

ESPECIALIZACIÓN EN

SDE

SISTEMAS * DISTRIBUCIÓN * ENERGÍA ELÉCTRICA

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES



FUNCIONES DE LA OPERACIÓN : Control de Pérdidas, Reactivos y la Reconfiguración de Sistemas Eléctricos de Distribución

Profesor: JAIRO BLANCO SOLANO
Candidato a Doctor - Área Ing. Eléctrica
Grupo GISEL

Universidad
Industrial de
Santander



Universidad
Industrial de
Santander



CONSTRUIMOS FUTURO

CONTENIDO

1. Pérdidas en sistemas de distribución
2. Aplicación de bancos de condensadores para la reducción de pérdidas
 - 2.1 Compensación del factor de potencia
 - 2.2 Compensación de línea
 - 2.3 Localización óptima de bancos de condensadores
3. Reconfiguración en sistemas de distribución

Pérdidas de potencia

Variación de las pérdidas de acuerdo a la configuración de los sistemas. Por ejemplo circuitos rurales tienen a presentar grandes pérdidas por sus distancias. Sistemas de distribución con tensiones elevadas tienen generalmente pérdidas bajas.

Pérdidas obtenidas por diferentes estudios en empresas del sector eléctrico

Utility	Electric System Energy Losses			
	Transmission (%)	Distribution (%)	Secondary (%)	Total Distribution (%)
B	0.62	2.73	3.75	6.49
C	N/A	1.91	0.92	2.84
D	2.53	1.79	0.89	2.68
E	3.71	2.40	0.35	2.76
F	2.25	1.84	1.75	3.59
G	3.76	1.53	1.71	3.24
H	4.20	0.82	0.89	1.71
I	3.51	1.20	1.24	2.44
J	3.70	1.28	1.28	2.56
K	1.10	6.40	1.56	7.96
O	1.80	3.67	0.38	4.05
P	1.38	1.58	1.80	3.38
Q	2.53	1.14	1.83	2.96
R	2.69	4.69	0.30	4.99

Source: From EPRI 1016097, *Distribution System Losses Evaluation*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 2008. Copyright 2008. Reprinted with permission.

Pérdidas de potencia

Los resultados difieren en cuanto:

- ✓ Variedad de las prácticas de diseño
- ✓ Tipos de carga
- ✓ Tipo de tensión y técnicas de regulación
- ✓ Prácticas de control de reactivos

Estadísticas de las pérdidas en circuitos de distribución

	Quartiles			
	Average	25%	50%	75%
Primary line losses	1.40	0.61	1.04	1.84
Transformer load losses	0.38	0.24	0.34	0.46
Transformer no-load losses	1.59	1.03	1.49	1.89
Secondary line losses	0.31	0.16	0.27	0.44
Total losses	3.64	2.52	3.09	4.32

Pérdidas de potencia

Conceptos importantes:

- ✓ **FACTOR DE PÉRDIDAS:** La relación entre el valor medio y el valor máximo de la potencia disipada en calor en un intervalo de tiempo especificado.

$$f_{\text{per}} = \frac{\text{kWh de pérdidas durante el período}}{\text{kW máximo de pérdidas} \times \text{número de horas del período}}$$

$$f_{\text{per}} = \frac{\text{Pérdidas de potencia promedio}}{\text{Pérdidas de potencia a la hora pico}}$$

- ✓ **PORCENTAJE DE PÉRDIDAS:** La relación de pérdidas en kW durante los períodos pico.

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{\text{Pérdidas de energía}}{\text{Energía suministrada a un sistema}} \times 100$$

$$\text{Pérdidas de energía} = \% \text{ de pérdidas} \times \sum D_i h$$

Ejemplo: Flujo_trifásico

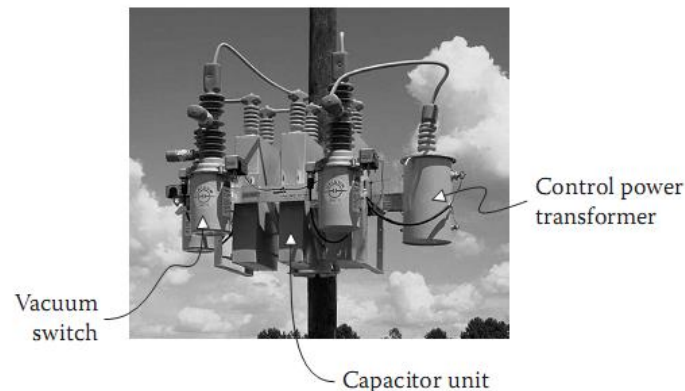
Aplicación de la compensación capacitiva

Beneficios en la operación de sistemas de distribución:

- ✓ Reducción de pérdidas y aumento en la capacidad de transporte: por la cancelación de reactivos, se genera reducción de las corrientes de línea. A su vez con menores corrientes se libera capacidad de transporte de las líneas y las pérdidas se reducen.
- ✓ Caídas de tensión: los condensadores el mejoramiento del perfil de tensión, cancelando las caídas de tensión por la operación de las cargas en el sistema. La conmutación de condensadores se usa para la regulación de tensión.

El control incorrecto de la compensación puede por el contrario generar incrementos en las pérdidas y sobretensiones (principalmente en condiciones de carga ligera).

Capacitor Application



Aplicación de la compensación capacitiva

Aplicaciones:

- ✓ Normalmente se instalan sobre secciones trifásicas en los sistemas. Las aplicaciones monofásicas no son tan comunes.
- ✓ Se evitan en aplicaciones de bancos trifásicos aguas abajo de protecciones monofásicas debido al riesgo de ferro-resonancia.

Substation versus Feeder Capacitors

Advantages	Disadvantages
Feeder Capacitors	
Reduces line losses	More difficult to control reliably
Reduces voltage drop along the feeder	Size and placement important
Frees up feeder capacity	
Lower cost	
Substation Capacitors	
Better control	No reduction in line losses
Best placement if leading vars are needed for system voltage support	No reduction in feeder voltage drop
	Higher cost

Aplicación de la compensación capacitiva

Capacidades típicas:

Volts, rms (Terminal-to-Terminal)	kvar	Number of Phases	BIL, kV
216	5, 7 1/2, 13 1/3, 20, and 25	1 and 3	30
240	2.5, 5, 7 1/2, 10, 15, 20, 25, and 50	1 and 3	30
480, 600	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60, and 100	1 and 3	30
2400	50, 100, 150, 200, 300, and 400	1 and 3	75, 95, 125, 150, and 200
2770	50, 100, 150, 200, 300, 400, and 500	1 and 3	75, 95, 125, 150, and 200
4160, 4800	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, and 800	1 and 3	75, 95, 125, 150, and 200
6640, 7200, 7620, 7960, 8320, 9540, 9960, 11,400, 12,470, 13,280, 13,800, 14,400	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, and 800	1	95, 125, 150, and 200
15,125	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, and 800	1	125, 150, and 200
19,920	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, and 800	1	125, 150, and 200
20,800, 21,600, 22,800, 23,800, 24,940	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, and 800	1	150 and 200

Source: Adapted from IEEE Std. 18-2002, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors. Copyright 2002 IEEE.

