



Algoritmo experto para la optimización de la compensación selectiva de un filtro activo de potencia

Expert algorithm for optimizing selective compensation of an active power filter

Algoritmo especialista para otimizar a compensação seletiva de um filtro de energia ativo

Daniel Engiberto Granda-Gutiérrez ^I
degranda@tecnologicoloja.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8726-0806>

Francisco José Gimeno-Sales ^{II}
fjgimeno@eln.upv.es
<https://orcid.org/0000-0001-5129-1184>

Correspondencia: degranda@tecnologicoloja.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de investigación

***Recibido:** 20 de mayo de 2020 ***Aceptado:** 27 de junio de 2020 * **Publicado:** 22 de julio de 2020

- I. Ingeniero Eléctrico, Docente del Instituto Superior Tecnológico Loja, Loja, Ecuador.
- II. Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Resumen

El presente trabajo describe la metodología desarrollada para el diseño, simulación e implementación de un algoritmo experto para optimizar la compensación selectiva de ineficiencias eléctricas (desequilibrios, armónicos y potencia reactiva) empleando un filtro activo de potencia. El algoritmo de optimización basado en un sistema experto se implementa en un procesador digital DSC Texas TMS320F28069M, de la familia C2000, mediante máquinas de estado finito. Los resultados muestran que el algoritmo experto permite reconfigurar de manera dinámica al filtro activo de potencia para adaptarse a los cambios de carga (diaria, semanal o estacional) y obtener el máximo provecho del filtro activo acorde a su potencia nominal.

Palabras claves: Algoritmo, optimización, C2000, potencia.

Abstract

The present work describes the methodology developed for the design, simulation and implementation of an expert algorithm to optimize the selective compensation of electrical inefficiencies (imbalances, harmonics and reactive power) using an active power filter. The optimization algorithm based on an expert system is implemented in a Texas TMS320F28069M DSC digital processor, of the C2000 family, using finite state machines. The results show that the expert algorithm allows to dynamically reconfigure the active power filter to adapt to changes in load (daily, weekly or seasonal) and to get the most out of the active filter according to its nominal power.

Key words: Algorithm, optimization, C2000, power.

Resumo

O presente trabalho descreve a metodologia desenvolvida para o projeto, simulação e implementação de um algoritmo especialista para otimizar a compensação seletiva de ineficiências elétricas (desequilíbrios, harmônicos e potência reativa) usando um filtro de potência ativo. O algoritmo de otimização baseado em um sistema especialista é implementado em um processador digital Texas TMS320F28069M DSC, da família C2000, usando máquinas de estados finitos. Os resultados mostram que o algoritmo especialista permite reconfigurar dinamicamente o filtro de energia ativo para se adaptar às mudanças na carga (diária, semanal ou sazonal) e aproveitar ao máximo o filtro ativo de acordo com sua potência nominal.

Palavras-chave: Algoritmo, otimização, C2000, potência.

Introducción

Un problema en la calidad de la energía eléctrica se presenta cuando ocurre cualquier desviación de la tensión, la corriente o la frecuencia lo que puede provocar un fallo, la mala operación en los equipos de uso final o el deterioro de la economía o bienestar de los usuarios. Por lo que es necesario la identificación y cuantificación de las ineficiencias que se puedan producir en un sistema eléctrico (desequilibrios, armónicos o potencia reactiva) para poder compensarlas o mitigarlas.

Los filtros activos de potencia conectados en paralelo (SAPF) pueden mejorar la calidad del sistema eléctrico generando las corrientes no eficientes que requiere la carga; estos pueden trabajar con una estrategia de compensación selectiva donde compensan cada uno de los fenómenos no eficientes requeridos por la carga. Debido a que los equipos convertidores tienen una potencia limitada cuando la potencia de los fenómenos no eficientes es mayor que la potencia del convertidor es preferible utilizar la potencia disponible para corregir un fenómeno o un conjunto limitado de estos fenómenos ya que una de las principales limitaciones de un filtro activo comercial es la corriente de compensación Máxima que puede circular por cada una de las fases.

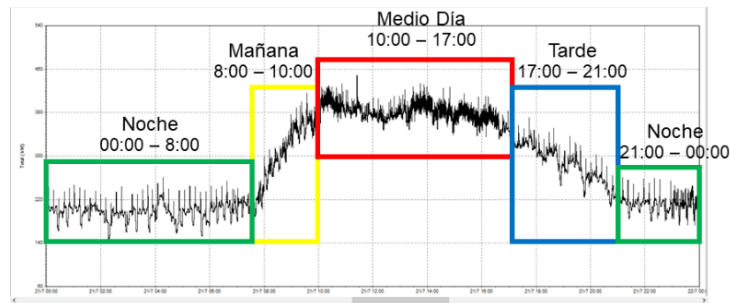
Otra limitante de los filtros activos comerciales es que se debe configurar el grado de compensación de cada armónico

manualmente, por lo que el grado de compensación configurado no responde al cambio en tiempo real de la carga (debido a la conexión o desconexión de equipos) de manera que las ineficiencias no se mitigan de manera eficaz para cada hora del día. Por lo que surge la necesidad de crear un sistema que permita variar los valores de compensación de cada parámetro según varíe la carga para obtener el mayor provecho del filtro activo.

En [1] se ha realizado un análisis de la implementación del filtro activo comercial Shaffner ECOsine Active FN 3430-

60-400-4 [2] en el edificio 8G de la UPV donde se miden los principales parámetros eléctricos de la instalación antes y después de instalar el filtro activo, lo cual permite conocer el comportamiento de la carga (como se ilustra en la Figura 1) y adoptar una solución para optimizar el trabajo del filtro activo mediante la implementación de un sistema experto.

Figura 1: Perfil del consumo de la carga en un día laboral [1]



El algoritmo de optimización se basa en un sistema experto y se implementa en un procesador digital DSC Texas TMS320F28069M, de la familia C2000, mediante máquinas de estado finito. Se utiliza una comunicación en serie RS485 halfduplex (2 hilos) para comunicar el DSC con el filtro activo mediante comandos, utilizando el protocolo ModBus como muestra la Figura 2.

El algoritmo obtiene los parámetros de medidas del filtro

activo mediante la conexión serie RS485. Entre sus parámetros más relevantes se dispone de:

- FFTs de línea L1, L2, L3 y Neutro. FFTs de la carga L1, L2, L3 y Neutro.
- Valor RMS de corrientes de línea L1, L2, L3 y Neutro. Toda la información es procesada por el algoritmo experto y los resultados obtenidos se envían al filtro activo para la compensación de ineficiencias. Las prioridades de compensación de estas ineficiencias son: 1) desequilibrios, 2) armónicos y 3) compensación de reactiva, de manera que la corriente de compensación del filtro activo no sobrepase los 60[A] por fase, es decir no supere la potencia nominal del equipo.

