUITO	121
3.2	ESTUDIO DE LA VARIACION DEL VOLTAJE	123
3.3	CONDICIONES DE LA SUBESTACION	124
3.4	DETERMINACION DE CAPACIDADES LIMITES DE LA ALIMENTADORA	128
3.5	DETERMINACION DEL VOLTAJE MAXIMO Y MINIMO	129
3.6	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN SITUACIONES DE EMERGENCIA	132
3.7	INVESTIGACION DE METODO ALTERNATIVO DE REGULACION	136
3.8	ASPECTO ECONOMICO	145
3.8.1	REDUCCION DE PERDIDAS DE ENERGIA	146
3.8.2	AUMENTO EN LA FACTURACION POR AUMENTO DEL VOLTAJE	147
3.8.3	CAPACIDAD LIBERADA EN LINEAS DE DISTRIBUCION, TRANSFORMADORES, SUBESTACION, TRANSMISION, ETC.	148
3.8.4	COSTO DE INSTALACION DE CAPACITORES	149
3.8.5	EVALUACION DE COSTOS Y BENEFICIOS	149

CAPITULO 4

ESTUDIO DE LOS EFECTOS SECUNDARIOS EN EL CIRCUITO
ANTERIOR

4.1	INTERFERENCIA TELEFONICA	151
4.2	EFEECTO SOBRE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA	152

XII

4.3	PROBLEMAS DE RESONANCIA	153
4.4	SOBREVOLTAJES	154
CAPITULO 5		
ELABORACION DE UN PROGRAMA DE COMPUTADORA PARA MECANIZAR LA APLICACION DE CAPACITORES A CIRCUITOS DE ALTA TENSION.		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		162
1	CONCLUSIONES	162
1.1	ALIMENTADORA MUY LARGA	162
1.2	ALIMENTADORA CON MUCHOS RAMALES MONOFASICOS	163
1.3	RAMALES MONOFASICOS MUY LARGOS	163
2	RECOMENDACIONES	164
ANEXO 1	PLANO A 1	CONTRAPORTADA
ANEXO 2	PROGRAMA GENERAL PARA EL CALCULO DE PERFILES DE VOLTAJE	166
	DATOS PARA CALCULAR LOS PERFILES DE VOLTAJE, TAMAÑO Y UBICACION DE CAPACITORES	190
	CALCULO PARA LA ALIMENTADORA 25 DE JULIO	195
	CALCULO CAPACIDAD MAXIMA DE ALIMENTADORA	221
	CALCULO CAPACIDAD MAXIMA SIN LOS CAPACITORES	229
	VOLTAJE + 5% DE LO NORMAL	237
	BIBLIOGRAFIA	251

INTRODUCCION

Los circuitos de distribución de energía eléctrica que sirven a una zona de la ciudad tienen conectadas cargas de diferentes tipos y frecuencia de funcionamiento muy variable durante el día o un período determinado lo que altera sus características de funcionamiento como son el voltaje, la cantidad de corriente y la potencia. Esta alteración se realiza lenta y paulatinamente, unas veces y súbitamente otras, esto hace que el control y regulación del voltaje y la corriente se vean afectadas por lo que es necesario recurrir a algún método para realizar este control adecuadamente.

El método que presento aquí se basa en la APLICACION DEL REACTIVO ESTATICO EN EL CONTROL Y REGULACION DEL VOLTAJE EN CIRCUITOS DE DISTRIBUCION por medio de capacitores de potencia instaladas en el circuito en cantidades y lugares convenientes.

Este método es adecuado porque el equipo que se reg

quiere es relativamente pequeño y puede ser instalado prácticamente en cualquier sitio, por su bajo costo, lo que permitirá adquirirlos poco a poco según las necesidades o disponibilidades económicas, pueden ser adaptados de cualquier forma, brindando una facilidad de maniobras de prácticamente del 0 al 100% y de manera instantánea, no tienen partes móviles que se desgasten en el uso, no presentan un mal aspecto y además ofrecen otras ventajas como veremos más adelante.

Los usuarios de energía eléctrica, conectados a los circuitos de distribución normalmente no tienen instalaciones o equipos apropiados para realizar un control y regulación del voltaje y corriente que ellos requieren, por lo que la empresa eléctrica que la sirve sufre las consecuencias y se ve en el caso de solucionar ellas mismas este problema utilizando el método más conveniente.

Para este estudio en particular se ha escogido la alimentadora 25 de julio de la Empresa Eléctrica del Ecuador Inc. que partiendo de la Subestación El Guasmo, viene a una extensa zona en pleno desarrollo, tanto industrial como residencial que sirven al Puerto Marítimo e importantes industrias del sur de la ciudad, como a numerosas ciudadelas residenciales,

tanto del IESS como del BEV, presentando caracterís
ticas de carga muy irregulares que necesitan ser co
rregidas y se prestan para realizar un análisis y
hacer más explícito este estudio.

C A P I T U L O 1

GENERALIDADES

1.1.- FUNDAMENTOS

Un capacitor es un sistema de conductores y aislantes eléctricos colocados de manera que sirvan para almacenar una gran carga eléctrica, y luego liberarla, en un volumen relativamente pequeño.

Están formados simplemente de dos placas metálicas separadas por un dieléctrico.

Los conductores o placas metálicas son generalmente dos láminas muy delgadas de aluminio.

Los aislantes o dieléctricos usados han sido y son de una gran variedad y entre los principales tenemos: Aire, papel kraft, polietileno, teflón, mylar, celulosa, polipropileno, magvar, etc.

El mejoramiento en la construcción de capacitores de potencia con el descubrimiento de nuevos materiales

y procesos ha llevado a una enorme disminución de pérdidas de potencia desde 4 watts por KVAR iniciales a los actuales 0.6 watts por KVAR y también a una enorme disminución de su tamaño desde 20 pulg.³ por KVAR a 10 pulg.³ por KVAR.

Los capacitores utilizados en sistemas de distribución tienen una resistencia de descarga interna la cual le permite descargarse después de haber sido desconectado del circuito.

Este conjunto de láminas conductoras de aluminio y finísimas películas de polipropileno dieléctrico va sumergido en un líquido dieléctrico y capaz de transferir calor, tales como: Aceite, pyranol, aroclor, etc. contenido en una caja metálica de acero con sus bornes para conexión y bastidor para montaje.

El capacitor, cuando es conectado en derivación en un sistema eléctrico, es una fuente estática de corriente reactiva siendo usado para suplementar al sistema de generación, el cual práctica o económicamente no puede suplir toda la carga reactiva.

Teóricamente, toda la carga, real y reactiva podría ser llevada por el sistema de generación. Sin embargo, el alto voltaje requerido para mantener un flujo adecuado de VARS, aumenta las pérdidas e in-

crementa la capacidad requerida, creando una situación intolerable desde los puntos de vista tanto operacional como económico. Por consiguiente, los capacitores shunt han probado ellos mismos ser un equipo de invalorable utilidad eléctrica, proveyendo una fuente de corriente reactiva que puede ser instalada junto a la carga. Esto permite una completa apreciación de la reducción de corriente a continuación de su punto de aplicación, resultando en un incremento de voltaje en la carga y disminuyendo las pérdidas en la línea porque el transporte de un gran porcentaje de la carga reactiva del sistema es eliminado. Fig. # 1 .

1.1.1.- CAPACITORES SHUNT VS CONDENSADORES SINCRONICOS

El mismo efecto general puede ser obtenido de un condensador sincrónico conectado a la barra de la carga. Sin embargo, el tamaño económico de las máquinas sincrónicas prohíbe el uso de ellas junto a las cargas reactivas a menos que sean muy grandes y altamente concentradas. Una comparación entre los capacitores shunt y los condensadores sincrónicos se muestra en la tabla # 1.

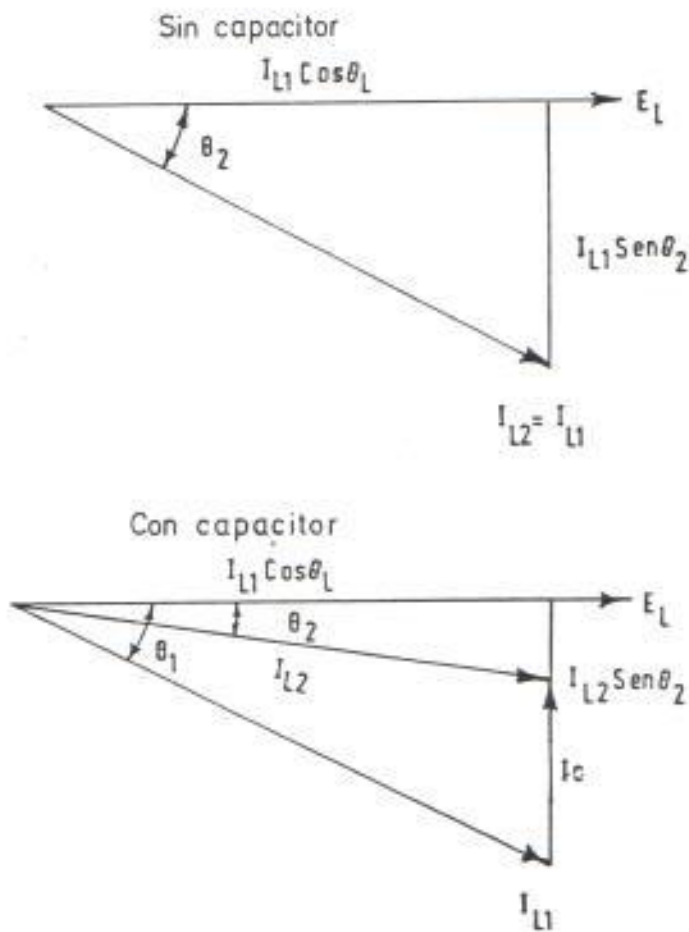
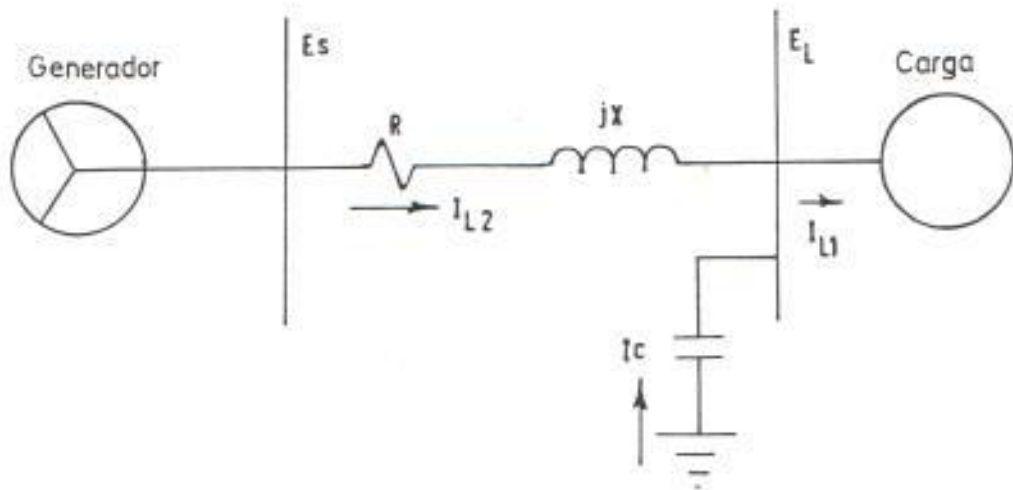


Fig. # 1 Diagrama fundamental del efecto del capacitor shunt.

TABLA # 1

COMPARACION DEL CAPACITOR SHUNT CON EL CONDENSADOR SINCRONICO		
Factor de Aplicación	Capacitor sincrónico	Capacitor shunt
Rangos de voltaje	Requiere transf. arriba 18 KV	A cualquier voltaje
Rangos KVA	Min. tamaño econ. 15000 KVAR	Desde 50 KVAR para arriba
Control	Continuo, completamente ajust.	Desconec. por etapas
Salida de VARS	Varía invers. voltaje terminal	Varía direct. volt. term.
Efect. regul. volt.	Instantánea	Regulación por etapas
Entrega VARS atrasad.	Hasta el 50%	NO
Instalación	Complicada y costosa	Muy simple y versátil
Mantenimiento	Costoso como toda máquina	Ninguno
Protec. fallas inter.	Disyuntores standard	Fusibles individuales
Protec. fallas exter.	Disyuntores y relays standard	Ninguna
Durante emergencias	Más KVAR por corto tiempo	Ninguna en emergencias
Luz oscilante	Muy costosos	NO son efectivos
Corrección factor de potencia	Muy costosos sólo para ésto	Bajo costo, uso principal
Ayuda estabilidad	Automático entregando VARS	Salida varía con cuadrado de voltaje

1.1.2.- UBICACION EN EL SISTEMA

La localización óptima del banco de capacitores dentro del sistema de potencia puede ser determinado sólomente después de un análisis completo del sistema, desde los puntos de vista tanto operacional como económico. La mayoría de los planificadores de sistemas de potencia, sin embargo, no buscan lo óptimo en la aplicación de capacitores de potencia. Inicialmente, en necesidad de compensar el reactivo instalarán capacitores fijos o desconectable en las alimentadoras de distribución. Los bancos de capacitores desde 150 a 1800 KVAR son instalados en postes, aunque ésto no es muy conveniente y es preferible hacerlo en cuartos o bóvedas.

Cuando la carga de una subestación es lo suficientemente concentrada, como en áreas de negocios o cuando cargas industriales salen directamente desde la subestación, un banco desconectable puede ser instalado en la barra de la subestación, y puede ser del tipo abierto sobre bastidores, o encerrados en cabinas, siendo su rango usual desde 600 a 10800 KVAR.

Las tres cuartas partes de la carga reactiva en un sistema típico provienen de los requerimientos de magnetización de los usuarios. Un máximo beneficio

en la aplicación de capacitores será obtenido cuando la fuente de reactivo esté lo más cerca de la carga reactiva. Esto no significa categóricamente que todos los capacitores deben estar localizados en las alimentadoras de distribución. El sistema de potencia por sí mismo en sus equipos de generación, transformación, transmisión y distribución, crea una gran carga reactiva. En particular los sistemas de transmisión, trabajando a plena carga y a un factor de potencia muy bajo, puede en muchos casos usar compensación reactiva directamente sobre el voltaje de transmisión, para: 1) corregir su propia carga de VARS; y, 2) compensar los VARS de los circuitos de distribución.

La instalación de capacitores en los sistemas de distribución, de los dos tipos, en las alimentadoras y en las barras, es usualmente la primera etapa llegar al factor de potencia unitario en el sistema de potencia. Una vez alcanzada la saturación a este nivel, determinado por la condición de baja carga y economía, la instalación de capacitores es llevada entonces a entregar corriente reactiva a nivel de subtransmisión y transmisión. La instalación de grandes bancos de capacitores a alto voltaje se están haciendo muy comunes, aunque la técnica y precauciones que acompañan a una aplicación de este tipo son más

complicadas que las requeridas para los bancos de bajo voltaje.

Debido al alto costo por KVAR de los capacitores del tipo usado en voltajes secundarios, los usados por los usuarios en la corrección del factor de potencia junto a la carga son relativamente una pequeña parte del total instalado. Estudios económicos han indicado, sin embargo, que hay algunas localidades en donde las características de la carga y capacidad de transformadores relevada que justifica el uso de unidades en el secundario. Estos, generalmente capacitores de una sola fase montados en el poste y en el arranque de la acometida.

Adicionalmente, la alta densidad de carga encontrada en redes secundarias usualmente dicta el uso de bancos directamente a la red del transformador para un máximo beneficio económico.

1.2.- EFECTOS FUNDAMENTALES DEL CAPACITOR SHUNT

Como se señaló en párrafos previos, el capacitor shunt es una fuente estática de corriente reactiva. La fig. 1 muestra como se reduce la corriente reactiva requerida desde la fuente de generación, por la entrega de corriente reactiva proporcional al tamaño del capaci

tor a la carga del sistema de potencia. Todos los beneficios obtenidos por la instalación de los capacitores shunt se derivan de este hecho fundamental. Porque el planificador de sistemas de potencia debe evaluar todos los efectos del capacitor shunt a fin de determinar si son económicamente convenientes, y donde dentro de sus sistemas serían ellos colocados, un completo entendimiento de este principio básico es necesario.

1.2.1.- REDUCCION DE CORRIENTE DE LINEA

La corriente reactiva de los circuitos fuente es reducida en proporción directa a la corriente del capacitor, sin embargo, la corriente total de línea es reducida en una cantidad considerablemente más pequeña debido a sus dos componentes, una de las cuales permanece fija.

La expresión para la corriente es:

$$I_{L2} = I_{L1} \cos \theta_1 - jI_{L1} \sin \theta_1 + jI_c \quad (1)$$

donde I_{L1} = corriente de línea sin capacitores

I_{L2} = corriente de línea con capacitores

$\cos \theta_1$ = factor de potencia inicial

I_c = componente cedida por el capacitor

EJEMPLO A

Cuál es la reducción en la corriente total y corriente reactiva respectivamente en un circuito a 13800 v con 1000 KVA de carga a 80% de factor de potencia - cuando 500 KVAR es añadido?

$$I_{L1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 13.8} \angle 36.8^\circ = 41.84 \angle 36.8^\circ$$

$$I_{L1} = 33.47 - j25.10$$

$$I_c = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 13.8} \angle 90^\circ = j20.92$$

$$I_{L2} = 33.47 - j25.10 + j20.92 = 33.73 \text{ Amp.}$$

Así, la reducción de la corriente reactiva de la fuente es $21/25 \times 100$ o 84% mientras que la corriente total es reducida $811/41.84 \times 100$ o 19%

Mientras que la reducción de la corriente total es importante considerando la capacidad relevada, es también verdad que en muchos casos la mayor parte de la caída del voltaje en el sistema es causado por la corriente reactiva. Las componentes de la caída de voltaje en cualquier circuito pueden ser expresadas como sigue:

$$\% E_r = \frac{KV \times R \cos \theta_L}{10 \times (KV)^2} \quad (2)$$

$$\% E_x = \frac{KVA \times X \text{ sen } \theta_L}{10 \times (KV)^2} \quad (3)$$

donde R = resistencia del circuito fuente

X = reactancia del circuito fuente

De la inspección de las ecuaciones 2 y 3, se puede ver que la porción de caída de voltaje reactiva es mayor que la resistiva siempre que $X \text{ sen } \theta_L > R \text{ cos } \theta_L$.

Puesto que en los sistemas de potencia típicos, X varía de 2 a 15 veces R es evidente que en la mayoría de los sistemas operando a factores de potencia más bajos que 90% la caída reactiva será mayor que la resistiva.

Prácticamente, esto significa que la reducción de la componente atrasada de la corriente, como el resultado de los capacitores shunt, compensará en un gran porcentaje de la caída de voltaje, de ese modo mejorando el nivel del voltaje del sistema y extendiendo el rango de los reguladores de voltaje.

Una expresión en per unit para la corriente de línea después de añadir los capacitores puede ser obtenida de la ecuación 1 al dividirla para I

$$\text{entonces } \frac{I_L}{I_L'} = \text{cos } \theta_L - j(\text{sen } \theta_L - ckva) \quad (4)$$

$$\text{donde } ckva = \frac{I_c}{I_L'} = \frac{KVAR}{KVA}$$

Si no son añadidas cargas adicionales después de ser instalados los capacitores, la reducción de corriente de línea total en per unit puede ser obtenida por la substracción de la ecuación 4 de la unidad.

entonces

$$P.U. |I_L| = 1 - \sqrt{\cos^2 \theta_1 + (\text{sen } \theta_1 - ckva)^2} \quad (5)$$

Esta relación está graficada en la figura siguiente como una función del tamaño del banco de capacitores y el factor de potencia original.

Todos los beneficios de la instalación de capacitores shunt son función directa de la reducción de la corriente atrazada, sin embargo, los efectos en la operación de sistemas de potencia pueden variar, dependiendo como ellos son considerados. Los siguientes párrafos discuten brevemente este contingente de beneficios y cómo ellos afectan en la operación y en lo económico.

1.2.2.- AUMENTO DEL NIVEL DE VOLTAJE EN LA CARGA

Para un simple sistema radial, la expresión completa para la caída de voltaje en la carga sería:

$$E_L = E_S - I_L Z \quad (6)$$

$$E_L = E_S - I_L (R \cos \theta_L + X \text{ sen } \theta_L) - jI_L (X \cos \theta_L - R \text{ sen } \theta_L)$$

donde

E_L = voltaje en la carga

E_S = voltaje en la fuente

R = resistencia de la línea y de la carga

X = reactancia de la línea y de la carga

Los otros símbolos como previamente definimos. En ecuación 6 hagamos

$$I_R = I_{L1} \cos \theta_L$$

$$I_X = I_{L1} \sin \theta_L$$

entonces

$$E_L = E_S - RI_R - XI_X - jXI_R + jRI_X \quad (7)$$

Esta relación está mostrada en el diagrama vectorial de la figura # 2 y E_L es el vector OB.

Si capacitores son añadidos al circuito, la ecuación para el voltaje en la carga viene a ser

$$E_L = E_S - RI_R - XI_X - jXI_R + jRI_X - jRI_C + XI_C \quad (8)$$

En la figura # 3 el voltaje en la barra de la carga con los capacitores conectados al circuito es el vector OC. El voltaje en la carga es aumentado porque la caída de voltaje a este punto del circuito es menor, debido a la disminución de la corriente de línea.

Una expresión simplificada para el voltaje en la carga en cualquier circuito es:

$$E_L = E_S - RI_R - XI_X + XI_C \quad (9)$$

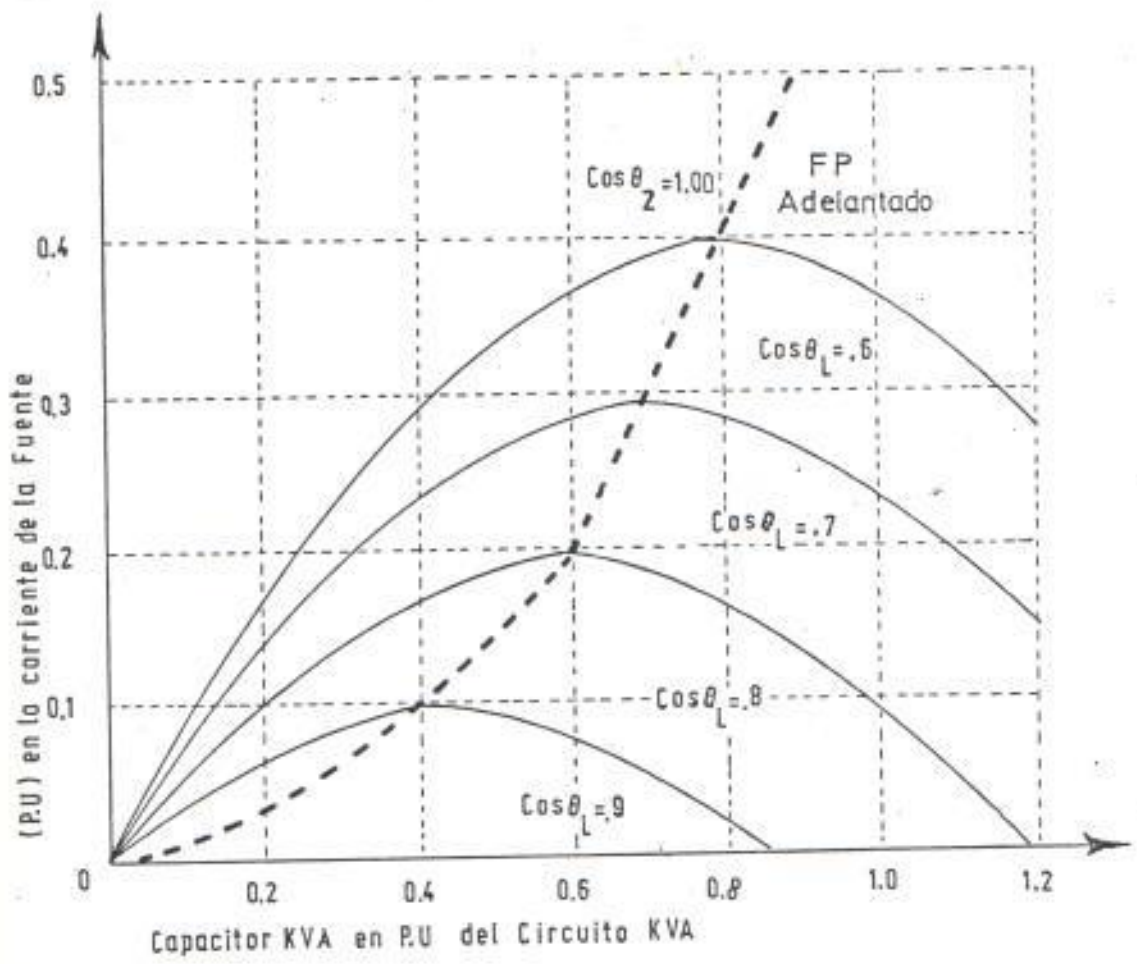


Fig. # 2 Reducción de corriente de línea por efecto del capacitor shunt.

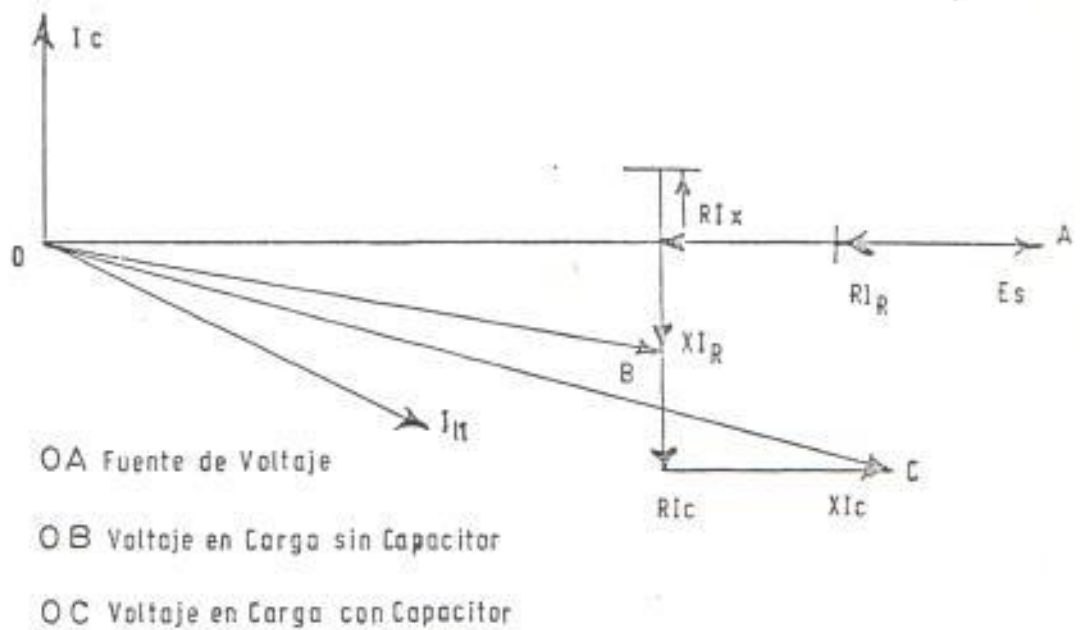


Fig. # 3 Componentes de la caída de voltaje de un sistema.