Aplicación de la compensación capacitiva

Restricciones en la operación (IEEE Std. 18-2002):

- ✓ 135 % de la capacidad nominal (kVar placa). Esto puede llegar a darse debido a tensiones superiores a la nominal y a las distorsiones armónicas.
- ✓ 110 % de la tensión nominal de placa y que una sobretensión no mayor a $1,2 * \sqrt{2}$ la tensión eficaz incluyendo armónicos pero excluyendo transitorios.
- ✓ 135 % de la corriente eficaz nominal basada en la capacidad y tensión nominal.

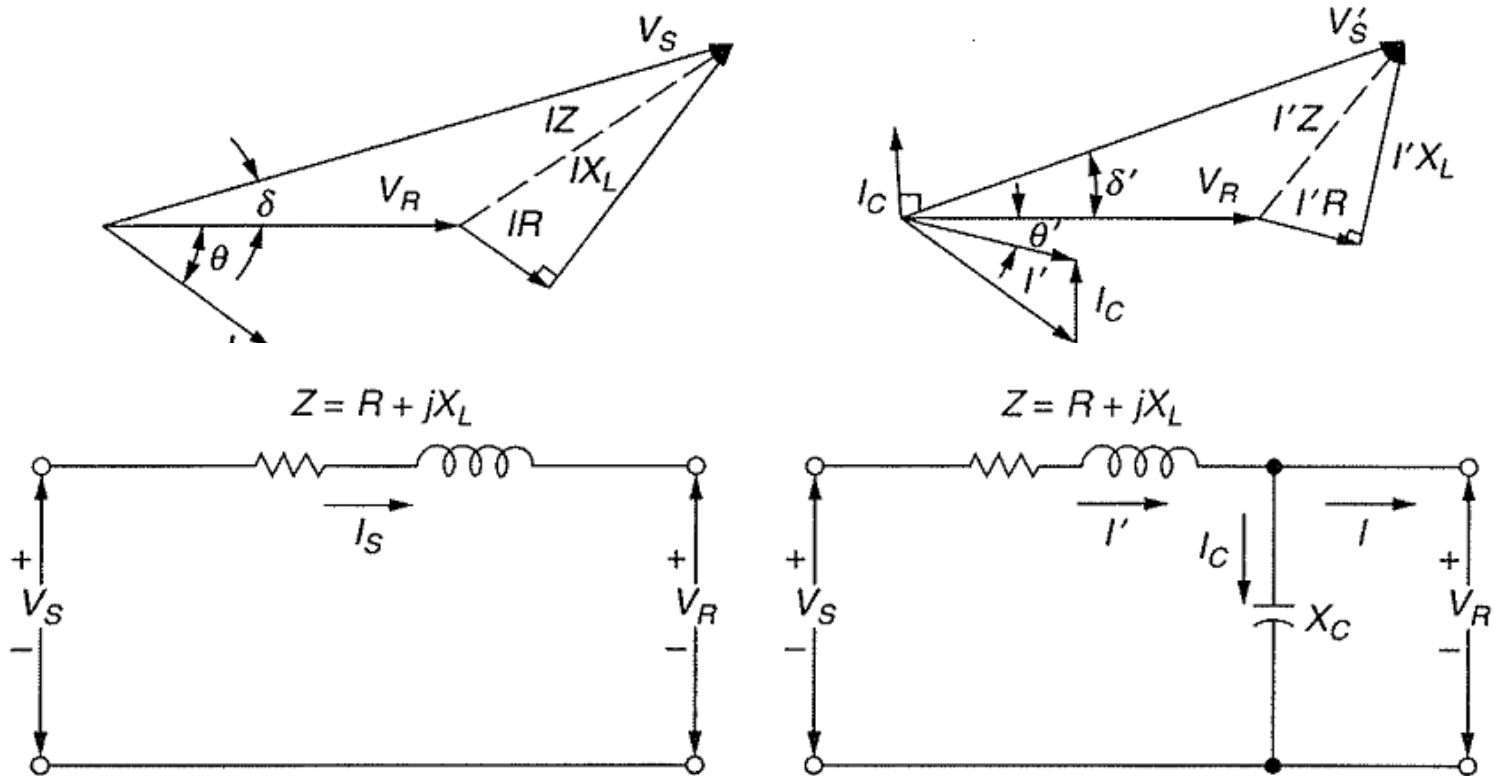
Máximas tensiones permisibles a frecuencia industrial

Duration	Maximum Permissible Voltage (Multiplying Factor to Be Applied to Rated Voltage rms)
6 cycles	2.20
15 cycles	2.00
1 sec	1.70
15 sec	1.40
1 min	1.30
30 min	1.25
Continuous	1.10

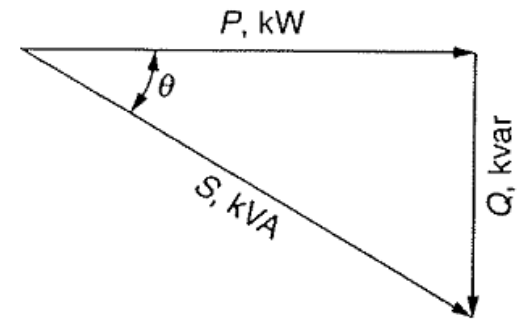
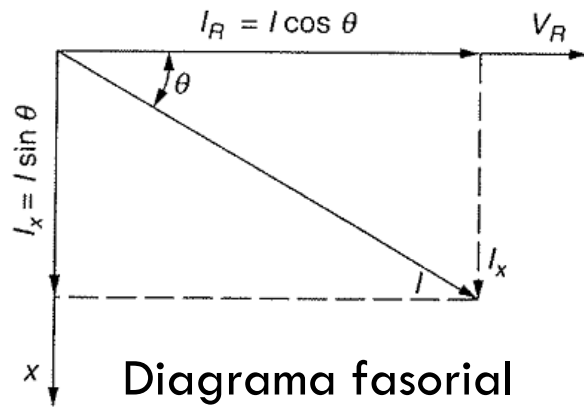
Control de Reactivos por bancos de condensadores

Características de la compensación paralelo:

- Método ampliamente usado para modificar las características de una carga inductiva por la inyección de una corriente en adelanto la cual contrarresta algunas o todas las componentes de atraso de la corriente de carga inductiva en el punto de instalación.



