

Introducción

Desde hace mas de 40 años que el desarrollo tecnológico de la electrónica de potencia ha hecho proliferar las cargas no lineales. Desde simples dimers de algunos VA hasta complejas estaciones de sistema HVDC⁴ de centenas de MW son los responsables de consumir corrientes armónicas. Desde un punto de vista general, las cargas perturbadoras se pueden clasificar en identificables y no identificables (Akagi, 1996).

Rectificadores de grandes potencias con diodos o tiritores (electrólisis, hornos de arco de continua, controles de velocidad de motores, UPS⁵, HVDC), cycloconvertidores, hornos de arco de alterna, sistemas SVC⁶, STATCOM⁷, TCSC⁸, UPFC⁹, BESS¹⁰, etc. son típicamente los identificables. Las empresas de energía eléctrica conocen generalmente su existencia y ubicación.

Por el contrario, las pequeñas cargas no lineales distribuidas en el sistema eléctrico son imposibles de ubicar. El rectificador de entrada de un pequeño electrodoméstico emite muy poca corriente armónica. Miles distribuidos en una ciudad son un problema que se agrava ya que generalmente los armónicos que emiten están en fase.

La respuesta para ambas categorías de cargas no lineales es la misma. Transitar el camino que supone el concepto de la Compatibilidad Electromagnética (EMC) cuyo marco normativo establecen las normas (*IEC 61000-1*, 1992). En el caso de cargas identificables el esquema supone que los distribuidores controlen a sus clientes, que los fabricantes o clientes diseñen su equipamiento para soportar hasta cierta calidad de suministro y un regulador que ponga los límites de referencia para ambos. Normas

⁴High Voltage Direct Current transmission line

⁵Uninterrupt Power Supply

⁶Static VAr Compensator

⁷Static Synchronous Compensator

⁸Thyristor Controlled Series Capacitor

⁹Unified Power Flow Controller

¹⁰Battery Energy Storage System

como la (*IEEE 519*, 1992) y la familia (*IEC 61000-3*, 1996) son el punto de partida.

En el caso de cargas no identificables, quizás la única forma es el etiquetado energético que incluya el tema de armónicos. No se debería importar, fabricar, vender o instalar equipamiento que no tenga algún tipo de evaluación funcional asociado con su emisión armónica. Para este caso, las Normas (*IEC 61000-3-2*, 2001) (*IEC 61000-3-4*, 1998) son ejemplos concretos.

La Electrónica de Potencia se presenta como una disciplina autosustentable (Akagi, 1996). Da respuesta satisfactoria a muchos problemas de los sistemas eléctricos, de la industria, de la vida cotidiana. Pero también crea problemas. Los armónicos son el peor de estos problemas.

Armónicos de corriente emitidos por una carga perturbadora se transforman en armónicos de tensión en los sistemas de distribución. Se generan pérdidas adicionales en líneas y transformadores, deterioro y destrucción de condensadores de compensación de reactiva. Se producen resonancias de estos condensadores con la impedancia de corto circuito en el punto de conexión que no hacen otra cosa que propagar el problema.

Clásicamente los problemas de armónicos se resuelven con la instalación de filtros pasivos shunt LC sintonizados lo mas cerca posible de la fuente de armónicos. Son económicos y eficientes. Estos filtros pasivos si bien solucionan en parte el problema en forma puntual, tienen múltiples inconvenientes. Si la tensión de suministro tiene armónicos, se sobrecarga el filtro pasivo. Se produce resonancia que entre el filtro pasivo y la impedancia de línea. Si antes de instalar el filtro pasivo existía resonancia entre una eventual compensación de reactiva y la impedancia de línea, al reconvertir dicho condensador en filtro sintonizado shunt, se baja peligrosamente la frecuencia de la resonancia preexistente.

Los Filtros Activos son la solución al problemas de armónicos que ofrece la Electrónica de Potencia. Un filtro activo no es otra cosa que un fuente de tensión alterna controlable (VSI¹¹) que comandada convenientemente (PWM¹²) tiene la capacidad de entregar o consumir energía en su punto de conexión al sistema eléctrico. En el apéndice D se describen las configuraciones básicas de filtros activos (Shunt, Serie, Híbrido, UPQC, etc.) y bien podría formar parte de esta introducción.

¹¹Voltage Source Inverter

¹²Pulse With Modulation

En todo momento se trabajará con sistemas de tres hilos por lo que no habrá componente homopolar ni serán consideradas las topologías de filtros activos que si las contemplan (ver apéndice D).