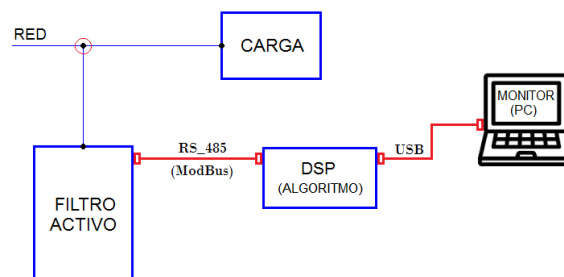


Figura 2: Diagrama unifilar de la solución propuesta donde se muestra el filtro activo, carga, DSC y el protocolo de comunicación ModBus

Marco Teórico

II-A. Filtro activo de potencia [3][4][5]

Los filtros activos de potencia están integrados por convertidores estáticos de potencia que se conectan en serie o en paralelo con la carga contaminante, son usados para generar corrientes en el punto de conexión (PCC) con el fin de cancelar armónicos, compensar total o parcialmente energía reactiva, y equilibrar las corrientes de fases y la cancelación de la corriente de neutro [6], como se muestra en la Figura 3.

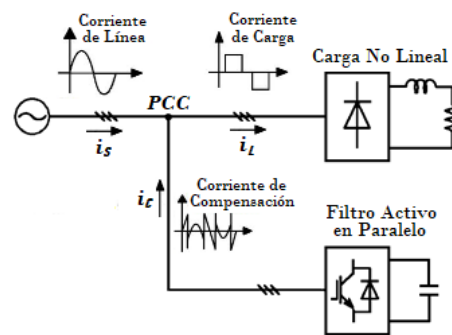


Figura 3: Filtro activo en conexión paralela (SAPF)

El límite de compensación máximo de un Filtro activo está determinado por la potencia máxima que puede manejar el convertidor de potencia. Ya que el convertidor es un sistema de potencia limitado, se puede pensar que cuando se alcanza el límite de potencia, la compensación global no siempre va a ser la mejor opción. Por lo que para algunas situaciones será conveniente utilizar un compensador selectivo, es decir utilizar toda la potencia del convertidor en la eliminación o mitigación de un único fenómeno o una combinación de ellos, sin sobrepasar la potencia máxima del convertidor.

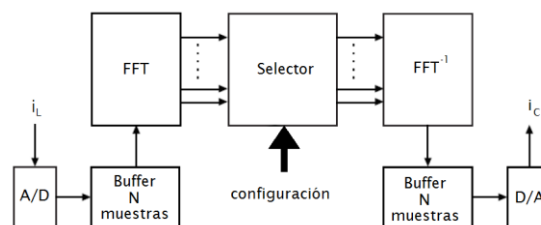
II-A1. Compensación Selectiva: Obtener las corrientes de compensación ligadas a cada uno de los fenómenos no eficientes, permitirá implementar filtros activos de potencia con la capacidad de eliminar o mitigar de forma independiente cada uno de estos fenómenos o una combinación de los mismos. Dirigidos por un sistema de gestión de energía que determine las acciones correctivas a tomar, el uso de compensadores selectivos pueden proveer al sistema de gestión de un mayor grado de libertad en el momento de decidir las acciones para mejorar el sistema eléctrico. La flexibilidad de la compensación selectiva hace del filtro activo un dispositivo muy

versátil para la compensación de potencia reactiva, corrientes armónicas y desequilibrio en las corrientes de alimentación y combinaciones de estas ineficiencias dependiendo del límite de potencia. Un filtro selectivo permite controlar el filtrado de cada armónico independientemente, esto sirve para compensar la distorsión armónica en la medida que se requiera minimizando la corriente generada [7].

II-A2. Clasificación por Métodos de Detección de Armónicos: Los métodos de detección de armónicos son aquellos que tienen la capacidad de determinar los atributos específicos de la señal como son: frecuencia, amplitud, fase, tiempo de ocurrencia, duración, energía, etc., de una señal de entrada usando un algoritmo matemático [8]. Con la información obtenida el controlador puede compensar la distorsión existente.

En el método de la FFT, se adquieren N muestras de la corriente i_L y se realiza la FFT sobre el este conjunto de muestras, así se obtienen las amplitudes y fases de las componentes frecuenciales de la señal. Una vez obtenidas las amplitudes el controlador filtra o atenúa (porcentaje de compensación) las componentes armónicas que no se desean compensar o atenuar, antes de realizar la FFT inversa. La suma de los nuevos valores obtenidos corresponde a la corriente de referencia para la compensación como se puede ver en la Figura 4.

Figura 4: Método de detección de armónicos basado en la FFT



Este método permite una total configuración de la compensación (selectiva, global, porcentajes de compensación) obteniendo buenos resultados en régimen estacionario, sin embargo, cuando el espectro de la corriente consumida por la carga es variable el resultado de la compensación es deficiente debido al retraso computacional de dos ciclos a la frecuencia fundamental de la red [9].

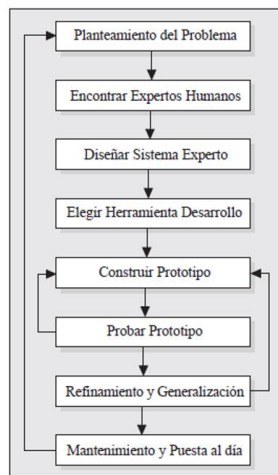
II-B. Sistemas Expertos [10]

Un sistema experto es un sistema informático que incorpora de forma operativa el conocimiento de una persona experimentada de manera que puede responder, explicar y justificar sus respuestas, esto da la idea de que para resolver un problema lo que se hace es imitar como un ser humano resuelve ese problema [11]. Su uso se aconseja en las siguientes situaciones: Cuando el conocimiento se basa en reglas que unicamente pueden ser aprendidas por la experiencia

- Cuando el problema está cambiantes sujeto a reglas o códigos.
- Cuando el servicio de expertos es caro o difícil de encontrar.
- Cuando el problema estos cambiantes
- Cuando el servicio de expertos es caro o difícil de encontrar.

Para el desarrollo de un sistema experto se sugieren las siguientes etapas:

Figura 5: Etapas en el desarrollo de un Sistema Experto



Las ventajas del sistema experto es que son herramientas estables para su entorno y muy fiables ya que para unas condiciones dadas siempre van a responder de la misma forma. Una de sus limitaciones es que para actualizarlo debe ser reprogramado y son programas poco flexibles al cambio y de difícil acceso a la información no estructurada.