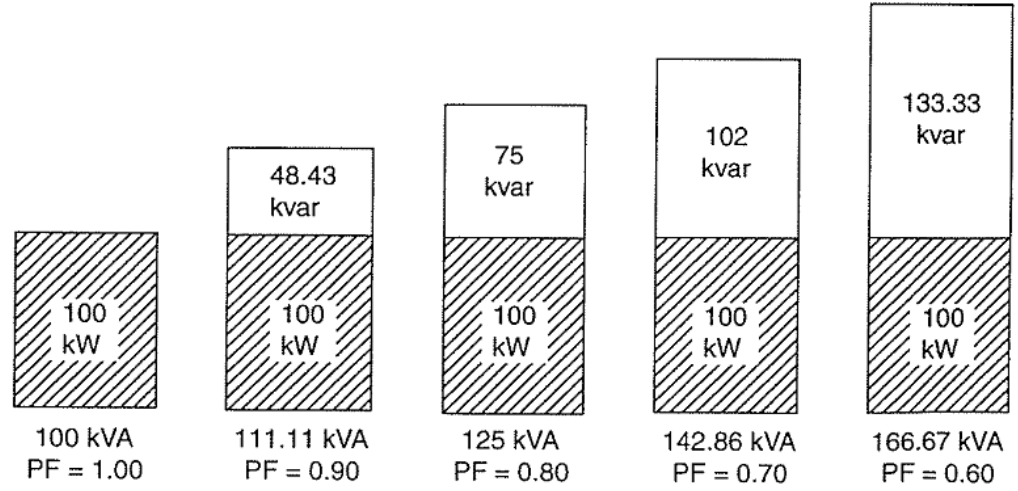
Corrección del factor de potencia



Triángulo de potencia para una carga de distribución típica

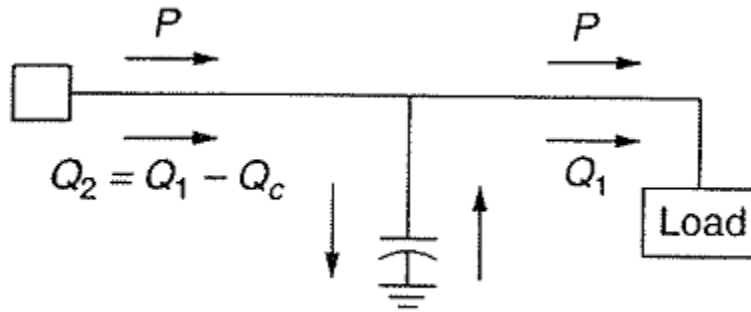
$$\cos \theta_1 = \frac{P}{S_1}$$

$$\cos \theta_1 = \frac{P}{(P^2 + Q_1^2)^{1/2}}$$



En la compensación:

$$\begin{aligned}\cos \theta_2 &= \frac{P}{S_2} \\ &= \frac{P}{(P^2 - Q_1^2)^{1/2}}\end{aligned}$$

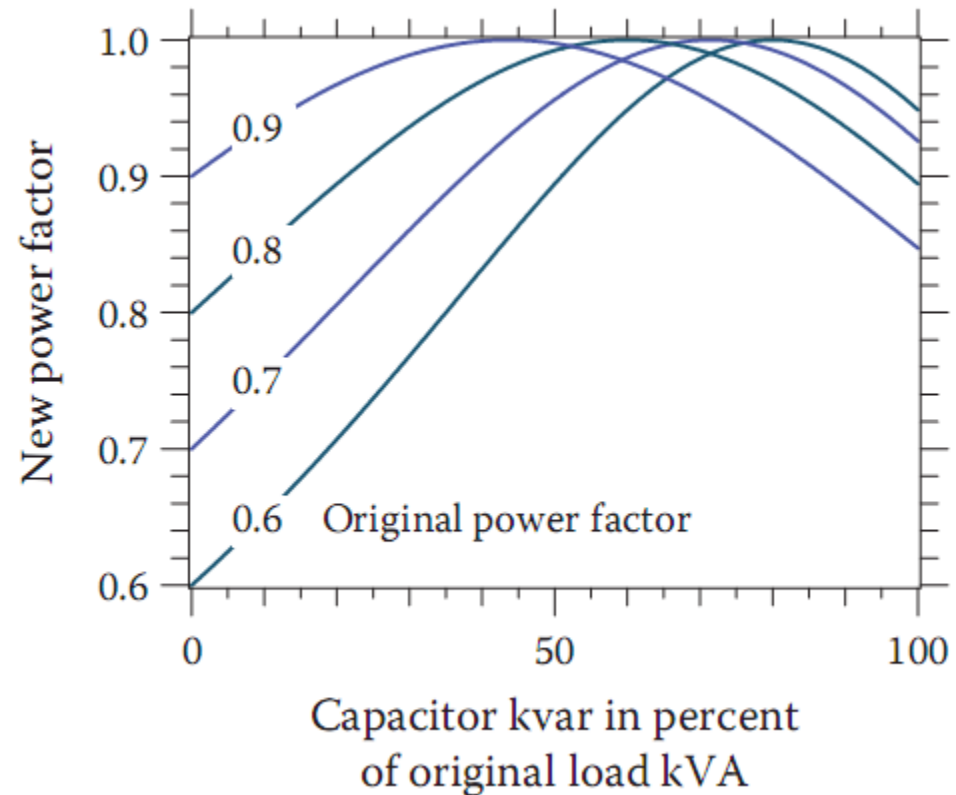
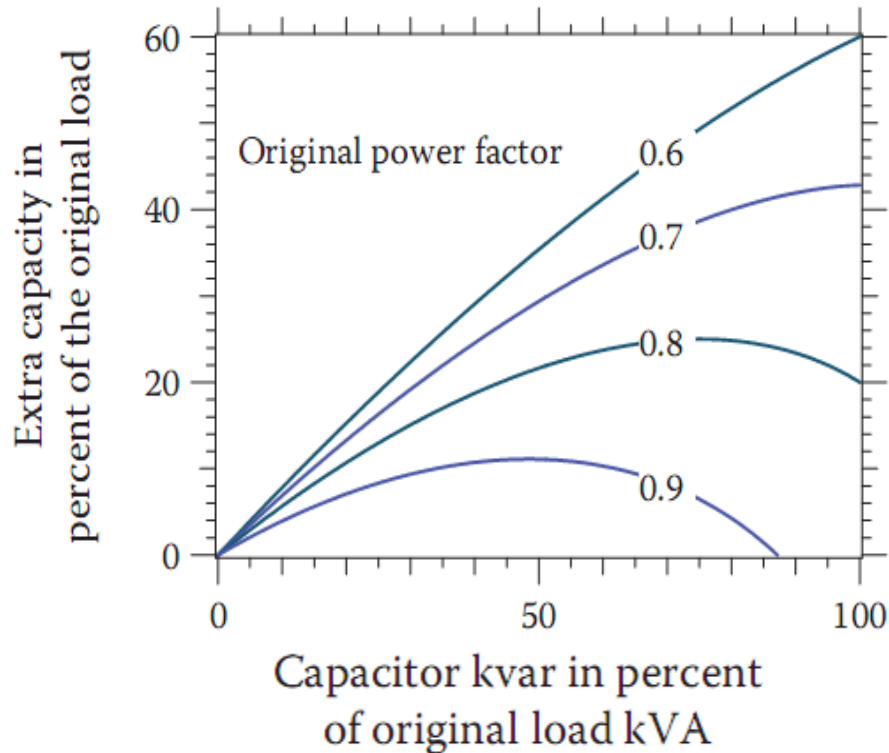


$$\cos \theta_2 = \frac{P}{[P^2 + (Q_1 - Q_c)^2]^{1/2}}$$

- La reducción de la corriente reactiva resulta en una reducción de la corriente total.
- Reducción de pérdidas en las líneas de distribución, en las plantas de generación, en las subestaciones transformadoras y en las mismas líneas de transmisión.