Han contribuido al desarrollo actual de los filtros activos varios factores:

- Los notables avances en el campo de los semiconductores. Hoy en día el IGBT¹³ ha alcanzado niveles de tensión, corriente y velocidad que permiten construir VSI de varios MVA a precios competitivos.
- Los vertiginosos avances de los microcontroladores, DSP¹⁴, etc. que permiten implementar prácticamente algoritmos de control y cálculo que tan solo una década atrás resultaban irrealizables en tiempo real.
- Propuestas de control potentes y prácticas. En ese sentido se destaca el trabajo de Akagi con su Teoría de la Potencia activa e imaginaria instantánea (Akagi et al., 1983)(Akagi et al., 1984).
- El aumento de las propias cargas perturbadoras.

Se podría agregar otro factor de impulso para el desarrollo de los filtros activos: la desregulación del sector eléctrico. A nivel mundial se viene operando este fenómeno. Se empiezan a aplicar en forma sistemática reglamentaciones sobre calidad en el suministro y consumo de energía eléctrica. Se va trasladando al consumidor la tarea de solucionar sus problemas puntuales¹⁵. Va creciendo la conciencia asociada con el concepto guía: *"quien ensucia, limpia"*.

Los filtros pasivos no son adecuados a tal concepto guía. Todo armónico emitido en las cercanías de un filtro pasivo shunt, sea propio o del vecino, terminará atrapado en el filtro pasivo. El Prof. E. H. Watanabe decía en la conferencia que brindara en ICHQP 2002: *los filtros pasivos son solidarios*.

El dispositivo que más se adapta al concepto de *"quien ensucia, limpia"* es el filtro activo shunt. Más aun si es controlado simplemente compensando armónicos

¹³Insulated Gate Bipolar Transistor

¹⁴Digital Signal Processors

¹⁵Se podrá pensar que se habla solamente de consumidores perturbadores. Las reglas del libre mercado llevan a que consumidores con cargas críticas deban ver la forma de solucionar sus problemas de suministro. Por ejemplo si son muy susceptibles a bajadas momentáneas de tensión (huecos, sags) y el distribuidor en su zona no está dispuesto a mejorar la calidad del suministro, el consumidor deberá recurrir a una UPS, BESS, etc.

consumidos. Filtrar exclusivamente lo propio. Si la tensión de suministro es de mala calidad y provoca un aumento de los armónicos consumidos, en la medida de poder evaluar dicho incremento, no deberían ser filtrados por el consumidor.

Nuevamente deberá apelarse a los principios de la *EMC*. Al distribuidor se le deberá exigir cierta calidad en la tensión suministrada y será admisible cierta distorsión armónica de tensión. Al consumidos se le deberá limitar la emisión armónica.

Este trabajo tiene como uno de sus objetivos específicos el tener en cuenta, en todo momento, que se debe cumplir con la reglamentación sobre emisión armónica.

Si también se tiene en cuenta el otro objetivo específico de arribar a una solución de mínimo costo, necesariamente no se deberá ir mas allá de lo que la reglamentación exige. Posiblemente nadie estará dispuesto a pagar algún esfuerzo adicional que se realice en otro sentido.

Por tanto no se eliminará todo el residuo armónico. Se eliminará una parte, la estrictamente necesaria.

En ausencia actual¹⁶ de reglamentación nacional, en este trabajo se utilizará la reglamentación Argentina (ENRE, 1997b) (ENRE, 1997a) que básicamente es una reproducción adaptada de la norma (*IEC 61000-3-4*, 1998). También se podría utilizar como referencia la normativa interna de UTE¹⁷ (*NCP.02.01/0*, 2000) que también es similar a éstas. Estas reglamentaciones no solo limitan la distorsión armónica total (THD). También limita la emisión armónica para cada armónica particular.

Basándose en la Teoría pq, se pueden eliminar fácilmente las corrientes armónicas. Problemas reportados en la teoría¹⁸ al momento de eliminar armónicos son subsanables. En el último trabajo de Akagi (Watanabe et al., 2002) se concluye que si las tensiones no son sinusoidales, la solución es usar un PLL¹⁹. Básicamente la idea es separar de las potencias instantáneas fluctuantes²⁰ las contribuciones de frecuencia fundamental. Algunos autores llaman *directo* a este método (Basic et al., 2000). Aquí se denominará filtrado *residual* en virtud de que se trata por igual a todo el

¹⁶A corto plazo la URSEA (Unidad Reguladora de los Servicios de Energía y Agua) tiene previsto poner en consideración pública un reglamento sobre calidad de potencia en la distribución

¹⁷Única empresa eléctrica del Uruguay (estatal)

¹⁸El problema no es la teoría, la cual está bien definida. El problema es no hacer buen uso de la misma.