II-C. Comunicaciones Serie

Las comunicaciones industriales son la base de la integración de los sistemas de automatización y control industrial.

II-C1. Norma Física RS-485: El EIA485 (RS-485) es un estándar de comunicaciones en bus de) es un estándar de comunicaciones en bus de la capa física del modelo OSI.

Es una interfaz multipunto y especifica un máximo de 32 equipos emisores-receptores en un mismo bus de datos. Los adaptadores RS-485 utilizan una fuente de alimentación de

5 voltios para sus circuitos [12]. El estándar sugiere que los nodos se conecten en topología bus half-duplex o full-duplex.

II-C2. ModBus [13]: ModBus provee una comunicación cliente/servidor (TCP/IP) o maestro/esclavo (ModBus Serial Line) entre dispositivos conectados en diferentes tipos de buses o redes. A nivel físico puede ser implementado sobre diferentes interfaces (RS485, RS232) siendo la interfaz de 2 cables (Half-dúplex) la más común.

La comunicación ModBus del Filtro Activo ECOSine define un espacio de direcciones para operaciones de E/S entre un dispositivo maestro y esclavo [14].

Simulación de filtro activo selectivo que trabaja con el método de la FFT

En la simulación se busca censar las corrientes de carga para obtener su FFT, además se obtienen los valores de secuencia positiva, negativa y homopolar de la corriente. Teniendo en consideración que el filtro activo puede manejar una corriente máxima de compensación, la estrategia de compensación selectiva consistirá en compensar desequilibrios (Todo o Nada) debido a que el filtro activo comercial posee esta característica, en caso de que la corriente de desequilibrios sea menor que la corriente máxima del compensador se compensará desequilibrios; caso contrario si la corriente de desequilibrios es mayor que la corriente máxima del compensador no se compensa desequilibrios y se procede a compensar corriente armónica. En caso de que el filtro activo después de compensar desequilibrios aun tenga potencia disponible se procederá a compensar armónicos.

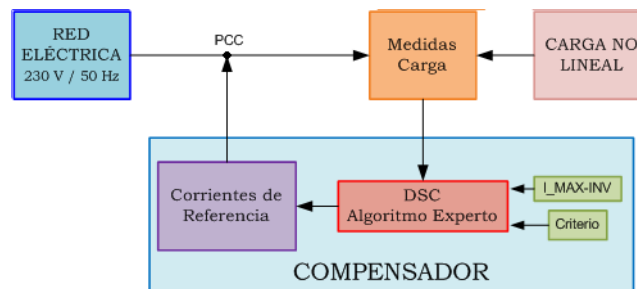
Para realizar la simulación de la compensación armónica se simula hasta el armónico 21, ya que como se menciona en [1], a partir del armónico 22 estos tienen un valor prácticamente nulo.

La compensación de los armónicos se la hace en base a dos criterios (Compensación por orden secuencial o compensación por orden de amplitud de los armónicos). Los armónicos se compensarán en orden (según el criterio escogido) siempre y cuando no se sobrepase la corriente máxima con la que puede trabajar el filtro activo, y si aún existe potencia de compensación disponible en el filtro activo se compensara potencia reactiva (en un tanto por ciento), ya que el filtro activo comercial si permite esta característica.

III-A. Bloques del Sistema a Simular

La Figura 6 muestra los bloques de los cuales consta la simulación desarrollada en Matlab de un filtro activo selectivo, el bloque RED ELECTRICA representa la red eléctrica de 230V con una frecuencia de 50Hz. El bloque MEDIDAS CARGA sirve para obtener las medidas de corriente y voltaje en la carga. El Bloque COMPENSADOR simula el filtro activo selectivo y finalmente el bloque CARGA NO LINEAL simulará las diferentes cargas que se pueden conectar al sistema.

Figura 6: Bloques para la simulación del filtro activo selectivo



El Bloque CARGA NO LINEAL que se conecta al sistema consta de cuatro cargas:

- CARGA 1: Carga Reactiva de 10kW y 20kVAR.
- CARGA 2: Rectificador trifásico de 15kW con inductancias del 3%.
- CARGA 3: Rectificador monofásico de 5kW con inductor de entrada del 3% (conectado entre fase R y Neutro) .
- CARGA 4: Carga desequilibrada y que consume armónicos.

En el bloque COMPENSADOR es donde se calcula las corrientes de referencia para la compensación selectiva. El corazón de este bloque es el Bloque que simula el DSC y donde se

aloja el algoritmo experto, este bloque tiene como entradas las amplitudes y fases de las FFT de la corriente de carga de cada una de las fases (R, S, T); otra señal de entrada son las amplitudes y fases de secuencias positiva, negativa y cero de las fases R, S y T, que se las obtiene del bloque Medidas Carga. Además, como entradas se tiene la corriente máxima del inversor I MAX-INV que puede circular por cada una de las fases de salida del filtro activo y el bloque CRITERIO es el criterio de compensación de armónicos a usar (Criterio 1 o Criterio 2). Finalmente, el bloque Corrientes de Referencia genera las corrientes de referencia dadas por el algoritmo experto que se utilizan para compensar las ineficiencias del sistema.

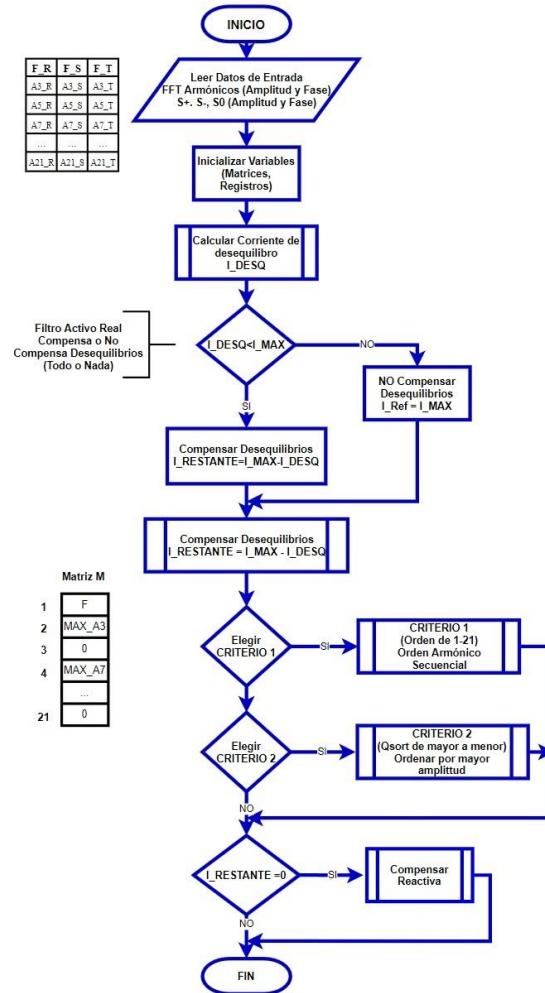
III-B. Criterios de Compensación de Armónicos

- **Criterio 1:** Compensa los armónicos impares en orden secuencial tomando en cuenta el número de armónico, es decir compensar el armónico 3, 5, 7, sucesivamente hasta el armónico 21.
- **Criterio 2:** Compensa los armónicos en orden de amplitud (de mayor a menor).or).