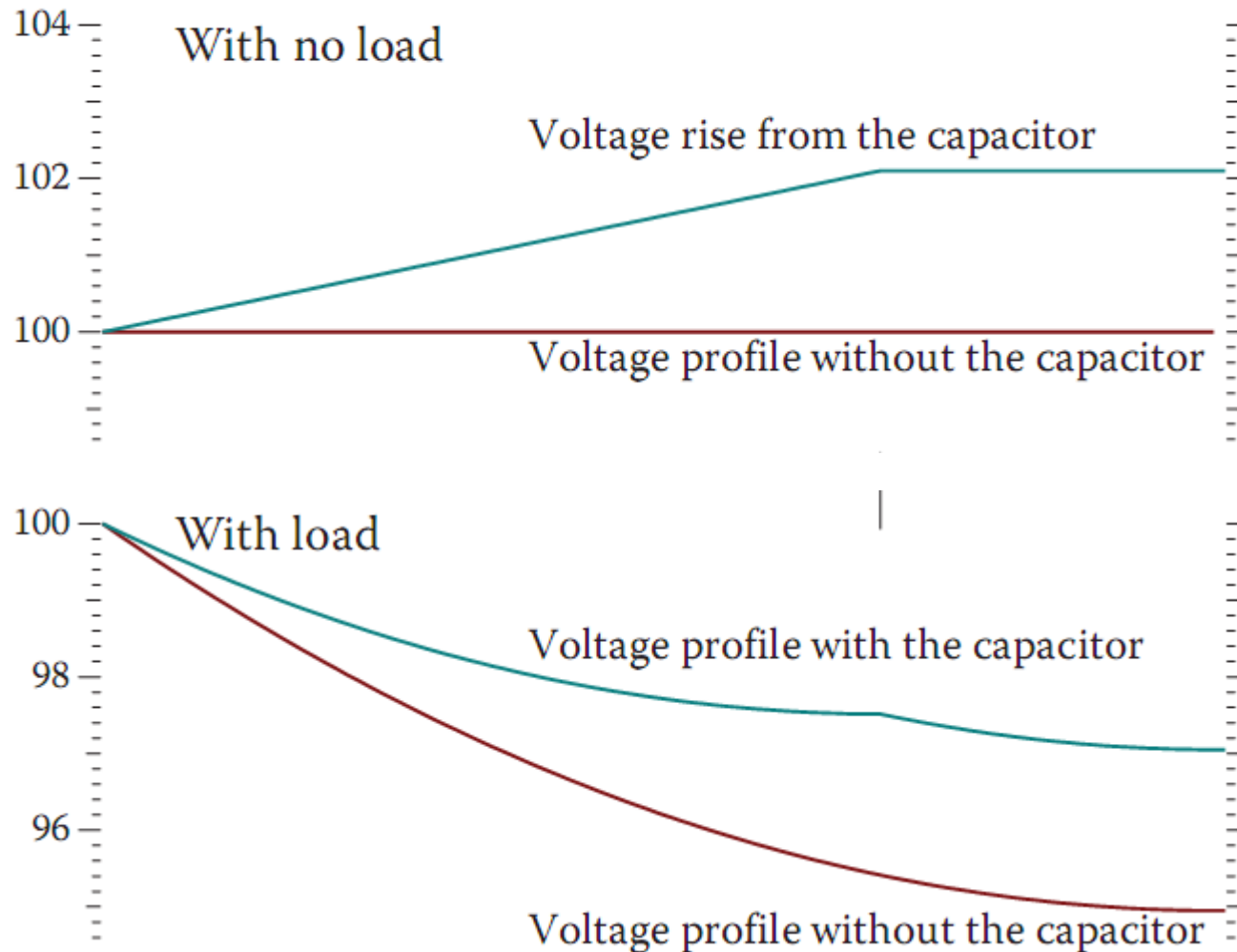
Aplicación de la compensación capacitiva

Capacidad extra como función del tamaño del banco de condensadores



Aplicación de la compensación capacitiva

Perfiles de tensión con la adición de un banco de condensadores



Métodos de compensación de líneas eléctricas:

En líneas de transmisión:

- Compensación serie: para reducir la impedancia serie de la línea y mitigar las caídas de tensión.
- Compensación paralelo en condiciones de baja carga: colocación de inductores en paralelo para mitigar el efecto ferranti.

En líneas de distribución:

- Compensación paralelo: condensadores en paralelo para disminuir las caídas de tensión y pérdidas de potencia.

Procedimiento matemático para determinar la localización óptima de bancos de condensadores

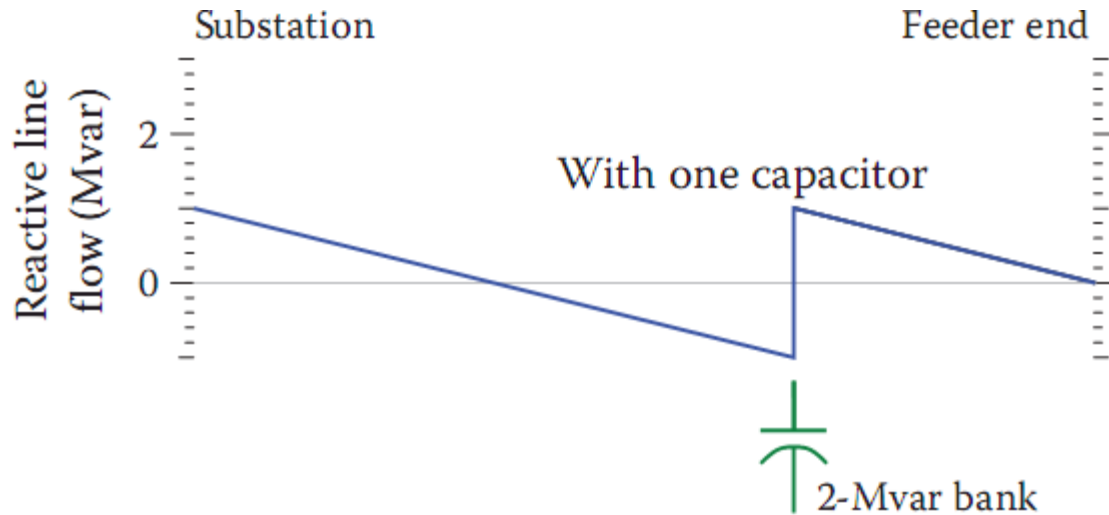
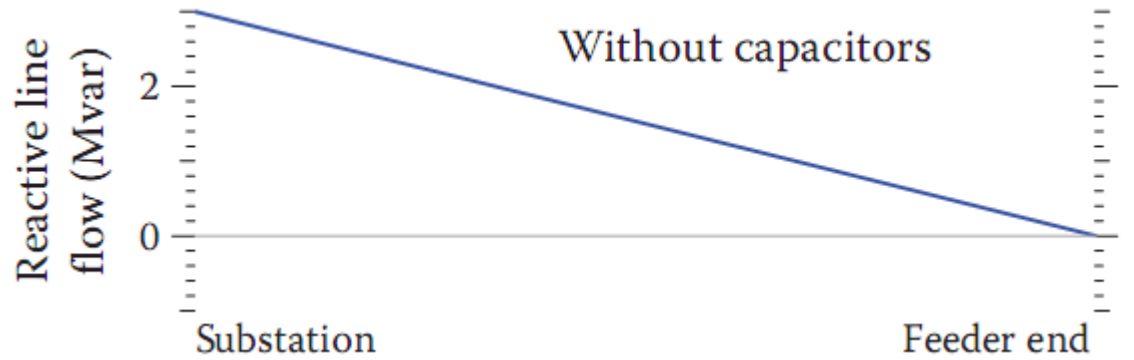
Regla de los 2/3: regla utilizada para y la localización y determinación del tamaño para reducir óptimamente las pérdidas.

