



Compensación de la potencia reactiva de los pequeños y medianos consumidores

Leonardo Casas

Recibido: Mayo del 2004

Aprobado: Julio del 2004

Resumen / Abstract

La compensación de la potencia reactiva que demandan las cargas de pequeño y mediano consumo, básicamente asociadas a las redes de distribución primaria, suele realizarse mediante los capacitores de mediano y bajo voltajes situados tanto en las redes primarias como en las instalaciones de los clientes. La empresa distribuidora de energía eléctrica instala en las redes de distribución primaria capacitores de medio voltaje, en tanto que los clientes medianos, presionados por la penalización de bajo factor de potencia, colocan los de bajo voltaje en sus circuitos. En este trabajo se realiza un análisis integral de las características de ambas formas de generar la potencia reactiva y se exponen las ventajas técnico-económicas de los capacitores de medio voltaje asociados a los circuitos de distribución primaria.

Palabras clave: capacitores, redes de distribución, pérdidas de potencia, pérdidas de energía

The compensation of the reactive power that small and medium loads demand, basically associated to primary distribution networks, is usually carried out by means of medium and low voltage capacitors located so much in the primary circuits as in the facilities of the clients. The utility installs in the primary distribution networks capacitors of medium voltage, as long as the medium clients, pressed by the penalization of low power factor, place those of low voltage in their circuits. In this work an integral analysis of the characteristics in both ways of generating the reactive power is carried out, and the technician and economic advantages of the medium voltage capacitors associated to the primary distribution circuits are expose.

Key words: capacitors, distribution networks, power losses, energy losses

INTRODUCCIÓN

Los consumidores asociados a las redes de distribución, a pesar de tener individualmente demandas pequeñas, forman un grupo numerosamente significativo que requiere un porcentaje elevado de la carga total de potencia activa y reactiva del sistema eléctrico.

La tarifa de los clientes más pequeños solo contempla la facturación de la energía activa, y en esta se incluye de alguna manera la demanda de

energía reactiva, pero no de una forma explícita, ya que es la propia empresa suministradora la que provee a estos consumidores de sus necesidades de potencia activa y reactiva, para lo cual utiliza la generación de las plantas y de los capacitores situados en las redes de distribución, en tanto que las mayores cargas se ven obligadas a instalar capacitores de bajo voltaje para satisfacer los requerimientos de factor de potencia estipulados por sus contratos.

Los capacitores de bajo voltaje tienen como ventaja que ejercen su influencia en las líneas y en los

transformadores de distribución, en tanto que los de media voltaje solo benefician a las líneas. Asimismo, los primeros son de mayor costo que los segundos,^{1,2} por lo que ambos presentan características propias con ventajas y desventajas.

CAPACITORES DE MEDIO VOLTAJE EN LAS LÍNEAS PRIMARIAS DE DISTRIBUCIÓN

La compensación ideal de la potencia reactiva se logra generando localmente la misma junto a cada carga que la requiera, con lo cual se elimina totalmente su transferencia desde las distantes fuentes de generación. Esta solución aunque sencilla y conceptual está muy lejos de ser económica y práctica.

La estrategia para instalar capacitores en las redes de distribución primaria se basa en las siguientes premisas:

- La capacidad de los bancos es grande comparada con las magnitudes de las cargas (transformadores de distribución). En la actualidad, la tendencia de los principales fabricantes es la de comercializar unidades monofásicas mínimas de 50 Ckvar.¹

- La mayor parte de los bancos de capacitores que se instalan son fijos en tanto que las cargas varían con el tiempo. Si bien es cierto que los bancos controlados ahorran más energía que los fijos, el costo adicional del equipamiento es alto y rara vez lo compensan. La experiencia muestra que el 80 % de la energía que puede ahorrarse se consigue con bancos fijos.³

Por otro lado, al seleccionar y ubicar los bancos de capacitores en los circuitos primarios se pueden perseguir diferentes objetivos, entre los que se encuentran:

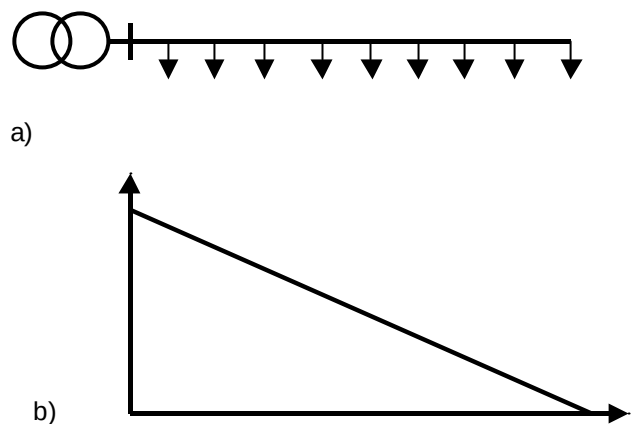
Máxima reducción de pérdidas de potencia a la hora de mayor demanda.