III-C. Algoritmos utilizados en la simulación

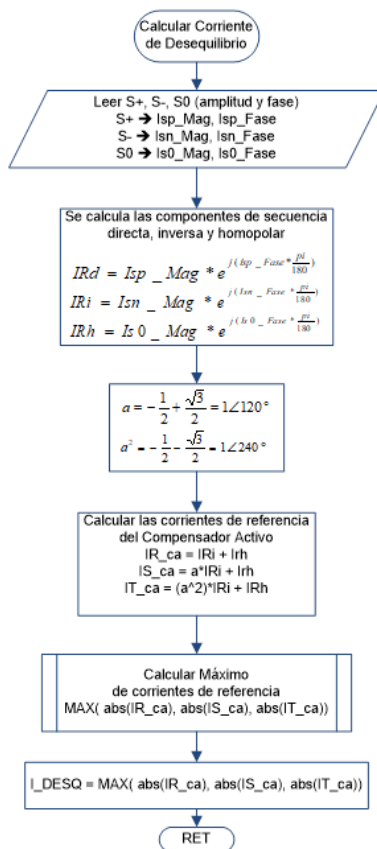
El algoritmo general utilizado en las simulaciones se puede ver en la Figura 7.

Figura 7: Diagrama de Flujo del algoritmo general de simulación



La Figura 8 muestra la función para el cálculo de las corrientes de desequilibrios y su compensación

Figura 8: Calculo de las corrientes de desequilibrio



Para la compensación de armónicos se tienen 2 criterios de compensación.

La Figura 9 muestra el Criterio 1 donde se compensan los armónicos secuencialmente según el número de armónico (del armónico 3 al 21).

La Figura 10 muestra el criterio 2 donde se compensan los armónicos según su amplitud (de mayor a menor).

Figura 9: Subrutina CRITERIO 1 para compensar armónicos del 3 al 21

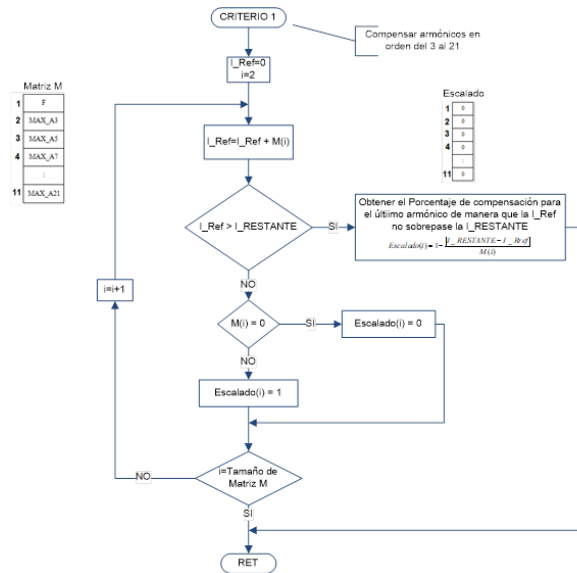
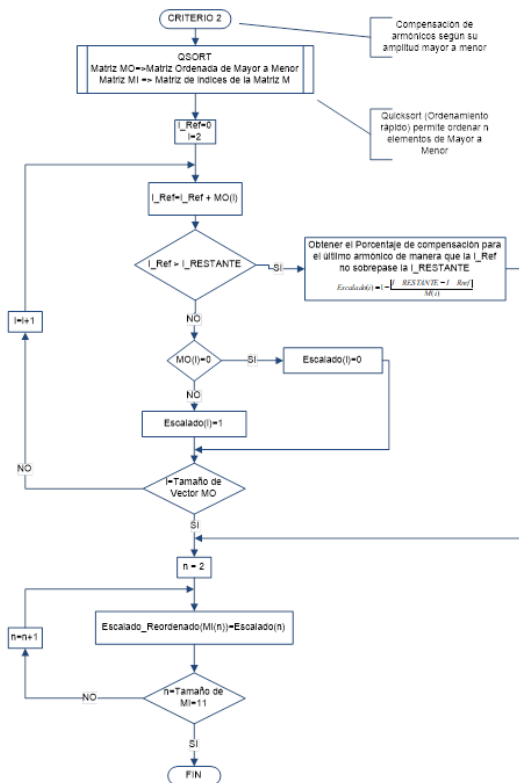


Figura 10: Subrutina CRITERIO 2 para la compensación de armónicos según su amplitud



III-D. Resultados

Las simulaciones se las realiza con una corriente máxima de compensación de 60 [A].

III-D1. Con Carga 1 Conectada:

Como muestra la Figura 11 en esta simulación se puede verificar que el algoritmo al no tener desequilibrios ni corriente armónica que compensar utiliza toda la potencia del filtro para compensar reactiva. En la tabla I se puede ver que el FP debido al desplazamiento mejora de 0.45 a 1.//

III-D2. Con Carga 2 Conectada: En la Figura 12 se puede ver que las corrientes de línea presentan un rizado a pesar de que la corriente máxima de compensador es superior a la suma de corrientes armónicas, esto es debido a que no se compensan los armónicos a partir del armónico 21. Se ha compensado los armónicos con el criterio #1, por lo que los armónicos se compensan en orden (del 3 al 21).