Para una carga uniformemente distribuida:

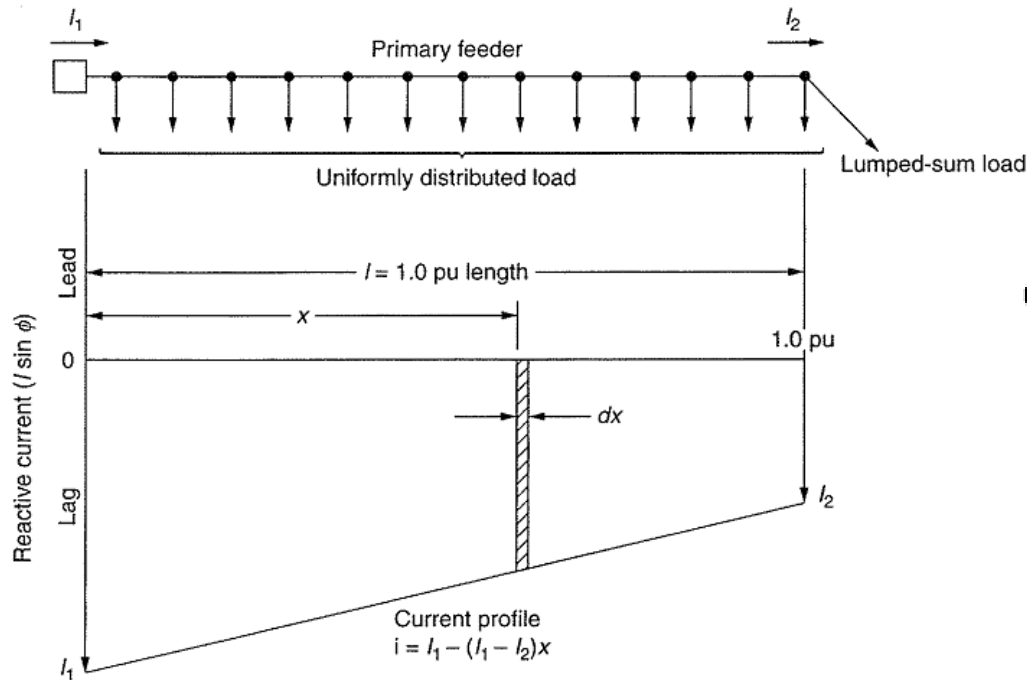
El tamaño del banco de condensadores = $2/3$ de los Vars requeridos por el circuito.

Localización del banco de condensadores = $2/3$ de la distancia entre la subestación y el final de la línea.

Comportamiento del flujo reactivo con la localización óptima del banco de condensadores



Desarrollo del método



$$dP_{LS} = 3[I_1 - (I_1 - I_2)x]^2 R dx.$$

Las pérdidas pueden ser encontradas:

$$dP_{LS} = 3[I_1 - (I_1 - I_2)x]^2 R dx.$$

$$\begin{aligned} P_{LS} &= \int_{x=0}^{1.0} dP_{LS} \\ &= 3 \int_{x=0}^{1.0} [I_1 - (I_1 - I_2)x]^2 R dx \\ &= (I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2) R \end{aligned}$$

Reducción de pérdidas

Caso 1: Un banco de condensadores

$$P'_{LS} = 3 \int_{x=0}^{x_1} [I_1 - (I_1 - I_2)x - I_c]^2 R dx + 3 \int_{x=x_1}^{1.0} [I_1 - (I_1 - I_2)x]^2 R dx$$

$$P'_{LS} = (I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2)R + 3x_1 \left[(x_1 - 2)I_1 I_c - x_1 I_2 I_c + I_c^2 \right] R.$$

La reducción de pérdidas por agregar el banco de condensadores en p.u:

$$\Delta P_{LS} = \frac{P_{LS} - P'_{LS}}{P_{LS}} \quad \Delta P_{LS} = \frac{-3x_1 \left[(x_1 - 2)I_1 I_c - x_1 I_2 I_c + I_c^2 \right] R}{(I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2) R}$$

$$\Delta P_{LS} = \frac{3x_1}{1 + (I_2/I_1) + (I_2/I_1)^2} \left[(2 - x_1) \left(\frac{I_c}{I_1} \right) + x_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \left(\frac{I_c}{I_1} \right) - \left(\frac{I_c}{I_1} \right)^2 \right].$$

Asumiendo:

$$C = \frac{\text{ckVA del banco instalado}}{\text{carga reactiva total}} = \frac{I_c}{I_1}$$

$$\lambda = \frac{\text{corriente reactiva al final del segmento}}{\text{corriente reactiva al inicio del segmento}} = \frac{I_2}{I_1}$$

De esta forma:

$$\Delta P_{LS} = \frac{3cx_1}{1 + \lambda + \lambda^2} [(2 - x_1) + x_1\lambda - c]$$

Si se define:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \lambda + \lambda^2}$$

$$\Delta P_{LS} = 3\alpha cx_1 [(2 - x_1) + \lambda x_1 - c].$$

Caso general: Para n bancos de condensadores.

$$\Delta P_{LS} = 3\alpha c \sum_{i=1}^n x_i [(2 - x_i) + \lambda x_i - (2i - 1)c]$$

Donde c es la tasa de compensación en cada locación, x_i es la distancia en p.u de la localización del i th banco de condensadores desde la fuente, y n es el número total de bancos de condensadores.

