



COMPENSACIÓN DE LA POTENCIA REACTIVA EN LA EMPRESA CLORO SOSA DE SAGÜA

Ignacio Pérez Abril
José Ángel González Quintero

RESUMEN / ABSTRACT

El presente trabajo trata la determinación de las variantes de compensación del factor de potencia en la industria química Cloro Sosa de Sagua. Para resolver este problema se emplea la simulación del modelo del sistema para obtener el comportamiento del sistema de potencia y determinar los beneficios de cada variante. Para este trabajo, se han desarrollado dos programas en Matlab 5.3 para implementar el Flujo de Potencia de Armónicos y el Barrido de Frecuencia.

Palabras claves: Potencia Reactiva, Compensación de Potencia.

The presented paper deals with the determination of the power factor compensation variants in the chemical industry Cloro Sosa of Sagua. To solve the presented problem the simulation of the system model is developed to obtain the power system performance and determine the benefices of each variant. For this work, two Matlab 5.3 programs have been developed to implement de Harmonic Power Flow and the Frequency Scan procedures.

Key words: Reactive Power, Compensation of Power

INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es determinar las posibles variantes de compensación de la potencia reactiva en la Empresa Cloro Sosa de Sagua y así evitar la elevada penalización por bajo factor de potencia que tiene que pagar la misma en la factura mensual de electricidad.

La compensación de potencia reactiva mediante bancos de capacitores en sistemas de suministro eléctrico contaminados por armónicos, presenta como dificultad técnica el posible deterioro de las condiciones de operación de la instalación debido a la aparición de resonancias en el sistema eléctrico que incrementan los niveles de distorsión existentes, empobrecen la calidad de la energía servida a las cargas y atentan contra la vida útil de equipos tales como los propios bancos de capacitores que se instalan.

La norma IEEE-519 establece los valores límites recomendados para la distorsión armónica en los sistemas eléctricos de potencia. No obstante, por el hecho de ser la empresa objeto de estudio un gran rectificador conectado directamente a una línea dedicada de 34.5 kV se ha priorizado el acuciante problema de la compensación del factor de potencia por sobre los problemas de calidad de la energía.

La norma ANSI/IEEE 18-1980 que establece los valores límites para el funcionamiento de los capacitores de potencia señala entre los aspectos fundamentales a considerar que, el capacitor debe admitir:

- a) Una corriente de hasta el 180% de su corriente nominal.
- b) Un voltaje aplicado de hasta el 110% de su voltaje nominal.
- c) Un voltaje pico aplicado de hasta el 120% de su voltaje pico nominal.
- d) Una potencia de hasta el 135% de su capacidad nominal.

Para solucionar el problema planteado, se emplea corrientemente la simulación de las variantes de compensación que se estudian realizando un modelo del sistema. De esta forma puede evaluarse el comportamiento de dichas variantes en las condiciones del sistema de suministro eléctrico considerado y determinar las ventajas y desventajas técnicas de cada una de ellas.

En este caso, se han utilizado sendos programas de Flujo de Potencia de Armónicos (HPF) y de Barrido de Frecuencia implementados ambos en el lenguaje Matlab 5.3.

DESARROLLO

Para determinar el comportamiento del sistema ante las diferentes variantes de compensación del factor de potencia a emplear, se han considerado los siguientes parámetros para su modelo.

1) Se considera el rectificador funcionando a plena capacidad 8.4 MW (120 kA) y con un factor de potencia de desplazamiento a la frecuencia fundamental de 0.86 (según mediciones efectuadas). Este rectificador, formado por dos puentes no controlados de 6 pulsos con desfase de $\pm 15^\circ$, se ha representado por fuentes de corriente para los armónicos impares no múltiplos de 3 hasta el de orden 31. Este tipo de convertidor funciona teóricamente como un convertidor de 12 pulsos, no obstante, al ser independiente el control de ambos puentes y debido a asimetrías en la red, las mediciones demuestran la existencia de armónicos no característicos de este tipo de convertidor. De esta forma, los armónicos característicos del convertidor de 12 pulsos ($n = 11, 13, 23, 25$, etc.) se han calculado por su valor teórico $I_n = I_1/n$, mientras que los no característicos ($n = 5, 7, 17, 19$, etc.) se han determinado a partir de las mediciones efectuadas en la fábrica como $I_5 = 0.6 I_1/5$ para el 5º e $I_n = 0.8 I_1/n$ para los armónicos superiores. Igualmente, se han asumido los ángulos de fase de los armónicos como $\phi_n = n\phi_1$.