¹⁹Phase Locked Loop

²⁰ \tilde{p} y \tilde{q} . Se recomienda al lector no versado en la Teoría pq leer el apéndice A

residuo armónico. En (Monteiro, 1997) se analiza esta metodología con profundidad pero para un caso particular. En (Casaravilla, 2000) y (Casaravilla et al., 2000) se utiliza y se aportan herramientas conceptuales para su análisis. En el capítulo 1 de este trabajo se mejoran y generalizan las herramientas de análisis.

Por otra parte se muestra un ejemplo de diseño de filtrado *residual* donde se concluye que si bien el filtrado permite cumplir con los requerimientos de *THD*, persisten problemas en algunas armónicas individuales.

Además de la Teoría pq, para realizar el filtrado residual se puede usar la metodología SRF²¹ (Zmood et al., 2001). En este trabajo se demuestra la equivalencia de estos métodos si se quiere discriminar una secuencia armónica.

El no cumplimiento de la reglamentación armónica en algunos límites individuales es consecuencia de la no selectividad del filtrado residual.

Los filtros activos selectivos han sido objeto de estudio en los últimos años (Basic et al., 2000)(Bhattacharya et al., 1997)(Mattavelli, 2001)(Shung et al., 2000). Si bien hay experiencia en su uso, implementación y limitaciones, en general se han aplicado a casos particulares en donde no se requería filtrar selectivamente muchas frecuencias²². En muchos casos se buscaba la supresión total de determinada frecuencia, por lo que los problemas de estabilidad resultaban críticos y fueron investigados. En muchos casos no se hacía distinción entre secuencias de diferente signo y se las filtraba por igual. No hay referencias a diferencias en la metodología de cálculo de las referencias de control del VSI según sea un control que compensa midiendo la corriente de carga o realimentando la corriente de línea²³.

En este trabajo, se investigará la posibilidad de filtrar múltiples secuencias armónicas. Sólo basta imaginar el escenario por el cual se desea filtrar, para cada frecuencia a limitar, un poco de corriente de cada secuencia. Dada la cercanía de los filtros selectivos, se deberán *manejar* las interferencias entre ellos.

Se analizarán los métodos de cálculo mas adecuados según la estrategia de control utilizada. En particular se propondrá un método de cálculo hasta ahora no estudiado en la literatura consultada. Este nuevo método permitirá resolver las interferencias

²¹Synchronous Reference Frame

²²Como se verá en este trabajo, en realidad se debe hablar de filtrar selectivamente secuencias armónicas.

²³En el apéndice E se describen en detalle estas dos alternativas de control

entre filtros de mejor manera que el método clásico utilizado hasta ahora.

A los efectos de probar mediante simulaciones los resultados teóricos desarrollados, se ejemplificará el diseño con una de las peores cargas distorsivas: un horno de arco de alterna en donde no se tiene periodicidad y generalmente su carga es desbalanceada.

Del propio ejemplo surgirá la necesidad de analizar dos tipos de filtros activos a diseñar. Un filtro activo shunt en barras de 150kV (PCC²⁴) o un filtro híbrido shunt en barras de 31.5kV, más próximo de la carga, con una potencia de corto circuito muy limitada y problemas de resonancia (la compensación de reactiva también está en 31.5kV).

Cumplir con la *THD*, cumplir con los armónicos individuales y tener un VSI de mínima corriente es un problema de optimización matemática. Del resultado de la optimización, surgirán las necesidades de filtrado selectivo.

Si se tienen en cuenta los dos posibles ubicaciones del filtro (150kV o 31.5kV) pero que las reglamentaciones deben cumplirse en el PCC, surgirá la necesidad de hacer el cálculo matemático óptimo teniendo en cuenta la propagación armónica.

Cuando se diseña el filtro pasivo se determina la ubicación de su frecuencia de resonancia (cero), pero al mismo tiempo se está ubicando en una frecuencia menor, un polo de resonancia con la impedancia de corto circuito del sistema.

Por tanto, el diseño del filtro pasivo del filtro híbrido debe ser hecho en conjunto con el de su parte activa. El nivel de compensación de una armónica en barras de 31.5kV, depende de su propagación armónica (transferencia pasiva del sistema) y de a que valor hay que llegar de acuerdo con la reglamentación a cumplir en el PCC.

Al cálculo matemático óptimo cuando el VSI está en el PCC (barras de 150kV), se lo denominará *local*. Si se instala el VSI en 31.5kV y se cumple la reglamentación en el PCC se lo denominará *remoto*. No se encontró referencias en la literatura consultada a este tipo de optimización ya sea local o remota.

²⁴Point of Common Coupling. Punto en donde se conecta el cliente y se debe cumplir la reglamentación.