Localización óptima de banco de condensadores

La localización óptima del i th banco de condensadores puede ser determinada a partir de la primera derivada de la función de reducción de pérdidas con respecto a x_i , e igualar a cero.

$$\Delta P_{LS} = 3\alpha c \sum_{i=1}^n x_i [(2 - x_i) + \lambda x_i - (2i - 1)c]$$

$$x_{i,\text{opt}} = \frac{1}{1 - \lambda} - \frac{(2i - 1)c}{2(1 - \lambda)} \quad c = \frac{2}{2n + 1}$$

La reducción óptima de pérdidas corresponde a:

$$\Delta P_{LS,\text{opt}} = \frac{3\alpha c}{1 - \lambda} \left[n - cn^2 + \frac{c^2 n(4n^2 - 1)}{12} \right]$$

La tasa de compensación óptima en cada locación se expresa de la siguiente regla:

$$c = \frac{2}{2n+1}.$$

Por ejemplo para $n=1$,

$$x_1 = \frac{2}{3(1-\lambda)}$$

$$\Delta P_{LS, opt} = \frac{2}{3(1-\lambda)}.$$

Para un alimentador con carga uniformemente distribuida,

$$\begin{array}{l} \lambda = 0 \\ \alpha = 1. \end{array} \quad \begin{array}{l} \Delta P_{LS, opt} = \frac{8}{9} \text{ pu} \\ x_1 = \frac{2}{3} \text{ pu} \end{array} \quad c = \frac{2}{3} \text{ pu.}$$

Para un alimentador con carga uniformemente distribuida para tres bancos

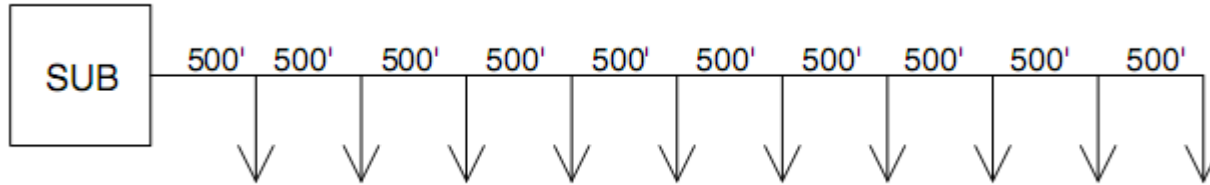
$$x_{i,\text{opt}} = \frac{1}{1-\lambda} - \frac{(2i-1)c}{2(1-\lambda)} \quad c = \frac{2}{2n+1}.$$

Capacidad de cada banco = $2/7$ de la carga reactiva requerida

Localización de cada banco en p.u: $2/7, 4/7, 6/7$.

Problemas

2. Un alimentador trifásico a 4160 V, con cargas uniformemente distribuidas:



Características de cada carga: 210 kVA, $f_p=0,9$ en atraso.

Ejemplo_Compensación

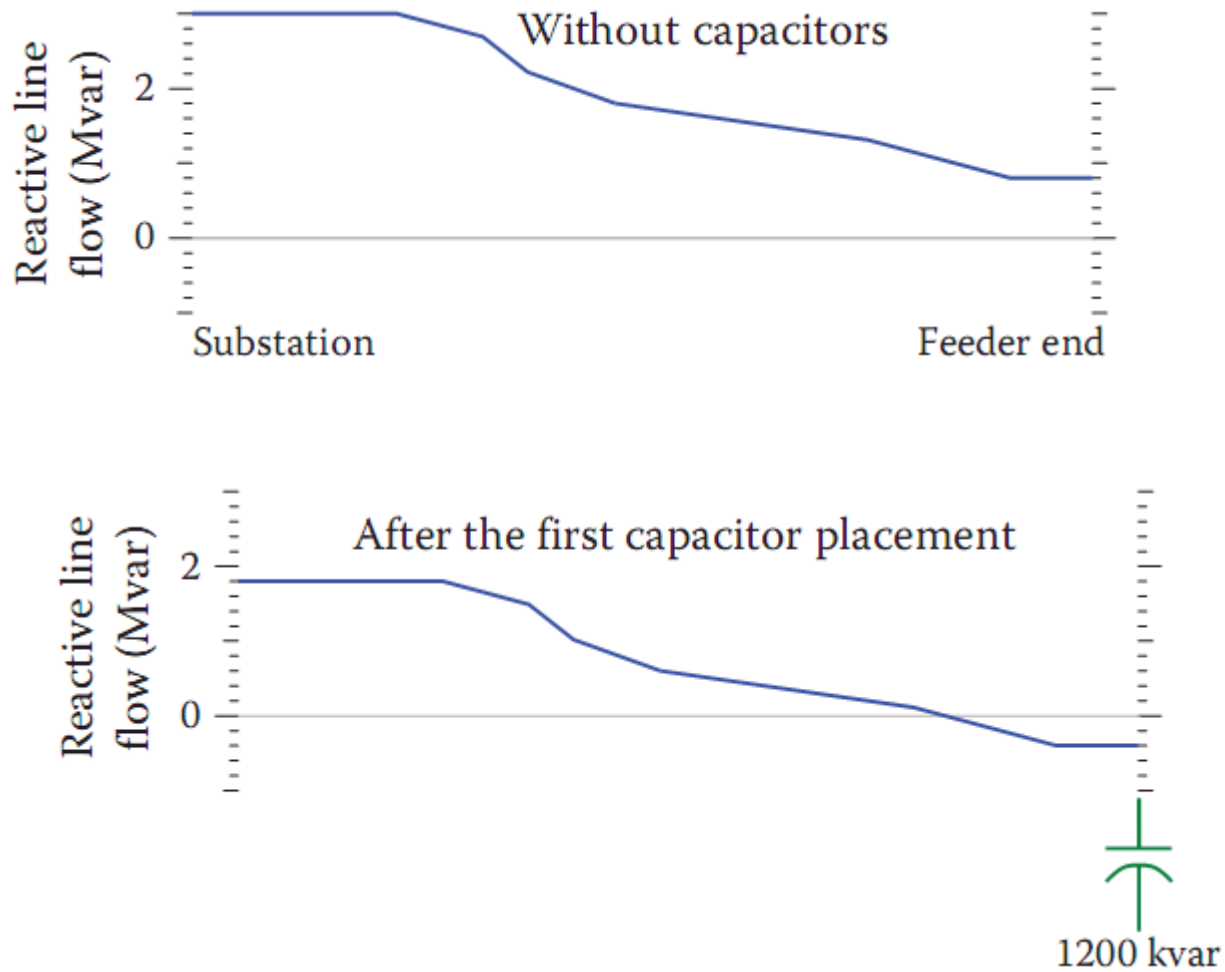
Método de Grainger/Lee (1981)

Método simple para la localización óptima de condensadores para cualquier perfil de carga. La idea básica es localizar los bancos de condensadores donde la potencia reactiva es igual a la mitad de la capacidad nominal del banco.

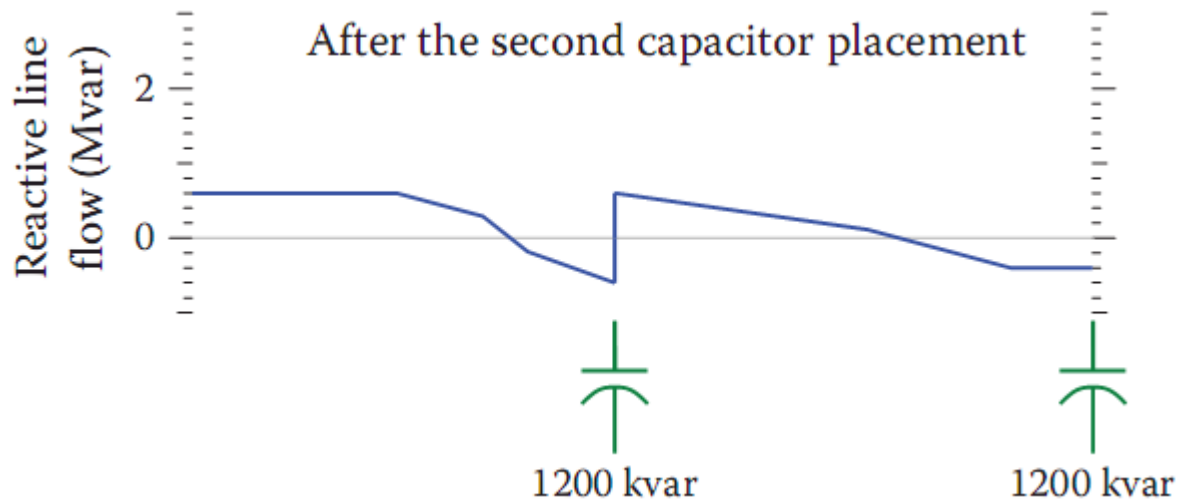
Los pasos son:

- ✓ Seleccionar un banco de condensadores estándar (rango común: 300 a 1200 kvar). Si el tamaño del banco es $\frac{2}{3}$ de los requerimientos del alimentador, solamente se requiere un banco. Si el tamaño es de $\frac{1}{6}$ del requerimiento, se requieren 4 bancos de condensadores.
- ✓ Localización del primer banco: Desde el final del alimentador y en dirección aguas arriba, se localiza el primer banco donde el flujo de potencia reactiva es igual a la mitad de su capacidad nominal.
- ✓ Localización de los bancos restantes: con el primer banco localizado, se reevalúa el perfil reactivo y se repite la regla anterior.
- ✓ Es posible utilizar diferentes especificaciones nominales para los bancos.

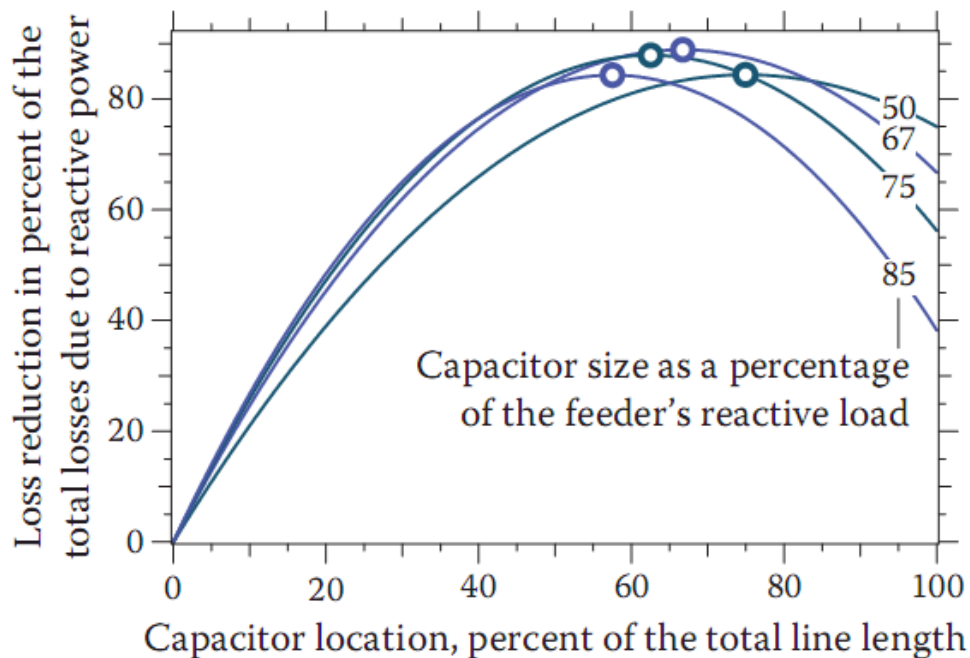
Reducción de pérdidas



Reducción de pérdidas



Para una carga uniformemente distribuida



Otros métodos reportados en la literatura

- “Effects on non linear loads on optimal capacitor placement in radial feeders”. Método para la ubicación y dimensionamiento de condensadores en sistemas de distribución en presencia de pérdidas múltiples por cargas no lineales, presentado como un problema de programación no lineal de minimización de pérdidas de potencia y de inversión.
- “Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distorted substation voltages” reformula el problema del dimensionamiento óptimo de condensadores en sistemas de distribución, considerando que los voltajes de las subestaciones no son sinusoidales y que existen interacciones armónicas, condiciones de resonancia, elevados factores de distorsión armónica y pérdidas armónicas adicionales. El problema se plantea como un problema de optimización combinatoria y se resuelve con un método heurístico simple de búsqueda local.

Otros métodos reportados

- “Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distorted substation voltages” y “Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms”. Se plantea el problema de “ubicación y tamaño óptimo de bancos de condensadores en la presencia de armónicos” como un problema de programación no lineal entero mixto considerando que los bancos de condensadores son fijos y que las cargas funcionan a valores máximos durante todo el tiempo. Se resuelve el problema utilizando lógica fuzzy y algoritmos genéticos.

Otros métodos

- “Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms” se reformula y se implementa una metodología para resolver el problema de “ubicación y tamaño óptimo de bancos de condensadores en la presencia de armónicos” y se determina hasta que punto es viable la utilización de bancos de condensadores como compensadores. Se resuelve con un método heurístico de búsqueda local el cual realiza una búsqueda exhaustiva en forma organizada y jerarquizada.
- “Optimal shunt compensators at nonsinusoidal busbars” se plantea un modelo para determinar el valor óptimo de condensadores en barras aisladas, con tensiones no sinusoidales que combine tres criterios básicos: Maximizar el factor de potencia, minimizar pérdidas en las líneas y maximizar la eficiencia en la transmisión.

Otros métodos

- “Distribution System Harmonic Filter Planning” se formula una metodología para planear la ubicación de filtros para armónicos en sistemas de distribución radiales con fuentes de armónicas de tamaño pequeño. En el método se propone corregir los problemas de inyección de potencia a frecuencia fundamental y después realizar el planeamiento de los filtros para armónicos.
- “Distribution System Harmonic Filter Planning” se desarrolla una metodología para encontrar el valor óptimo de bancos de condensadores fijos que minimicen la distorsión armónica del voltaje en barras de carga, mientras se mantiene el factor de potencia en valores deseados y se cumplen las restricciones dadas por el estándar IEEE Standard for Shunt Power Capacitors 18-1992.

Reconfiguración de sistemas de distribución para reducción de pérdidas

- Es una función que permite reducir pérdidas y mejorar la calidad del servicio alterando la estructura topológica.
- La importancia de la implementación de la función de la reconfiguración está basada en la reducción de pérdidas.

MÉTODO DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS	BENEFICIO / COSTO
Ubicación de condensadores	2 a 8
Cambio de conductores	0.6 a 7
Elevación de los niveles de tensión de servicio	1.5 a 3
Reconfiguración	Mayor de 13

Reconfiguración de sistemas de distribución

- El problema de la reconfiguración consiste en optimizar una o varias funciones objetivo sujeto a restricciones. Debido al tamaño de la red y a la gran cantidad de opciones de conmutación, este problema se ha clasificado como un problema complejo de decisión, con algunas características como: optimización lineal, objetivo múltiple, sujeto a restricciones y combinatorio de gran escala.
- La investigación en la temática de reconfiguración se orienta a:
- Técnicas de búsqueda rápida que eliminen opciones de conmutación no factibles.
- Utilización de técnicas computacionales avanzadas para obtener la solución óptima.
- Implementación de flujos de carga radial que permitan rápidamente chequear las restricciones operativas.
- Modelos de diferentes tipos de carga.

