

# Evolución y desarrollo de los dispositivos compensadores de potencia reactiva

Davel Borges  
Vicente León

Recibido: Junio del 2005

Aprobado: Septiembre del 2005

## Resumen / Abstract

Desde el propio surgimiento de los sistemas eléctricos de corriente alterna durante la segunda mitad del siglo XIX, numerosos científicos advirtieron de los efectos nocivos del desfase de corriente y tensión producidos por la presencia de bobinas y capacitores en el sistema y caracterizados por la potencia reactiva. Esto motivó la introducción de dispositivos compensadores al efecto. En el trabajo se discuten las diferentes tecnologías que se han empleado hasta la actualidad, en cuanto a su aplicación, ventajas y desventajas. Puede notarse como el desarrollo de la electrónica de potencia también ha logrado invadir este campo con modernas tecnologías que ya se aplican y que han marcado una nueva etapa de la compensación.

Palabras clave: bancos de capacitores, dispositivos de compensación de reactivo, bancos controlados, compensadores del factor de potencia

*From the beginning of the alternating current systems during the second half of the century 19, numerous scientifics noticed of the noxious effects of the angle difference between current and tension that taken place by the presence of coils and capacitors in the systems and characterized by the reactive power. This motivated the introduction of compensators devices. The different technologies that have been used until our days are discussed, as for their application, advantages and disadvantages. It can be noticed as the development of the power electronics it has also been able to invade this field with modern technologies that are already applied and that they have marked a new stage of the compensation.*

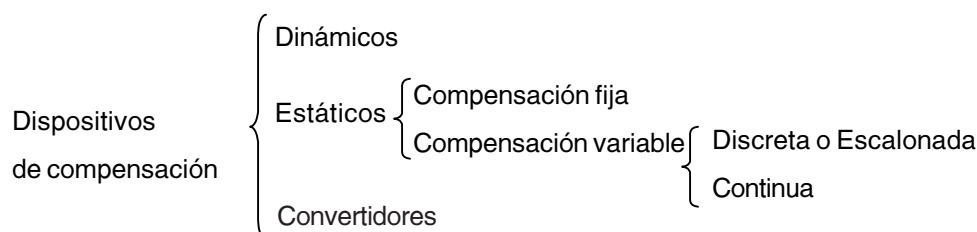
*Key words: capacitor banks, reactive power compensations, static VAR compensations, power factor improvement*

## INTRODUCCIÓN

Los dispositivos de compensación de la potencia reactiva suministran a los receptores del sistema una buena parte de la corriente reactiva necesaria para su funcionamiento energético, permitiendo la descarga

de dicha corriente del sistema eléctrico hasta el punto de compensación.

Pueden clasificarse atendiendo al principio de operación en:



Cada dispositivo ha representado un avance tecnológico en la búsqueda de mejores prestaciones.

## **DESARROLLO**

### **A. Dispositivos dinámicos de compensación de reactivo**

Los dispositivos dinámicos de compensación están formados por compensadores o motores sincrónicos. Los compensadores sincrónicos, se han utilizado fundamentalmente en la compensación del reactivo en líneas de transporte de energía eléctrica. Son alternadores (máquinas de corriente alterna) cuya excitación se ha regulado de forma que solo generen potencia reactiva (sobreexcitados).<sup>1</sup> En el pasado fueron los principales dispositivos de compensación en las líneas de transmisión, ya que permiten una compensación continua, ajustada a la potencia reactiva necesaria en cada instante, siendo esta su mayor ventaja.<sup>2</sup> En la actualidad, a nivel industrial, su uso es muy restringido. Algo más usual es el empleo de motores sincrónicos que realizan simultáneamente las funciones de accionamiento a una carga activa continua y la producción de potencia reactiva de compensación para el sistema. No obstante, exige para su selección de un riguroso análisis técnico-económico.

### **B. Dispositivos estáticos de compensación fija**

Los dispositivos de compensación estáticos son aquellos formados por capacitores y(o) bobinas estacionarias. El empleo de la compensación fija a través de capacitores en la industria y en los sistemas de potencia data de principios del siglo XX.

Como en los sistemas eléctricos predomina la carga inductiva por la propia composición de las instalaciones (líneas, máquinas eléctricas, etc.), la compensación de reactivo se realiza por la asociación de un banco de capacitores de compensación, generalmente en paralelo con el receptor, de forma tal, que el conjunto se aproxime lo más posible al comportamiento resistivo puro.

El fundamento de los dispositivos de compensación se encuentra en los efectos opuestos de las bobinas y capacitores.