2) La carga de bajo voltaje (480V) es de 900 kW con un factor de potencia natural estimado de 0.8. La representación de la misma a frecuencias armónicas se ha efectuado por el modelo de impedancia serie para obtener los resultados más pesimistas.

3) Los elementos del sistema de suministro eléctrico, transformadores, líneas, capacitores, filtros y fuentes de generación se han representado por los modelos corrientemente empleados para este tipo de estudio. El efecto pelicular en líneas se desprecia y se utilizan los MV.A de cortocircuito mínimos para obtener las peores condiciones de operación.

Caso base

El sistema se modela con los parámetros previamente establecidos y con toda la carga de bajo voltaje conectada a un solo transformador tal y como opera actualmente la planta. En estas condiciones y tomando un voltaje en la fuente de frecuencia fundamental de 34.5 kV, se obtiene un factor de potencia real del 82% en la barra.

Variantes de compensación

Considerando la necesidad de incrementar el factor de potencia hasta un valor superior al 92%, se han analizado las variantes siguientes:

- 1) Compensación por bajo voltaje mediante capacitores
- 2) Compensación por alto voltaje mediante capacitores
- 3) Compensación por bajo voltaje mediante filtros sintonizados al 5º armónico
- 4) Compensación por alto voltaje mediante un filtro sintonizado al 5º armónico

VTE # 1: Compensación por bajo voltaje mediante bancos de capacitores

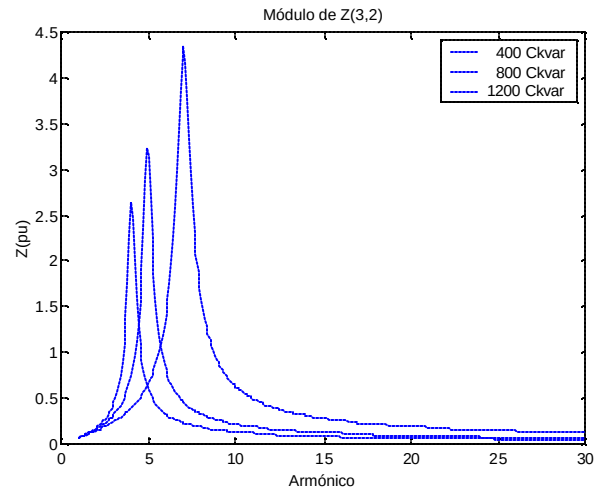
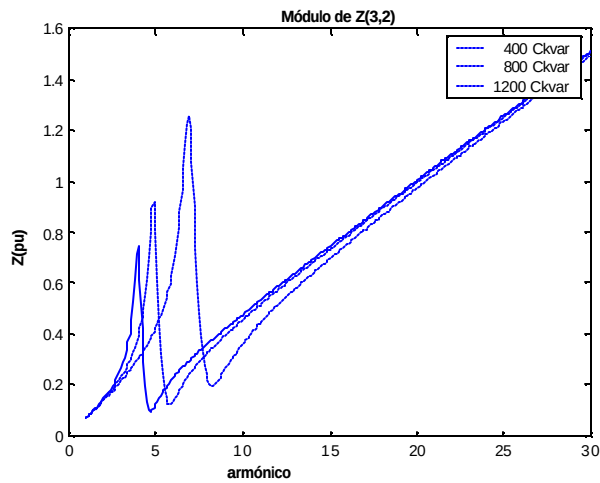
Consiste en la instalación de bancos de capacitores en las barras de 480 V hasta alcanzar el factor de potencia deseado. En esta variante puede añadirse un banco de capacitores de hasta 1300 Ckvar en cada barra para un total de 2600 Ckvar.