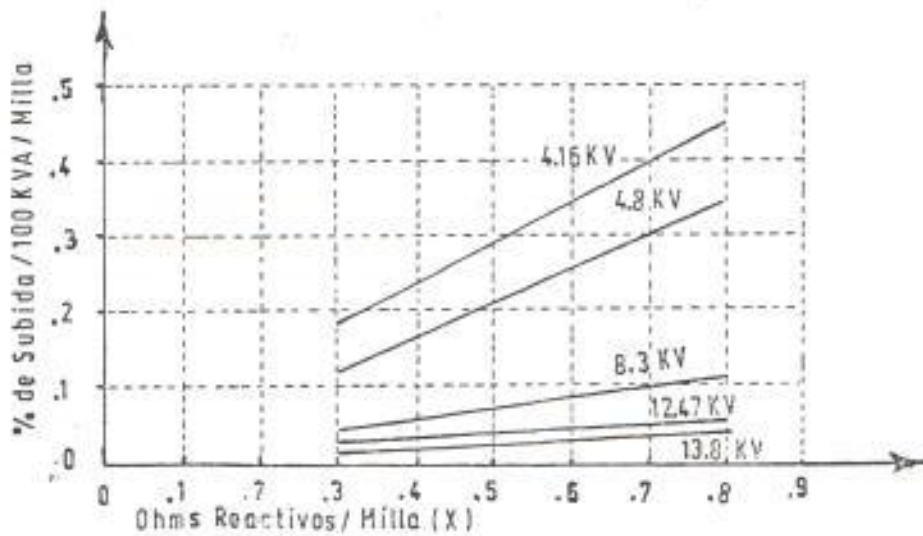


Fig. # 4 Curvas típicas de subida de voltaje para varios voltajes de distribución.

La ecuación 9 es obtenida de la 8 despreciando la caída de voltaje en cuadratura. Este resultado es mucho más simple y suficientemente aproximado para todos los casos prácticos.

De la ecuación 9 puede verse, que si I_c es suficientemente grande el efecto de caída debido a la corriente reactiva puede ser cancelado.

También, puesto que las componentes de la corriente de carga I_a e I_x son dependientes de la carga misma, durante períodos de carga ligera XI_c puede ser más grande que XI_x . La línea, entonces, estaría sobrecompensada y el factor de potencia sería adelantado. Un factor de potencia adelantado como una condición aislada de una alimentadora de distribución es sin importancia, sin embargo, como una condición general del sistema es indeseable. Operando a un factor de potencia adelantado disminuye el margen de estabilidad estática y aumentan las pérdidas arriba de las obtenidas a factor de potencia unitario. Las figs. # 2 y # 5 enseñan que la reducción de la corriente y de pérdidas es máxima a factor de potencia unitario.

Un capacitor fijo, por tanto, no cambia la regulación básica de una alimentadora radial puesto que el

capacitor causa un aumento de voltaje tanto con carga ligera como plena carga. Es necesario investigar las necesidades de aumento de voltaje y de VARS durante los períodos de carga ligera para determinar si la condición es tolerable para el equipo eléctrico asociado. Conmutación del banco de capacitores puede ser necesaria en algunas instalaciones para evitar condiciones indeseables.

Puesto que el aumento del voltaje en la carga es aproximadamente proporcional a XI_c , el aumento porcentual de voltaje para una instalación de capacitores dada es aproximadamente

$$\% \text{ aumento} = \frac{\text{KVAR} \times X \times d}{10 \times (\text{KV}_{L-L})^2} \quad (10)$$

donde

X = reactancia de la fuente hasta la instalación de los capacitores en ohms/Km

KVAR = tamaño del banco de capacitores

d = kilómetros desde la barra regulada a la instalación

KV_{L-L} = voltaje línea a línea

Generalmente, esta fórmula es usada para encontrar el aumento del voltaje causado por un capacitor en una ubicación específica, el cual es superpuesto a la curva de voltaje de la alimentadora para obtener las características netas del voltaje.

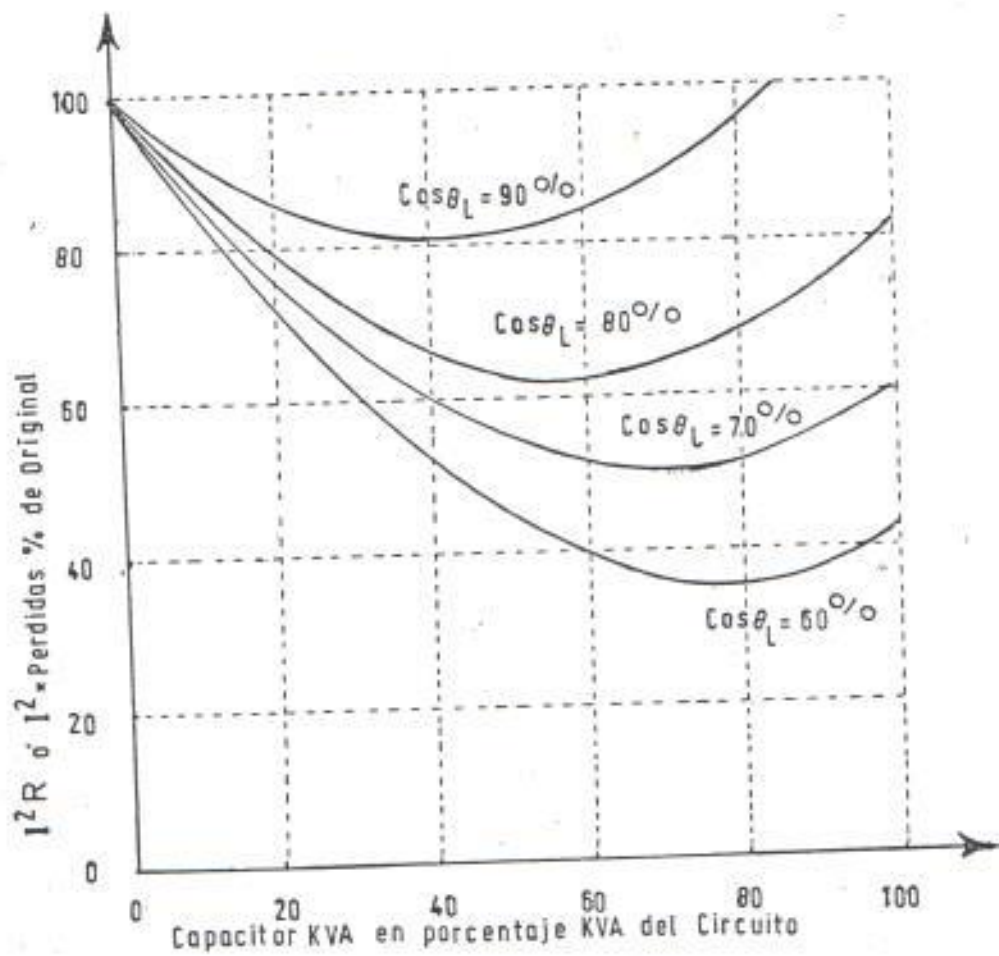


Fig. # 5 Reducción de pérdidas del circuito al añadir capacitores.

EJEMPLO B

qué aumento de voltaje se espera si se instala un banco de 1800 KVAR a 3 Km de la subestación en un circuito a 13.8 KV, usando un conductor 336 MCM ACSR?

$$\text{KVAR} = 1800$$

$$X = 0.52 \text{ ohm/Km}$$

$$d = 3 \text{ Km}$$

$$\text{KV} = 13.8$$

$$\% \text{ aumento} = \frac{1800 \times 0.52 \times 3}{10 \times (13.8)^2} = 1.47$$

1.2.3.- REDUCCION DE PERDIDAS DEL SISTEMA

Las pérdidas en cualquier porción de un sistema de potencia es una función del cuadrado de la corriente y de la inductancia y resistencia del sistema. Las pérdidas son consideradas usualmente como dos componentes, los I^2R pérdidas de potencia y los I^2X pérdidas reactivas. Puesto que la instalación de capacitores shunt reduce la componente reactiva de la corriente de línea, la reducción de pérdidas debida a los capacitores es una función de la corriente reactiva solamente. La componente real de la corriente no necesita ser usada en los cálculos.

La reducción de pérdidas I^2R debida a la adición de capacitores es:

$$LR_R = (I_x)^2 R - (I_x - I_c)^2 R = 2I_c I_x R - (I_c)^2 R \quad (11)$$

Así mismo, la reducción de pérdidas reactivas es:

$$LR_X = 2I_c I_x X - (I_c)^2 X \quad (12)$$

En las ecuaciones 11 y 12, I_c es la corriente del capacitor, I_x es la corriente reactiva en el circuito antes de añadir los capacitores, R es la resistencia del circuito y X su reactancia.

El efecto de los capacitores sobre las pérdidas del sistema están graficadas en las fig. # 5 como un porcentaje de las pérdidas del circuito original y como una función del porcentaje de capacitores instalados. Nótese que las pérdidas son mínimas cuando $\cos \theta = \text{sen} \theta$.

EJEMPLO C

Cuál es la reducción de pérdidas en un circuito a 13.8 KV con una carga de 5000 KVA cuando son añadidos 1800 KVAR. Los parámetros del circuito son los siguientes:

Impedancia de la fuente $Z = 0.6 + j0.8$ ohms

Factor de Potencia = 80%

$$I_L = \frac{5000}{\sqrt{3} (13.8)} = 209.18 \text{ Amp.}$$

$$I_x = 209.18 \times \text{sen } \theta_L = 209.18 \times 0.6 = 125.51 \text{ Amp.}$$

$$I_c = \frac{1800}{\sqrt{3} (13.8)} = 75.30 \text{ Amp.}$$

De la ecuación 11

$$LR_A = 2 \times 75.30 \times 125.51 \times 0.6 - (75.31) \times 0.6$$

$$LR_A = 7940 \text{ watts.}$$

De la ecuación 12

$$LX_x = 2 \times 75.30 \times 125.51 \times 0.8 - (75.30) \times 0.8$$

$$LX_x = 10585 \text{ vars.}$$

Las pérdidas originales del sistema calculadas son 26253 watts y 35005 vars. Si la reducción de pérdidas arriba calculadas son restadas de las pérdidas originales del sistema, las pérdidas finales son cerca del 65% de las originales.

1.2.4.- AUMENTO DEL FACTOR DE POTENCIA EN LOS CIRCUITOS FUENTE

Puesto que los capacitores pueden ser considerados como generadores de vars, cualquier instalación de capacitores shunt reduce la carga de vars del sistema de generación. Esta reducción de demanda de vars de la fuente generadora permite ser cambiado el ni-

vel de excitación tanto que la máquina puede ser operada a un factor de potencia cercano a la unidad.

Para una indicación de cómo aumenta el factor de potencia en la fuente, referirse a la fig. # 6 . El factor de potencia de la fuente resultante está dibujado como una función del factor de potencia inicial e instalación de capacitores en porcentaje de la carga del circuito. Estas curvas son derivadas en base de que la carga en la fuente es mantenida constante después de que son añadidos los capacitores. El factor de potencia resultante sería mayor si la carga del circuito fuera reducida en la cantidad de KVAR añadidos. Por ejemplo, si 500 KVAR son añadidos a 1000 KVAR en un circuito operando a un factor de potencia del 60%, el factor de potencia resultante, si no es añadida más carga, sería del 89%. Si la carga en la fuente es mantenida constante por la añadidura de más carga al factor de potencia original, el factor de potencia resultante, sería de acuerdo con la fig. # 6, del 81%.

1.2.5.- REDUCCION DE CARGA EN LA FUENTE GENERADORA Y EN LOS CIRCUITOS

El aumento del factor de potencia en la fuente, debido a la reducción de la componente atrasada de la corriente, disminuye la carga en kva en cada generador

y en el circuito. También puede relevarlos de una sobrecarga existente, dejando en libertad capacidad para un aumento de carga en el circuito.

Si el beneficio de los capacitores es considerado por la capacidad recuperada para el aumento de carga, la cantidad de capacitores necesarios para un aumento requerido de carga es una regla valiosa. El aumento de carga permitido es calculado en base del aumento de carga al factor de potencia original hasta que los circuitos fuentes estén cargados de la misma manera que antes de añadir los capacitores. Los capacitor KVAR por KVA de carga aumentada está graficado en la fig. # 7 como una función del porciento del capacitor KVAR y factor de potencia original. Si esta cantidad multiplicada por el costo del KVAR de capacitores instalados, el producto es el costo promedio de la provisión de cada KVA adicional de carga. Este costo, relegando otras ventajas del capacitor, puede ser comparado con el de otros métodos para aumentar la capacidad de los circuitos, tales, como cambiando conductores, aumentando transformadores o aumentando generación.

EJEMPLO D

Si el factor de potencia de la carga es originalmente del 80%, y si el 50% de KVAR en capacitores se añaden,

el KVAR en capacitores por aumento de KVA en la carga es 2.2 de la fig. # 7. Si el costo de los capacitores instalados es de S/. 400 por KVAR, el aumento de capacidad para entregar carga es de S/. 880 por KVA.

El costo por KVA al añadir transformadores para un posible aumento de carga puede ser mucho más alto que añadiendo capacitores. Se nota en la figura # 7 que la cantidad de KVAR requerida de capacitores por KVA de aumento de carga crece más rápidamente con un mayor factor de potencia original.

2.2.6.- REDUCCION DE DEMANDA EN INTERCAMBIOS Y COMPRAS LOCALES DE ENERGIA

Los beneficios derivados de la instalación de capacitores en líneas interconectadas y en compras locales de energía es esencialmente como se ha descrito en los párrafos anteriores, excepto que es económico por naturaleza. El costo de la energía comprada se basa generalmente en la demanda en KVA más un adicional por la potencia real. Puesto que la instalación de capacitores disminuirá la demanda en KVA a través de la línea interconectada, una correspondiente reducción ocurrirá en la energía comprada. En algunos casos se ha probado que la corrección al ciento por ciento del factor de potencia es económico.

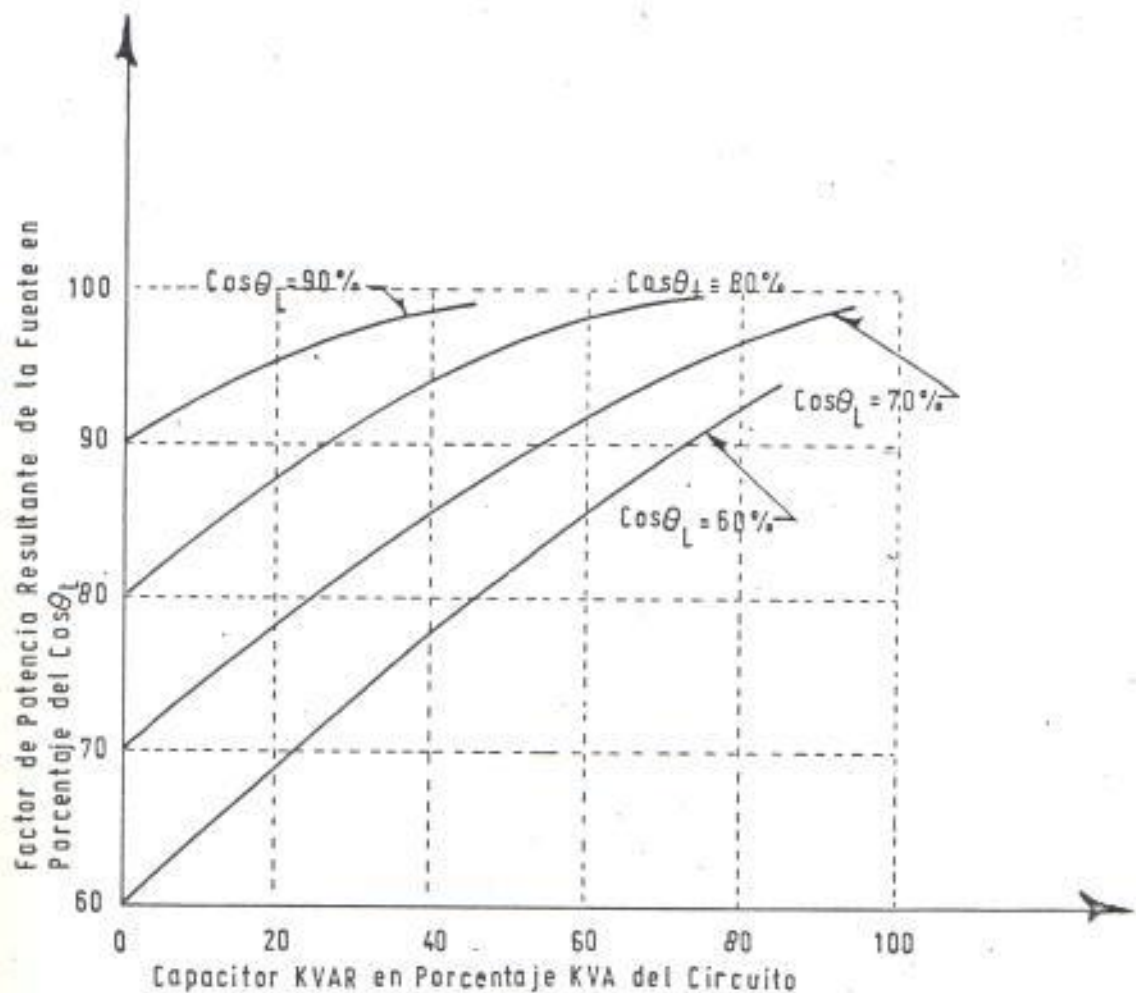


Fig. # 6 Incremento en el factor de potencia de la fuente por efecto de los capacitores.

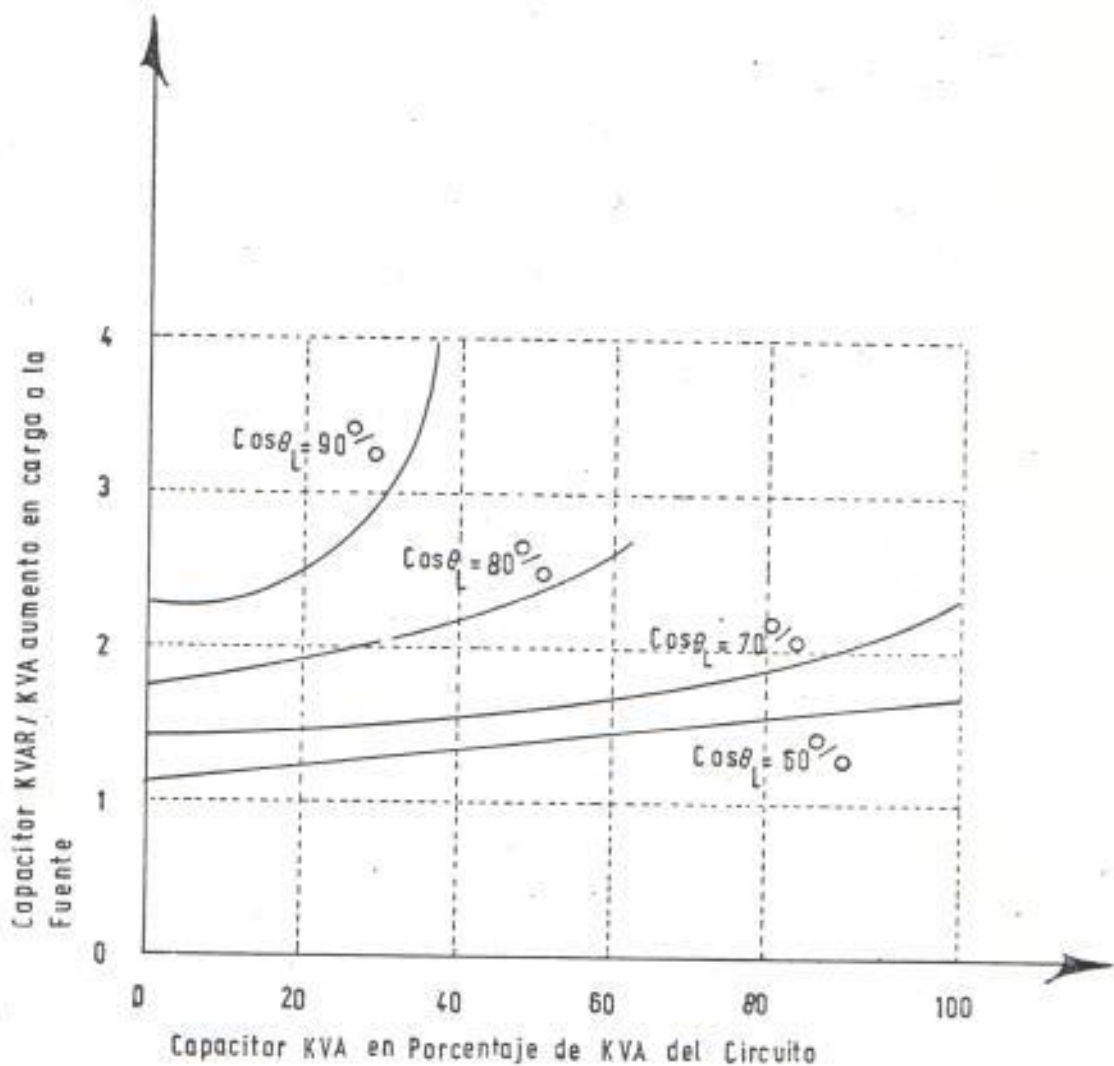


Fig. # 7 Aumento de carga permisible debido a la instalación de capacitores.

1.2.7.- REDUCCION DE LA INVERSION POR KILOVATIO DEL SISTEMA

Una empresa eléctrica obtiene un costo por kilovatio de carga entregada considerando la inversión total de sus propiedades y facilidades del sistema más el costo de producción. Si habría un método aceptado para obtener el costo de KVAR entregado, la reducida inversión en capacitores sería rápidamente igualada. Desafortunadamente, muchas empresas no prorratan el costo de la entrega de KVAR, otras derivan un costo relacionado con las pérdidas del sistema y aún otros usan un costo obtenido de las pérdidas por excitación.

Si se instalan capacitores para relevar capacidad del sistema o para mejorar las condiciones del voltaje, es generalmente aceptado que la reducción de la inversión en todo el sistema es una función directa del promedio de costo por KVA para diferentes métodos de obtener el mismo resultado.

Como se discutíó previamente, el aumento del factor de potencia en la fuente puede permitir cargar más los generadores. Un método práctico para determinar el efecto sobre la inversión en el sistema es considerar este beneficio como una inversión diferida para las facilidades del sistema.

EJEMPLO E

Si una instalación de capacitores del 50% KVAR nominales permite un 15% de aumento de capacidad de transporte de carga, los KVAR requeridos por KW de carga aumentada es 3.32 . Por consiguiente, a S/. 400 el costo de instalación por KVAR, el costo por KW de carga aumentada es S/. 1320 . Si un costo promedio de --- S/. 20.000 por KW de potencia entregada es asumido, y la carga anual es del 15%, la inversión diferida ahorrada sería de:

$$(0.15 \times 20.000) - 1.320 = \text{S/} . 1.680 \text{ por KW/año}$$

1.3.- BENEFICIO DEL USO DE LOS CAPACITORES SHUNT

En la instalación de capacitores shunt en el sistema de una Empresa Eléctrica el ingeniero planificador de be, como en el caso de aumentar cualquier otra clase de equipo, justificar su compra. Inicialmente, la justificación para los capacitores fue considerada primeramente en base de la capacidad recuperada del e equipo de las alimentadoras más alguna compensación por la reducción de pérdidas en la alimentadora. Es generalmente comprobada que una corrección arriba del 90% es prácticamente inconveniente.

Recientes estudios de sistemas indican que además de

considerar estos factores, la capacidad relevada y reducción de las pérdidas en el cobre, el ingeniero de la empresa debe considerar la reducción de las pérdidas I^2X kilovar, reducción de pérdidas en el e equipo de generación y transmisión, y la reducción - del pago de sobrepagos en la entrega de energía.

Estos estudios hacen énfasis en otro factor que se hace importante en la comparación económica, que es, la ubicación del banco de capacitores con respecto a todo el sistema en lugar de su posición dentro de una alimentadora individual. Resultados con diferencias substanciales pueden obtenerse dependiendo de que si el capacitor está instalado sobre el secundario del transformador de distribución, o en la barra de la subestación de distribución. Este es el factor el cual será considerado en adición a los o-tros al hacer la comparación económica.

Debido al bajo costo del KVA de capacitores compara-do con el alto costo del KVA de generación, transmisión y distribución, la teoría generalmente recono-cida de que corrección arriba del 90% al factor de potencia es antieconómica, ha sido desaprobada. Corrección del factor de potencia a cerca de la uni-dad es práctica común, y se puede demostrar que es económica.

El estudio de cualquier empresa eléctrica debe basarse en su totalidad y no solamente una sección en particular. La eficiencia completa de las operaciones depende de cada una de las partes del sistema operando a un factor de potencia lo más cercano al unitario como sea posible. La determinación de la ubicación de las unidades es una derivación económica, y uno debe considerar que la eficiencia del sistema debe sopesarse con la eficacia del capacitor en una localización relativa a lo largo del sistema.

Hay cuatro criterios en los cuales la comparación económica concerniente a capacitores shunt es basada. Estos son los siguientes:

- 1.- Capacidad relevada al sistema y equipo
- 2.- Reducción de pérdidas en el sistema y equipo
- 3.- Aumento de rentas debido a un mayor voltaje
- 4.- Capital ganado por disminución de inversiones en el sistema.

Cada uno de estos criterios puede ser aplicado varias veces en un estudio económico. La fórmula exacta y la extensión a la cual es llevada el estudio es dictado por la ubicación propuesta de los capacitores dentro del sistema.

1.3.1.- CAPACIDAD RELEVADA DEL EQUIPO Y DEL SISTEMA

La capacidad de llevar carga de los equipos de transmisión y distribución es limitada en muchos casos por la caída de voltaje, y en otros por su capacidad térmica. Generalmente hablando, la caída de voltaje es el factor limitante de las alimentadoras, y ocasionalmente la capacidad de las líneas de transmisión es limitada por una caída de voltaje máxima. Equipos como generadores y transformadores están limitados por capacidad térmica, y cualquier beneficio ganado en ello por la instalación de capacitores debe ser considerado en esta base.