Se puede ver además en la tabla II que se compensa Armónicos y reactiva y no se compensa desequilibrios, ya que la carga no tiene desequilibrios

Figura 11: Simulación con la carga 1 conectada

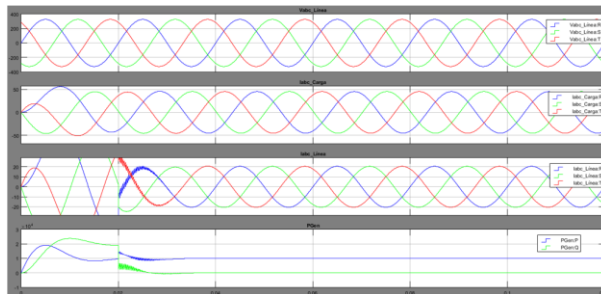


Tabla I: Mediciones en la carga 1 y en la línea una vez conectado el filtro activo selectivo a la red

Parámetro	Medidas en la carga 1	Medidas en la Línea
I_+	45.42 [A]	20.47 [A]
I_-	0.032 [A]	0.032 [A]
I_0	0.032 [A]	0.032 [A]
FP	0.449	1
$THD_i R$	0.04 %	0.04 %
$THD_i S$	0.04 %	0.04 %
$THD_i T$	0.04 %	0.04 %

Figura 12: Simulación con la carga 2 conectada

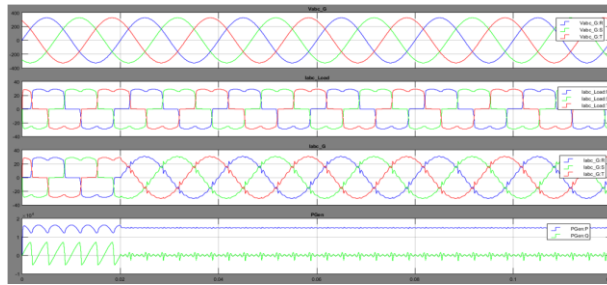


Tabla II: Mediciones en la carga 2 y en la línea una vez conectado el filtro activo selectivo a la red

Parámetro	Medidas en la carga 2	Medidas en la Línea
$I+$	30.56 [A]	20.47 [A]
$I-$	0.032 [A]	0.032 [A]
I_0	0.032 [A]	0.032 [A]
FP	0.996	1
$THD_i R$	27.99 %	5.01 %
$THD_i S$	28.02 %	5.01 %
$THD_i T$	28.01 %	5.01 %

III-D3. Con Carga 3 Conectada: En la Figura 13 se puede ver que se compensan los desequilibrios que presenta la carga, además se compensa la potencia reactiva que consumen la impedancia base de la carga. Debido a que el sistema no tiene componentes armónicas el escalado de los armónicos se mantiene en cero como se ve en la tabla III, sin embargo, se puede ver que al compensar la THD_i en la línea R aumenta.

III-D4. Con Carga 4 Conectada: Para el análisis del comportamiento de la carga 4, se realizan simulaciones con los 2 criterios de compensación de armónicos.

Como se puede ver en la Figura 14 y en tabla IV, en esta simulación se puede comprobar que se compensan las ineficiencias armónicas con el criterio 1.

Figura 13: Simulación con la carga 3 conectada

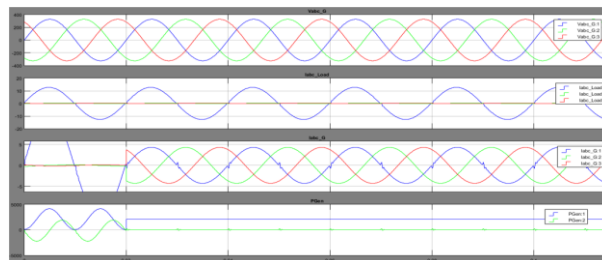


Tabla III: Mediciones en la carga 3 y en la línea una vez conectado el filtro activo selectivo a la red

Parámetro	Medidas en la carga 3	Medidas en la Línea
I_+	4.278 [A]	4.3 [A]
I_-	4.209 [A]	0 [A]
I_0	4.209 [A]	0 [A]
FP	0.996	1
$THD_i R$	1.219 %	3.598 %
$THD_i S$	0.579 %	0.047 %
$THD_i T$	0.579 %	0.047 %

Figura 14: Simulación con la carga 4 conectada y criterio 1

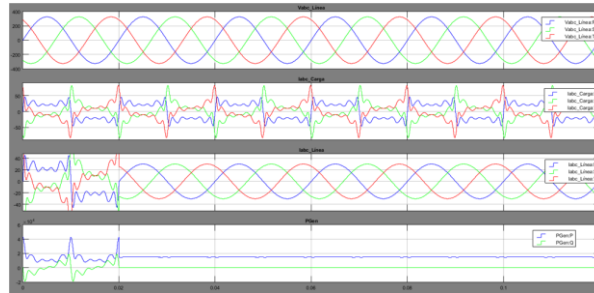
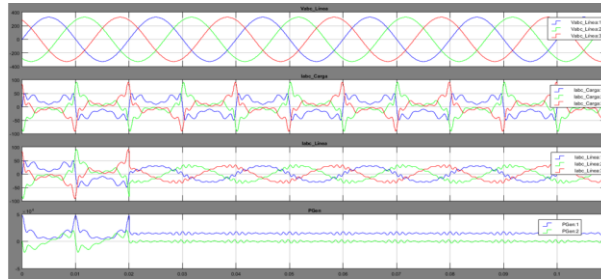


Tabla IV: Mediciones en la carga 4 y en la línea, conectado el filtro activo selectivo a la red con el criterio 1

Parámetro	Medidas en la carga 4 y Criterio 1	Medidas en la Línea
I_+	30.07 [A]	30.11 [A]
I_-	0.032 [A]	0.032 [A]
I_0	0.032 [A]	0.032 [A]
FP	1	1
$THD_i R$	73.48 %	0.141 %
$THD_i S$	73.56 %	0.141 %
$THD_i T$	73.56 %	0.141 %

Para simular el criterio 2 (compensar por orden descendente de amplitud) se cambia la carga 4 configurando el Armónico 3= 25[A]. Como muestra la Figura 15 con el criterio 2 se puede ver que los armónicos se compensan en orden de amplitud, en este caso el ultimo armónico en compensarse con la potencia disponible del inversor es el armónico 7, mientras que los armónicos 9, 11, 13 y 15 ya han sido compensados al 100%

Figura 15: Simulación con la carga 4 conectada y criterio 2



Se observa además que debido a que el filtro ya llega a su límite de corriente de compensación no se compensan todos los armónicos, debido a esto el THDi de línea no disminuye del todo como se ve en la tabla V. Ya que la carga no tiene ineficiencias de desequilibrios ni de reactiva estas no se compensan.

Tabla V: Mediciones en la carga 4 y en la línea conectado el filtro activo selectivo a la red con el criterio 2

Parámetro	Medidas en la carga 4 y Criterio 2	Medidas en la Línea
I_+	30.07 [A]	30.11 [A]
I_-	0.032 [A]	0.032 [A]
I_0	0.032 [A]	0.032 [A]
FP	0.999	1
$THD_i R$	99.08 %	12.86 %
$THD_i S$	99.18 %	12.87 %
$THD_i T$	99.18 %	18.87 %

III-D5. Con Carga 1,3 y 4 Conectadas: En la Figura 16 y tabla VI se puede ver que compensan las ineficiencias de desequilibrios y de un porcentaje de armónicas y debido a que el filtro llega a su límite de compensación no compensa reactiva.