Considerando bancos de 1200 Ckvar en cada barra con un costo estimado de \$43200 se obtiene un factor de potencia del 93%. La carga de corriente, voltaje y potencia en los bancos de capacitores de bajo voltaje se comporta según:

Capacitor 480V	I/Inom %	V/Vnom %	$V_{pico}\sqrt{2}$ %	Vnom	Q/Qnom %
1200 Ckvar (barra1)	110	102	100		106
1200 Ckvar (barra2)	110	102	100		106

Como puede apreciarse en la tabla precedente, prácticamente no existe sobrecarga en ninguno de los bancos de capacitores instalados. Sin embargo, esta variante tiene el inconveniente de que los bancos tienen que ser fijos, ya que la simulación demuestra que al reducir el número de unidades conectadas a 800 o 400 Ckvar por barra se produce una pronunciada resonancia en las barras de 480 V a frecuencias peligrosas de 288 – 294 Hz para 800 Ckvar (la impedancia crece entre 45 y 56 veces) y 408 – 420 Hz para 400 Ckvar (la impedancia crece entre 62 y 74 ve-

ces) . La resonancia para 1200 Ckvar ocurre a 240 Hz que está por debajo del primer armónico generado por el convertidor. Los gráficos siguientes muestran el comportamiento con la frecuencia de la impedancia equivalente en la barra de 34.5 kV y la impedancia transferencial entre el convertidor y las barras de bajo voltaje respectivamente.



VTE # 2: Compensación por alto voltaje mediante bancos de capacitores

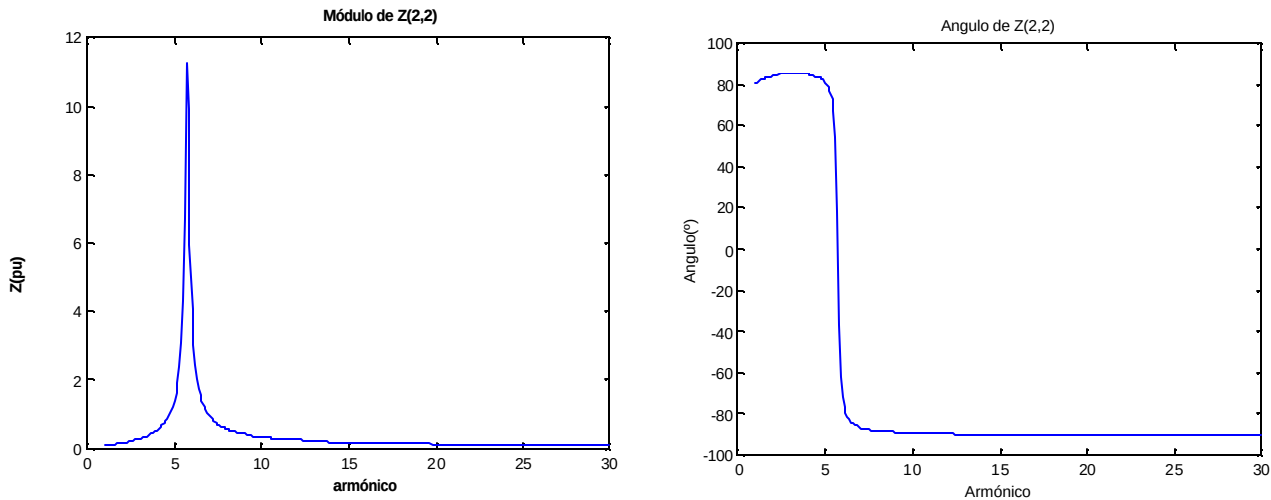
Consiste en la instalación de un banco de capacitores en la barra de 34.5 kV hasta alcanzar el factor de potencia deseado. El banco debe tener por propósitos de protección una configuración doble estrella no aterrada con tres capacitores monofásicos protegidos por fusibles internos de voltaje nominal 6.65 kV y conectados en cada fase de una estrella para formar un total de 18 unidades.