1.3.2.- LIMITACION DE LA CAIDA DE VOLTAJE

Cuando la corriente de carga reactiva es suplida por capacitores en lugar de una fuente que tenga inductancias reactivas, hemos demostrado, como un efecto fundamental, que el voltaje al lado de la carga es más alto que sin capacitores. Es más alto en una cantidad que es igual a la inductancia reactiva de la fuente multiplicada por la corriente entregada por el capacitor. Es obvio entonces, que si la carga conectada está limitada por la caída de voltaje, una carga mayor puede tolerarse si se aplicados capacitores shunt los cuales reducen la caída de voltaje.

para determinar la capacidad liberada obtenida por la adición de capacitores shunt, considere el aumento permitido en KW como la capacidad liberada. Los cálculos se basan en que la caída de voltaje después de la instalación de capacitores debe ser la misma que antes de añadirlos.

El diagrama vectorial para esta condición se muestra en la fig. # 8 . Si el voltaje es constante, los KW y KVA son directamente proporcional a la corriente, y por consiguiente, en notación por unidad, ellas son consideradas igual a la corriente.

De la fig. ,

$$\begin{aligned} I_c &= \text{capacitor KVAR} \\ &= KW_2 (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \end{aligned} \quad (13)$$

donde

- I_c = corriente del capacitor shunt
- I_{L1} = corriente de carga inicial
- I_{L2} = corriente de carga final
- I_2 = corriente final de la fuente

El aumento en capacidad es:

$$\begin{aligned} \frac{KW_2 - KW_1}{KW_2} &= \frac{I_2 \cos \theta_2 - I_{L1} \cos \theta_1}{I_2 \cos \theta_2} \\ &= 1 - \frac{I_{L1} \cos \theta_1}{I_2 \cos \theta_2} \end{aligned} \quad (14)$$

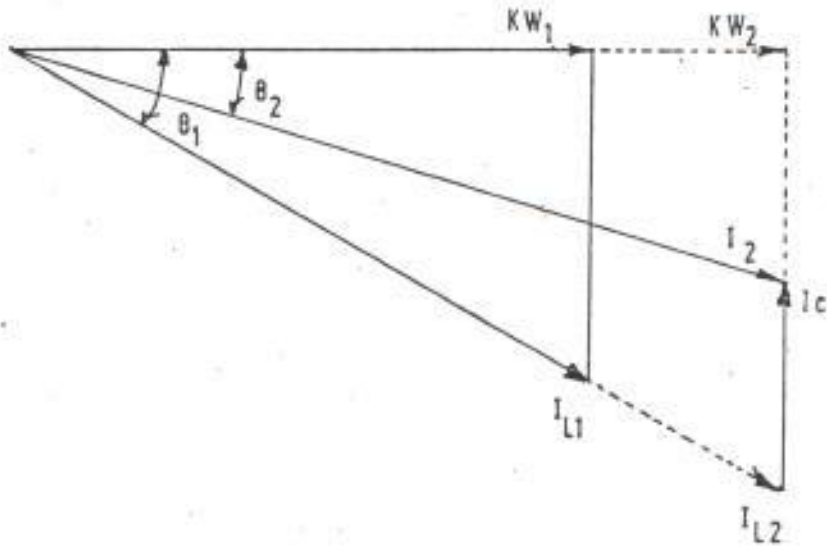


Fig. # 8 Diagrama vectorial para circuitos limitados por caída de voltaje.

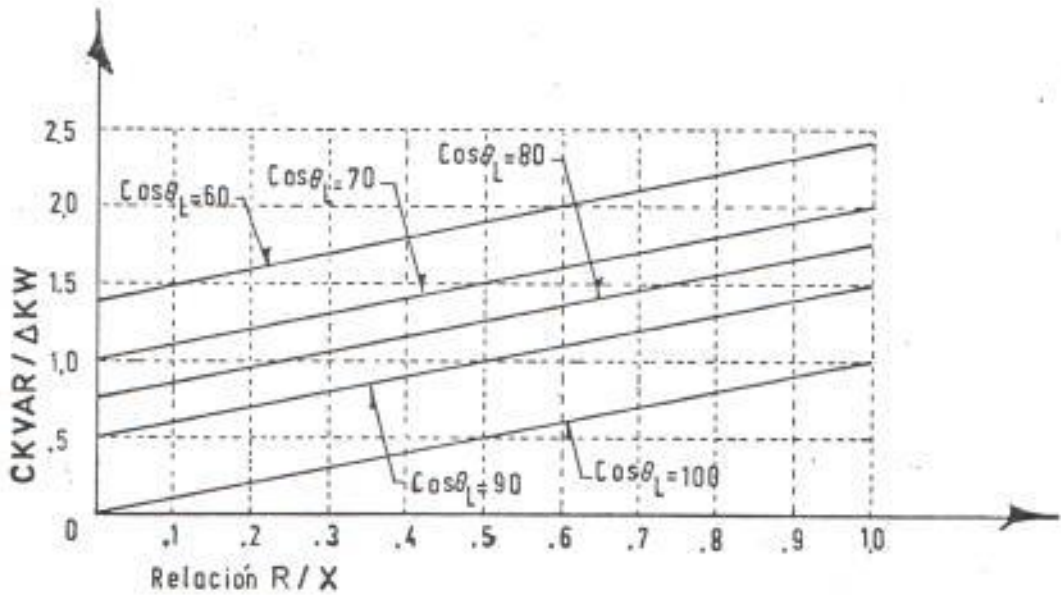


Fig. # 9 Capacidad liberada en circuitos limitados por caída de voltaje, en base a la relación R/X.

Puesto que la caída de voltaje después de añadir los capacitores debe ser igual a la caída original, las respectivas caídas de voltaje pueden ser igualadas como en la ecuación 15, omitiendo la caída reactiva.

$$I_{11} (R \cos \theta_1 + X \sin \theta_1) = I_2 (R \cos \theta_2 + X \sin \theta_2) \quad (15)$$

por consiguiente,

$$\frac{I_2}{I_{11}} = \frac{R \cos \theta_1 + X \sin \theta_1}{R \cos \theta_2 + X \sin \theta_2} \quad (16)$$

sustituyendo en la ecuación 14 .

$$\frac{KW_2 - KW_1}{KW_2} = \frac{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}{R/X + \tan \theta_1} \quad (17)$$

si la ecuación 13 es dividida para $KW_2 - KW_1$

$$\frac{\text{capacitor KVAR}}{KW_2 - KW_1} = \frac{KW_2}{KW_2 - KW_1} (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (18)$$

Por sustitución de la ecuación 17 en la 18, una expresión para KVAR en capacitores por aumento en KW es obtenida.

$$\frac{\text{capacitor KVAR}}{\Delta KW} = R/X + \tan \theta_1 \quad (19)$$

Este análisis indica que los kilovatios ganados, donde los circuitos están limitados por el voltaje, depende sólo del factor de potencia de la carga y de la razón de la resistencia del sistema a la reactancia.

Esta relación se dibuja mejor en términos de KVAR por KW ganados versus la razón R/X para valores típicos

de factor de potencia. Esta familia de curvas se muestra en la fig. # 9.

EJEMPLO F

Si 500 KVAR en capacitores shunt son añadidos a un circuito con una carga de 1000 KVA a un factor de potencia inicial del 60%, cuál es la capacidad liberada? La razón X/R del sistema en el punto de instalación es 1.0 .

de la ecuación 19

$$\frac{\text{KVAR}}{\Delta \text{KW}} = 1.0 + \tan \theta_L = 1.0 + 1.32 \\ = 2.32$$

$$\Delta \text{KW} = \frac{500}{2.32} = 215 \text{ KW}$$

1.3.3.- AUMENTO DE CAPACIDAD DEL LIMITE TERMICO

Para determinar la capacidad liberada donde la disipación térmica es el factor limitante, una diferente aproximación debe hacerse. En este caso, la corriente de línea o los KVA son aumentados, después de añadir los capacitores, al valor asumido antes de instalarlos.

Los KVA adicionales necesitados para cargar al circuito fuente con la carga igual a la original, es la cantidad de la capacidad ganada debido a la instalación

de los capacitores shunt.

Derivando una expresión para el aumento de KVA o capacidad liberada, la carga adicional se asume ser al mismo factor de potencia original θ_1 . Esto para ser pesimista, pero es más aproximado añadir la carga al factor de potencia resultante θ_2 .

El diagrama vectorial para esta consición está ilustrado en la fig. # 10. Donde

ΔKVA = carga al factor de potencia original
añadida después de instalar los capacitores.

KVAR = tamaño del banco de capacitores

KVA_1 = carga original

KVA_2 = carga final

Si KVA_1 es designado como el radio de un círculo con centro en O, y X e Y son coordenadas de un punto del círculo, la ecuación para este círculo es:

$$X^2 + Y^2 = KVA_1^2 \quad (20)$$

de la figura # 10

$$X = KVAR \operatorname{sen} \alpha$$

$$= KVAR \cos \theta_1 \quad (21)$$

sustituyendo ecuación 21 en la ecuación 20

$$(KVAR \cos \theta_1)^2 + Y^2 = KVA_1^2$$

$$Y = \sqrt{(KVA_1)^2 - (KVAR \cos \theta_1)^2} \quad (22)$$

de fig. # 10

$$\Delta KVA = KVAR \text{ sen } \theta_1 - (KVA_1 - Y) \quad (23)$$

sustituyendo ecuación 22 en ecuación 23

$$\Delta KVA = KVAR \text{ sen } \theta_1 - KVA_1 + \sqrt{(KVA_1)^2 - (KVAR \text{ cos } \theta_1)^2} \quad (24)$$

En lugar de la complicada expresión de la ecuación 24 se puede simplificar convirtiéndola a cantidades por unidad para ambos tanto los KVA ganados como el tamaño del banco de capacitores. Esto se realiza dividiendo la ecuación 24 para los KVA. Entonces KVA_6 y $ckva$ son valores por unidad para la capacidad liberada y capacitores instalados respectivamente.

$$KVA_6 = ckva \text{ sen } \theta_1 - 1 + \sqrt{1 - (ckva \text{ cos } \theta_1)^2} \quad (25)$$

Esta relación está dibujada en la figura, # 11, solo requiere el valor por unidad de los capacitores añadidos y el factor de potencia original de la fuente para obtener directamente la capacidad liberada.

El factor de potencia de los circuitos fuente resultante es:

$$\text{cos } \theta_2 = \frac{KW_1 + \Delta KW}{KVA_1} \quad (26)$$

$$\text{cos } \theta_2 = \text{cos } \theta_1 (1 + KVA_6) \quad (27)$$

EJEMPLO G

Cuánta carga puede ser aumentada a un circuito que

ya está en su límite térmico con una carga de 4000 KVA al 60% del factor de potencia al añadir 2000 KVAR en capacitores shunt?

De la ecuación 25

$$KVA_0 = 0.5 \times 0.8 - 1 + \sqrt{1 - (0.5 \times 0.6)^2}$$

$$KVA_0 = 0.4 - 1 + 0.95 = 0.35$$

$$\Delta KVA = 0.35 \times 4000 = 1400 \text{ KVA}$$

El factor de potencia de la fuente resultante es, de la ecuación 27

$$\cos \theta_2 = 0.6 (1 + 0.35) = 0.81$$

Las ecuaciones 19 y 25 son útiles para determinar la capacidad del circuito liberada para evaluaciones económicas. La inspección de estas dos ecuaciones revela lo siguiente:

En circuitos limitados por el voltaje la capacidad liberada es:

- 1.- Dependiente del factor de potencia original de la fuente
- 2.- Dependiente de la razón X/R de la fuente
- 3.- Independiente de la carga del circuito

En circuitos limitados por la corriente la capacidad liberada es:

- 1.- Dependiente del factor de potencia original de la fuente
- 2.- Independiente de la razón X/R de la fuente
- 3.- Dependiente de la carga del circuito

1.3.4.- REDUCCION DE PERDIDAS EN EL EQUIPO Y EN EL SISTEMA

Cálculos de la reducción de pérdidas en el sistema debido a la instalación de capacitores shunt pueden ser hechos directamente de las ecuaciones 11 y 12, donde los resultados están expresados en vatios y vars mono fásicos.

Una expresión en por unidad para la reducción de pérdidas es obtenida de estas mismas ecuaciones por la sustitución de los sigtes. equivalentes:

$I_c = KVAR$ = tamaño del banco de capacitores

$I = KVA_i$ = carga inicial

$ckva$ = carga inicial del banco de capacitores en por
unidad

θ_i = ángulo del factor de potencia de la carga inicial

De las ecuaciones 11 y 12,

ΔPL = p.u. reducción de pérdidas pico =

$$= 2 ckva \text{ sen } \theta_i - (ckva)^2 \quad (28)$$

Esta expresión es válida tanto para reducción de pérdidas I^2R real como para I^2X reactiva. Si se desea la reducción de pérdidas en pico, el por unidad del banco de capacitores debe estar en la carga pico base. Si la evaluación va a ser determinada usando kilovatio-horas, la corriente de carga o KVA debe incluir el factor de carga reactiva. Esto redundará en

la siguiente modificación de la ecuación 28

$$\begin{aligned}\Delta EL &= \text{p.u. reducción de pérdidas de energía} \\ &= (2 \text{ ckva sen } \theta_L) LF - (\text{ckva})^2\end{aligned}\quad (29)$$

El uso de esta ecuación es válido solamente si no hay cargas que varíen la componente reactiva de la corriente en la sección que está siendo considerada. Por consiguiente, el cálculo de reducción de pérdidas es solamente tan aproximado como en la extensión en la cual el sistema es seccionalizado para propósitos de cálculo.

EJEMPLO H

Usando los mismos parámetros del circuito que en el ejemplo C, la reducción de pérdidas pico es:

$$\Delta PL = 2 \times 0.5 \times 0.6 - 0.5^2$$

$$\Delta PL = \text{p.u. reducción de pérdidas pico} = 0.35$$

Por consiguiente, las pérdidas finales serán el 65% de las originales como se puede encontrar en las curvas de la fig. # 5.

si el factor de carga es del 70%:

$$\Delta EL = 2 \times 0.5 \times 0.6 \times 0.7 - 0.5^2$$

$$\Delta EL = \text{p.u. reducción de pérdidas de energía} = 0.17$$

Después del cálculo de la reducción de pérdidas, hay tres beneficios económicos que evaluar. Estos son:

- 1.- Reducción de la carga pico en KW
- 2.- Reducción de la carga pico en KVAR
- 3.- Ahorro de energía debido a la reducción de pérdidas en KW-horas.

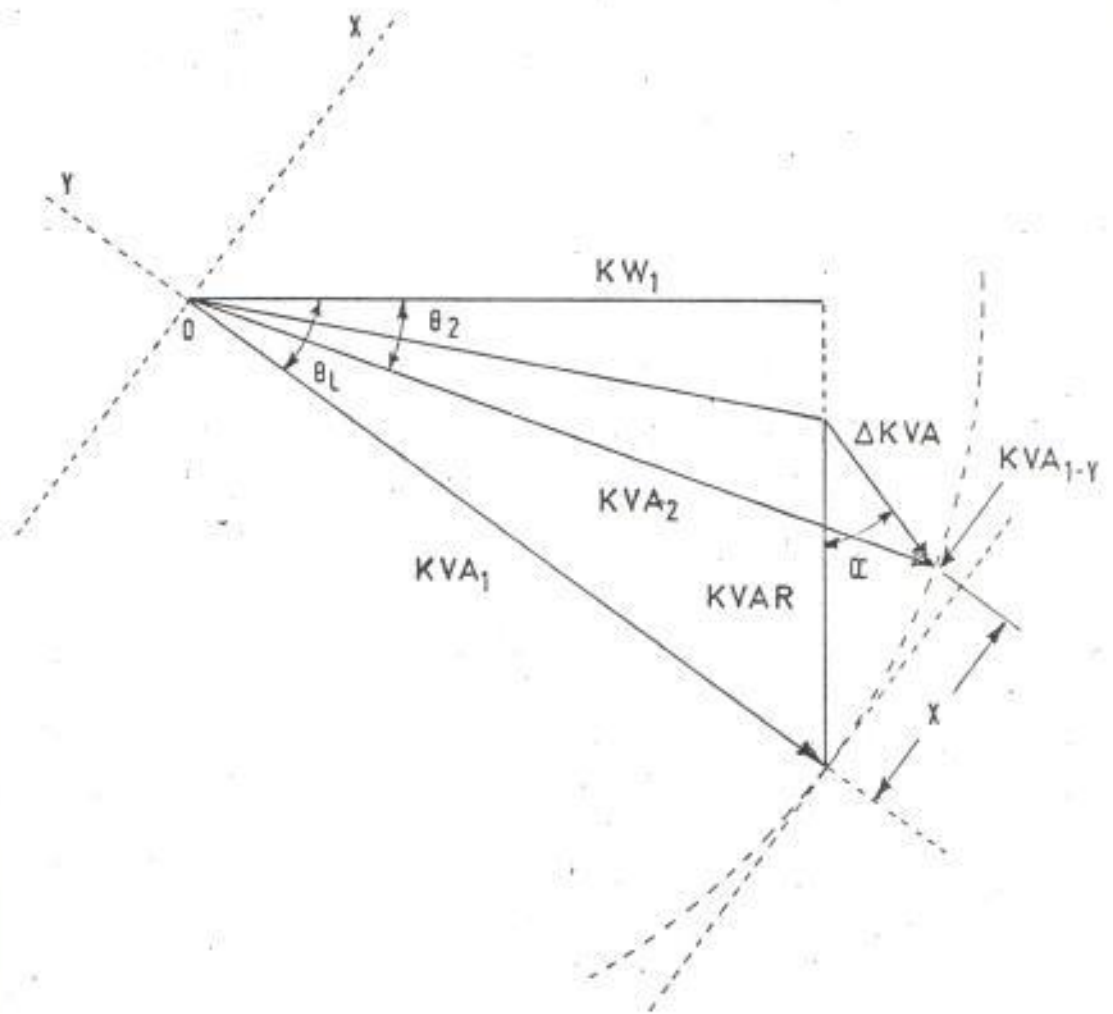


Fig. # 10 Diagrama vectorial para circuitos limitados por corriente.

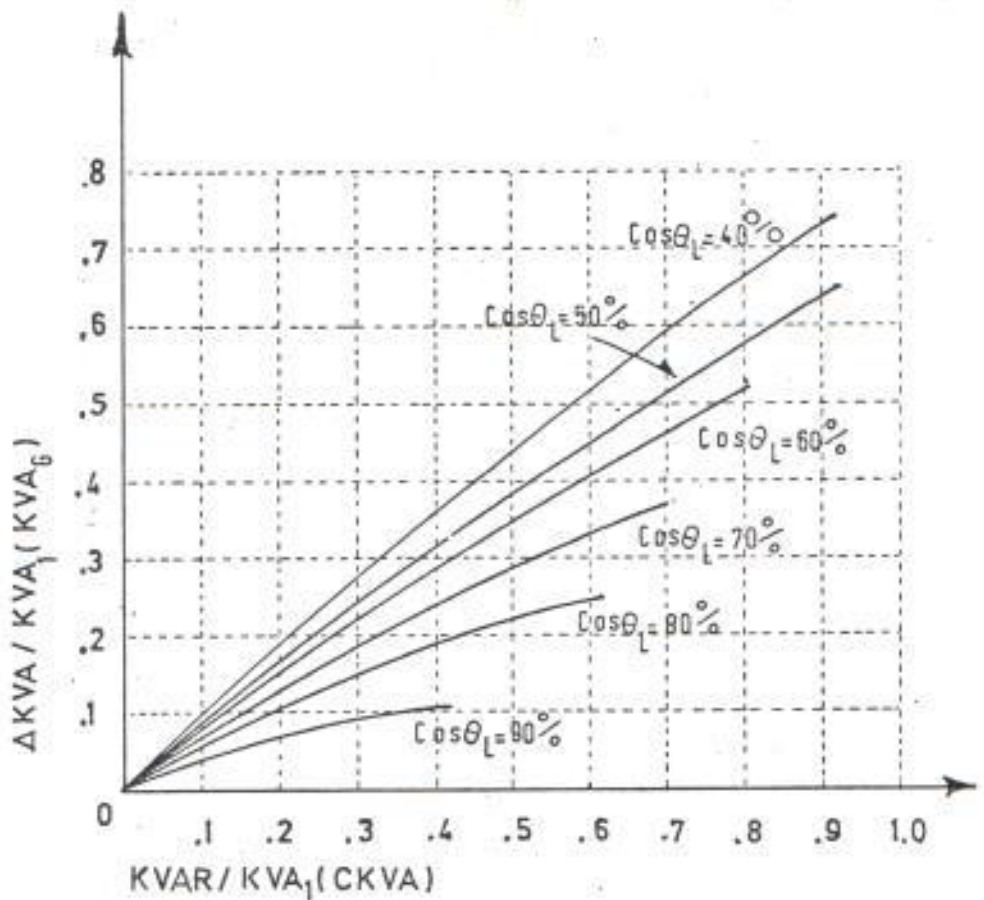


Fig. # 11 Capacidad liberada en circuitos limitados por la corriente debido a la instalación de capacitores.

La reducción de la carga pico en kilovatios (demanda) es un importante beneficio económico para las empresas.

El tercer beneficio derivado de la reducción de pérdidas es fácilmente evaluado una vez que los cálculos iniciales son realizados. Para este análisis de costo, la mayoría de empresas usa el costo por kilovatio de energía entregada. El ahorro es la reducción calculada en por unidad multiplicada por la pérdida pico original por las horas del período considerado, multiplicado por el costo encontrado.

3.3.5.- AUMENTO DE RENTAS DEBIDO A UN MAYOR VOLTAJE DEL SISTEMA

La evaluación de los mayores voltajes resultantes de la instalación de capacitores, concierne dos aspectos. Ellos son:

- 1.- El aumento inmediato del voltaje del sistema en el punto de medición ocasionando un aumento proporcional en el registro de kilovatio-hora.
- 2.- La reducción de la pendiente del perfil del voltaje de la alimentadora.

Esto está ilustrado en la fig. # 12

La relación de la ecuación 10 puede ser usada para calcular la subida de voltaje en un punto dado. Puesto que el beneficio generalmente está relacionado con

los niveles de voltaje residenciales, puede asumirse que las características de la carga serán primariamente resistivas. Por consiguiente, el aumento de kilovatios usados será proporcional al aumento del voltaje. Para realizar una evaluación conservadora, la siguiente relación es generalmente usada:

$$\Delta KW = 0.5\Delta E \quad (30)$$

en donde las dos cantidades están expresadas en porcentajes.

Esta expresión puede ser convertida en kilovatios-hora usando el total de horas del período considerado. La ganancia en kilovatios-hora es usualmente considerado sobre una base anual, por consiguiente:

$$\Delta KWHR = 8760 \times 0.5\Delta E \times KW \times LF \quad (31)$$

EJEMPLO I

Cuál es el valor económico del aumento de energía medida si un banco de capacitores de 900 KVAR se instala en una alimentadora a 13.8 KV con una carga promedio de 2000 KW? La alimentadora tiene una longitud de 6 Km con una reactancia de 0.44 ohms/Km y un costo promedio de energía de S/. 2/KWHR.

$$\Delta E = \% \text{ subida voltaje} = \frac{900 \times 0.44 \times 6}{10 \times (13.8)^2} = 1.25$$

$$\Delta KWHR = \frac{8760 \times 0.5 \times 1.25 \times 2000}{100} = 109.500$$

Aumento de rentas = 2 x 109.500 = S/. 219.000 anuales

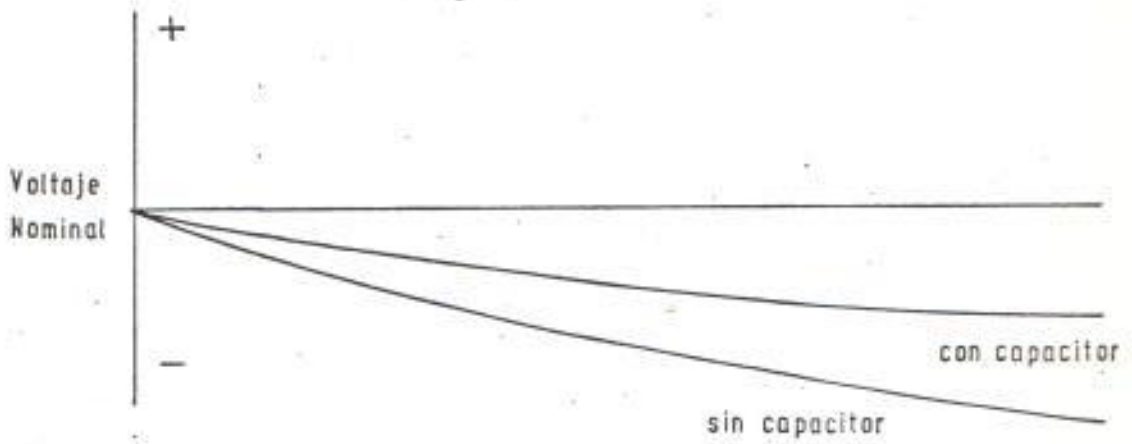


Fig. # 12 Perfil de voltaje en alimentadora con carga distribuída.

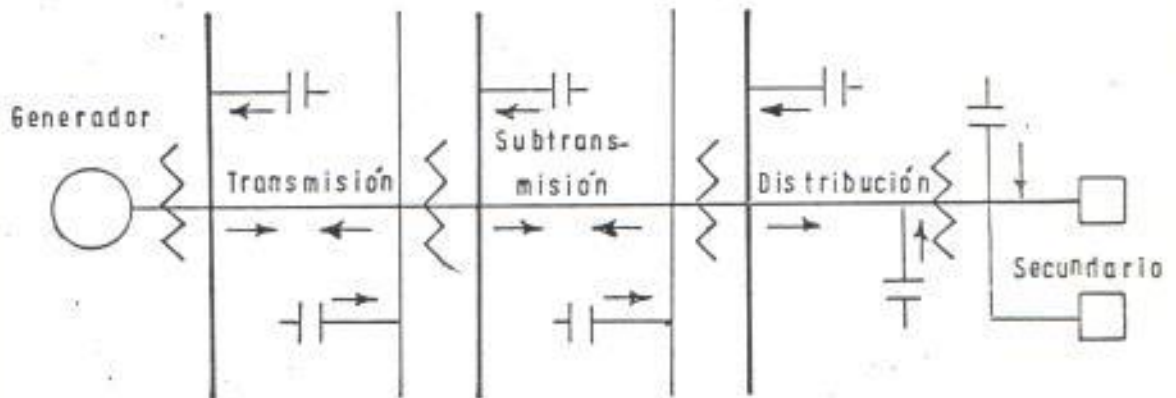


Fig. # 13 Ubicación típica de banco de capacitores.

La segunda condición para ganancia económica resulta porque el banco de capacitores fijos reduce la gradiente de voltaje a lo largo de la alimentadora con carga distribuída, como se muestra en la fig. # 12. Efectivamente-puesto que la caída reactiva del voltaje es reducida- la razón del voltaje de recepción al del entrada es cercano a la unidad. Esto puede permitir la omisión del regulador de voltaje en la alimentadora y en cualquier reducción en inversión en equipos para el sistema que deberían ser acreditados a la instalación de capacitores.