Máxima reducción de pérdidas de energía en el circuito.

Máximo beneficio económico de la inversión.

UBICACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES PARA MÁXIMA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA

Con el fin de simplificar el procedimiento de cálculo, se considera el caso de un circuito con carga reactiva uniformemente distribuida, con un calibre único en todo su recorrido, cuyo perfil se muestra en la figura 1a) y b), lo que permite aplicar la matemática continua.



a) Circuito radial con carga reactiva uniformemente distribuida.
b) Perfil de la corriente reactiva.

1

En estas condiciones la corriente (potencia) reactiva en cada lugar del circuito se describe mediante la ecuación:

$$i_q = I_{q \text{ máx}} - \frac{I_{q \text{ máx}}}{L} l \quad \dots(1)$$

donde:

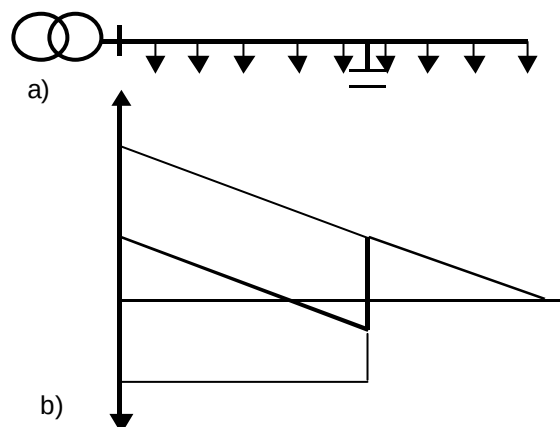
i_q : Corriente reactiva a lo largo del circuito.

$I_{q \text{ máx}}$: Corriente reactiva máxima (en la subestación).

L : Longitud total del circuito.

l : Longitud (variable independiente).

La colocación de una fuente de corriente (potencia) reactiva I_c (Q_c) en l_c modifica la distribución a lo largo del circuito en la forma en que muestra en la figura 2.



a) Circuito radial con carga reactiva y un banco de capacitores.
b) Perfil de la corriente reactiva resultante.

2

Para la distribución de corriente resultante se obtienen dos ecuaciones:

$$i_{q1} = I_{qm\acute{a}x} - I_c \frac{I_{qm\acute{a}x}}{L} l \quad \text{para } l \leq l_c \quad \dots(2)$$

$$i_{q2} = I_{qm\acute{a}x} \frac{I_{qm\acute{a}x}}{L} l \quad \text{para } l \geq l_c \quad \dots(3)$$

donde:

i_{q1} : Corriente desde la subestación hasta l_c .

i_{q2} : Corriente desde l hasta el final del circuito.

I_c : Corriente del banco de capacitores.

l_c : Lugar de ubicación del capacitor.

Como la resistencia de la línea es proporcional a la longitud (calibre uniforme) las pérdidas de potencia por la circulación de la potencia reactiva se determinan mediante:

$$dP = i_{q1}^2 dl + i_{q2}^2 dl \quad \dots(4)$$

Sustituyendo 2 y 3 en 4 y desarrollando se llega a:

$$\Delta P = \frac{1}{3L} (3I_c^2 I_{qm\acute{a}x} l_c - 3I_c L I_c (2I_{qm\acute{a}x} - I_c) + L^2 I_{qm\acute{a}x}^2) \quad \dots(5)$$

Como puede observarse, las pérdidas de potencia dependen de los datos del problema (L , $I_{qm\acute{a}x}$), de la magnitud de los capacitores I_c , y del lugar su ubicación, l_c . La ubicación para pérdidas mínimas se obtiene mediante:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial l_c} = 0 \quad \dots(6)$$

de donde se llega a:

$$l_c = \frac{L(2I_{qm\acute{a}x} - I_c)}{2I_{qm\acute{a}x}} \quad \dots(7)$$

De esta ecuación se obtiene el criterio general del lugar óptimo de ubicación del capacitor dado por:

$$i_q = \frac{I_c}{2} \quad \dots(8)$$

que establece que el lugar óptimo de un banco dado "...es aquel lugar donde la corriente reactiva (potencia)

del circuito sea igual a la mitad de la corriente capacitiva (potencia) del banco que se ubica". Resulta evidente que la ubicación óptima depende de la capacidad del banco, o sea, que cada banco tiene su propio lugar de ubicación óptima.