Considerando unidades monofásicas de 250 Ckvar (4500 Ckvar totales) con un costo estimado de \$42300 se obtiene un factor de potencia real del 84%. La carga en los bancos de capacitores de alto voltaje se comporta según:

Capacitor 34.5 kV	I/Inom %	V/Vnom %	$V_{pico}/\sqrt{2} V_{nom}$ %	Q/Qnom %
4500 Ckvar	155	101	115	121

Como puede apreciarse en la tabla precedente, las sobrecargas de corriente, voltaje pico y potencia se acercan peligrosamente a los límites permisibles. Por otra parte, el factor de potencia no llega al valor deseado debido a la distorsión presente.

Las gráficas de impedancia y fase en la barra de 34.5 kV demuestran la existencia de una pronunciada resonancia a 342 Hz, (la impedancia se incrementa a 159 veces) cercana al 5° armónico de la corriente consumida por el convertidor, lo que explica la gran sobrecarga experimentada por el capacitor.



VTE # 3: Compensación por bajo voltaje mediante filtro de 5^{to} armónico

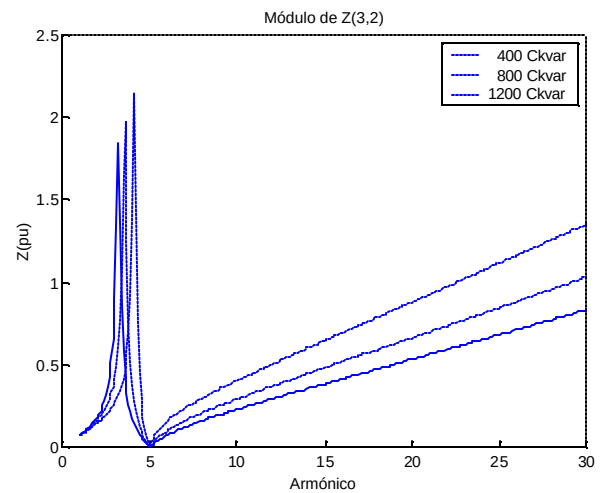
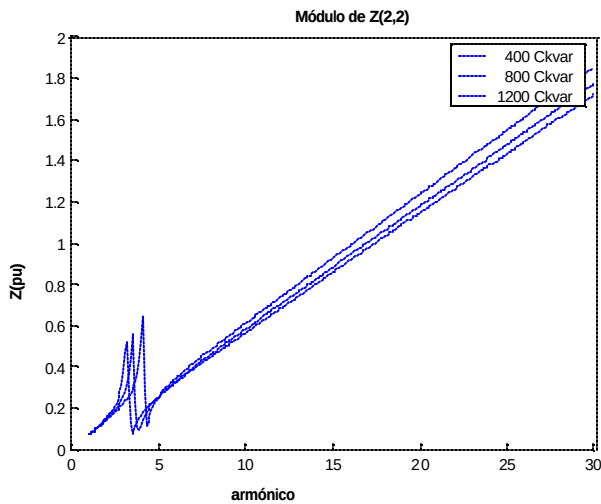
Consiste en la instalación de filtros sintonizados al 5^{to} armónico en las dos barras de 480 V para alcanzar el factor de potencia deseado. El filtro estará formado por un arreglo en delta de capacitores monofásicos de 500 V y un conjunto trifásico de reactores con reactancia a frecuencia fundamental igual a $X_L = X_C/25$. Se ha considerado un factor de calidad de 100 para su diseño.