1.3.6.- SUMARIO DE EVALUACION DE BENEFICIOS DE LOS CAPACITORES

Los principales beneficios económicos para las empresas eléctricas por la instalación de capacitores shunt han sido discutidos brevemente. Análisis más detallados y comentarios se pueden encontrar en los artículos enlistados en la bibliografía.

El ingeniero de planificación tiene la opción de evaluar todos los beneficios económicos señalados, o usar sólo aquellos que pueda aplicar a un determinado caso.

1.4.- DETERMINACION DE LOS REQUERIMIENTOS EN CAPACITORES

El concepto original de instalación de capacitores shunt en sistemas eléctricos era proponer algo así como a la buena de Dios, gobernado por métodos empíricos. Bastante extraño, cuando el amplio sistema de ingeniería en análisis, comparaciones y programas de computación han venido recomendando procedimientos para la aplicación de capacitores, estos mismos métodos nuevos han verificado la exactitud básica de algunos de estas guías o preceptos originales.

Toda la información precedente en este estudio es concerniente con la investigación de los efectos fundamentales de los capacitores shunt y cálculos de las ganancias económicas o crédito establecido por la instalación de este tipo de corrección de reactivo. El planificador de sistemas debe determinar, usando estos datos fundamentales y las características de su sistema, qué cantidad de correctores de reactivo debe comprar y en qué parte del sistema debe ser instalado.

1.1.- ESTIMACION DE LA MAGNITUD DE LA NECESIDAD DE REACTIVO ESTATICO

Una estimación aproximada de la s necesidades de reacu

tivo en todo el sistema es necesario para asegurar que una impropia distribución de los capacitores shunt no ocurra. La carga reactiva en cada sección debe ser considerada, siendo el principal objetivo operar cada parte del sistema a un factor de potencia lo más cercano a la unidad como sea posible práctica y económicamente.

Los datos que deben ser recolectados para este análisis es idéntico a los que se necesitan para un estudio de flujo de carga.

Esto incluirá cosas tales como:

- 1.- Características de las líneas de transmisión y subtransmisión.
- 2.- Tamaño de los transformadores, impedancias, y número de taps.
- 3.- Características del generador y su capacidad reactiva.
- 4.- Magnitud y localización presente de fuente de reactivo, tales como motores, generadores sincrónicos, o capacitores shunt.
- 5.- Constantes típicas de las alimentadoras de distribución y su carga.
- 6.- Factor de potencia y magnitudes de las mayores tomas de carga.

Las tendencias pasadas de requerimientos de reactivo eran estudiadas particularmente con relación al crecimiento de carga. Esto ayudará en la determinación de las futuras necesidades de KVAR que eran previstas por la tendencia del pico de carga del sistema. Un análisis del flujo de carga puede predecir los requerimientos de reactivo, informando generalmente al planificador cuántos KVAR son necesarios en las varias secciones del sistema, basándose en niveles de voltaje y picos de carga. El mismo estudio de carga puede decirle específicamente cuánta carga reactiva pueden suplir los generadores sin crear condiciones intolerables en el voltaje del sistema.

Si un estudio en un calculador de redes no puede ser hecho, las necesidades de capacitores pueden ser determinadas de los mismos datos, calculando cuántos KVAR son necesarios para subir el control de potencia de cada sección de operación a la unidad. La vía más simple de llegar a esto es resolver el sistema de circuitos radiales equivalentes.

Este circuito radial tendrá las características combinadas de cada sección asumiendo implícitamente que las características de los circuitos y las cargas en varias secciones del sistema son similares, y pueden ser agrupadas con un voltaje básico común. El

factor de potencia de operación de cada sección del sistema es dependiente de la sección subsiguiente, en dirección de la carga, el factor de potencia operando en cada sección precedente debe ser reajustado hacia arriba antes de corregirlo a la unidad.

2.4.2.- LOCALIZACION DE LOS CAPACITORES EN UN SISTEMA RADIAL

Después de obtener los resultados para los requerimientos seccionales o totales de KVAR, es necesario arreglar un programa ordenado de instalación. El sistema típico de ubicación de capacitores está mostrado en la fig. # 13. Hay tres planes comunes para determinar cuál de estas ubicaciones es usada y la distribución de los capacitores en ella. Ellos son:

- 1.- Saturación del sistema de distribución.
- 2.- Comparación económica.
- 3.- Prioridad en emergencias.

2.4.3.- SATURACION DEL SISTEMA DE DISTRIBUCION

Es el primer y aún el método más común y aplicado por las empresas eléctricas en la aplicación de capacitores. Básicamente, según las necesidades de corrección de reactivo acumulado, capacitores shunt fijos son instalados en las alimentadoras de distribución hasta que el factor de potencia de operación iguale o exceda a

la unidad a niveles de carga ligera. Para corregir a unidad a plena carga, se instalan banco de capacitores desconectables -sea en postes o en la subestación-.

Este programa es continuado cada año con una relación fija entre el crecimiento total de la carga del sistema y los capacitores a ser añadidos al sistema de distribución. Si se encuentra que a este nivel de voltaje no satisface plenamente las necesidades de reactivo, se hace consideraciones entonces al siguiente nivel de voltaje más alto. De esta forma, el sistema terminará con alrededor del 75-85% de sus capacitores shunt al nivel de voltaje de distribución, y el resto en los circuitos de subtransmisión.

3.4.4.- COMPARACION ECONOMICA

Involucra datos de costo del sistema para obtener el costo/KVAR de capacitores shunt instalados para cada sección del sistema. Estas cifras son entonces comparadas al costo/KVA de los equipos fuente los cuales producirán los mismos beneficios al sistema tales como mayor voltaje, aumento de capacidad y menores pérdidas.

Hay muchas maneras de obtener, y comparar estas cifras

de costos. Casi toda empresa tiene su método preferido a medida de su sistema de operación o método contable. Una filosofía preferida es considerar que los capacitores shunt pueden ser instalados en una sección dada del sistema hasta que S/. costo/KVAR instalados exceda al S/. ganancia/KVAR de los últimos KVAR instalados. Como se puntualizó previamente, los S/. ganancia/KVAR disminuyen como el factor de potencia original aumenta. Por consiguiente, por cada KVAR añadido, la razón de S/. ganados a S/. de costo disminuirá. Cuando la razón llega a la unidad que ha alcanzado el balance económico de la instalación de capacitores. Puesto que el costo S/./KVAR variará entre las secciones del sistema, esta comparación debe hacerse a base de datos seccionales, de este modo arribando a la instalación óptima de capacitores en esa sección, sea transmisión, subtransmisión, distribución o secundario.

Un procedimiento sugerido para hacer una comparación de éstas es el siguiente:

- Paso 1.- Obtener los S/. costo/KVAR instalados para cada sección del sistema a ser considerado.
- Paso 2.- Calcular los S/. ganados/KVAR para cada sección del sistema.
- Paso 3.- Calcular la razón de S/. ganados/KVAR a S/. costo/KVAR y continuar instalando capacitores en esa sección hasta que la razón sea 1.

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
 DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS
 No. DOT-061

TABLA # 2

FACTORES DE CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA POR UNIDAD DE KW

FACTOR DE POTENCIA DESEADO

50	0.982	1.008	1.034	1.060	1.086	1.112	1.139	1.165	1.192	1.220	1.248	1.276	1.304	1.332	1.360	1.403	1.442	1.481	1.519	1.590	1.732	
51	.977	.962	.949	.935	.921	.907	.894	.881	.868	.855	.842	.829	.816	.803	.790	.777	.764	.751	.738	.725	.712	.699
52	.893	.879	.865	.851	.837	.823	.809	.795	.781	.767	.753	.739	.725	.711	.697	.683	.669	.655	.641	.627	.613	.600
53	.850	.836	.822	.808	.794	.780	.766	.752	.738	.724	.710	.696	.682	.668	.654	.640	.626	.612	.598	.584	.570	.556
54	.809	.795	.781	.767	.753	.739	.725	.711	.697	.683	.669	.655	.641	.627	.613	.599	.585	.571	.557	.543	.529	.515
55	.769	.755	.741	.727	.713	.699	.685	.671	.657	.643	.629	.615	.601	.587	.573	.559	.545	.531	.517	.503	.489	.475
56	.720	.706	.692	.678	.664	.650	.636	.622	.608	.594	.580	.566	.552	.538	.524	.510	.496	.482	.468	.454	.440	.426
57	.672	.658	.644	.630	.616	.602	.588	.574	.560	.546	.532	.518	.504	.490	.476	.462	.448	.434	.420	.406	.392	.378
58	.635	.621	.607	.593	.579	.565	.551	.537	.523	.509	.495	.481	.467	.453	.439	.425	.411	.397	.383	.369	.355	.341
59	.618	.604	.590	.576	.562	.548	.534	.520	.506	.492	.478	.464	.450	.436	.422	.408	.394	.380	.366	.352	.338	.324
60	.584	.570	.556	.542	.528	.514	.500	.486	.472	.458	.444	.430	.416	.402	.388	.374	.360	.346	.332	.318	.304	.290
61	.549	.535	.521	.507	.493	.479	.465	.451	.437	.423	.409	.395	.381	.367	.353	.339	.325	.311	.297	.283	.269	.255
62	.515	.501	.487	.473	.459	.445	.431	.417	.403	.389	.375	.361	.347	.333	.319	.305	.291	.277	.263	.249	.235	.221
63	.483	.469	.455	.441	.427	.413	.399	.385	.371	.357	.343	.329	.315	.301	.287	.273	.259	.245	.231	.217	.203	.189
64	.450	.436	.422	.408	.394	.380	.366	.352	.338	.324	.310	.296	.282	.268	.254	.240	.226	.212	.198	.184	.170	.156
65	.419	.405	.391	.377	.363	.349	.335	.321	.307	.293	.279	.265	.251	.237	.223	.209	.195	.181	.167	.153	.139	.125
66	.388	.374	.360	.346	.332	.318	.304	.290	.276	.262	.248	.234	.220	.206	.192	.178	.164	.150	.136	.122	.108	.094
67	.358	.344	.330	.316	.302	.288	.274	.260	.246	.232	.218	.204	.190	.176	.162	.148	.134	.120	.106	.092	.078	.064
68	.329	.315	.301	.287	.273	.259	.245	.231	.217	.203	.189	.175	.161	.147	.133	.119	.105	.091	.077	.063	.049	.035
69	.299	.285	.271	.257	.243	.229	.215	.201	.187	.173	.159	.145	.131	.117	.103	.089	.075	.061	.047	.033	.019	.005
70	.270	.256	.242	.228	.214	.200	.186	.172	.158	.144	.130	.116	.102	.088	.074	.060	.046	.032	.018	.004	.000	.000
71	.242	.228	.214	.200	.186	.172	.158	.144	.130	.116	.102	.088	.074	.060	.046	.032	.018	.004	.000	.000	.000	.000
72	.213	.200	.186	.172	.158	.144	.130	.116	.102	.088	.074	.060	.046	.032	.018	.004	.000	.000	.000	.000	.000	.000
73	.186	.172	.158	.144	.130	.116	.102	.088	.074	.060	.046	.032	.018	.004	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
74	.159	.145	.131	.117	.103	.089	.075	.061	.047	.033	.019	.005	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
75	.132	.118	.104	.090	.076	.062	.048	.034	.020	.006	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
76	.105	.091	.077	.063	.049	.035	.021	.007	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
77	.079	.065	.051	.037	.023	.009	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
78	.053	.039	.025	.011	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
79	.026	.012	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
80	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
81	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
82	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
83	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
84	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
85	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
86	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
87	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
88	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
89	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
90	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
91	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
92	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
93	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
94	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
95	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
96	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
97	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
98	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
99	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FACTOR DE POTENCIA ORIGINAL

Puesto que la disminución en S/. ganados/KVAR es una función del cambio del factor de potencia de la fuente, es necesario recalcular el factor de potencia de la fuente después de cada incremento de capacitores. La tabla # 2 de la pag. , simplifica este procedimiento puesto que el factor de potencia resultante para cada incremento de capacitores puede obtenerse proporcionando el factor de potencia inicial conocido.

EJEMPLO J

Suponiendo que 3000 KVAR se han añadido a un circuito con 11250 KVA de carga al 80% de factor de potencia, cuál es el factor de potencia resultante?

$$\text{Factor de corrección} = \frac{3000}{11250} = 0.266$$

De la tabla # 2, el factor de potencia resultante es 88.8%.

Si esto es usado en una comparación económica, todo S/. ganado/KVAR para bancos adicionales serán evaluados con una base de un factor de potencia original del 88.8%.

Otra filosofía aceptada y probada de comparación económica es basar el límite de instalación de capacitores al mínimo costo del sistema. El siguiente análisis correlaciona la cantidad de capacitores instalados

a un mínimo de inversión del sistema. Las fórmulas son derivadas para aplicación general a cualquier sección del sistema.

Las siguientes cantidades son usadas:

P_L = KW entregados a la carga

U_L = KVA entregados a la carga

U_R = KVA resultantes del sistema

Q_L = KVAR entregados a la carga

Q_C = KVAR entregados por el capacitor

Q_S = KVAR entregados por la fuente

θ_1 = factor de potencia inicial

θ_2 = factor de potencia resultante

R = costo/KVAR anual del capacitor

S = costo/KVA anual de los circuitos fuente

C = costo total del sistema/KW de la capacidad del sistema.

La relación vectorial entre kilovatios, kilovars y KVA totales en cualquier punto del sistema está mostrado en la fig. # 14 para un sistema simplificado que está en la misma figura.

La potencia real requerida por la carga y el sistema es P_L , y los vars de la carga y el sistema más allá de un punto en particular es Q_L . Los vars son entregados parcialmente por los generadores y el resto por los capacitores. La parte de Q_L que viene de la fuente

te es Q_s y la porción entregada por los capacitores es Q_c . El sistema y la carga más lejanos al punto de instalación de los capacitores absorbe U_1 KVA a un ángulo de factor de potencia inicial de θ_1 por lo cual la fuente entrega U_1 KVA a un ángulo de factor de potencia resultante θ_2 . El factor de potencia de la fuente decimos es resultante porque si los capacitores no estuvieran en circuito, la fuente tendría que entregar todo el reactivo y operaría al mismo factor de potencia de la carga.

Las cargas al capital invertido anualmente para abastecer a la carga, incluyendo costos de todas las secciones del sistema hasta la instalación de los capacitores en kilovatios en por unidad se designa como C . Puesto que cada uno de los valores de la fuente de energía está expresado en por unidad, las cargas a la inversión totales pueden mostrarse como:

$$C \times P_1 = S \times U_1 \times R \times Q_c \quad (32)$$

Es posible convertir esta expresión por medio de equivalentes trigonométricos hasta que el costo total este en términos de una sola variable que es $\cos \theta_2$, factor de potencia resultante de los circuitos fuente. Esto es de desearse puesto que el objetivo esencial de cualquier instalación de capacitores es reducir a un mínimo la demanda del reactivo a la fuente. Debe

hacerse notar que el factor de potencia de la carga es considerado fijo y por consiguiente es tomado como una constante en la derivación. Por consiguiente:

$$C = \frac{S \frac{P_L}{\cos \theta_2} + R \times P_L (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)}{P_L} \quad (33)$$

$$\delta \quad C = \frac{S}{\cos \theta_2} + R (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (34)$$

Esta ecuación final para C es una expresión del costo combinado anual de los circuitos fuente y de los capacitores en términos del ángulo del factor de potencia resultante. El ángulo del factor de potencia obtenido cuando este costo anual es mínimo, es una medida de la proporción más económica del capital invertido entre circuitos fuente y capacitores. El valor mínimo de C puede ser obtenido tomando la primera derivada de C con respecto a θ_2 , e igualándola a 0, así:

$$\frac{dC}{d\theta_2} = \frac{S \operatorname{sen} \theta_2}{\cos^2 \theta_2} + R \left(0 - \frac{1}{\cos^2 \theta_2} \right) = 0 \quad (35)$$

Por consiguiente

$$\begin{aligned} S \operatorname{sen} \theta_2 - R &= 0 \\ \operatorname{sen} \theta_2 &= R/S \end{aligned} \quad (36)$$

Este análisis matemático, en efecto, relaciona las distribuciones monetarias establecidas anteriormente con la relación vectorial mostrada en la fig. #

Puesto que $\operatorname{Cos} \theta = \sqrt{1 - \operatorname{sen}^2 \theta}$
el factor de potencia puede ser expresado directamen

te como:

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{S}\right)^2} \quad (37)$$

El factor de potencia determinado por esta fórmula es entonces, el factor de potencia óptimo que puede alcanzarse por la aplicación de capacitores shunt a un sistema eléctrico. Resultados típicos están graficados en la fig. #15.

Por sustitución en la fórmula original para el costo total, puede obtenerse una expresión para el costo mínimo.

$$C = \sqrt{S^2 - R^2} + R \tan \theta_1 \quad (38)$$

Puesto que estas fórmulas son derivadas usando como base un costo de sistema/KVA para equipos limitados sólo térmicamente, hay un pequeño error involucrado donde parte del sistema incluido tienen su capacidad limitada por la caída de voltaje.

Usando el factor de potencia óptimo derivado en la ecuación 37 como el factor de potencia máximo para operación de cualquier sección del sistema, la cantidad óptima de capacitores shunt a instalarse puede ser determinada como sigue:

1.- Determine el costo S./KW o costo S./KVA para

equipos fuente o líneas. Esto debe ser calculado para cada sección del sistema.

- 2.- Determine el costo S./KVAR de los capacitores shunt instalados, tomando también como base una sección.
- 3.- Usando la ecuación 37 o la fig. # 15, calcule el factor de potencia óptimo para la sección del sistema en consideración.
- 4.- De la tabla # 2, obtenga el factor de corrección apropiado. Cuando la carga en KW es multiplicada por este factor, el valor óptimo de capacitores a instalarse para una sección en particular del sistema es obtenido.

Si el mismo procedimiento es aplicado a otra sección del sistema, se deberá recordar que el factor de potencia de operación de cualquier sección será modificado por la instalación de capacitores entre ella y la carga.

EJEMPLO K

Cuál es la instalación de capacitores óptima en una alimentadora a 13.8 KV con las siguientes características:

$$KW_1 = 3000$$

$$\theta_1 = 80\%$$

$$S = 6000/KVA$$

$$R = 400/KVA$$

de la ecuación 37

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{400}{6000}\right)^2} = 0.997$$

de la tabla # 2

instalación óptima de capacitores shunt

= 0.61 x 3000

= 1.830 KVAR

Este ejemplo nos indica que la corrección a casi la unidad del factor de potencia es muchas veces económicamente justificada.

3.4.5.- INSTALACION EN EL PRIMARIO VS INSTALACION EN EL SECUNDARIO

Algunos planificadores prefieren considerar los capacitores en el secundario sólo como base para comparar los con las unidades en el primario antes que para una aplicación en todo el sistema. Este método ahorra tiempo, puesto que asume que los capacitores primarios están ya económicamente justificados. Puesto que todos los beneficios que puedan resultar de la instalación de capacitores primarios pueden ser acreditados también a las unidades para secundario, justificación de las unidades para secundario pueden ser rápidamente chequeadas computando las ganancias adicionales obtenidas por la reducción de la corriente reactiva a través de los transformadores de distribución y circuitos secundarios.

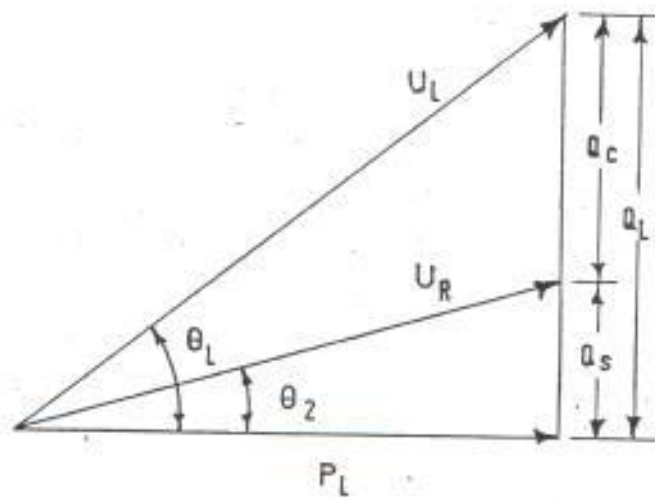
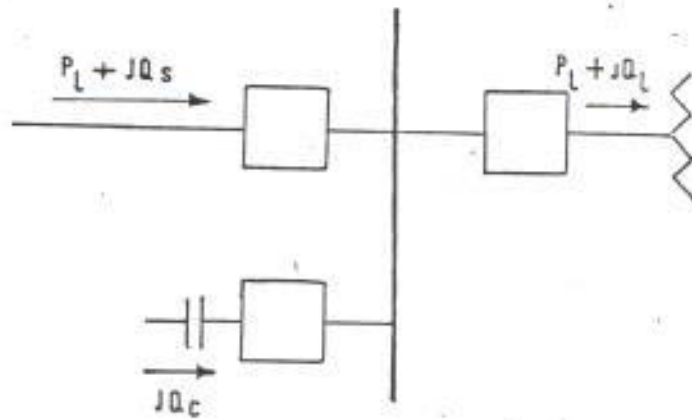


Fig. # 14 Diagrama vectorial para derivación de fórmula del mínimo costo.

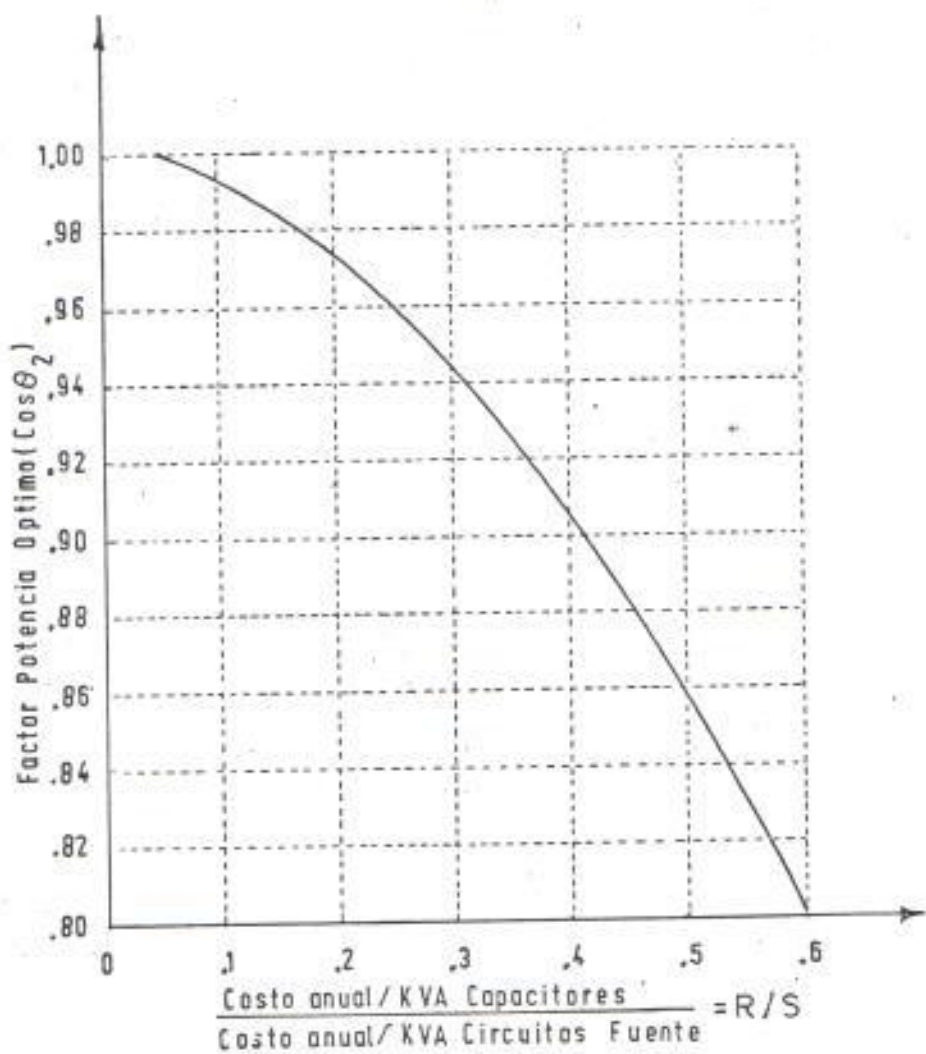


Fig. # 15 Factor de potencia óptimo del sistema en función de una mínima inversión.

Puede parecer que capacitores en el secundario podrían ser siempre justificados puesto que ellos ofrecen una mayor reducción de pérdidas, como mayor capacidad relevada, y mayor incremento de voltaje directamente en el punto de medición. Económicamente, sin embargo, este aumento de beneficios puede ser completamente compensado por el alto costo/KVAR de los capacitores de la clase de 240 a 600 voltios, comparados con las unidades de 2400 a 7960 voltios. Además, las unidades individuales son necesariamente pequeñas debido a las dimensiones de la carga reactiva que ellos intentan corregir. Este incrementa el costo S./KVAR de instalación considerablemente.

Es posible hacer una comparación económica completa en este caso especial por cualquier método señalado bajo "comparación económica" pág. , sin embargo, un método rápido para revisar se usa en la práctica. Este procedimiento reconoce que la mayor ventaja de los capacitores secundarios sobre las unidades primarias es la capacidad relevada en el transformador de distribución. Por consiguiente, si la instalación en el secundario puede justificarse en esta base sólomente, los otros beneficios simplemente aumentan las ganancias económicas. Si, sin embargo, ellos no pueden demostrar una ventaja sobre las unidades primarias debido a la capacidad relevada en el transformador, las

ganancias adicionales por los otros beneficios usualmente no son suficientes para garantizar futuras consideraciones.

Las curvas de la fig. #16 fueron desarrolladas del diagrama vectorial de la fig. #10 que representa la capacidad liberada en los equipos limitados térmicamente. Si el voltaje es el factor determinante, una comparación paso a paso como se discutió anteriormente sería más aproximada.

Para el caso general, sin embargo, es posible determinar si unidades para secundario son económicas conociendo solamente el factor de potencia inicial, factor de potencia óptimo deseado, razón de costo de unidades para secundario a unidades para primario y el costo de transformadores de distribución por KVA. Si la razón de KVAR (secundario) a KVAR (primario) es permisible de acuerdo a las curvas de la fig. #16 es justamente igual a la razón actual, otros beneficios económicos tales como disminución de pérdidas en el secundario y aumento de entradas por un mayor voltaje en el secundario podrían ser calculados para validar una decisión positiva.