MÁXIMA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN EL CIRCUITO

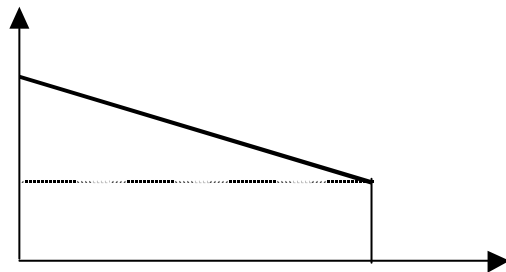
Para estudiar el ahorro de pérdidas de energía que logra la compensación de la potencia reactiva en los circuitos de distribución se requiere tener presente los gráficos horario de las cargas del circuito, los que se pueden transformar en gráficos de duración de la demanda. Estas curvas, al igual que en el análisis anterior, se puede aproximar por una recta como se muestra en la figura 3 y de ella se obtiene la ecuación de la corriente (potencia) reactiva para cada instante de tiempo t , dada por:

donde:

i_{qt} : Corriente reactiva en el instante t .

$I_{qm\acute{a}x}$: Valor máximo de la corriente reactiva.

I_{qmin} : Tiempo de duración del gráfico de carga (generalmente 24 h).



Distribución de la corriente reactiva en el tiempo.

3

De igual forma, como ya se había visto, la distribución de la corriente reactiva a lo largo del circuito toma la forma mostrada en la figura 1b). Esta distribución se puede representar para el valor de corriente en cualquier instante de tiempo. En la figura 4, se han representado los instantes de mínima y máxima demanda.

Si bien la figura 4 representa solo dos estados de carga, el máximo ($I_{qm\acute{a}x}$) y el mínimo (I_{qmin}), dentro de ese intervalo quedan comprendidos todos los demás, por lo que en realidad, de dicho gráfico se logra la

expresión que define la distribución de la corriente en el tiempo y en el espacio, dada por

donde:

i_{qtl} : Corriente reactiva en el instante t en el punto l .

Sustituyendo 9 en 10 se obtienen las pérdidas de energía mediante:

$$\Delta E = \int_0^L \int_0^T i_{qtl}^2 dt dl \quad \dots(11)$$

Al colocar un capacitor de corriente I_c en l_c , la corriente reactiva resultante será:

$$i'_{qtl} = i_{qtl} - I_c \quad \text{para } l \leq l_c$$

$$i_{qtl} = i_{qtl} - \frac{I_c}{L} l \quad \text{para } l > l_c \quad \dots(10)$$

$$i_{qtl} = i_{qtl} - \frac{I_c}{L} l \quad \text{para } l > l_c \quad \dots(12)$$

Las pérdidas de energía después de colocado el capacitor se calculan mediante:

$$\Delta E = \int_0^{l_c} \int_0^T (i'_{qtl})^2 dt dl + \int_{l_c}^L \int_0^T (i''_{qtl})^2 dt dl \quad \dots(13)$$

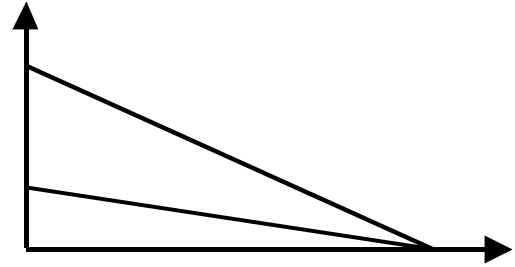
Como en el caso del estudio de la minimización de las pérdidas de potencia, la ubicación óptima de la fuente de potencia reactiva, se determina mediante:

$$\frac{\partial \Delta E}{\partial I_c} = 0 \quad \dots(14)$$

y por un procedimiento se llega a la condición óptima de ubicación dada por:

$$E_q = \frac{I_c T}{2} \quad \dots(15)$$

de donde se obtiene el criterio de ubicación de un banco de capacitores de corriente I_c para máxima reducción de pérdidas de energía y que se enuncia de la siguiente forma: "el banco debe ubicarse donde la energía reactiva del circuito, en el tiempo considerado, sea igual a la mitad de la energía reactiva generada por ese banco en la misma unidad de tiempo ($I_c T$)". Puede compararse con el criterio para máxima reducción de pérdidas de potencia.