Figura 16: Simulación con las cargas 1,3 y 4 conectadas y criterio 1

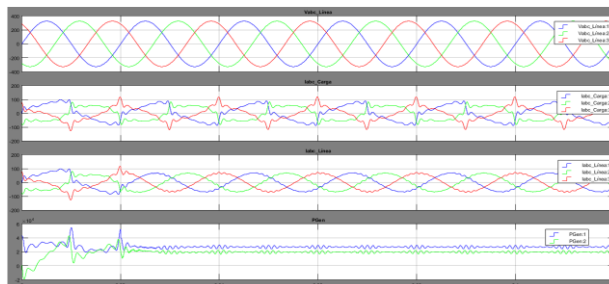


Tabla VI: Mediciones en la carga (1,3 y 4) y en la línea, conectado el filtro activo selectivo a la red con el criterio 2

Parámetro	Medidas en la carga 1,3,y 4	Medidas en la Línea
$I+$	68.8 [A]	67.83 [A]
$I-$	4.177 [A]	0 [A]
I_0	4.177 [A]	0 [A]
FP	0.804	0.804
$THD_i R$	29.66 %	4.77 %
$THD_i S$	34.22 %	4.78 %
$THD_i T$	34.22 %	4.78 %

Comunicaciones entre filtro activo y DSC

IV-A. Comunicación ModBus del Filtro Activo ECOsine [14]

ModBus define un espacio de direcciones para operaciones de E/S entre un dispositivo maestro y esclavo. Todos los valores de medida y parámetros establecidos para el filtro activo comercial se identifican con un número de parámetro como se puede ver en la Figura 17

Figura 17: Lista de parámetros del Filtro Shaffner ECOsine

Parámetro	Dir. ModBus	Designación
20	200	Estado_FILTRO (4= Full_Load)
101	1010	THDi [%]
102	1020	Factor de Potencia
120-122	1200-1220	Corriente de línea rms L1, L2, L3 [A]
147	1470	Corriente de línea rms Neutro [A]
400	4000	Compensación Potencia Reactiva [0-100%]
405	4050	Balaceo de Carga 0 → OFF 1 → ON
410	4100	Compensación Armónica 0 → OFF 1 → ON
411- 434	4110- 4340	Compensación de H3 a H49 (armónico 3-49) [%]
700	7000	Selección FFT 0 = corriente de Línea 1 1 = corriente de Línea 2 2 = corriente de Línea 3 3 = corriente de Neutro
701 - 749	7010 - 7490	FFT H1 a H49 [A]

IV-B. DSC con comunicación Modbus Serie RS-485

La Figura 18 muestra el diagrama de bloques de la comunicación serial entre el DSC y el filtro activo, el dispositivo MAX485 convierte las señales TTL de salida del DSC en señales diferenciales compatibles con el estándar RS-485. Esta conversión la hace de manera bidireccional.

Figura 18: Diagrama de Bloques de la comunicación entre el DSC y el Filtro Activo Shaffner Ecosine Active



Para la comunicación mediante el protocolo Modbus el DSC actúa como Maestro en la comunicación Modbus y el filtro activo actúa como Esclavo teniendo en cuenta que la dirección Modbus del filtro activo Shaffner Ecosine Active es la ID 1, la tasa de transición es de 38400 baudios, paridad (NO) y bit de parada (1) tanto en el código objetos Modbus como en el filtro activo.

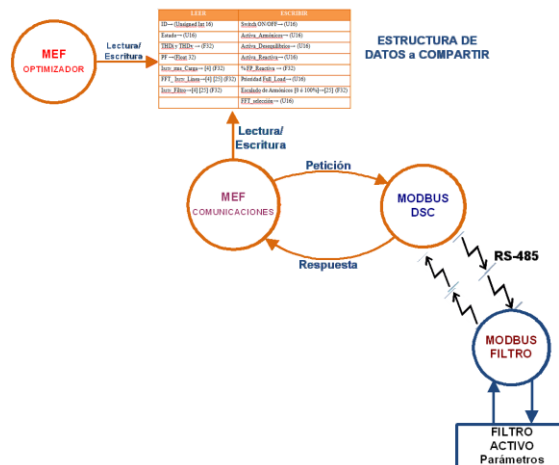
V. Implementación del sistema experto

V-A. Algoritmo para el Sistema Experto Propuesto

El algoritmo experto que se implementó sobre la plataforma LAUNCHXL-F28069M fue desarrollado con la Herramienta Code Composer Studio v6.1.2.

La Figura 19 muestra la solución implementada para el desarrollo de este proyecto, donde el bloque MEF OPTIMIZADOR es el algoritmo experto implementado con máquinas de estado finitas. El bloque MEF Comunicaciones que muestra la Figura 20 es una máquina de estados que se encarga de realizar la comunicación Modbus con el filtro activo. Estos dos bloques comparten una estructura de datos donde se almacenan las variables o parámetros del filtro activo requeridos por el algoritmo experto.

Figura 19: Diagrama General de la solución adoptada para la implementación del Sistema Experto



V-A1. MEF OPTIMIZADOR: La Figura 21 muestra la máquina de estados finitos MEF OPTIMIZADOR.

Basados en [1] donde se realiza el estudio del comportamiento de la carga en el sistema, para el desarrollo del Sistema Experto se ha tomado en consideración que los desequilibrios son muy altos en las horas de trabajo, por lo que se compensa primero desequilibrios, luego de esto se compensara las ineficiencias ocasionadas por la distorsión armónica y finalmente se compensara el factor de potencia de desplazamiento ocasionado por la potencia reactiva, ya que el sistema cuenta con un banco de capacitores que mantiene el factor de potencia en un nivel superior a 0.95. Por esta razón el Sistema Experto compensa las ineficiencias del sistema en el siguiente orden:

1. Desequilibrios.
2. Armónicos.
3. Reactiva.

Para el desarrollo del sistema Experto se utiliza una máquina de estados finitos. El primer estado es ACTIVO donde comprueba que el Filtro Activo este en modo de operación, mientras el filtro este apagado o no esté trabajando se mantendrá en este estado hasta que el filtro este activo. Si el filtro esta activo se transita al segundo estado llamado DESEQUILIBRIOS.

En el estado DESEQUILIBRIOS (Figura 22) si el filtro activo se encuentra en Full Load (plena carga), este compensará los desequilibrios en la red con toda la capacidad que tiene disponible y se desactivan las compensaciones de Armónicos y Reactiva, esto hace también que se regrese al estado anterior para verificar que el filtro este activo. Caso contrario si es que el filtro no llega a Full Load significa que todavía hay potencia disponible para compensar más ineficiencias del sistema, por lo que se transita al estado siguiente para compensar armónicos.