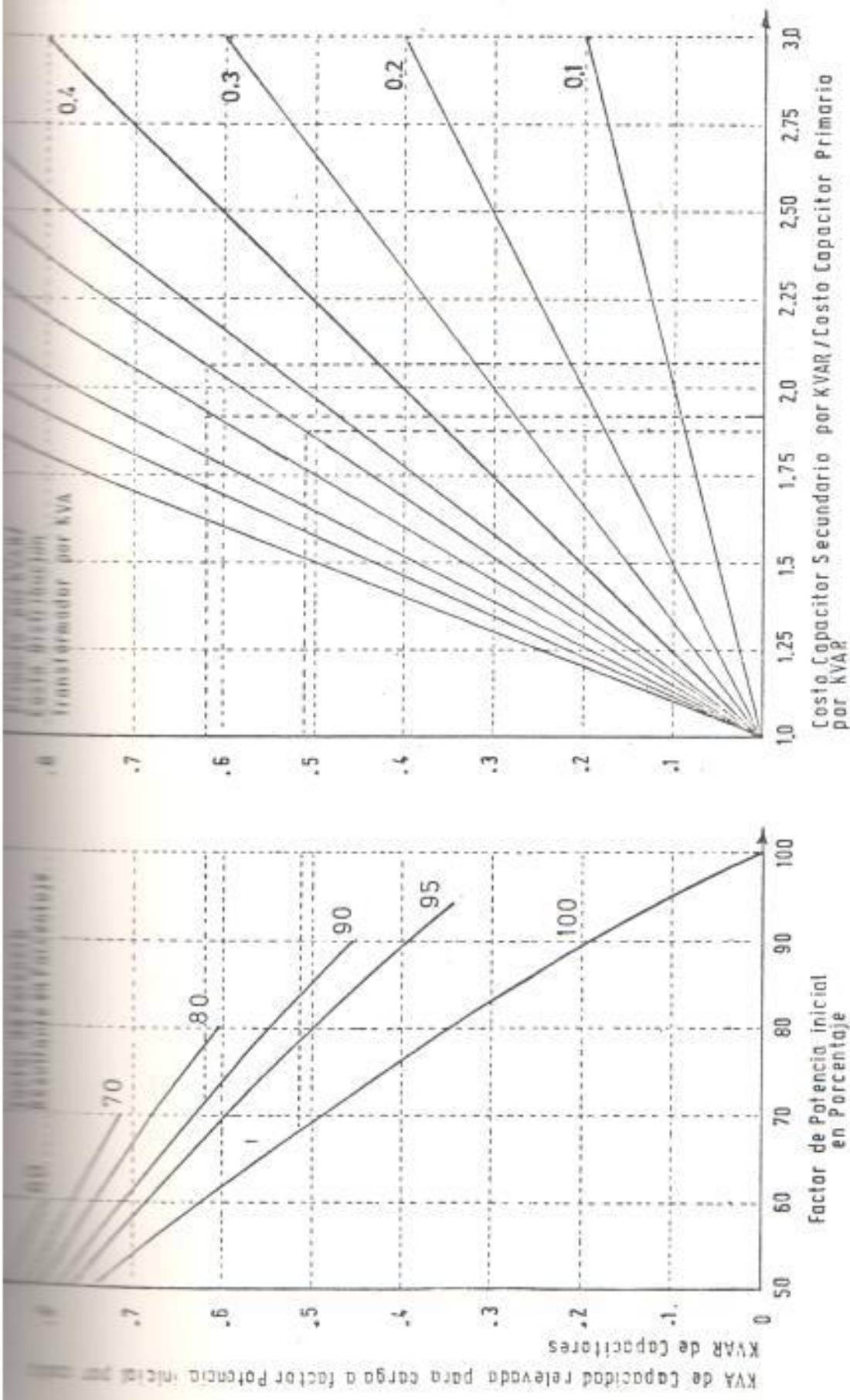


Fig.# 16 Comparación económica entre instalación de capacitores en el primario y el secundario.

1.4.6.- PRIORIDAD EN EMERGENCIAS

Muchas instalaciones de capacitores son justificados sólomente por sus beneficios al sistema durante condiciones de emergencia. Esto es particularmente verdad con bancos grandes y a alto voltaje. Por ejemplo, un banco de capacitores puede ser instalado en una barra de 138 KV con dos líneas de entrada.

El banco de capacitores podría estar el mayor tiempo de -energizado, sin embargo, cuando hay una tormenta eléctrica en el área, podrían ser conectados a la barra. Entonces, si una línea se desconecta durante la tormenta, la línea restante será capaz de llevar toda la carga de la subestación, porque la corriente reactiva será entregada por el capacitor. Sin el capacitor, el voltaje en la barra sería muy bajo y toda la carga puede perderse.

Otro ejemplo es una empresa la cual encuentra deseable compensar las altas pérdidas reactivas en un transformador de interconexión, normalmente no soportando una carga apreciable. Esto permite un máximo intercambio de energía por su operación a un factor de potencia unitario o cercano a él durante emergencias tales como la pérdida de un generador grande del sistema interconectado.

Bancos de capacitores desconectables son instalados a veces en alimentadoras de distribución estrictamente por el mérito de mejorar la regulación de voltaje. En esta aplicación son comparados económica y operativamente con los reguladores de voltaje necesarios para proveer la misma función. Sólo recientemente, con el advenimiento de exitosos programas de computación para comparar métodos de regulación de voltaje esta práctica ha venido a ser corriente. Previamente, la complejidad y largura de los cálculos han prohibido extensos estudios.

3.4.7.- UBICACION DE CAPACITORES DENTRO DE SECCIONES DEL SISTEMA

La instalación de capacitores enseñada en la fig. 13 indica la ubicación óptima dentro de cada sección para dar unas pérdidas mínimas al sistema. Esto puede o no dictar el emplazamiento exacto del banco de capacitores dentro de cada sección, otras consideraciones tienen a veces prioridad. Esto es verdad particularmente con bancos para transmisión y subtransmisión, donde la facilidad de espacio en la subestación o condiciones de emergencia pueden ejercer gran influencia en determinar la ubicación antes que las mínimas pérdidas.

La ubicación exacta de bancos de capacitores diseñados para instalación en alimentadoras primarias de distribución es, sin embargo, un problema con muchas variables, y no todas incluidas en la solución. En general, el análisis para una ubicación óptima en una alimentadora en particular se basa en una máxima reducción de pérdidas. Sin embargo, el variante patrón de la carga, cambio de conductores y el efecto de usar capacitores fijos y desconectables en la misma alimentadora, hace imposible mantenerlos en una óptima ubicación. Esto hace necesario analizar continuamente las alimentadoras individualmente o desarrollar métodos de optimización para aplicar al caso general, y considerar su aplicación sólo una vez, al momento de su instalación inicial.

Una aproximación práctica en este problema, la cual se puede probar en práctica y en teoría, es instalar el banco de capacitores en un punto que esté a $2/3$ de distancia de la fuente al final de la alimentadora. La cantidad de KVAR correctivos y el factor de carga reactivo determinarán si ésto da la máxima reducción de pérdidas en general, sin embargo, los resultados obtenidos son satisfactorios. El efecto completo será un compromiso en que el tamaño del banco de capacitores más económico determinado considerando todos los beneficios, y su ubicación en base a pérdidas mínimas.

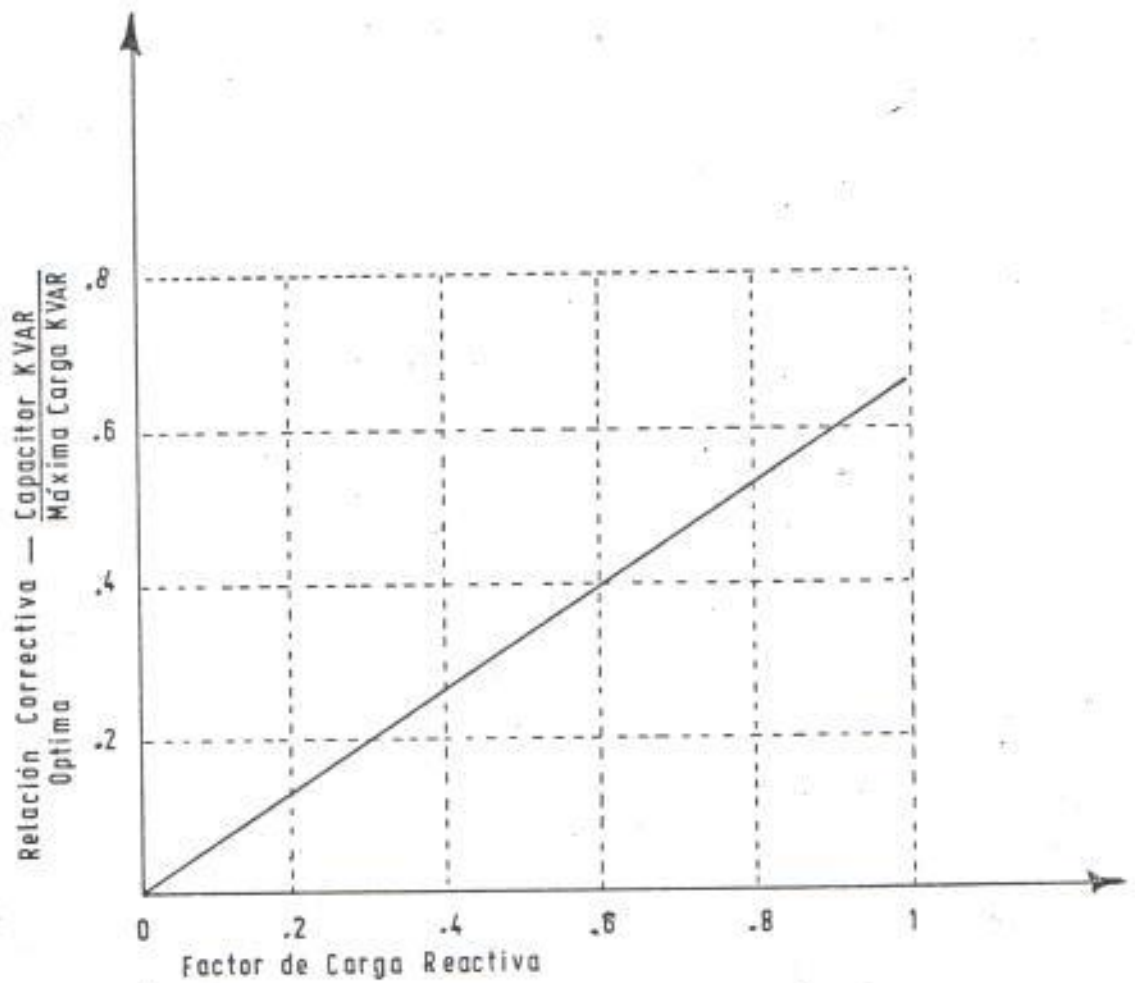


Fig. # 17 Variación de la instalación óptima de capacitores con el factor de carga reactiva.

Si la instalación es considerada sólo en base de pérdidas mínimas, puede ser demostrado que el tamaño óptimo del banco de capacitores es de $2/3$ de los KVA de la carga y su ubicación óptima la indicada previamente. Resultados de recientes estudios han demostrado que esta conclusión es válida excepto cuando la alimentadora tiene un bajo factor reactivo de carga. La fig. # 17 indica cómo el tamaño óptimo del banco de capacitores varía con el factor de reactivo de la carga sumiendo que la instalación se hará en un punto a $2/3$ de la distancia entre la fuente y la carga.

La probabilidad de que condiciones de voltaje, estandarización de equipos, o limitaciones en el voltaje forzaran la instalación de más de un banco en una alimentadora dada, añadiendo otra variable más al problema de la determinación del tamaño y ubicación óptimos.

Los siguientes pasos se sugieren para la determinación de los requerimientos de capacitores shunt en alimentadoras primarias:

Paso 1.- La instalación óptima de capacitores shunt para una alimentadora en particular se determinará por el método del mínimo costo.

Paso 2.- El factor reactivo de carga, el cual es la razón de la carga reactiva promedio a la carga reactiva total, será calculado usando fig. 17,

el tamaño máximo del banco a ser instalado en un punto a $2/3$ de la distancia de la fuente a la carga puede obtenerse. Si el total a ser instalado obtenido con el paso 1 es mayor que aquel determinado en la fig. # 17, la aplicación será hecha en dos o más bancos con los otros bancos instalados hacia la fuente.

Paso 3.- Cuando el límite de capacitores fijos se ha alcanzado, como se determinó anteriormente, deben añadirse capacitores desconectables hasta alcanzar el límite económico. La ubica-
ción de capa citores desconectable será dic-
tada principalemnte por las condiciones del
voltaje, sin embargo, generalmnte son ins-
talados en el $1/3$ restante de la alimentadora.

3.3.- CONECCION ELECTRICA DE LOS CAPACITORES SHUNT AL SISTEMA

Al efectuar las conecciones del sistema de potencia, algunas preguntas relacionadas con las condiciones de operación deben ser contestadas. Cada problema como conmutación, conección y puesta a tierra, y la pro-
tección de los bancos deben ser arreglados para mejora de la instalación, y en casos aún a los clientes. Cada una de estas preguntas es discutida en los si-

guientes párrafos.

1.4.9.- BANCOS DE CAPACITORES FIJOS O DESCONECTABLES

Todos los bancos shunt de capacitores deben ser liga dos a la red a través de un artefacto desconectador al menos capaz de interrumpir la corriente del capacitor. En un banco desconectable este aparato desconectador es operado regularmente para beneficio del sistema, mientras que en un banco fijo hay sólo una operación ocasional para mantenimiento. En circuitos de distribución, bancos de capacitores fijos son instalados hasta que las necesidades de reactivo a baja carga son satisfechas. Cualquier capacitor a dicional es instalado con conmutadores, usualmente montados en postes.

Bancos para transmisión y subtransmisión, por ser un gran conjunto de capacitores, son siempre desconecta bles. El único problema es la máxima cantidad la cual puede ser conmutada al mismo tiempo. Esto es usualmente limitado por equipo conmutador antes que por el cambio súbito de voltaje causado por inserción o remoción del banco de capacitores del sistema. Esto es particularmente verdad si rompe cargas o dis yuntadores comunes son usados como medios de conmutación.

Muy poca conmutación ha sido intentada con unidades secundarias debido a lo económico. Algunos aparatos han sido hechos con elementos bimetálicos sensibles a la temperatura ambiente.

2.4.10.- CONMUTADORES

Conmutadores típicos, dependiendo de su ubicación dentro de la alimentadora primaria son:

- 1.- Interruptores en aceite de un polo o tres polos
- 2.- Disyuntores en aceite - tres polos
- 3.- Disyuntores en aire - tres polos

El costo del equipo conmutador debe ser incluido en el costo por KVAR de capacitores shunt instalados. Su costo relativamente alto, particularmente en aplicaciones a alto voltaje, es a veces el factor determinante en el análisis económico. Sin embargo, desarrollos en equipos conmutadores de bajo costo están progresando rápidamente, y en el futuro la ventaja económica de grandes bancos se hará más aparente.

2.4.11.- CONTROL DE CONMUTACION

Si un banco de capacitores va a ser conmutado regularmente, un método de control específico debe escogerse. Este esquema de control, puesto que es la base en la cual el banco de capacitores es conectado o desconec

tado del sistema, debe ser adaptado a la medida más próxima como sea posible a los requerimientos reactivos del sistema. Los parámetros típicos usados para controlar los conmutadores de capacitores son los siguientes:

- 1.- Disyuntor de tiempo
- 2.- Voltaje
- 3.- Corriente
- 4.- Voltaje-tiempo
- 5.- Voltaje-corriente
- 6.- Vars o corriente reactiva
- 7.- Temperatura
- 8.- Manual

Un estudio reciente ha revelado que el control con disyuntores de tiempo es usado en la mayoría de las instalaciones en alimentadoras primarias, y el control de voltaje es el método más común en bancos en subestaciones. Los otros esquemas de control son usados en variado grado, usualmente en situaciones especiales. Como las empresas investigan más a fondo los requerimientos de vars en su sistema, se hace obvio que métodos más sofisticados de control tales como corriente-tiempo y watt-vars están ganando en uso. Esto puede resultar incuestionablemente en una entrega de vars lo más apretada posible a las necesidades del sistema, y generalmente con los beneficios contingentes asegurados.

Control por tiempo, sin embargo, tiene la ventaja que es el menos costoso al instalarlo, y además, es independiente de la operación del sistema, no necesitando coordinación con otros equipos de regulación de voltaje. Determinar si es que el control por tiempo puede ser usado requiere estudios del ciclo de la carga en las alimentadoras representativas del sistema. Es más efectivo en alimentadoras radiales donde el ciclo es más predecible y consistente. Grandes bancos de capacitores en las barras de transmisión también pueden ser aplicadas efectivamente usando control de tiempo.

Conmutación de un banco de capacitores respondiendo a la variación del voltaje del sistema de distribución puede crear un problema de coordinación con los reguladores de inducción o por etapas (taps) en la misma área. Sin embargo, usando el voltaje como señal de conmutación es deseable porque el elemento sensible es simple y rápidamente disponible. También, en muchas aplicaciones, bancos controlados por el voltaje resultan en ganancias de todos los beneficios de los capacitores shunt, puesto que el bajo voltaje es un resultado directo del flujo de corriente reactiva, a la cual reducen los capacitores.

Para resolver el problema de coordinación, consideraciones sobre el ajuste del control de cualquier regu

lador de voltaje asociado es necesario. Una excesiva operación del banco de capacitores o del regulador puede ocurrir de acuerdo al penduleo causado por una coordinación impropia entre los dos aparatos. Cuando es usado control de voltaje en un banco de una alimentadora primaria, el cambio de voltaje causado por el capacitor puede ser calculado por la ecuación 10. El rango del regulador de voltaje debe incluir o agrupar el cambio de voltaje de la alimentadora calculado, de tal manera que la operación de uno no causa la operación del otro en la dirección opuesta. Si la coordinación es apropiada, interacción entre los dos aparatos no ocurrirá, y el banco de capacitores estará en servicio el máximo tiempo permitido basado en los requerimientos de reactivo del sistema.

3.4.12.- CONECCION Y PUESTA A TIERRA DE BANCOS DE CAPACITORES

Bancos de capacitores shunt pueden ser conectados al sistema de una empresa eléctrica como un transformador, o sea que en tanto en estrella o en triángulo. Además, si se conecta en estrella, el banco puede ser puesto a tierra o no. La mayoría de los bancos existentes están conectados en estrella. Pero hay aún alguna controversia sobre si los bancos deben ser aterrizados o no. Los tres métodos básicos de conexión están mostrados en la fig. # 18. El método utilizado

por una empresa dependerá del tipo de sistema (puesto a tierra o no), coordinación, economía, ubicación y una posible interferencia inductiva.

Generalmente, bancos grandes en transmisión, subtransmisión y distribución en las barras de la subestación son conectados en Y. El tamaño del banco y el esquema de protección empleado determinan si el banco es puesto a tierra o no.

En banco de alimentadoras primarias de distribución, la mayoría de bancos de capacitores shunt son conectados en estrella con el neutro aterrizado. Las razones para esta preferencia son las siguientes:

- 1.- Puesto que el neutro está aterrizado, la estructura de montaje y el tanque del capacitor pueden ser aterrizados, y la instalación es considerada segura desde el punto de vista de operación.
- 2.- Si una unidad falla, una corriente de falla grande resulta y ocurre una operación positiva de los fusibles.
- 3.- La instalación es considerada segura si un conductor se abre antes del banco, puesto que al lado de la carga del circuito abierto no habrá potencial superior al de tierra.
- 4.- El banco es algo autoprotegido de las descargas atmosféricas, puesto que presenta un camino de baja impedancia a tierra.

5.- Inversión del neutro o posiciones resonantes, debido a la conmutación de una sola fase entre la fuente y el banco, es poco probable que ocurra.

Muchas empresas, las cuales usan bancos conectaos en delta o estrellas sin aterrizar, basan su práctica en las siguientes desventajas de los bancos conectados en estrella sólidamente puesto a tierra.

- 1.- Bancos en estrella aterrizados pueden trastornar la detección de tierra o los esquemas de los relés en circuitos no aterrizados puesto que ellos proveen un circuito de baja impedancia a tierra.
- 2.- El banco de capacitores, si es aterrizado, proporciona un camino para las corrientes armónicas impares, y una interferencia inductiva o telefónica puede resultar. También, estas corrientes armónicas pueden causar un sobrecalentamiento del neutro.

Tanto los bancos conectados en delta como los conectados en estrella sin aterrizar tienen la ventaja de que son necesarios sólomente dos disyuntores para de-energizar el banco de capacitores. De este modo una empresa puede escoger esta conección por razones económicas además de las dos desventajas que la conección en estrella aterrizada mencionada anteriormente.

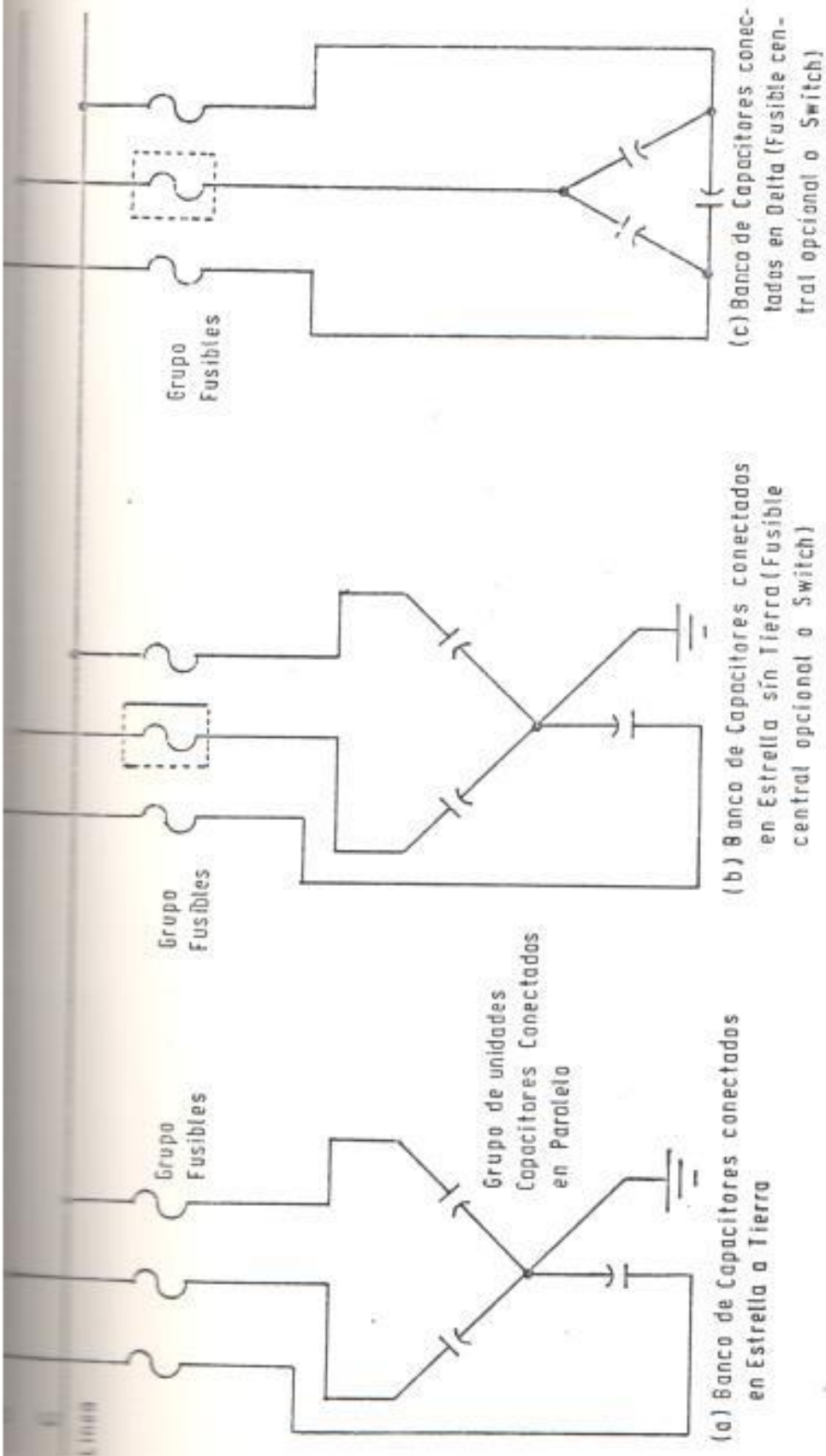


Fig. #18 Métodos para conectar bancos de capacitores al sistema

Donde se esperan corrientes de falla excesivamente altas, es a veces necesario el banco en estrella sin aterrizar el cual inherentemente limita la corriente causada por una unidad dañada de los capacitores. Esto se ilustra por examen de la fig. # 19 la cual nos muestra que el tiempo para la ruptura del tanque para una unidad de 50 KVAR a 5000 amp. o más es de 0.8 de ciclo. El mínimo tiempo para reacción del fusible es también 0.8 ciclos y por consiguiente la coordinación del grupo de fusibles se dificulta, sino se imposibilita. El uso de bancos conectados en estrella sin aterrizar, el cual limita la corriente a tres veces la normal, elimina la necesidad de ir a fusibles limitadores de corriente caros para resolver el problema.

Para resumir, las prácticas más comunes respecto a la conexión de bancos de capacitores shunt a sistemas de una empresa son los siguientes:

- 1.- En las instalaciones en barras de subestaciones de transmisión, subtransmisión o distribución son usualmente conectados en estrella aterrizada o no, dependiendo del tipo de protección.
- 2.- Para sistemas en delta o no aterrizados, se usan generalmente bancos conectados en delta, excepto donde las corrientes de falla son excesivas, entonces bancos conectados en Y y sin ate-

servicio.

- d) Protección contra sobrevoltaje: Cuando un banco shunt de capacitores está formado por grupos conectados en series de unidades en paralelo, el retiro de una o más unidades de un grupo causan sobrevoltajes en las unidades restantes. El voltaje continuo en cualquier unidad no debe exceder del 110% del voltaje nominal. El porcentaje de fallas en unidades de capacitores -normalmente menor al 1%- aumenta rápidamente si éstos están sujetos a sobrevoltajes. Por consiguiente, algún tipo de protección se necesita en bancos grandes, que retire el banco del sistema o suene una alarma, cuando un número significativo de unidades han sido retirados de servicio debido a la operación de fusibles. Instalación típica en fig. # 20

15.- PROTECCION DE BANCOS EN ALIMENTADORAS DE DISTRIBUCION

Por su pequeño tamaño y consecuentemente menor inversión total, los bancos en alimentadoras primarias justifican menor protección que los bancos grandes. Bancos fijos son generalmente protegidos contra fallas internas por un fusible para el grupo, el cual está coordinado con las características de ruptura del tanque como se describió previamente. Este mismo fusi-

ble sirve para desconectar al banco del sistema, pre
viniendo la paralización de la alimentadora, por fa-
lla del banco de capacitores.