Actualmente, en la industria está muy difundido el empleo de los dispositivos estáticos de compensación fija. Sin embargo, como lo indica su nombre, solo pueden entregar una potencia reactiva de compensación única, por lo que su empleo en cargas variables no es totalmente eficiente.<sup>2</sup> Su aplicación actual está más relacionada con la compensación de receptores individuales de carga constante.

### **C. Dispositivos estáticos de compensación escalonada**

Los dispositivos estáticos de compensación variable escalonada son los más difundidos en aplicaciones

industriales, debido a que posibilitan el mejoramiento del factor de potencia al valor deseado con poca variación en el comportamiento de este, a pesar de la variabilidad del comportamiento de la carga.<sup>1-3</sup>

En este caso, la compensación del factor de potencia se realiza por medio de baterías individuales de capacitores, no necesariamente todas ellas de la misma potencia, que son conectadas y desconectadas automáticamente mediante dispositivos de conmutación (contactores, tiristores, IGBT, entre otros) gobernados por un transductor llamado regulador varmétrico. Diferentes estrategias se utilizan para el control del dispositivo en el regulador.<sup>4</sup>

Estos dispositivos reciben el nombre de equipos de compensación escalonada, aunque en la industria es más utilizada la denominación de baterías de compensación automática.<sup>2</sup>

El regulador varmétrico detecta en cada instante el factor de potencia de la red eléctrica y lo compara con el valor deseado. Si este varía, actúa adecuadamente sobre los dispositivos de conmutación, quienes a su vez conectan (o desconectan) las unidades (capacitores independientes) de forma tal que el factor de potencia vuelva a alcanzar el valor más cercano al prefijado.

Conforme se incrementa a la demanda de la potencia reactiva del receptor, el factor de potencia va disminuyendo, pero el regulador no actúa hasta que se vuelve a alcanzar el valor prefijado. Por esta razón, este tipo de compensación es discreta, ya que el factor de potencia no se mantiene absolutamente constante, sino que varía en determinados límites.

Esta es la mayor desventaja de este tipo de dispositivos, ya que para gran variabilidad de la carga, con pequeños saltos de potencia, el diseño del dispositivo se encarece, debido a la necesidad de incremento de unidades de compensación.

Por otra parte, la selección de este tipo de dispositivos responde a una aplicación concreta, por lo que deben ser fabricados con carácter exclusivo.

### **D. Dispositivos estáticos de compensación continua**

Los dispositivos estáticos con regulación continua de la potencia reactiva (SVC) son de más reciente incorporación al mercado. En ellos la regulación se logra de las más disímiles formas empleando bobinas y(o) capacitores estacionarios, combinados con convertidores electrónicos de potencia, que regulan la potencia reactiva en las ramas del circuito de compensación.

En el sistema de control (regulador varmétrico) se utilizan circuitos de disparo para los elementos de

potencia. Diversos algoritmos de control se implementan para garantizar la variación de la potencia reactiva del dispositivo,<sup>5-8</sup> incluso, la variación de las susceptancias por fase.<sup>9</sup> Novedosas aplicaciones han sido controladas por microprocesadores,<sup>10,11</sup> e incluso, computadoras personales.<sup>12-15</sup> En este último caso se emplean algoritmos computacionales para la medición de la potencia reactiva, tales como la transformada de Walsch.<sup>16</sup>

Este tipo de compensación tiene como objetivo suministrar la potencia reactiva que necesita en cada instante el receptor, de tal forma que el factor de potencia del conjunto tenga siempre el mismo valor prefijado.

Estos dispositivos son idóneos para una gran variabilidad de la carga. Son equipos robustos y de bajo nivel de mantenimiento.<sup>2</sup> Adicionalmente a su aplicación en los sistemas eléctricos industriales,<sup>2,17-21</sup> se ha difundido su empleo a sistemas de distribución,<sup>22-26</sup> y transmisión de potencias.<sup>20</sup> Han encontrado aplicación en sistemas de generación no convencionales, tales como parques eólicos, donde la compensación del reactivo por métodos tradicionales resulta lenta.<sup>27</sup> Sin embargo, su utilización aún es restringida debido a su elevado costo en el mercado. Su principal inconveniente consiste en que el empleo de la electrónica introduce no linealidades al sistema y, por ende, incrementa los efectos nocivos de la presencia de armónicos en este,<sup>28</sup> a la vez que afecta el propio

funcionamiento del equipo.<sup>29,30</sup> Actualmente se diseñan teniendo en cuenta este inconveniente, incorporándoles filtros de armónicos,<sup>2,4,17,19,20,22,27</sup> lo que encarece aún más su valor comercial.

En la tabla 1 se muestra un análisis comparativo entre los diferentes tipos de dispositivos analizados en relación con diversos indicadores de calidad.