Método de Intercambio de Rama Simple

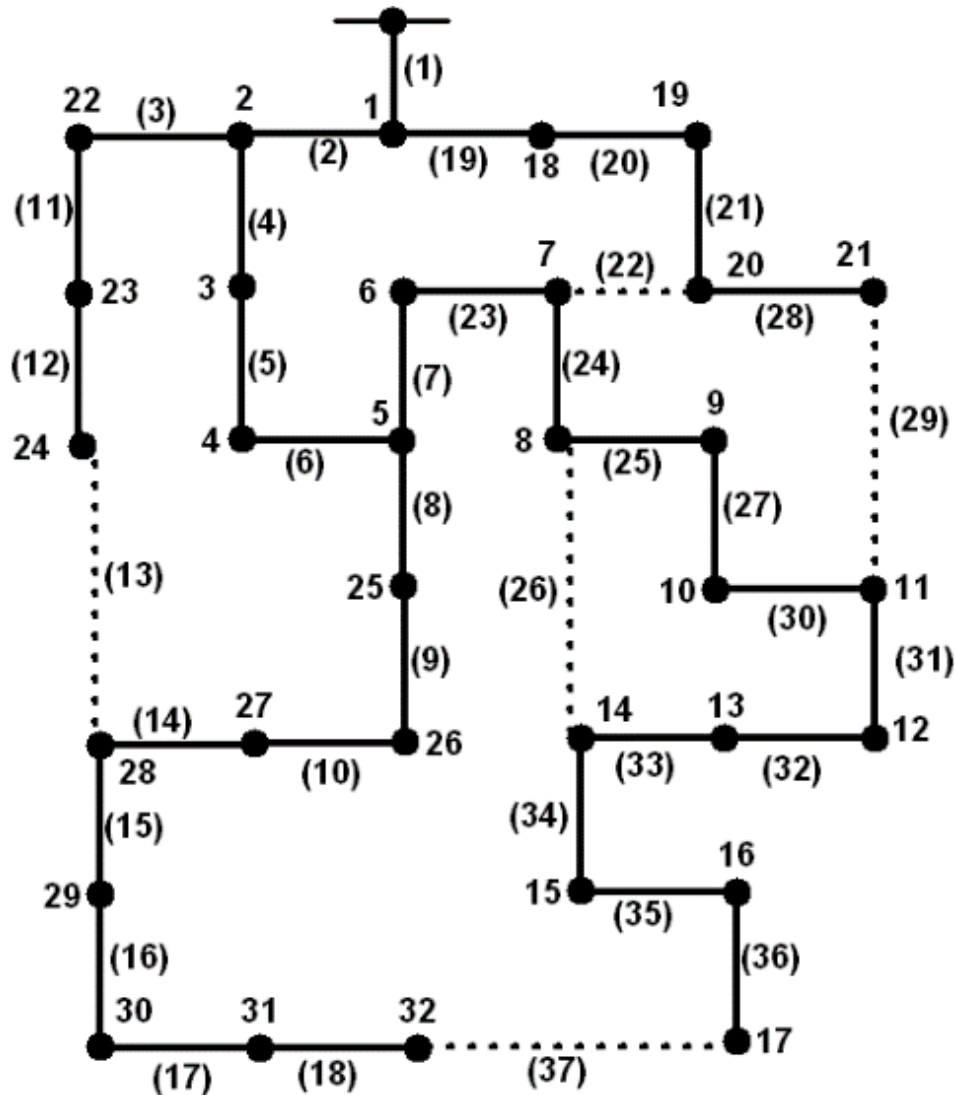
La idea básica del método de intercambio de rama heurístico es calcular el cambio de pérdidas de potencia operando un par de interruptores (cerrando uno y abriendo el otro al mismo tiempo).

Algoritmo propuesto:

- 1) Obtener una red inicial de configuración radial.
- 2) Obtener el conjunto de interruptores abiertos (y cerrados) que se manipularán.
- 3) Correr un flujo de cargas para todas las posibles combinaciones de este conjunto tomando nota de sus pérdidas de potencia y del cumplimiento de las restricciones impuestas.
- 4) Mostrar los resultados de la configuración topológica con menor función objetivo (Pérdidas de Potencia) y que cumple con las restricciones impuestas al problema.

Ejemplo

Sistema de prueba IEEE de 33 nodos



Reconfiguración de sistemas de distribución para otros requerimientos

- ✓ Reconfiguración por cambios topológicos en la misma red: Las condiciones de falla obligan a la reconfiguración de la red mientras se despeja la falla.
- ✓ Reconfiguración por suplencias desde otras subestaciones: consideradas para el balance y reducción de pérdidas, así como para contingencias por falla.

Técnicas de reconfiguración

Métodos basados en el conocimiento. Están basados en la experiencia de los operadores en el funcionamiento del sistema. Basado en este conocimiento, se han diseñado algoritmos para facilitar la búsqueda de la nueva configuración de red de distribución, intentando encontrar una opción cercana a la óptima. Los métodos heurísticos, la programación lineal, los sistemas de expertos y la lógica difusa están bajo esta categoría.

Métodos basados en Técnicas Evolutivas. Están basados en la imitación de los procesos físicos, biológicos y neurológicos presentes en la naturaleza. Tienen una característica importante: la falta de una formulación matemática rigurosa que permite establecer su funcionamiento en cada situación con certeza. Ejemplos de técnicas en esta categoría son: las técnicas de recocido simulado, los algoritmos genéticos y las redes neuronales. Estas técnicas empiezan con una solución y la mejoran progresivamente.

Técnicas de reconfiguración

Métodos Mixtos. Estos métodos están en uso desde 1996 y son combinaciones de métodos anteriores. Algunos tienen una formulación que resulta difícil de entender, otros presentan una implementación que tiene numerosos requerimientos. Dentro de los algoritmos encontrados en la literatura varios autores emplean el método llamado intercambio de rama. Este permite trabajar siempre sobre una red radial evitando los chequeos relativos a esta restricción impuesta al problema .

Bibliografía

- J. González, I. Mesa y J. Hifikepunje. Algoritmo Heurístico para la Reconfiguración de Sistemas de Distribución Mediante Intercambio de Ramas . Ingeniería Energética Vol. XXXIII, No. 3 / 2012 Septiembre – Diciembre p. 196-204.
- Jizhong Zhu. Optimization of Power System Operation . John Wiley & Sons, 2009.
- Turan Gonen, Electrical Power Distribution System Engineering . Second Edition. CRC Press., 2008.
- Carlos Alberto Ríos Porras , Ubicación Óptima de Condensadores en Sistemas de Distribución con Polución Armónica , Universidad Tecnológica De Pereira, 2004.
- Electric Power Distribution Handbook, T. A. Short, Electric Power Research Institute, CRC Press.