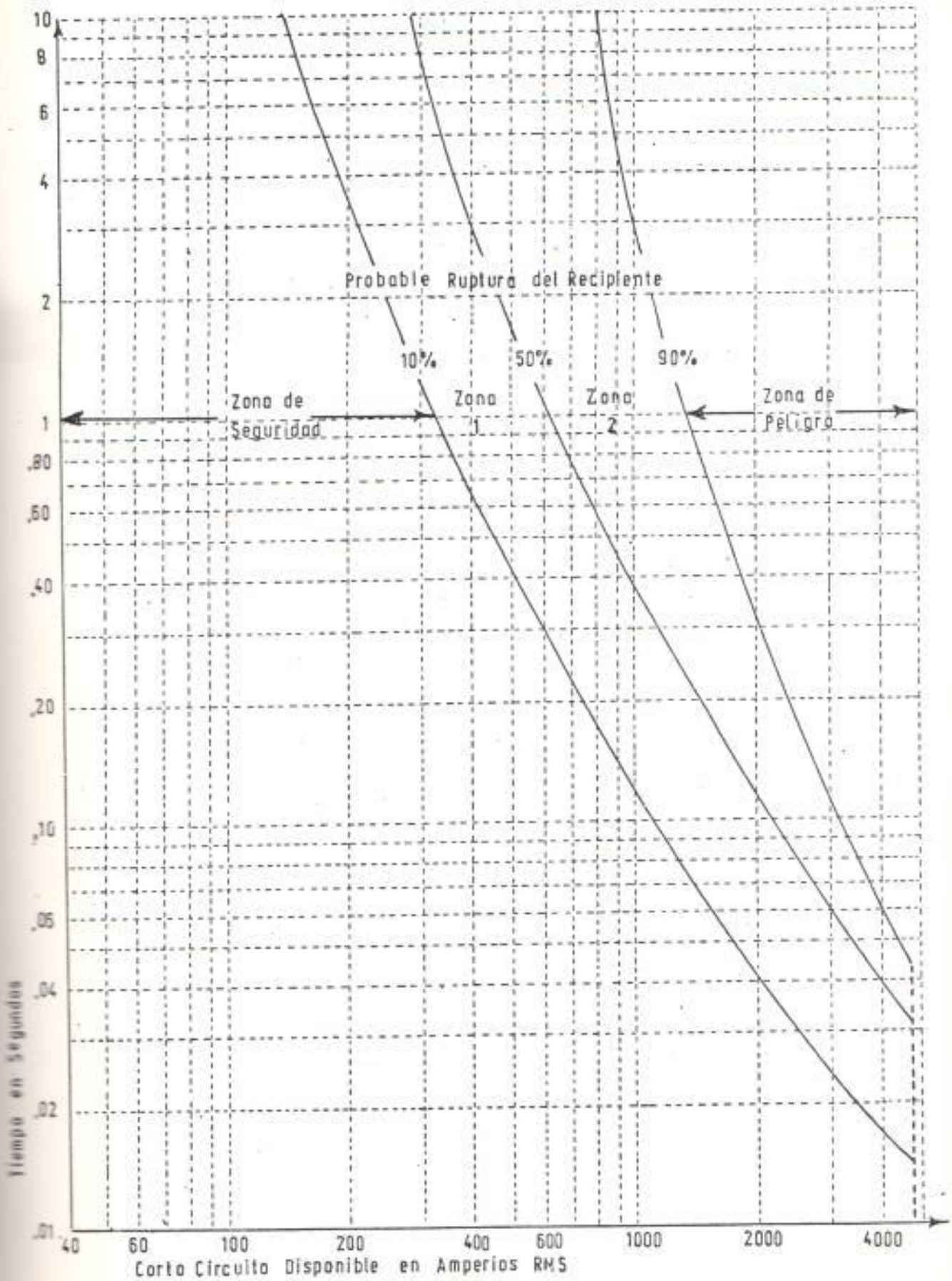


Fig. # 19 Características de ruptura del tanque de 50 KVAR.

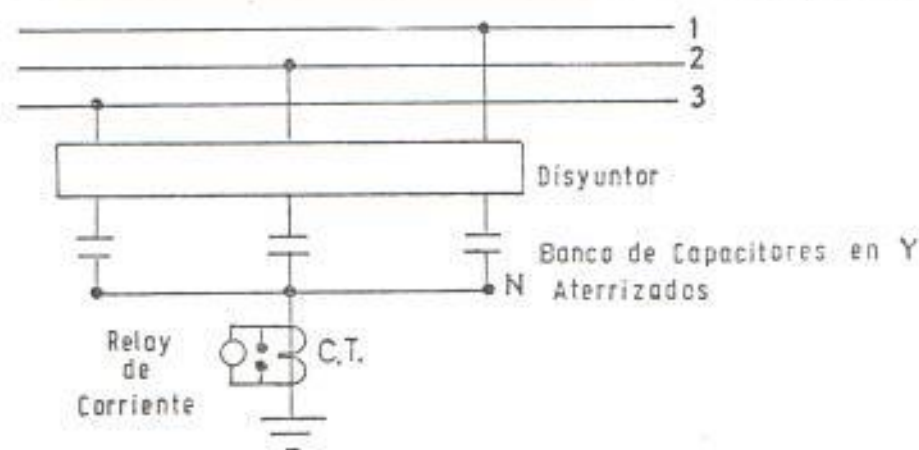
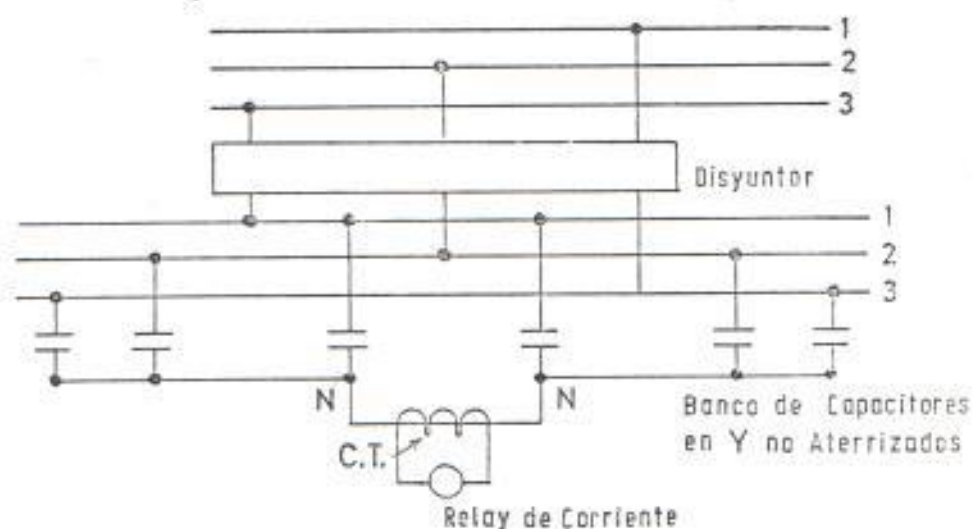
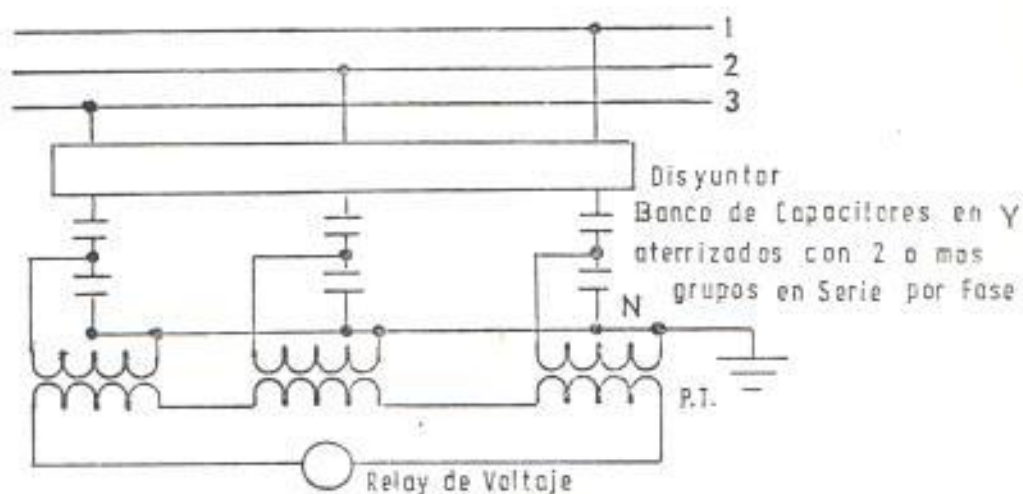


FIG. # 20 Método común de protección contra sobrevoltajes en bancos de capacitores.

C A P I T U L O 2

EFFECTOS SECUNDARIOS DE LOS CAPACITORES

Hay varios problemas de operación los cuales pueden ser primeramente encontrados debido a la instalación de capacitores shunt. Estas condiciones deben ser reconocidas y corregidas. La aplicación de unidades de capacitores shunt es aún, sin embargo, uno de los más simples y directos de los aparatos eléctricos. El problema que causan es usualmente pequeño, y generalmente puede ser resuelto sin perjudicar a otros componentes del sistema o el máximo beneficio de la instalación de capacitores.

Una breve discusión de estos problemas y limitaciones de operación de los capacitores shunt están contenidos en los siguientes párrafos. Información más detallada se encontrará en las referencias enlistadas en la bibliografía.

2.1.- INTERFERENCIA TELEFONICA

Debido a la presencia de equipos en un sistema eléc-

trico el cual puede inherentemente generar corrientes armónicas, un problema de coordinación inductiva puede existir entre circuitos de servicio eléctrico y líneas telefónicas. Mientras que el capacitor mismo no es una fuente de corrientes armónicas, un banco conectado en Y aterrizada puede complicar o aumentar substancialmente las corrientes armónicas y voltajes asociados con cualquier porción del sistema en particular. Esto es porque el banco de capacitores crea un camino de impedancia reducida para las corrientes armónicas, puesto que su impedancia es inversamente proporcional a la frecuencia.

Coordinación inductiva o interferencia telefónica fue más problemático en el pasado que en el presente. Con el mejoramiento de los cables y equipos telefónicos, muy pequeños problemas de esta suerte han sido encontrados en años recientes. El método más clásico de proceder con este problema es el de arreglar las conexiones del banco de capacitores, si un problema de éstos ocurre. En otras palabras, si el banco de capacitores ha sido instalado con el neutro aterrizado y la interferencia telefónica aumenta en el área, una reconexión del banco en Y sin aterrizar puede ser usualmente realizada, y el problema desaparecerá. En caso de que la reconexión no sea posible, hay otros métodos de mejorar la si-

tuación tales como reactores auxiliares y cambios en los circuitos telefónicos o la reubicación del banco de capacitores.

2.2.- EFECTOS DE LOS CAPACITORES SHUNT SOBRE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA

Como se señaló previamente en la sección anterior, la instalación de capacitores shunt en sistemas eléctricos causa un aumento directo en el factor de potencia de operación de los generadores. Reduciendo la cantidad de reactivo entregado por el generador se reduce la magnitud de la corriente de campo para una carga en kilovatios y voltaje terminal dados. La estabilidad estática para unas condiciones de carga dadas es proporcional al voltaje en el entrehierro según la curva de saturación del generador, correspondiente a la corriente de excitación. Como la corriente de excitación es disminuída, el voltaje en el entrehierro del generador es disminuído; por consiguiente, la estabilidad estática del generador es proporcional a la corriente de excitación del generador. Esto ha sido observado generalmente, en generadores a turbina, si el factor de potencia de operación es mantenido al 95% atrazado o menos, no hay problema con la inestabilidad estática. Experiencias de operación han indicado que algunos generadores pueden ser operados entre 95

y 100% de factor de potencia sin problemas aparentes con la estabilidad del generador.

Cualquier generador, indiferente de su tipo, será afectado por la instalación de capacitores shunt a un sistema, por la natural disminución de la corriente de excitación. Esto puede ser necesario, como la operación de varios generadores de un sistema se aproximan a la unidad, analizar la capacidad reactiva de cada generador y determinar cuál sería su máximo factor de potencia de operación, desde un punto de vista de la estabilidad. La curva de capacidad reactiva de cada generador puede ser obtenida de los fabricantes, y el límite de estabilidad estática del generador dibujado sobre la curva. Esto permitirá a los operadores determinar el correcto factor de potencia de operación, y eliminar cualquier problema de estabilidad debido a la instalación de capacitores.

2.3.- RESONANCIA

El capacitor como un parámetro del circuito tiene la inherente habilidad de resonar a algunas frecuencias con las inductancias del circuito. Esto resulta, que bajo ciertas circunstancias puede ocurrir resonancia entre el capacitor en combinación con reactancias a tierra en paralelo dentro del sistema o del equipo.

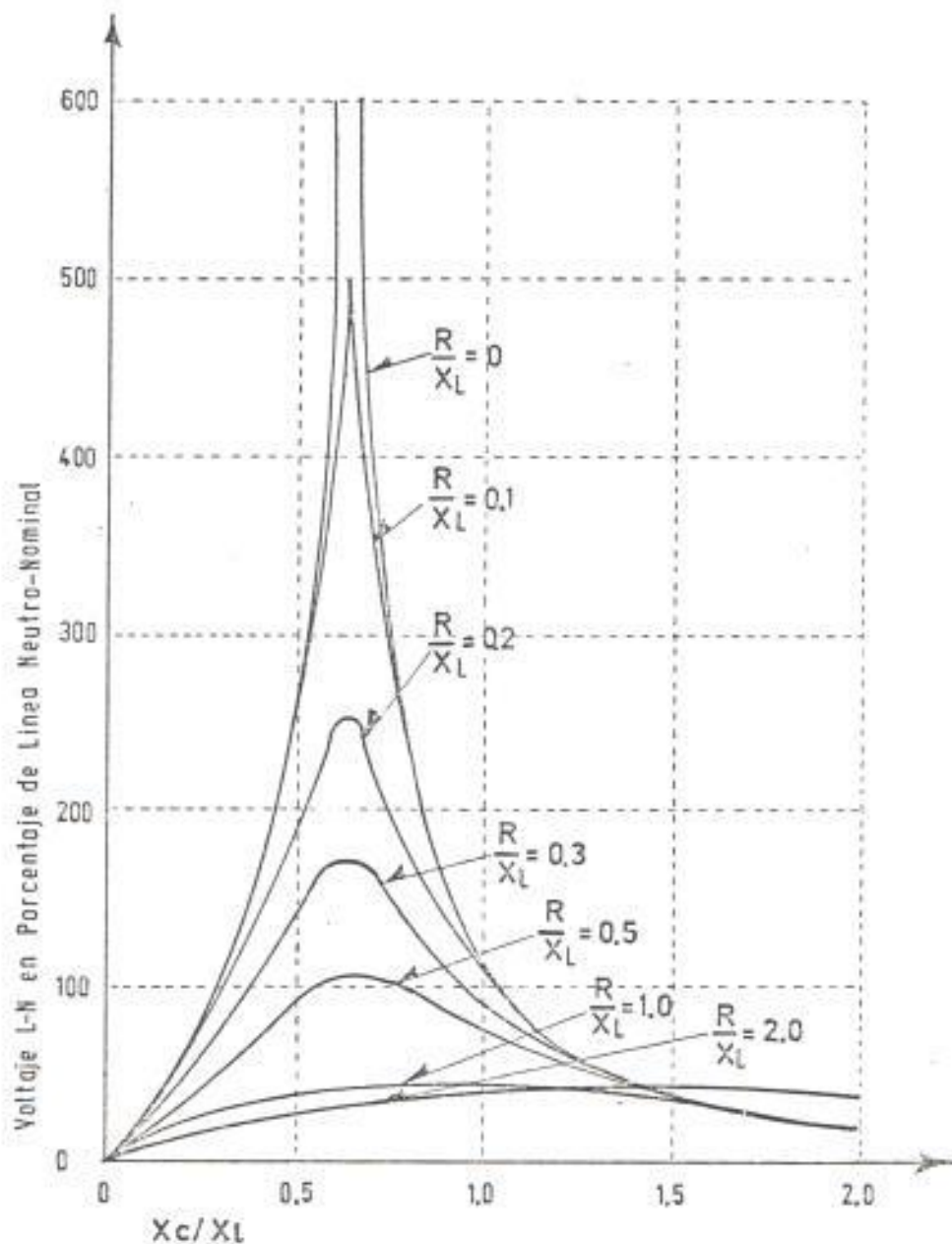


Fig. # 21 Posible sobrevoltaje debido a resonancia por una fase abierta.

Varios fenómenos de sobrevoltajes transientes han ocurrido en el pasado, los cuales pueden ser directamente señalados por la presencia de un banco de capacitores shunt en el sistema. El problema cae generalmente dentro de las siguientes categorías:

- 1.- Sobrevoltajes en los circuitos primarios con el banco de capacitores shunt instalados en circuitos de distribución varias veces aterrizados usando transformadores de distribución monofásicos.
- 2.- Sobrevoltajes transientes ocurren en el secundario de un transformador trifásico de distribución con capacitores en el primario.
- 3.- Sobrevoltajes resonantes directos ocurren simplemente por el incidente de conectar el banco de capacitores al circuito.

Los sobrevoltajes transientes en los dos primeros casos ocurren cuando uno o dos conectores están abiertos, y el circuito resonante es establecido entre la reactancia de magnetización del transformador y la reactancia a tierra del capacitor.

2.3.1.- RESONANCIA DE UN TRANSFORMADOR MONOFASICO DE DISTRIBUCION

Sobrevoltajes típicos posibles para una condición específica del sistema se muestran en la fig. # 21, para la primera categoría mencionada anteriormente. Las conclusiones alcanzadas, concernientes a la resonancia

de este tipo, son:

- 1.- Este fenómeno de resonancia en particular ocurre sólomente en circuitos de cuatro hilos teniendo cargas monofásicas conectadas línea a neutro y bancos de capacitores sin aterrizar. Los capacitores pueden ser conectados tanto en Y sin aterrizar o en delta.
- 2.- Resonancia ocurre cuando una o dos fases se abren entre el banco de capacitores y la fuente de voltaje.
- 3.- Serios sobrevoltajes o inversión del neutro ocurren solamente durante condiciones de carga muy ligeras. Este tipo de resonancia sería más permanente y bien conocido excepto que los valores de capacitancia, inductancia y resistencia están fuera del rango usualmente encontrado en los circuitos de alimentadoras primarias.
- 4.- La condición de resonancia puede ser prevenida a aterrizando el neutro del banco de capacitores, previniendo el corte de fases entre el capacitor y la fuente de voltaje, o manteniendo las constantes del circuito fuera del rango crítico.

2.3.2.- RESONANCIA EN TRANSFORMADORES TRIFASICOS DE DISTRIBUCION

El segundo tipo de resonancia puede ocurrir con un banco de capacitores aterrizado y un banco de transfor

madores de distribución conectado en delta-estrella sin aterrizar. Con uno o dos conductores de fase abiertos, la reactancia capacitiva y la reactancia magnetizante del circuito tienden a formar un camino resonante de baja impedancia con ciertas relaciones de estas reactancias. Esto permite un flujo de corriente con el resultado que aparecen altos voltajes en el secundario, o en las fases abiertas del primario. Los voltajes del circuito pueden alcanzar una magnitud de dos a tres veces el voltaje línea-línea normal.

El problema puede ocurrir aún cuando no sean instalados capacitores shunt, debido a la capacitancia de línea a neutro del circuito, sin embargo, la presencia de un banco shun conectado en Y agrava la situación. Evidencias de estos posibles sobrevoltajes - cuando esta condición ha ocurrido han sido testificados por motores de aparatos quemados, ida a tierra - de calentadores a bajo voltaje y arcos producidos en las acometidas del secundario.

El hecho de que la caya portafusible está usualmente ubicada entre el banco de capacitores y el transformador aumenta la posibilidad de que ocurra resonancia. Las conclusiones alcanzadas con respecto a las causas y curas son las siguientes:

1.- Los voltajes transientes encontrados pueden ser

eliminados por aterrizamiento del neutro de los transformadores de distribución.

- 2.- El uso de disyuntores monofásicos entre los bancos de capacitores y transformadores debe evitarse.
- 3.- Generalmente, sobrevoltajes transientes peligrosos debido a este tipo de resonancia son limitados a sistemas donde la razón de la reactancia capacitiva a la reactancia magnetizante es tres o menos.

2.3.3.- SOBREVOLTAJES RESONANTES DIRECTOS

El fenómeno asociado con la tercera condición es un efecto resonante indeseable causando altos voltajes cuando el banco de capacitores se conecta al sistema. Estos sobrevoltajes son frecuentemente en ubicaciones remotas al banco de capacitores, tal como un circuito a bajo voltaje acoplado inductivamente a través de un transformador al circuito en el cual el capacitor está conectado. Por ejemplo, altos sobrevoltajes transientes pueden observarse cerca de un capacitor secundario cuando un banco de capacitores de una alimentadora primaria es conmutado. Esto es debido al circuito resonante formado por el capacitor secundario, la alimentadora y la inductancia del transformador entre los dos bancos de capacitores.

res. Cuando el banco del primario es conmutado, una frecuencia transiente ocurre, el cual inicia el circuito resonante causando el sobrevoltaje. Este tipo de problema puede resultar en falla de un fusible o un pararrayos en el circuito de bajo voltaje o posible arco en una falla en los transformadores-instrumento en el circuito de alta tensión.

Las tres condiciones resonantes mencionadas arriba son difíciles de reconocer y casi imposible de predecir. Sólomente después de que el problema ha ocurrido pueden ser relacionadas con los bancos de capacitores, puesto que un conjunto peculiar de condiciones debe prevalecer antes de cualquier resonancia directa o ferro-resonancia tales como las descritas pueden causar voltajes anormales del sistema. Si el problema aumenta, condiciones correctivas como el movimiento del banco, aterrizar el transformador o el banco de capacitores dependiendo del tipo de problemas que son encontrados, remoción de protecciones monofásicas de entre el banco de capacitores y el transformador, o añadir una impedancia amortiguadora tal como un reactor el cual elimina enteramente el problema de resonancia.

TABLA # 3

LIMITES DE SOBREVOLTAJES RECOMENDADOS PARA CAPACITORES	
Duración	Factor multiplicador del voltaje RMS
½ Ciclo	3.0
1 Ciclo	2.7
15 Ciclos	2.0
1 Segundo	1.75
15 Segundos	1.40
1 Minuto	1.3
5 Minutos	1.2
30 Minutos	1.15

TABLA # 4

LIMITES DE VOLTAJES TRANSIENTES Y CORRIENTE RECOMENDADOS PARA CAPA- CITORES.		
Probable número de operaciones al año	Valor transiente pico multiplicado por vol- tajes y corriente RMS	
	Voltaje	Corriente
4	5	1500
40	4	1150
400	3.4	800
4000	2.9	400

2.4.- OPERACION DE LOS CAPACITORES BAJO CONDICIONES ANORMALES DEL SISTEMA

Los capacitores están diseñados para soportar a 60 ci clos un voltaje continuo del 110% del nominal. Los KVAR nominales de un capacitor en particular a cualquier voltaje es encontrado por la expresión:

$$\text{KVAR} = \frac{E^2 \times 2\pi f C \times 10^{-6}}{1000} \quad (39)$$

donde

E = voltaje RMS nominal

f = frecuencia, ciclos/seg.

C = capacitancia en microfaradios

Como el voltaje sube, el KVAR aumenta con el cuadrado del voltaje. Esto aumentará la corriente absorvi da por el capacitor, y por consiguiente, causa calentamiento y puede fallar el capacitor, si la condición se prolonga. Por consiguiente, es importante estar seguro que no son mantenidos voltajes a 60 ciclos sobre el 110% del nominal continuamente sobre la unidad de capacitor. El capacitor, sin embargo, tiene un margen de diseño para una condición de emergencia de sobrevoltaje como todos los aparatos eléctricos. Las tablas 3 y 4 tomadas de capacitores de potencia normales indican los tiempos límites de varios sobrevoltajes y corrientes, a los cuales un capacitor nor

mal puede estar sujeto sin pérdida de su vida esperada.

En el diseño de capacitores para aplicación en circuitos de potencia, es reconocido que el voltaje en operación no tiene una onda perfectamente sinusoidal, y que los KVAR de operación del capacitor serán mayores que los nominales, por una cantidad proporcional a la magnitud de las armónicas presentes en la onda de voltaje. Reconociendo nuevamente que generadores y transformadores son abastecedores de armónicas impares de voltaje, es necesario diseñar las unidades de capacitores individuales para que soporten continuamente alguna cantidad de voltaje armónico.

Unidades de capacitores, por consiguiente, tienen un margen térmico el cual es suficiente para permitir a 60 ciclos el sobrevoltaje mencionado previamente y alguna distorsión de la forma de la onda. La norma industrial del 135% de la corriente nominal debe prevenir tanto contra el voltaje fundamental excesivo a 60 ciclos como la combinación de armónicas. Así, si el voltaje fundamental es mayor que el normal, el margen para las armónicas se reduce. Un procedimiento básico en operación es limitar los sobrevoltajes a 60 ciclos a no más del 105% del voltaje nominal, para que el margen para el sobrevoltaje armónico no sea re

ducido excesivamente.

La fig. # 22 nos indica el efecto de la forma de onda sobre la corriente del capacitor y puede ser usada para determinar la cantidad de permisible sobrevoltaje basado en el voltaje RMS medido en porciento del voltaje nominal.

Los voltajes y corriente RMS totales pueden ser determinados de un circuito en particular por unos voltímetros y amperímetros convencionales.

Es posible determinar de las curvas de la fig. # 22 el porcentaje de corriente RMS nominal permisible basado sobre un 135% del KVA máximo aceptables.

EJEMPLO L

Cuál es la máxima corriente RMS (medida) de un capacitor a 13,800 voltios, 100 KVAR, que puede absorber y permanecer dentro de los límites térmicos si está siendo operado 105% del voltaje nominal?

De la fig. # 22 asumimos que solamente la tercera armónica de voltaje tiene la magnitud suficiente para causar sobrecorriente.

De la fig. # 22 la corriente RMS medida puede ser 146% de la nominal.

$$I_{\text{nominal}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 4,18 \text{ Amp.}$$

$$I = 1,46 \times 4,18 = 6,10 \text{ Amp.}$$

Esto significa que si el valor medido de la corriente RMS no excede a 6,10 amperios, el capacitor está operando dentro de límites térmicos permisibles.