Figura 20: Diagrama de la máquina de estados de la comunicación para enviar y recibir parámetros para/del filtro activo.



Figura 21: MEF OPTIMIZADOR Algoritmo propuesto para el desarrollo del Sistema Experto

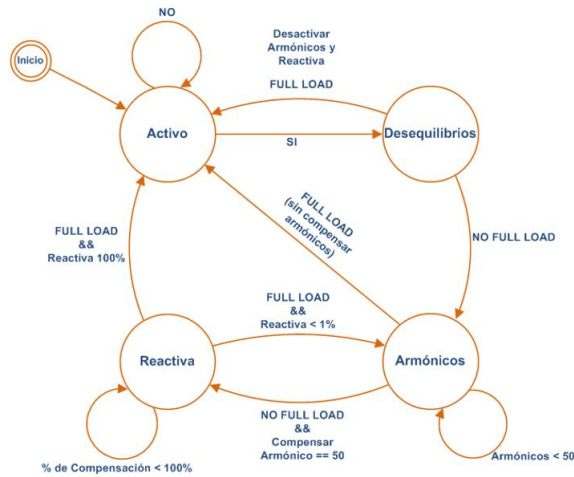
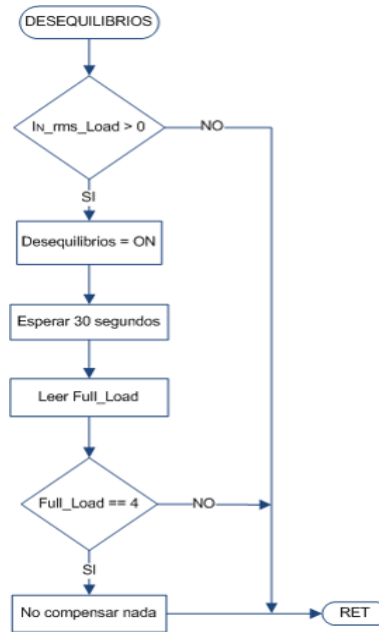


Figura 22: Diagrama de flujo del algoritmo implementado para la compensación de desequilibrios



En el Estado ARMÓNICOS (Figura 23) se compensa al 100 % los armónicos del 2 al 49 (solo impares) mientras el filtro no llegue a Full Load. En caso de que la variable Full Load se active, se transita al estado ACTIVO, ya que Full Load (Estado=4) puede activarse debido a un desequilibrio en el sistema, caso contrario si se compensan al 100% todos los armónicos hasta el 49 y aun la variable Full Load no se ha activado significa que todavía hay potencia disponible para compensar más ineficiencias, y se procede al último estado donde se realiza la compensación de energía reactiva.

En el último estado REACTIVA (Figura 24) se compensa la Energía Reactiva que haya en la red mediante un porcentaje de 0 a 100%, en caso de la variable Full Load se active y la compensación de reactiva sea menor del 1% significa que ha habido un cambio en los desequilibrios o en los armónicos y se procede a ir al estado ARMÓNICOS para reducir la compensación armónica. Caso contrario si la variable Full Load no se activa y ya se compensa toda la energía reactiva quiere decir que se ha compensado todas las ineficiencias de la red, y se vuelve al estado inicial de la máquina de estados finitos.

Figura 23: Diagrama de flujo del algoritmo implementado para la compensación de armónicos

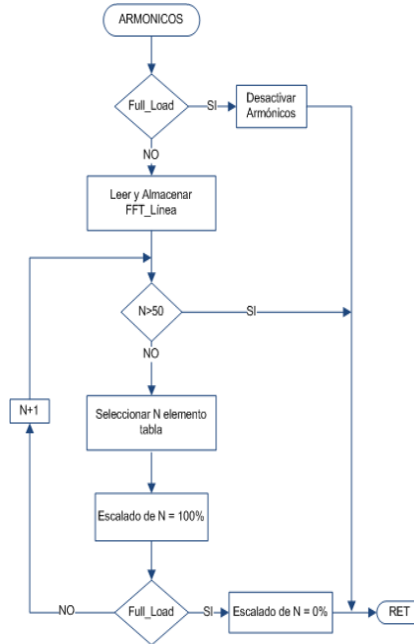
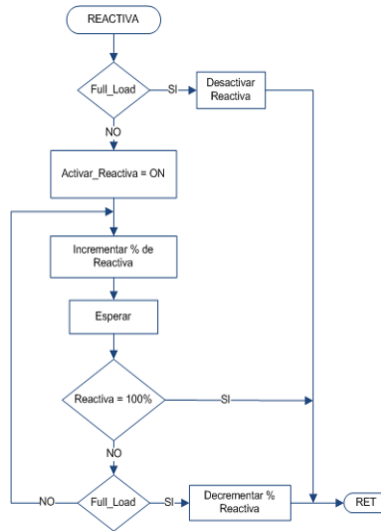


Figura 24: Diagrama de flujo del algoritmo implementado para la compensación de reactiva



VI. Resultados Experimentales

La Figura 25 muestra el comportamiento del sistema cuando no está conectado el filtro activo a la red.

La Figura 26 muestra el sistema cuando el filtro activo está conectado a la red eléctrica. En este estado se compensa el 1% de las componentes armónicas 3, 5, 7, 9, 11 y 13; por defecto se puede observar una mejora en los factores de THDi en la entrada de red.

La Figura 27 muestra la compensación únicamente de desequilibrios.

El compensador está en Full load, no es capaz de compensar toda la corriente de desequilibrios, la corriente de compensación de desequilibrios es escalada, se observa una mejora en el equilibrado de las corrientes de línea y un empeoramiento de THDi, debido al escalados conjuntos de las corrientes de desequilibrio y la corriente armónica.

Figura 25: a) Corrientes de las Fases R, S y T del sistema con el filtro sin conectar. b) Distorsión armónica total de corriente en las fases R, S y T con el filtro sin conectar.

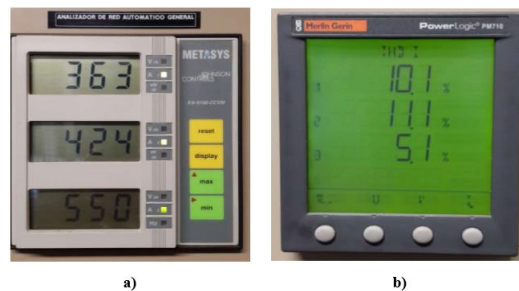


Figura 26: Figura 6.2. a) Corrientes de las Fases R, S y T del sistema con el filtro conectado a la red. b) Distorsión armónica total de corriente en las fases R, S y T con el filtro conectado a la red.