Distribución de la corriente máxima y mínima en el espacio (a lo largo del circuito).

4

Este criterio es similar al anterior, solo que se trabaja con energía en vez de potencia máxima, y como $E = P_{\text{máx}} (FC) T$, donde FC es el factor de carga, la ubicación de los capacitores se hará, en general, más cerca de la subestación. Los mismos resultados se obtienen, obviamente, al trabajar con los valores medios de las cargas.

CAPACITORES DE BAJO VOLTAJE

Los capacitores de bajo voltaje presentan particularidades propias que los diferencian de los situados en las redes de voltaje medio, entre las que sobresalen:

- Actúan sobre las líneas y los transformadores de distribución.
- Su ubicación dentro del circuito es aleatoria al ser colocados por los clientes.
- Su costo es superior a los de voltaje medio (alrededor de tres veces)^{1,2}
- Como se operan de acuerdo con los intereses del cliente, en muchas ocasiones están fuera de servicio en el horario de máxima demanda del circuito.

La tabla 1 muestra el resultado de un estudio realizado con el Sistema RADIAL⁴ en 10 circuitos primarios de la ciudad de Santa Clara, donde se simuló la ubicación de capacitores de acuerdo con las capacidades comerciales existentes y donde para el caso de los capacitores de bajo voltaje se muestran diferentes horarios de explotación. En dicha tabla, adicionalmente, se incluye entre paréntesis el caso particular del circuito 6.

Como puede apreciarse, en todos los casos, excepto en el caso del circuito 6, en que los resultados son ligeramente inferiores, el ahorro logrado con los capacitores de medio voltaje es mayor que los obtenidos con los de bajo voltaje.

Un análisis minucioso del citado circuito 6 mostró que las cargas donde se instalaron los capacitores de baja se encuentran en el entorno del lugar óptimo de ubicación del circuito, lo que justifica los resultados del ahorro de energía. No se incluyen los resultados económicos que siempre fueron favorables para los capacitores de voltaje medio.

de potencia reactiva, básicamente en las hora de máxima, que aporta resultados adicionales favorables.

4. ¿No sería posible implementar un sistema de penalización en el que los consumidores asociados a la distribución encargaran a la empresa distribuidora la función de compensación de su potencia reactiva, ya que esta lo realiza siempre de una forma más eficiente con mayores beneficios para la economía nacional en cuanto a ahorro de energía y costos?

Tabla 1
Ahorro anual (MWh/año) en 10 circuitos analizados y del circuito 6

	Alta (1 725 Ckvar)		Baja (1 651 Ckvar)	
Horario	Líneas	Líneas	Transformadores	Total
0 - 24	400 (63)	276 (62)	50 (10)	326 (72)
8 - 18	298 (51)	213 (46)	51(4)	264 (50)
18 - 22	65 (11)	37 (10)	1(0,3)	38(10)

CONCLUSIONES

1. La variable de mayor incidencia en el ahorro, tanto de energía como de potencia, es el lugar de ubicación del capacitor, el que se determina de acuerdo con los criterios mostrados.
2. Los menores costos de los capacitores de medio voltaje conducen, además, a resultados económicos más favorables.
3. Si los clientes que operan los capacitores de baja los desconectan después de concluida su jornada laboral, se pierde una importante fuente de generación

REFERENCIAS

1. *ABB Single - Phase Capacitors Units. Externally Fused Units. High Voltage 60 Hz*, List Price Sheet, Dated 1, June, 1998.
2. *Selectric, Inc_ Power Factor Correction Capacitors.htm*
3. Bae, Y. G.: "Analytical Method of Capacitor Allocation on Distribution Primary Feeders", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, July-August.
4. "Sistemas para cálculos en redes de distribución primaria", *Revista Energética. Cuba*, 2001.

AUTOR

Leonardo Casas Fernández
Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas,
Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Eléctrica,
Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba
e-mail:lcasas@uclv.edu.cu

*Disponemos de un departamento
informatizado, dotado con tecnologías
que nos permiten realizar todo el proceso
de edición de revistas científicas así
como de otros materiales.
Visítenos!!!*