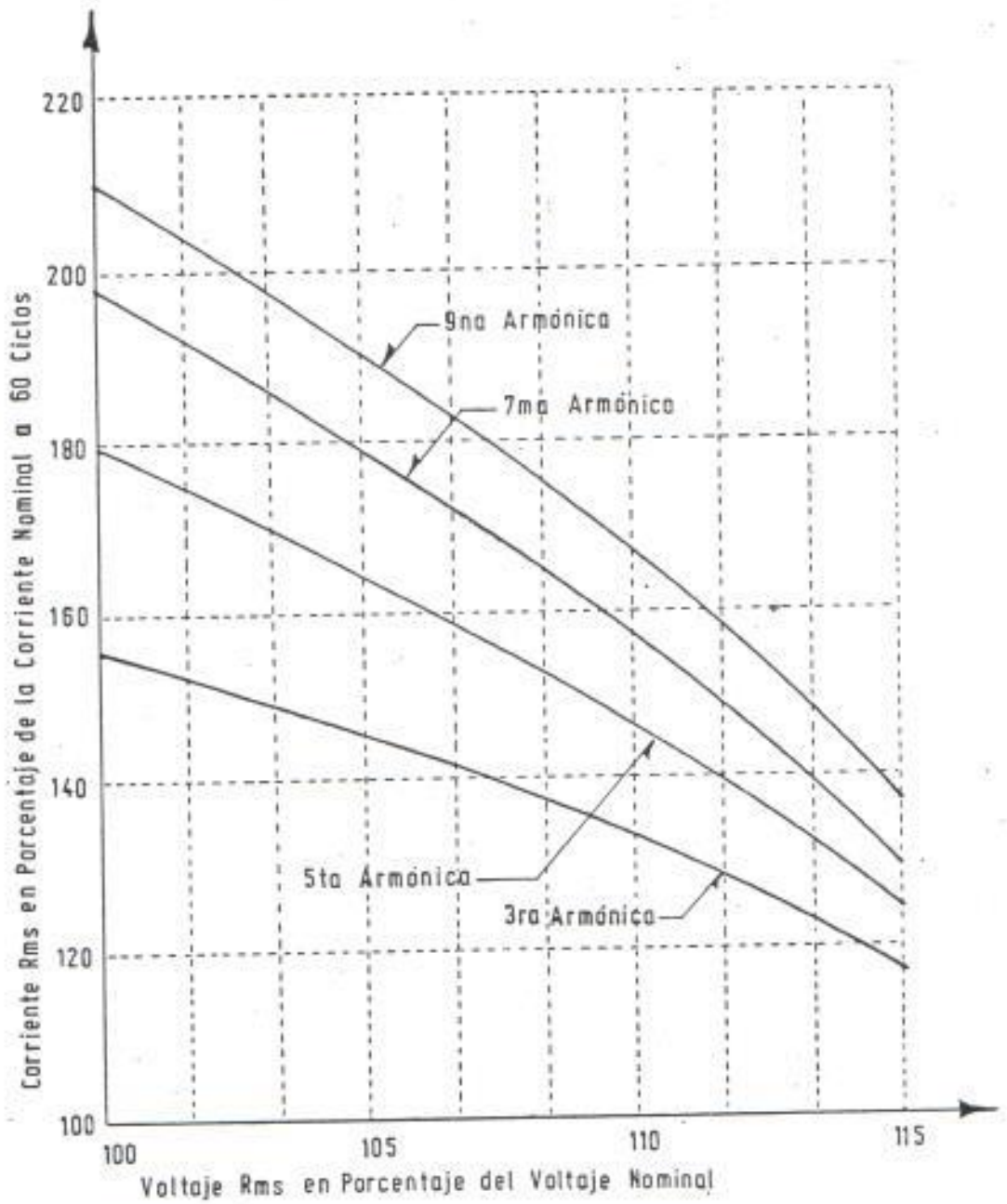


Fig. # 22 Límite térmico de operación de capacitores.

C A P I T U L O 3

CALCULO DE APLICACION DE CAPACITORES A UN CIRCUITO DE ALTA TENSION DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL

3.1.- LEVANTAMIENTO DE CONDICIONES DEL CIRCUITO

La alimentadora escogida para realizar el estudio de aplicación de capacitores shunt para el control y regulación de voltaje ha sido llamada 25 DE JULIO que - saliendo de la subestación llamada GUASMO hace un recorrido por la parte sureste de la ciudad, sirviendo a extensas zonas residenciales en pleno desarrollo y a algunas industrias que existían antes de las llamadas invasiones que dieron inicio a la formación de áreas residenciales y artesanales con un factor de consumo KWHR/mes por habitante muy pequeño, pero que en los próximos años tendrá un desarrollo rápido, explosivo, fuera de toda estadística.

La carga, al ser una combinación de tipo residencial, artesanal e industrial, tiene una variación muy gran-

de, tanto en su cantidad como en su tipo, dependiendo de la hora del día y del día de la semana.

De registros cedidos por la Empresa Eléctrica del Ecuador Inc. y con ayuda del programa de computación preparado para este cálculo, y cuyos perfiles de voltaje están mostrados en las figs. # 23 y # 24, se han determinado los siguientes datos representativos de las condiciones de la alimentadora:

$V_{\min} = 13.800$ voltios

$V_{\max} = 13.800$ voltios

$I_{\min} = 195$ Amp.

$I_{\max} = 345$ Amp.

$P_{\min} = 3.728$ KW

$P_{\max} = 6.596$ KW

Factor de Potencia = 0.8

En el anexo 1 se encontrará el plano A - 1 que es el diagrama unifilar de la alimentadora y en el que constan las estaciones o nodos con carga instalada e indicadas o derivaciones en ramales y subramales en sus distancias principales indicadas y su tipo de conductor especificado y el número de fases que sirven al sector.

Es muy importante observar que los ramales que salen de la línea principal algunos son muy largos y con una

carga muy grande para su conductor, especialmente con siderando que la mayor parte son monofásicas, razón por la cual la caída de voltaje queda fuera del límite en condiciones de carga mínima. Tal es el caso del ramal 300.

3.2.- ESTUDIO DE LA VARIACION DEL VOLTAJE

Los datos determinados en el capítulo 3.1 se introdujeron en el programa de computación preparado para cal cular los perfiles de voltaje a lo largo de la alimen tadora con varias condiciones de carga, obteniéndose los resultados detallados en el anexo 2, del cual se ha extraído un resumen y que están graficados en la fig. # 23, 24, 25, y 26, en las cuales se toma como voltaje base 13.800 voltios en la barra de salida de la alimentadora y se determinan valores de voltaje según la distancia a las barras aumenta, hasta llegar a nivel más bajo alcanzado en la alimentadora que corres ponde a la estación # 134, que está en el extremo del ramal denominado 300-13-3 en el plano A - 1 del anexo 1.

En la fig. # 23 está el perfil del voltaje de la alimen tadora con carga máxima, calculada en 6.595 KW y un fac tor de potencia de 0.8 atrasado, en la que se ve claramente que apenas al primer kilómetro llega un voltaje dentro del 5% de caída permitida y en el final de la

alimentadora sobrepasa el 10% la caída de voltaje. La condición es más seria todavía en el ramal 300 que es su peor ramal.

En la fig. # 24 el perfil es para carga mínima en donde la caída de voltaje apenas sobrepasa el 5% al final de la línea, situación que ya necesita atención y debe ser mejorada conjuntamente para el peor ramal.

En la fig. # 25 vemos las mismas condiciones de carga y factor de potencia que en la fig. # 23 y que es carga máxima, y notamos que la caída de voltaje en la línea principal en ningún punto llega al 5% de caída manteniendo una regulación dentro de los límites normalmente establecidos. Inclusive, el peor ramal apenas llega al mínimo del voltaje aceptado.

En la fig. # 26 las condiciones son para carga ligera y, como era de esperarse, los valores de voltaje se mantienen totalmente dentro de los límites permitidos incluyendo su peor ramal.

3.3.- CONDICIONES DE LA SUBESTACION

La subestación que sirve a la alimentadora 25 de Julio es la llamada Guasmo y está conformada por los siguientes equipos principales:

2 transformadores clase OA/FA

Capacidad máxima continua

12 MVA con ventilación natural y 55°C de aumento de temp.

16 MVA con ventilación natural y 55°C de aumento de temp.

17.9 MVA con ventilación natural y 65°C de aumento de temp.

Voltaje nominal: Alta tensión 67.000 voltios

Baja tensión 13.800/7.980 voltios

Frecuencia: 60 Hz.

de fases: 3

Con 12 MVA 67/13.8 KV

Impedancia = 7%

Enfriamiento: aceite

Conexión en alta tensión: Delta

Conexión en baja tensión: Estrella

Niveles de voltaje de impulso de onda completa:

Bobinas de alto voltaje 350 KV

Bobinas de bajo voltaje 110 KV

De las barras de bajo voltaje del transformador que sale de la alimentadora 25 de Julio salen además otras dos alimentadoras.

También, en las barras de bajo voltaje del transformador está conectado a un banco de capacitores shunt de 1.800 KVAR controlado por un dispositivo sensible al voltaje, razón por la cual el voltaje en barras se mantiene en 13.800 voltios tanto con carga mínima como con máxima.

PERFIL DE VOLTAJE - CARGA MAXIMA - SIN CAPACITORS

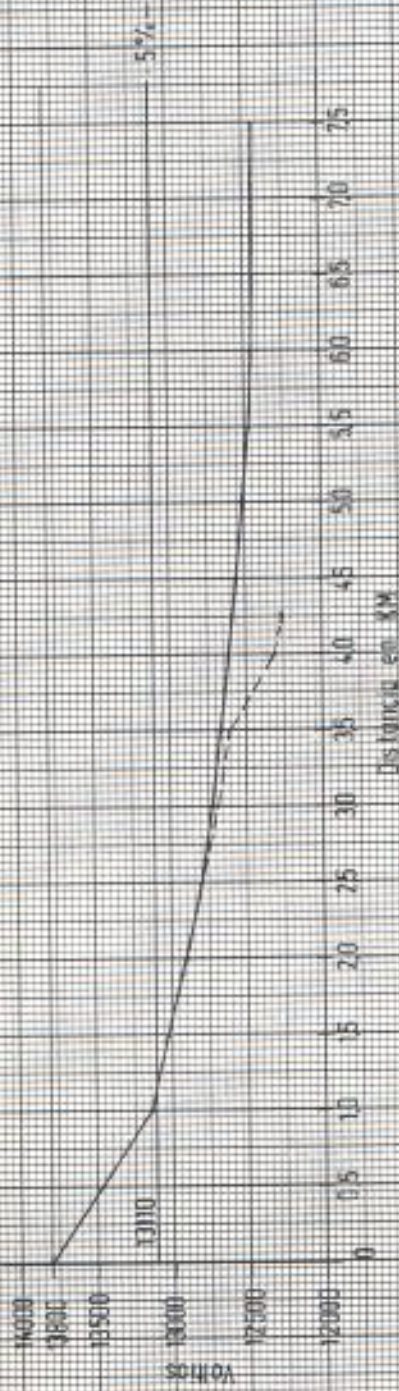


FIG. # 23

— perfil voltaje alimentadora
- - - perfil voltaje peor ramal

PERFIL DE VOLTAJE - CARGA MINIMA - SIN CAPACITORS

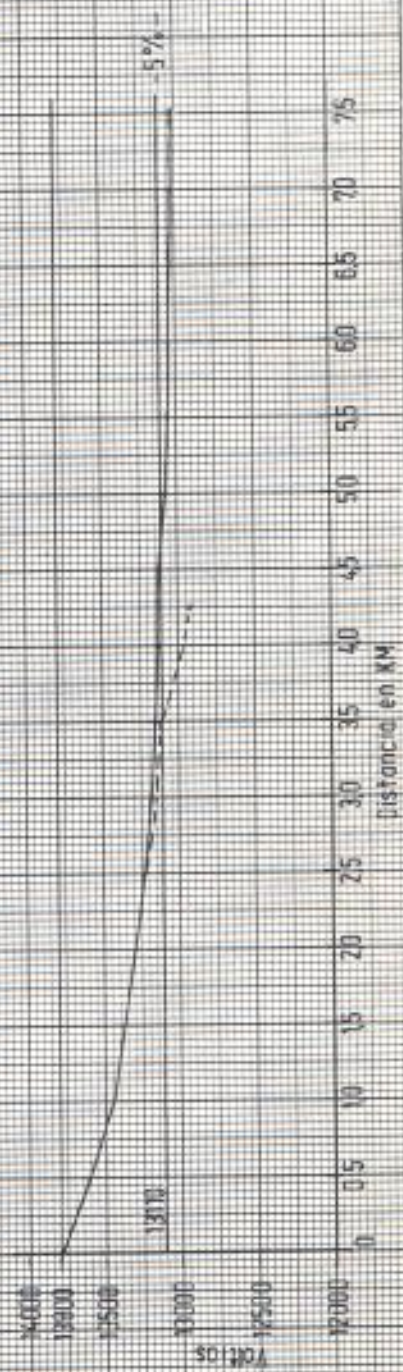


FIG. # 24

PERFIL DE VOLTAJE - CARGA MAXIMA - CON CAPACITORES

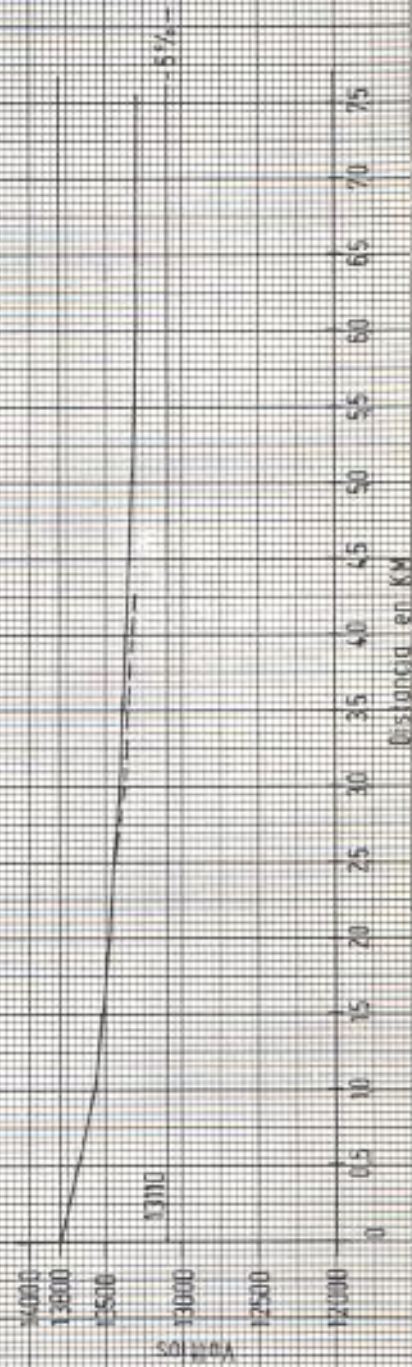


Fig. # 25

— Perfil voltaje alimentadora
- - - Perfil voltaje peor ramal

Fig. # 26

PERFIL DE VOLTAJE - CARGA MINIMA - CON CAPACITORES



3.4.- DETERMINACION DE LAS CAPACIDADES LIMITES DE LA ALIMENTADORA

La capacidad de transporte de carga de una alimentadora está limitada por dos condiciones principales y son:

Límite por caída de voltaje

Límite térmico debido a la corriente

3.4.1.- El límite por caída de voltaje aceptado por la mayoría de las empresas eléctricas es el del 5%, lo que significa un mínimo de 13.110 voltios en el usuario más alejado eléctricamente de la subestación.

En la tabla # 5, que es un resumen de los resultados obtenidos por medio de la aplicación del programa de computación para calcular los perfiles de voltaje en la alimentadora, tenemos los siguientes valores que son lo suficientemente aproximados como para considerarlos como límites de capacidad de la alimentadora.

Sin capacitores	Voltaje mínimo
Carga = 2.963 KW	
Corriente = 155 Amp.	13.110
Factor de Potencia = 0.8	
Con capacitores propuestos	Voltaje mínimo
Carga = 7.591 KW	
Corriente = 397 Amp.	13.110
Factor de Potencia = 0.99	

Revisando la tabla # 5 vemos que la carga máxima actual de la alimentadora es de 6.596 KW y la carga máxima por límite de caída de voltaje es de 7.591 KW lo que nos indica que queda todavía una capacidad disponible de 1.000 KW.

3.4.2.- El límite térmico por corriente para esta alimentadora sería de 451 amperios considerando que es permitido el 85% de la ampacidad máxima del conductor para líneas aéreas, por razones mecánicas, lo que nos deja 451 amperios de los 530 nominales para conductor 336 MCM ACSR.

De la tabla # 5 obtenemos que la carga máxima aceptable con factor de potencia 0.99 es de 397 amperios que está muy lejos de los 451 amperios que sería el límite térmico, por consiguiente, en este caso, el límite de la capacidad de la alimentadora es el de caída de voltaje.

3.5.- DETERMINACION DEL VOLTAGE MAXIMO Y MINIMO

Para llegar a determinar los voltaje máximo y mínimo que se deben mantener en una alimentadora de distribución en condiciones normales de operación debemos definir primero los sigtes. términos:

Voltaje nominal: Es el valor designado al voltaje de un circuito o sistema con el propósito de referencia.

Voltaje de servicio: Es el voltaje medido en los terminales de entrada del usuario. Generalmente el equipo de medición. (Kilovatihorímetro).

Voltaje de utilización: Es el voltaje medido en los terminales de la máquina o equipo eléctrico en operación.

Caída de voltaje: En sistema de distribución, es la diferencia entre el valor del voltaje al arranque de la alimentadora y el voltaje en el punto de utilización.

Variación de voltaje: Es la diferencia entre los voltajes máximo y mínimo en un circuito o sistema.

Regulación de voltaje: Es el porcentaje de caída de voltaje en la alimentadora con referencia al voltaje en el punto de utilización más bajo.

$$\% \text{ regulación} = \frac{100 (E_s - E_r)}{E_r}$$

donde

E_s = voltaje al arranque de la alimentadora.

E_r = voltaje de utilización más bajo de la alimentadora

La variación de voltaje aceptada por la mayoría de las empresas eléctricas es del 5% arriba y abajo del nominal medidos en el punto de utilización de la alimentadora, o sea, en el lado de alta tensión del transformador de distribución.

Este 5% de caída de voltaje en la alimentadora más la caída de voltaje en el transformador, un 2%, y la caída en el secundario, acometida y alambrado interior del usuario, un 3%, da como total el 10% y sería el voltaje de utilización.

Este voltaje de utilización es aceptado por la totalidad de los equipos y máquinas eléctricas normalmente utilizados en la industria y en las viviendas.

De lo expuesto anteriormente se concluye que los voltajes máximo y mínimo aceptables en la alimentadora serán:

Voltaje máximo	14.490 voltios
Voltaje mínimo	13.110 voltios

3.6.- ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

En el análisis del comportamiento de los capacitores shunt en situaciones de emergencia se han de considerar las sigtes. posibles situaciones de emergencia:

- 1.- Sobrevoltajes.
- 2.- Pérdidas de carga de la alimentadora.
- 3.- Pérdidas de 1 o 2 fases de la alimentadora.
- 4.- Aumento de carga por transferencia de otra alimentadora.

3.6.1.- Sobrevoltajes pueden ocurrir por pérdidas súbitas de carga de la alimentadora, pérdidas súbitas de carga de la subestación, o por subidas de voltaje en el lado de alta tensión de la subestación.

Para la alimentadora 25 de Julio se ha considerado un aumento súbito y sostenido del 5% por un período de una hora o más que es el máximo que permitirían los equipos reguladores de voltaje instalados en la subestación o atrás de ella.

Utilizando el programa de computación preparado para estudiar la aplicación de reactivo estático en el control y regulación de voltaje en circuitos de distribución en esta alimentadora y aplicando un voltaje de aproximadamente el 5% arriba del nominal, tenemos los siguientes resultados:

Voltaje subestación	14.400 voltios
Voltaje mínimo carga máxima	13.237 voltios
Voltaje mínimo carga mínima	13.215 voltios

Ver tabla # 5

Valores que están dentro del rango de voltajes máximo y mínimo para esta alimentadora y que son de:

Voltaje máximo	14.490 voltios
Voltaje mínimo	13.110 voltios

3.6.2.- Pérdida de carga de la alimentadora.

La alimentadora puede perder carga de dos maneras y en dos condiciones:

Pérdida de carga antes del banco de capacitores y que salgan éstos también, si está con carga media o ligera y al perder $1/3$ o más quedaría con unos 3.000 KW o menos y el voltaje se mantendría entre sus límites. Si está con carga máxima se podría quedar hasta con 4.000 KW y entonces el voltaje bajaría a un nivel por debajo del mínimo aceptado llegando a aproximadamente 12.900 V y una caída cercana al 6.5% lo que sería una situación inaceptable, aunque por poco tiempo hasta que se supere la anormalidad.

Pérdida de carga inmediatamente después del banco de capacitores. En este caso, si está con carga máxima pasaría a condición cercana de carga mínima y el nivel de voltaje se mantendría también dentro del margen establecido. Si está con carga mínima, y los capacitores desconectables fuera, el aumento de voltaje debido a los capacitores sería mayor que el necesario y una condición de sobrecompensación podría ocurrir, sin llegar a salirse del límite establecido previamente, puesto que el factor de potencia probablemente pase de la unidad y se adelante, sin llegar el voltaje a sobrepasar el 5% arriba del nominal.

3.6.3.- Pérdidas de una o dos fases de la alimentadora.

Al perder una o dos fases la alimentadora normalmente deben operar los equipos de protección de ésta. De no ocurrir el correcto funcionamiento de la protección podrían darse casos de una subida de voltaje en la fase o fases que queden conectadas. Porque al perderse una o dos fases se perdería el $1/3$ o $2/3$ de la carga aproximadamente quedando en condición de carga mínima y el voltaje dentro del rango establecido.

3.6.4.- Aumento de carga por transferencia de otra alimentadora.

En ocasiones, por razón de servicio debido a una emergencia, es necesario transferir parte de carga de una alimentadora a otra.

En el caso de la alimentadora 25 de Julio he considerado una transferencia de carga hasta llegar a su límite térmico dado por el conductor 336 MCM ACSR y que es de 451 amperios.

Corriendo el programa con la carga de 451 Amp. y el voltaje nominal de 13.800 voltios se han obtenido los sigtes. resultados:

Voltaje mínimo carga mínima	13.215 voltios
Voltaje mínimo carga máxima	12.544 voltios
Regulación	5.08%
Caída de voltaje total	9.10%

Ver anexo 2

En estas condiciones, que son extremas, tenemos que el voltaje que recibe el último usuario estará por debajo del mínimo tolerable normalmente, pero que se puede soportar por poco tiempo, puesto que este nivel es aceptado en líneas rurales con mayor frecuencia.

3.7.- INVESTIGACION DE METODO ALTERNATIVO DE REGULACION

Hay varios métodos de mejorar la regulación del voltaje a lo largo de un sistema de distribución. Algunos métodos suben el voltaje al principio de la alimentadora de distribución cuando la carga aumenta, reduciendo de este modo el promedio de la diferencia de voltaje entre carga mínima y máxima para todos los consumidores conectados a la alimentadora. Otros métodos disminuyen la impedancia entre las barras de la alimentadora y la carga, reduciendo de esta manera la caída de voltaje. También, la corriente de carga puede ser reducida, y en esta forma reducir la caída de voltaje.

Equipo regulador de voltaje puede también ser aplicado a lo largo de la alimentadora donde el voltaje sea muy bajo o muy alto.

Varios de los métodos para mejorar la regulación de

voltaje a lo largo de un sistema de distribución están enumerados a continuación y cada uno tiene sus características concernientes a la cantidad de voltaje mejorado, costo por voltio de mejora y flexibilidad.

- 1.- Por medio de reguladores de voltaje del generador.
- 2.- Aplicación de equipo regulador de voltaje en la subestación.
- 3.- Aplicación de capacitores en la subestación.
- 4.- Balanceando cargas en las alimentadoras.
- 5.- Aumentando el calibre del conductor de la alimentadora.
- 6.- Cambiando secciones de la alimentadora de monofásicas a trifásicas.
- 7.- Transfiriendo cargas a otras alimentadoras.
- 8.- Instalando nuevas subestaciones y nuevas alimentadoras.
- 9.- Subiendo el nivel de voltaje en el primario.
- 10.- Aplicando reguladores de voltaje a lo largo de la alimentadora.
- 11.- Aplicando capacitores en serie a lo largo de la alimentadora.

La selección de cuál método o métodos es el más aplicable y cuál regulador de voltaje es el mejor a usarse depende del sistema en particular o del problema involucrado.

No hay una regla definida para seleccionar el mejor mé
todo. El tamaño del sistema, tipo de carga servida, u
bicación del equipo existente, magnitud de la correc-
ción de voltaje necesaria, área servida, expansión fu-
tura del sistema y crecimiento de la carga son los fac
tores que se deben considerar en el estudio.

3.7.1.- Por medio de los reguladores de voltaje del generador
Variando el voltaje en la barra del generador según va
rían las condiciones de carga cambiando el campo del
generador se presenta como el método más económico pa-
ra regular el voltaje.

Esto es aplicable sólo en donde el generador alimenta
directamente al sistema de distribución.

En sistemas grandes, multibarras, se usa sólomente pa
ra mantener el voltaje en barra deseado para condicio-
nes de carga predominante y flujo de reactivo requeri-
do.

3.7.2.- Aplicación de equipo regulador de voltaje en la Subestación.
Los equipos reguladores de voltaje en la subestación
pueden ser cambiadores de derivación bajo carga, regu-
lador de voltaje en la barra de la subestación, capaci-
tores desconectables en la barra de bajo voltaje o re-
guladores de voltaje separados para cada alimentadora.

Si los equipos de regulación de voltaje en la subestación, la caída de voltaje en la línea de alimentación a ésta es transferido a las alimentadoras de distribución.

La regulación en la subestación permite una mayor estabilización del voltaje en la alimentadora y una mayor capacidad de carga. El máximo voltaje permitido estará limitado por el del usuario más cercano.

Los cambiadores de derivación bajo carga más populares son los de 32 etapas y 10% de regulación arriba y abajo, cada etapa representa 5/8% de cambio de voltaje. Su tamaño varía normalmente alrededor de 1500 KVA para subestaciones de 15000 KVA o menos, por lo cual son equipos grandes y se puede considerar su instalación tan compleja como la del transformador mismo de la subestación, puesto que hay que instalar todo el equipo de protección, transferencia y mantenimiento similar al de transformador de la subestación.

La regulación de voltaje en la subestación tiene las sigtes. desventajas que pueden influir decisivamente al escoger el método para regular el voltaje de un sistema, y éstos son:

- 1.- Equipos grandes con una inversión muy alta.
- 2.- Se requieren unidades de emergencia instaladas para un caso de falla de equipo.

- 3.- El ciclo de carga de la alimentadoras debe ser si milar para poder efectuar una adecuada regulación de voltaje.
- 4.- Las alimentadoras deben estar balanceadas para evitar una incorrecta información a los controles.
- 5.- No corrigen la excesiva caída de voltaje en la alimentadora, sólomente mantienen el voltaje en ba rra para cualquier condición de carga.