Considerando dos filtros de 1200 Ckvar (2400 Ckvar totales) con un costo estimado de \$72000 se obtiene un factor de potencia real del 91%. La carga de corriente, voltaje y potencia en los capacitores de los filtros se comporta según:

Capacitor 480 V	I/I _{nom} %	V/V _{nom} %	$V_{pico}/\sqrt{2}$ %	V _{nom}	Q/Q _{nom} %
1200 Ckvar (barra1)	103	101	103		99
1200 Ckvar (barra2)	103	101	103		99

Como puede apreciarse en la tabla precedente, prácticamente no existe sobrecarga en ninguno de los capacitores instalados. Por otra parte, la simulación demuestra que los filtros pueden ser controlados en función de la carga. Variando las secciones de filtro conectadas en 400, 800 y 1200 Ckvar por barra la resonancia en las barras de alto y bajo voltaje se producen a frecuencias inferiores a los 246 Hz y por lo tanto no peligrosas con respecto a los armónicos generados por el convertidor.

Los gráficos siguientes muestran el comportamiento con la frecuencia de la impedancia equivalente en la barra de 34.5 kV y la impedancia transferencial entre el convertidor y las barras de bajo voltaje respectivamente.



VTE # 4: Compensación por alto voltaje mediante filtro de 5^{to} armónico

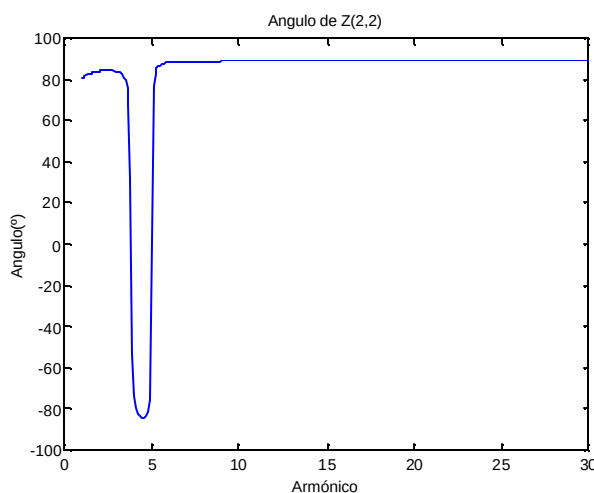
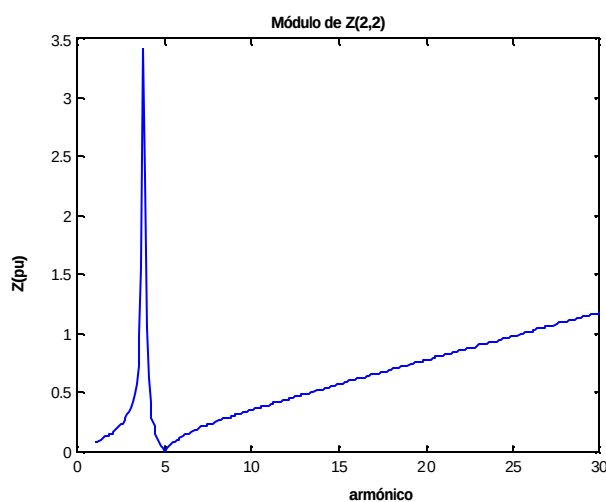
Consiste en la instalación de un filtro sintonizado al 5^o armónico en la barra de 34.5 kV para alcanzar el factor de potencia deseado. El filtro debe tener por propósitos de protección una configuración doble estrella no aterrada con tres capacitores monofásicos protegidos por fusibles internos de voltaje nominal 6.92 kV y conectados en cada fase de una estrella para formar un total de 18 unidades. A lo que se añade un conjunto trifásico de reactores de 36 kV con núcleo de aire y reactancia a frecuencia fundamental igual a $X_L = X_C/25$. Se ha considerado un factor de calidad de 100 para su diseño.

Considerando unidades monofásicas de 250 Ckvar (4500 Ckvar totales) con un costo estimado sin interruptor de \$78000 se obtiene un factor de potencia real del 98%. La carga de corriente, voltaje y potencia en los capacitores de alto y bajo voltaje se comporta según:

Capacitor 34.5 kV	I/Inom %	V/Vnom %	$V_{pico}/\sqrt{2}$ Vnom %	Q/Qnom %
4500 Ckvar	105	99	103	95

Como puede apreciarse en la tabla precedente, los capacitores del filtro trabajan en un régimen permisible y se obtiene un factor de potencia superior al deseado.