### E. Dispositivos convertidores de compensación

En las últimas décadas, el vertiginoso desarrollo alcanzado por la electrónica de potencia, ha posibilitado el diseño de convertidores de potencia que, sin la presencia de bobinas y(o) capacitores estacionarios, logran a través de una estrategia de control censar la demanda de potencia reactiva en la carga y proporcionarle a la misma una corriente reactiva equivalente.

En calidad de convertidores de potencia se han empleado inversores de fuente de tensión -VSI's-<sup>31</sup>, restauradores de tensión dinámica -DVR-<sup>32</sup>, convertidores AC-DC o AC-AC,<sup>24</sup> filtros de corriente,<sup>33</sup> inversores PMW,<sup>34</sup> convertidores PMW como fuentes de potencia reactiva,<sup>35</sup> convertidores AC-fed PMW,<sup>36</sup> entre otros.

Tales dispositivos posibilitan una compensación continua de la potencia reactiva, pero también ocasionan gran distorsión al sistema. Su costo de inversión es aún elevado, en versiones comerciales.

Indicadores	Dispositivos dinámicos	Dispositivos estáticos		
		Fijos	Escalonados	Continuos
Costo de la inversión	Alto	Bajo	Medio	Alto
Pérdidas de potencia	Mayor (150 - 320 W/Ckvar)	Menor (2,5 - 5 W/CkVAr)		
Nivel de mantenimiento	Alto	Bajo	Medio	
Nivel de regulación	Continuo	Ninguno	Medio	Continuo
Nivel de ruido	Alto	Bajo		Medio
Peso del dispositivo	Mayor	Menor	Medio	

## CONCLUSIONES

Desde el propio surgimiento de los sistemas eléctricos de corriente alterna se han empleado los dispositivos compensadores de la potencia reactiva, en el sentido de mejorar las condiciones de explotación de las instalaciones, principalmente vinculado a la optimización de las pérdidas. Su aplicación es inherente a todo tipo de sistema eléctrico. Los avances tecnológicos de cada época han marcado diferencias constructivas, destacándose tres etapas de desarrollo principales en la compensación: el empleo de las máquinas eléctricas, el empleo de elementos reactivos (bobinas y/o capacitores) y más recientemente el empleo de diversas aplicaciones de la electrónica de potencia. Muy vinculado a la introducción de esta tecnología ha quedado pendiente la solución del efecto de las no linealidades de los dispositivos electrónicos, siendo un reto al desarrollo de modernas versiones comerciales.

## REFERENCIAS

1. **Beeman, D. L.:** *Industrial Power Systems Handbook*, Ed. Mc Graw Hill. Book, Estados Unidos, 1955.
2. **León Martínez, Vicente:** *Ineficiencias de los sistemas eléctricos*, Joaquín Montañana Romeu, (eds.), Universidad Politécnica de Valencia, España, 2001.
3. **Feodorov, A. A.:** *Suministro eléctrico de empresas industriales*, Mir, URSS, 1982.
4. **Cavallini, Andrea:** "Design of Shunt Capacitor Circuits for Power Factor Compensation in Electrical Systems Supplying Nonlinear Load: A Probabilistic Approach", Giovanni Mazzanti (eds.), *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(4) 675-681, 1998.
5. **Emanuel, A. E.:** "A Current Regulated Switched Capacitor Static Volt Ampere Reactive Compensator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(4) 986-997, 1994.
6. **Goos, G.:** "An Efficient Switched Reactor-Based Static VAR Compensator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(4) 998-1005, 1994.
7. **IL, A.:** "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 20(3) 998-1005, 1984.
8. **Karady, G.G.:** "Continuous Regulation of Capacitive Reactive Power", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(3) 1466-1473, 1992.
9. **Lee, San-Yl.:** "A Compact Control Algorithm for Reactive Power Compensation and Load Balancing with Static VAR Compensator", *Electric Power Systems Research*. [www.elsevier.com/locate/epsr](http://www.elsevier.com/locate/epsr). (58) 63-70, 2001.
10. **Gómez Exposito, Antonio:** "Microprocessor-Based Control of Fan SVC for Optimal Load Compensation", Francisco González Vázquez (eds.), *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(2) 706-712, 1992.
11. **Kearly, J.:** "Microprocessor Controlled Reactive Power Compensator for Loss Reduction in Radial Distribution Feeders", A.Y. Chikhani (eds.), *IEEE Transactions on Power Delivery*. 6(4) 1848-1855, 1991.
12. **Paul, S. A.:** "Microcomputer Controlled Static VAR Compensator for Power System Laboratory Experiments", S.K. Basu (eds), *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(1) 370-375, 1992.
13. **Aparicio López, R.:** "Método de compensación de la potencia reactiva por computador", *Mundo Electrónico*, (156) 81-85, 1985.
14. **Keene, G. A.:** "Computer Controlled VAR Compensator for Distribution Feeder", A.Y. Chikhani, (eds.), *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1(3) 337-345, 1986.
15. **Mandal, R. A.:** "Microcomputer Based Power Factor Controller," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 31(3) 361-371, 1994.
16. **Aparicio López, R.:** "Medida de la potencia reactiva por la transformada de Walsch", *Mundo Electrónico*, (149) 159-162, 1985.
17. **Nandi, Subhasis:** "Two Novel Schemes Suitable for Static Switching of Three-Phase Delta-Connected Capacitor Banks With Minimum Surge Current", Pannalal Biswas (eds.), *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33(5) 1348-54, 1997.
18. **Hahn, Jaehong:** "A New Three-Phase Power-Factor Correction (PFC) Scheme Using Two Single-Phase PFC Modules", Prasad N. Enjeti (eds.), *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(1) 123-130, 2002.
19. **Czarnecki Leszeks, S.:** "Minimization of Reactive Power Under Nonsinusoidal Conditions", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 36(1) 18-22, 1987.
20. **Martínez, P. M.:** "Compensación estática de la potencia reactiva," *Mundo electrónico*, (112), 143-150, 1981.
21. **Moran, L. A.:** "Analysis and Design of a Three-Phase Synchronous Solid-State VAR Compensator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 25(4) 598-608, 1989.
22. **Kemerer, Ray S.:** "Directly Connected Static VAR Compensations in Distribution System Applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35(1) 176-182, 1999.