La instalación de reguladores de voltaje exclusivas para cada alimentadora que sale de una subestación es una práctica frecuente.

Se utilizan normalmente cambiadores de derivación bajo carga automáticos y 10% arriba y abajo del voltaje nominal y 32 etapas.

Estos equipos a más de que mantienen el voltaje dentro de los límites preestablecidos con cambios de carga, también lo mantienen con variaciones de voltaje del lado de alta de la subestación.

3.7.3.- Aplicación de capacitores en la Subestación.

Se usan capacitores desconectables para regulación de voltaje en la subestación cuando incluyen equipo de desconexión automático.

Los tamaños comunes de bancos de capacitores para subestación son de arriba de 6000 KVAR y la cantidad de KVAR a cambiar en cada etapa depende directamente de su aplicación en particular, aceptándose generalmente un cambio en el voltaje del 2 o 3% aunque se podría llegar a un 5%.

3.7.4.- Balanceando cargas en las alimentadoras.

Una alimentadora con carga muy desbalanceada tendrá una pobre regulación de voltaje y los equipos instalados en la subestación se pueden sobrecargar excesivamente durante el período de carga máxima e inclusive a baja carga. Esto hace necesario balancear la carga en la alimentadora seleccionando áreas servidas por una fase y que tengan un tipo de carga similar.

Realizar este trabajo requiere modificar circuitos de alta tensión, aumentar ramales, transferir cargas a otras alimentadoras.

Este método no disminuye la caída de voltaje en la alimentadora la cual es debida a su carga misma.

3.7.5.- Aumentando el calibre del conductor en la alimentadora.

Al aumentar el calibre del conductor disminuye la impedancia de la línea y por consiguiente disminuye la caída de voltaje con una misma carga.

Este método es uno de los más costosos para mejorar la regulación de voltaje de una alimentadora, y sólo se justifica si es que hay un plan de crecimiento de carga en el área.

3.7.6.- Cambiando secciones de la alimentadora de monofásica a trifásica.

Una alimentadora tiene, normalmente, algunos ramales monofásicos los cuales producen una caída de voltaje tanto en el conductor de fase como en su retorno.

Al cambiar a trifásica un ramal de la alimentadora la caída de voltaje se reduce a $1/3$ aproximadamente de la caída con una sola fase, permitiendo un considerable aumento de carga en la línea y mejorando la regulación de voltaje en el sector.

Este método es muy costoso y se justifica si es que hay programas de expansión futuras. Además no varía la caída de voltaje total en la alimentadora.

3.7.7.- Transfiriendo cargas a otras alimentadoras.

Al transferir cargas a otras alimentadoras la corriente de línea disminuirá y por consiguiente su caída de voltaje.

3.7.8.- Instalando nuevas subestaciones y nuevas alimentadoras.

Una nueva subestación o la división de una alimentadora

en dos o más va a dividir la carga y a mejorar los niveles de voltaje en la alimentadora.

La instalación de nuevas subestaciones y creación de nuevas alimentadoras o la transferencia de carga a otras alimentadoras no se hace específicamente para mejorar el voltaje sino que es parte de un plan integral de desarrollo en el área. De no ser así, significaría que muy pronto habría que pensar en un programa de racionamiento.

3.7.9.- Subiendo el nivel de voltaje en el primario.

Cuando se cambia el nivel de voltaje de la alimentadora manteniendo la misma carga la corriente de línea de la alimentadora cambiará en razón inversa al del cambio de voltaje, y la regulación cambiará con el cuadrado del cambio de voltaje.

Por ejemplo, cambiando de un sistema delta tres hilos a estrella cuatro hilos el voltaje se multiplica por raíz de tres (3), reduciendo la caída de voltaje a 1/3.

Este método es también costoso si se lo emplea sólo para mejorar el voltaje. Pero puede ser parte de un plan general de desarrollo en el área.

3.7.10.- Aplicando reguladores de voltaje a lo largo de la alimentadora. Los reguladores de voltaje instalados a lo largo de la alimentadora corrigen la excesiva caída de voltaje y mejoran el nivel de voltaje de servicio.

Estos equipos se instalan en un punto de la alimentadora donde el voltaje baja a menos del mínimo permitido en período de carga alta.

También se puede aplicar reguladores en serie, pero el límite térmico y las pérdidas de línea limitan su número generalmente a dos.

Los reguladores no corrigen el factor de potencia y por consiguiente no disminuyen la corriente de línea ni tampoco disminuyen las pérdidas de potencia, sino que, al aumentar el voltaje mas bien las aumenta.

Se utilizan reguladores monofásicos y se necesitan tres, uno para cada fase, lo que hace su instalación costosa.

3.7.11.- Instalando capacitores en serie a lo largo de la alimentadora.

Al instalar capacitores en serie en una alimentadora se modifica la reactancia de la línea disminuyendo según el tamaño del banco, y en consecuencia disminuye la caída de voltaje en la alimentadora. La subida de voltaje

producida por el capacitor en serie es proporcional a la corriente de carga, y por consiguiente proporciona un aumento de voltaje en la línea instantáneamente al aumentar la carga en la misma.

Este método es el menos usado como regulador de voltaje debido al comportamiento de los capacitores en serie en ciertas aplicaciones que han causado problemas insolubles, involucrando problemas de resonancia. Por lo cual el costo de los capacitores serie más el costo de los equipos de protección hacen más costoso que aplicar reguladores o capacitores shunt.

3.8.- ASPECTO ECONOMICO

Para analizar desde el punto de vista económico los resultados obtenidos con la aplicación de capacitores a la alimentadora 25 de Julio de la ciudad de Guayaquil tenemos que considerar los siguientes aspectos principales:

- 1.- Reducción de pérdidas de energía.
- 2.- Aumento de facturación por aumento de voltaje.
- 3.- Capacidad liberada en líneas de distribución, transformadores, subestación, transmisión, etc.
- 4.- Costo de instalación de capacitores.
- 5.- Evaluación de costos y beneficios.

Aunque los valores de los costos de los equipos eléctricos varían periódicamente y con los volúmenes con los que se están tratando es más difícil todavía, in tentaré cuantificar a enero de 1985.

3.8.1.- REDUCCION DE PERDIDAS DE ENERGIA

Como uno de los efectos beneficiosos de la aplicación de capacitores es la reducción de la corriente total para una misma potencia efectiva, tenemos que para la alimentadora 25 de Julio la reducción de pérdidas justifica plenamente los costos de la instalación de capacitores.

De la tabla # 5 tenemos que:

Pérdidas a carga mínima sin capacitores	196 KW
Pérdidas a carga mínima con capacitores fijos	<u>157 KW</u>
Disminución de pérdidas	39 KW
Pérdidas a carga máxima sin capacitores	611 KW
Pérdidas a carga máxima con capacitores fijos y desconectables	<u>446 KW</u>
Disminución de pérdidas	165 KW

Y el promedio de disminución de pérdidas sería:

$$\text{Promedio} = \frac{39 + 165}{2} = 102 \text{ KW}$$

Lo que nos daría un promedio de disminución de pérdidas de energía de:

$$102 \times 8.760 = 893.520 \text{ KWHR/año}$$

Si el promedio de venta de KWHR es de S/. 2.80 nos daría un ahorro anual de:

$$893.520 \times 2.80 = \text{S/. } 2'501.856 \text{ por año}$$

3.8.2.- AUMENTO EN LA FACTURACION POR AUMENTO DEL VOLTAJE

Al aumentar el voltaje de servicio a nivel del usuario aumenta proporcionalmente los KW utilizados por el cliente.

Utilizando la ecuación 30 y los datos de la tabla # 5 podemos obtener los siguientes resultados:

Promedio caída de voltaje sin capacitores:

$$\frac{1}{2}(12.48 + 6.70) = 9.59\%$$

Promedio caída de voltaje con capacitores:

$$\frac{1}{2}(5.42 + 4.42) = 4.92\%$$

Promedio subida de voltaje:

$$9.59 - 4.92 = 4.67\%$$

Promedio de carga:

$$\frac{1}{2}(6596 + 3728) = 5162 \text{ KW}$$

Aplicando la ecuación 30

$$\text{KW} = 0.5 \text{ E}$$

Y expresando en KWHR anuales tendríamos:

$$\begin{aligned} \text{KWHR} &= 8760 \times 0.5 \times 0.0467 \times 5162 \\ &= 1'055.866 \text{ KWHR} \end{aligned}$$

Considerando el promedio de venta de S/. 2.80 por KWHR nos daría un beneficio anual de:

$$\begin{aligned} \text{S/.} &= 1'055.866 \times 2.80 \\ &= \text{S/. } 2'956.425 \text{ por año.} \end{aligned}$$

3.8.3.- CAPACIDAD LIBERADA EN LINEAS DE DISTRIBUCION, TRANSFORMADORES SUBESTACION, TRANSMISION, ETC.

La instalación de capacitores disminuye la corriente de línea, por consiguiente, todos los equipos utilizados para producir y transportar la corriente se ven liberados de una parte de la carga, lo que se podría aprovechar para transportar más KW, frente a la alternativa de aumentar generación, líneas de transmisión, subestaciones, alimentadoras, etc.

De datos proporcionados por EMELEC, muy generales por cierto, se estima en unos S/. 60.000,00 por KW las instalaciones totales desde generación hasta el transformador de distribución.

La tabla # 5 nos indica que, manteniendo el voltaje dentro de los límites, es decir, un 5% de caída como máximo, la capacidad de la alimentadora es de 2963 KW

sin capacitores, al añadir 3000 KVAR en capacitores la capacidad aumenta a 7591 KW, por lo tanto la capacidad liberada a las instalaciones es de 4628 KW.

Si aceptamos el costo de S/. 60.000,00 por KW a nivel de usuario lo prorratamos en 10 años tendríamos los siguientes valores:

Costo anual = $60.000 \times 4628 \times 0.1 =$ S/. 27'768.000,00
que es el ahorro por diferir la inversión.

3.8.4.- COSTO DE INSTALACION DE CAPACITORES

Con datos proporcionados por EMELEC se ha determinado que el costo del capacitor más el costo de la instalación es de aproximadamente S/. 1.200 por KVAR que incluyen pararrayos, portafusibles, control, etc.

Tenemos que para los 3000 KVAR de capacitores calculados que se necesitan para controlar y regular el voltaje en la alimentadora 25 de Julio su costo total sería de:

Costo total = $3000 \times 1.200 =$ S/. 3'600.000,00

3.8.5.- EVALUACION DE COSTOS Y BENEFICIOS

Haciendo un resumen de los aspectos económicos de los cuatro artículos anteriores podemos llegar a los si-

güentes resultados:

Beneficios obtenidos anualmente	
Reducción de pérdidas de energía	S/. 2'501.856,00
Aumento en facturación por aumento de voltage	" 2'956.425,00
Capacidad liberada en equipos (1)	<u>" 27'768.000,00</u>
Beneficios totales al año	S/. 33'226.281,00
Costo por instalación de capacitores	S/. 3'600.000,00
Balance: Beneficios:	S/. 33'226.281,00
Costos:	<u>" 3'600.000,00</u>
Beneficio Total	S/. 29'626.281,00

Cifra que es muy significativa para la operación económica del sistema y que justifica plenamente la instalación de capacitores en alimentadoras de distribución.

(1) Este valor representa lo que habría que invertir en equipos para producir y transportar la capacidad liberada por los capacitores y que se pagarían en 10 años.

C A P I T U L O 4

ESTUDIO DE LOS EFECTOS SECUNDARIOS EN EL CIRCUITO ANTERIOR

Los efectos secundarios de la instalación de capacitores shunt en una alimentadora se manifiestan en la siguiente forma:

- 1.- Interferencia telefónica.
- 2.- Efectos sobre la estabilidad del sistema.
- 3.- Problemas de resonancia.
- 4.- Sobrevoltajes.

Se ha tratado de observar y cuantificar estos efectos secundarios en el área influenciada por alimentadora el 25 de Julio y debido a sus mínimos valores o a la ausencia de ellos los resultados son mayoritariamente especulativos.

4.1.- INTERFERENCIA TELEFONICA

La interferencia telefónica se produce por el efecto inductivo en las líneas telefónicas debido a las corrientes armónicas en el circuito de potencia y un

banco de capacitores conectado en estrella y aterrizado ofrece un camino de baja impedancia a las corrientes armónicas aumentando la circulación de estas corrientes y sus voltajes generados.

En el área que está servida por la alimentadora 25 de Julio la cantidad de líneas telefónicas es tan insignificante que realmente no se pudo hacer una investigación acerca de la interferencia telefónica ocasionada por la instalación de capacitores.

Además, los capacitores serían instalados en un solo banco en una sola estación, donde no hay teléfonos, por lo cual, cuando se lleguen a instalar líneas telefónicas en el sector, el problema se manifestaría, de producirse, en su mínima expresión.

4.2.- EFECTO SOBRE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA

La estabilidad de un sistema eléctrico de potencia depende del factor de potencia. Con la aplicación de 3000 KVAR en la alimentadora 25 de Julio se mantiene un factor de potencia entre 0.92 y 0.99 y se podría pensar que se podría presentar algún problema relacionado con la estabilidad del sistema. Pero si hacemos las siguientes consideraciones veremos que realmente la posibilidad de llegar a una situación de inestabilidad es muy remota.

En primer lugar la alimentadora 25 de Julio sale de una subestación de la cual salen además otras seis a limentadoras que suman unos 30000 KVA de los cuales apenas $1/6$ los toma la 25 de Julio, por consiguiente, el efecto sobre la subestación es pequeño, además, la subestación es una de tantas subestaciones que tiene el sistema Guayaquil, por lo cual su efecto será mi- nimizado en tantas veces cuantas subestaciones hayan.

En segundo lugar las modernas unidades generadoras es tán diseñadas para trabajar a un factor de potencia de 0.95 sin problemas.

De lo antedicho podemos concluir que el efecto sobre la estabilidad del sistema será insignificante.

4.3.- PROBLEMAS DE RESONANCIA

Los problemas de resonancia pueden presentarse bajo dos condiciones principalmente:

Circuitos con transformadores monofásicos de distribu ción y circuitos con transformadores trifásicos de distribución. En cuanto a éstos no son empleados en ningún punto de la alimentadora 25 de Julio.

En los circuitos con transformadores monofásicos de distribución se presentan fenómenos de resonancia cuan

do el circuito es de cuatro hilos y multiterrizado con bancos de capacitores sin aterrizar. Este no es el caso, puesto que la conexión propuesta de los bancos, tanto el fijo como el desconectable, será en estrella con el neutro aterrizado, por lo cual no habrá resonancia.

La otra posibilidad es el monofaseo al perder una o dos fases la alimentadora, pero este caso está normalmente prevenido por los equipos de protección del sistema.

4.4.- SOBREVOLTAJES

Sobrevoltajes debidos a la instalación de capacitores en una alimentadora de distribución pueden ser por resonancia o por monofaseo.

Los sobrevoltajes resonantes pueden evitarse al aterrizar los bancos de capacitores o cambiándolos de lugar previo un análisis del problema específico y determinar de qué manera se alteran la relación de las reactancias del circuito con el banco de capacitores.

El monofaseo se evita usando desconectores trifásicos.

C A P I T U L O 5

ELABORACION DE UN PROGRAMA DE COMPUTADORA PARA MECANIZAR LA APLICACION DE CAPACITORES A CIRCUITOS DE ALTA TENSION

El programa usado en este estudio consta, básicamente, de dos partes. La primera parte calcula las caídas de voltaje y las pérdidas de potencia de la alimentadora en tramos de estación a estación empleando el método "Voltios-amperios-ohmios". La segunda parte del programa calcula la capacidad necesaria en capacitores y determina su ubicación usando un algoritmo preestablecido.

Para el cálculo de las caídas de voltaje se parte de la ecuación general:

$$E_{rn} = E_{sn} - (IR \cos\theta_s + I_x \text{sen } \theta_s) \quad (40)$$

donde

E_{sn} = Voltaje línea neutro en la fuente.

E_{rn} = Voltaje línea neutro en la carga.

θ = Angulo del factor de potencia de la fuente.

I = Corriente de línea.

R = Resistencia en ohmios de una línea.

X = Reactancia en ohmios de una línea.

Como la caída de voltaje está definida en porcentaje, tenemos, sumando ecuaciones 2 y 3:

$$\begin{aligned} \% \text{ Caída de voltaje} &= \frac{(E_s - E_r)100}{E_r} \\ &= \frac{\text{KVA} (R \cos \theta_s + X \text{ sen } \theta_s)}{10 (\text{KV})^2} \quad (41) \end{aligned}$$

Para un sistema trifásico.

Esta fórmula se usa para circuitos trifásicos de tres hilos y cargas trifásicas, y para este estudio se han agrupado los transformadores, que en su mayoría son monofásicos, simulando bancos trifásicos.

Para las líneas monofásicas de uno y dos hilos con neutro multiterrizado se toma en cuenta una impedancia de retorno equivalente. Y las fórmulas para calcular la caída de voltaje en este tipo de alimentadora son:

Para dos fases y neutro

$$\begin{aligned} \% E 2 \phi_n &= \frac{\text{KVA}}{10(\text{KV})^2} \left\{ r_s \cos(30+\theta_s) + X_s \text{ sen}(30+\theta_s) + \right. \\ &\quad \left. \sqrt{3} [r_{sn} \cos(60+\theta_s) + X_{sn} \text{ sen}(60+\theta_s)] \right\} \quad (42) \end{aligned}$$

y para una fase y neutro

$$\% E \phi_n = \frac{\text{KVA}}{10(\text{KV})^2} \left\{ 3 [(r_s + r_{sn}) \cos \theta_s + (X_s + X_{sn}) \text{ sen } \theta_s] \right\} \quad (43)$$

donde

$\% E 2 \phi_n$ = Porcentaje de caída de voltaje para dos fases a neutro.

$\% E \phi_n$ = Porcentaje de caída de voltaje para una fase a neutro.

r_L = Resistencia de secuencia positiva del conductor fase.

r_n = Resistencia de retorno del circuito.

X_L = Reactancia de secuencia positiva del conductor fase.

X_{en} = Reactancia equivalente del neutro.

θ = Angulo del factor de potencia.

KVA = KVA del circuito.

KV = Voltaje línea a línea en kilovoltios.

Los valores de la resistencia y reactancia empleados en las fórmulas 41, 42 y 43 tanto de línea como de retorno son tomados de tablas en ohmios/mil pies y luego convertidos a ohmios/Km. Debiendo señalarse que los valores de las resistencias y reactancias usados en las fórmulas de caída de voltaje para los casos de 2 fases y una fase, aunque están indicados como valores de secuencia positiva, son, lógicamente, los mismos que en simetría usados para calcular caídas de voltaje en circuitos trifásicos.

Para el cálculo de las pérdidas se usan solamente las

pérdidas de potencia activa. La razón es que éstas son las computables, empleando la siguiente fórmula para sistemas trifásicos:

$$\% \text{ pérdidas de línea} = \frac{\% ER}{Z \cos \theta_L} \quad (44)$$

donde

R = resistencia de la alimentadora.

$$Z = R \cos \theta_L + X \sin \theta_L$$

Para 2 fases y neutro, tenemos:

$$\% \text{ pérdidas de línea } 2 \phi_n = \frac{KVA}{10(KV)^2} \left[\frac{2r_L}{3 \cos \theta_L} + \frac{r_n}{\cos \theta_L} \right] \quad (45)$$

Para 1 fase y neutro

$$\% \text{ pérdidas de línea } \phi_n = \frac{KVA}{10(KV)^2} \times \frac{3(r_L + r_n)}{\cos \theta} \quad (46)$$

Las ecuaciones 41 a 46 tanto para el cálculo de la caída de voltaje como para el cálculo de pérdidas de potencia están en función del factor de potencia.

Para los cálculos anteriores los parámetros necesarios son los medidos en la subestación y éstos son corriente de línea a máxima carga y a mínima carga, voltaje en las barras y factor de potencia a la subida de la subestación.

Como es imposible obtener las cargas individuales de cada estación así como su factor de potencia respectivo. Se prorratean las corrientes a cada estación, con ésto, obligadamente, designamos el mismo factor de potencia a cada una de las estaciones y no varían los valores medidos en la subestación.

Para el cálculo de la capacidad necesaria y la ubicación óptima de los capacitores dentro de la alimentadora, se usa el método general para alimentadoras con cargas concentradas empleado para la obtención de máxima reducción de pérdidas deducida del cálculo de la ubicación óptima de capacitores en alimentadoras con cargas uniformemente distribuidas y que dice: Que la ubicación óptima de capacitores puede ser expresada por la ecuación tomada del ahorro en pérdidas de porcentaje debido a la instalación de capacitores y que es:

$$\% \text{ ahorro de pérdidas por la instalación de capacitores en circuitos con cargas uniformemente distribuidas} = 3 a \left(\frac{CKVA}{KVAR_t} \right) \left(2 - a - \frac{CKVA}{KVAR_t} \right) 100 \quad (47)$$

donde

a = Localización del banco de capacitores en p.u.

CKVA = Tamaño del banco de capacitores.

KVAR_t = KVAR totales atrasados del circuito antes de instalarse capacitores.

En esta fórmula se ve que la máxima reducción de pérdidas se obtiene cuando el banco de capacitores está ubicado en el punto donde la corriente del capacitor es el 200% o menos que la corriente reactiva del sistema.

Para el estudio de la alimentadora 25 de Julio se aplica el mismo criterio de estación a estación en forma iterativa y acumulativa para la totalidad de la alimentadora hasta obtener la ubicación óptima dentro de la totalidad de la alimentadora.

Para el uso del programa se han usado los siguientes datos:

Cantidades medidas suministradas por EMELEC

Voltaje máximo en barras	13800 voltios
Voltaje mínimo en barras	13800 voltios
Corriente carga máxima	345 Amp.
Corriente carga mínima	195 Amp.
Factor de potencia	0.8 atras.

Parámetros obtenidos en el campo

Distancias entre estaciones	Ver plano A - 1
Tipos de conductores usados	336 MCM ACSR y # 2 AWG ACSR
Neutro equivalente	# 4/0 AWG y # 2 AWG

Parámetros calculados

Resistencia de cable 336 MCM ACSR	= 0.0526	/1000pies
Reactancia cable 336 MCM ACSR	= 0.0843	/1000pies
Resistencia equivalente 4/0 AWG	= 0.0284	/1000pies
Reactancia equivalente 4/0 AWG	= 0.0684	/1000 pies
Resistencia cable # 2 AWG ACSR	= 0.0448	/1000pies
Reactancia cable # 2 AWG ACSR	= 0.0945	/1000pies
Factor de carga	= 0.59	
Número de estaciones	= 225	

Valores obtenidos

Potencia máxima

Potencia mínima

Capacidad instalada en KVA

Factor de potencia

Factor de pérdidas

Pérdidas de potencia en KW

Pérdidas de potencia en %

Voltaje mínimo a carga mínima

Voltaje mínimo a carga máxima

Capacidad de bancos de capacitores fijos

Capacidad de bancos de capacitores desconectables

Ubicación de bancos fijos y desconectables

% de regulación de voltaje

Estos resultados obtenidos por medio de la computadora están enlistados en el anexo 2 y su resumen en la tabla # 5.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados obtenidos por medio de la computadora de los cálculos de los perfiles de voltaje a lo largo de la alimentadora 25 de Julio en distintas condiciones de carga, voltaje, factor de potencia, y cuyo resumen está tabulado en la tabla # 5 y en las figs. # 23, 24, 25 y 26 podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- 1.- La alimentadora es muy larga.
- 2.- La alimentadora tiene muchos ramales monofásicos.
- 3.- Los ramales monofásicos son muy largos.

1.1.- ALIMENTADORA MUY LARGA

El recorrido total de la alimentadora es de 7.5 Kms. en su línea principal y su capacidad está limitada por la caída de voltaje al extremo de la misma o de su peor ramal, como nos demuestra el artículo 3.4.1,

y que es de 155 amperios, si comparamos este amperaje con los 451 amperios que es el límite térmico del conductor de la alimentadora vemos que alcanza al 34% de su capacidad.

1.2.- ALIMENTADORA CON MUCHOS RAMALES MONOFASICOS

En su recorrido, la alimentadora tiene un gran número de ramificaciones, las cuales todas son monofásicas y con conductor # 2 ACSR, las cuales aumentan la caída de voltaje, puesto que la caída de voltaje en un sistema monofásico multiaterrizado es de aproximadamente tres veces la caída de voltaje en un sistema trifásico.

1.3.- RAMALES MONOFASICOS MUY LARGOS

Los ramales que salen de la alimentadora primaria tienen un recorrido muy largo que llega hasta los dos kilómetros en su ramal principal además que tienen subramales de hasta 0.5 Km, y éstos derivaciones de hasta 0.3 Km. como se puede apreciar en el anexo 1, haciendo que el voltaje caiga rápidamente como se puede ver en los perfiles de voltaje demostrados en las figs. # 23 y 24 en las cuales se ve la súbita caída del voltaje en su peor ramal que es el 300.

2.- RECOMENDACIONES

Después de analizar los resultados obtenidos por medio de la computadora y enlistados en el anexo 2 me atrevo a hacer las siguientes recomendaciones:

- 1.- Cambiar a trifásico todo el ramal 300.
- 2.- Completar a trifásico toda la alimentadora desde la estación 410 hasta la 530.
- 3.- Instalar 3000 KVAR en capacitores chunt en la estación 460 compuestos de dos bancos: 1200 KVAR fijos y 1800 KVAR desconectables controlados por mandos sensibles al voltaje.
- 4.- Hacer pruebas de voltaje tomando mediciones en diferentes condiciones de carga, analizar los resultados, y prever una posible reubicación de los bancos de capacitores, utilizando el programa de computación preparado para este estudio.

B I B L I O G R A F I A

<u>TITULO</u>	<u>AUTOR</u>
1. Power Capacitors	R. E. MARBURY
2. Transmission & Distribution	WESTINGHOUSE
3. Distribution Systems	WESTINGHOUSE
4. Power Capacitors	GENERAL ELECTRIC
5. Ventajas económicas y aplicación de condensadores a sistemas eléctricos.	Mc GRAW-EDISON
6. ABC of capacitors	Mc GRAW-EDISON
7. Shunt Capacitors: Where to put them.	POWER Sept. 1950
7. Capacitores de Potencia	BALMEC S.A.México
8. Power Capacitors Application Measurement and Control	SANGAMO
9. Curso Planificación de Sistemas de Distribución.	E.S.P.O.L
10. Capacitors help tu start large motors.	ELECTRICAL WORLD Nov. 1974
11. Automatically Switched Capacitors.	FOWLER, THOMAS
12. Power System Voltage Control without Feeder Voltage Regulators	SMELOFF AIEE
13. Shunt Capacitors	WESTINGHOUSE