Las gráficas de impedancia y fase en la barra de 34.5 kV demuestran la existencia de una resonancia a 228 Hz, frecuencia inferior al 5^o armónico y por lo tanto no coincidente con ninguna de las frecuencias encontradas en la corriente de carga del rectificador.



CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados previamente obtenidos, se concluye que las variantes de compensación más promisorias son:

a) La compensación por bajo voltaje mediante un filtro sintonizado al 5^o armónico.

Esta variante es suficiente para compensar el factor de potencia al valor deseado, ya que garantiza un factor de potencia de 0.91 a plena carga (120 kA) y 0.92 al 80% de carga (96 kA) al tiempo que reduce la distorsión existente en las barras de 480 V y mejora la calidad de la energía servida a los motores. Por otra parte, los 1200 Ckvar reactivos pueden dividirse en tres filtros de 400 Ckvar y con ello reducir la capacidad de los interruptores automáticos empleados para su conexión. Esta variante puede ejecutarse paulatinamente de acuerdo a las necesidades de la fábrica.

b) La compensación por alto voltaje mediante un filtro sintonizado al 5^o armónico.

Esta variante incrementa el factor de potencia hasta el 98% y reduce la distorsión existente en la barra de 34.5 kV. En todos los casos, esta variante involucra la compra de un interruptor automático de 34.5 kV para la conexión del filtro a la barra.

Ambas variantes son factibles técnicamente, no obstante, y aún sin la realización de un análisis económico más profundo, existen argumentos que sustentan la conveniencia de la compensación por bajo voltaje mediante filtros como son:

1) Se emplea una menor capacidad total de compensación en Ckvar que puede ser seccionalizada en varios pasos y operada en función de la carga.

2) Se mejora la calidad de la energía servida a los motores de la carga auxiliar de la fábrica.

3) No se precisa de una instalación de alto voltaje que incluye la compra de un costoso interruptor automático.

BIBLIOGRAFÍA

1. Y. Baghzouz, "Effects of Nonlinear Loads on Optimal Capacitor Placement in Radial Feeders", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, January 1991, pp. 245-251.

2. T. Coleman, M. A. Branch and A. Grace, "Matlab Optimization Toolbox User's Guide", MathWorks Inc., 1999.

3. T. Hiyama, M. S. A. A. Hammam, T. H. Ortmeier, "Distribution System Modeling with Distributed Harmonic Sources", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp. 1297-1304.

4. IEEE Standard 519-1992, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE, New York, NY, 1993.

5. IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks. Part 1: Concepts, Models and Simulation Techniques", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996, pp. 452-465.

6. C. Kawann and A. E. Emanuel, "Passive Shunt Harmonic Filters for Low and Medium Voltage: A Cost Comparison Study", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 4, November 1996, pp. 1825-1831.

7. A. A. Mahmoud and R. D. Shultz, "A Method for Analyzing Harmonic Distribution in A.C. Power Systems", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, No. 6, June 1982, pp. 1815-1824.

8. D. Xia and G. T. Heydt, "Harmonic Power Flow Studies Part I- Formulation and Solution", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, No. 6, June 1982, pp. 1257-1265.

9. D. Xia and G. T. Heydt, "Harmonic Power Flow Studies Part II- Implementation and Practical Application", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, No. 6, June 1982, pp. 1266-1270.

DATOS DE LOS AUTORES

Dr. Ing. Ignacio Pérez Abril *

MSc. Ing. José Angel González Quintero **

Institución de Procedencia

*** Profesor Titular. Centro de Estudios Electroenergéticos, Facultad de Ingeniería Eléctrica. UCLV. Cuba. E-mail:**

iperez@uclv.edu.cu , fax: 53-422-281608, teléfono: 53-422-281632.

**** Profesor Asistente. Centro de Estudios Electroenergéticos, Facultad de Ingeniería Eléctrica. UCLV. Cuba. E-mail:**

pepe@uclv.edu.cu , fax: 53-422-281608, teléfono: 53-422-281632.