- 23. Redondo Quintela, F.:** "Energía reactiva y disminución de las pérdidas en distribución de energía eléctrica", *Energía*, 24 (4) 91-94, Madrid, 1998.
- 24. Gómez Exposito, A.:** "Compensación estática de la potencia reactiva," *Energía*, 17 (2) 67-76, Madrid, 1991.
- 25. Koessler, R. J.:** "Dynamic Simulation of Static VAR Compensator in Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3) 1285-1291, 1992.
- 26. Wong, W. K.:** "Application of Compact Static VAR Compensators to Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(2) 1113-1120, 1990.
- 27. Balcells, J.:** "Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos en parques eólicos", *Técnica industrial*, 47(234) 26-31, Madrid, 1999.
- 28. Xu, W.:** "Harmonic Analysis of Systems with Static Compensator", *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(1) 183-190, 1991.
- 29. Montaña Asqueriño, C.:** "Efectos de la distorsión armónica en los compensadores de potencia reactiva", M. Castilla Ibáñez (eds.), *Energía*, 20 (2) 91-95, Madrid, 1994.
- 30. Montaña, J.C.:** "Effects of Voltage-Waveform Distortion in TCR-Type Compensators," J. Gutiérrez (eds.), *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40(3) 373-383, 1993.
- 31. Ghosh, Arindam:** "A New Approach to Load Balancing and Power Factor Correction in Power Distribution System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1) 417-422, 2000.

- 32. Von Jouanne, Annette:** "Assessment of Voltage Unbalance", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(4) 782-790, 2001.
- 33. Mishral, Mahesh K.:** "A New Compensation Algorithm for Balanced and Unbalanced Distribution Systems Using Generalized Instantaneous Reactive Power Theory", *Electric Power Systems Research*, www.elsevier.com/locate/epsr. (60) 29-37, 2001.
- 34. Joos, G.:** "Performance Analysis of a PWM Inverter VAR Compensator", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6(3) 380-391, 1991.
- 35. Van Wyk, J.D.:** "Simulation and Experimental Study of Reactively Loaded PMW-Converter as a Fast Source of Reactive Power, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 22(6) 1082-1090, 1986.
- 36. Rosetto, L.:** "Using AC-fed PMW Converters as Instantaneous Reactive Power Compensators", *IEEE Transactions on Power Electronics*. 7(1) 224-230, 1992.

## AUTORES

### Davel Borges Vasconcellos

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba  
e-mail:davel@em.reduc.edu.cu

### Vicente León Martínez

Ingeniero Técnico Electricista, Ingeniero Superior Industrial, Doctor Ingeniero Industrial, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Valencia, España  
e-mail:vleon@die.upv.es

C I E N C I A Y T É C N I C A

REVISTAS



PONEMOS  
EN SUS  
MANOS  
REVISTAS  
CIENTÍFICAS



Instituto Superior Politécnico  
José Antonio Echeverría  
**cujae**