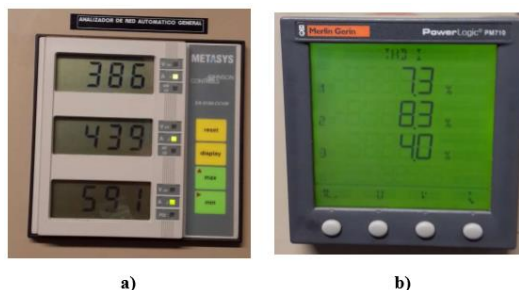
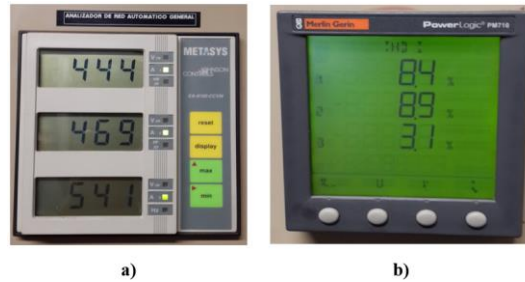


Figura 27: a) Corrientes de las Fases R, S y T del sistema con el filtro compensando desequilibrios. b) Distorsión armónica total de corriente en las fases R, S y T con el filtro compensando desequilibrios.



La tabla VII muestra las medidas de los principales armónicos en el sistema, se obtienen las siguientes amplitudes para cada una de las componentes armónicas en la entrada de línea.

Tabla VII: Principales armónicos en el sistema

ARMONICO #	MAGNITUD [A]
3	35 [A]
5	16
7	6
9	10
11	4

En la Figura 28 se puede ver únicamente la compensación del Armónico 3 al 100%, se muestra el valor de THDi de cada una de las fases (R, S y T) de la red.

Figura 28: THDi del sistema después de compensar el tercer armónico



En la Figura 29 se puede ver el valor de THDi de cada una de las fases de la red (R, S y T) cuando se compensan los armónicos 3 y 7.

Figura 29: THDi del sistema después de compensar el tercer y séptimo armónico



En la Figura 30 se puede ver el valor de THDi de cada una de las fases de la red (R, S y T) cuando se compensan todos los armónicos

Figura 30: THDi del sistema después de compensar todos los armónicos



Como se observa en la Figura 31 la potencia reactiva no es necesario compensarla con el filtro activo, ya que existe una batería de condensadores conectada a la carga y en todos los casos el factor de potencia fue cercano a la unidad.

Figura 31: Factor de Potencia del Sistema



Conclusiones

- Las simulaciones realizadas en Matlab simulan el comportamiento de un filtro activo selectivo siguiendo el orden del criterio de compensación planteados para el algoritmo experto que es compensar las ineficiencias de desequilibrios, armónicos y reactiva.
- Se logro implementar exitosamente la comunicación entre el filtro activo Shaffner ECOsine Active FN 3430-60-400-4 y el DSC, mediante una interfaz serie RS485 y el protocolo de comunicación Modbus.
- Se pudo comprobar el correcto funcionamiento del sistema experto una vez implementado en el DSC compensando desequilibrios y armónicos. Obteniendo una optimización de la capacidad del filtro y su adaptación a los cambios de la carga.

Mejoras para el futuro

- Compensación parcial de cada uno de los armónicos.
- Extender el sistema experto para manejar más escenarios.
- Elaboración de un software de comunicación para monitorizar las variables en un PC remoto. Para que el usuario final dispusiera de una interfaz (WIFI, USB o MODBUS).
- Utilizar otros sistemas de medida de la red para obtener más datos y mejorar las decisiones del sistema experto (analizadores de red conectados en el PCC).

Referencias

1. SEGUI COTANO, MARTIN, Application of an active harmonic filter in building 8G of the UPV for the improvement of the electrical power quality in the low distribution network, 73 pags, 2016.
2. <http://www.schaffner.com> MANUAL SHAFFNER HARMONIC FILTERS, FN 3420/ FN 3430.
3. ORTS GRAU, SALVADOR, GIMENO SALES, FRANCISCO JOSÉ, ABELLAN GARCÍA, ANTONIO SEGUI CHILET, SALVADOR, ALCANIZ FILLOL, MIGUEL MASOT PERIS, RAFAEL, Nuevo compensador activo basado en la IEEE Std. 1459., IEEE Latin America Transactions. 4, pp. 38 - 46. 2006. ISSN 1548-0992
4. ORTS GRAU, SALVADOR, GIMENO SALES, FRANCISCO JOSÉ, SEGUI CHILET, SALVADOR, ABELLAN GRACÍA, ANTONIO, ALCANIZ FILLOL, MIGUEL, MASOT

- PERIS, RAFAEL, Selective shunt active power compensator applied in four-wire electrical systems based on IEEE Std. 1459., IEEE Transactions on Power Delivery. 23, pp. 2563-2574. 2008. ISSN 0885-8977. DOI:10.1109/TPWRD.2008.923414
5. MUÑOZ GALEANO, NICOLAS, ORTS GRAU, SALVADOR, SEGUI CHILET, SALVADOR, GIMENO SALES, FRANCISCO JOSÉ , LOPEZ LEZAMA, JESUS MARÍA, Deterministic Algorithm for Selective Shunt Active Power Compensators According to IEEE Std. 1459., Energies. 10, pp. 1 - 14. 2017. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en10111791
 6. CASTILLO, ENRIQUE, Filtros Activos de Potencia para la Compensación Instantánea de Armónicos y Energía Reactiva, 250 pags.
 7. CASARAVILLA, GO N Z A L O, INDA, JO S É , BARBAT, GABRIEL , Estabilidad de Filtros Activos Shunt Selectivos Aplicados en Cargas con Compensación de Reactiva, 7 pags.
 8. ASIMINOAEI, LUCIAN, BLAABJERG, FREDE, HANSEN, STEFFAN , Evaluation of Harmonic Detection Methods for Active Power Filter Applications, 7 pags.
 9. CASTELBLANCO, NELFOR, Filtros Activos: Control por DSP de un Filtro Activo para la compensación de Corrientes Armónicas, 113 pags, Bucaramanga 2006.
 10. CASTILLO, ENRIQUE, GUTIÉRREZ, JOSÉ , HADI, ALI, Sistemas Expertos y Modelos en Redes Probabilísticas, 639 pags, USA.
 11. MUNERA, LUIS EDUARDO, Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos, artículo de la conferencia sobre inteligencia artificial dictada en el ICESI, 20 pags, 1990.
 12. GUERRERO, VICENTE, YUSTE, RAMÓN, MARTÍNEZ, LUIS, Comunicaciones Industriales, 410 pags, 2010.
 13. <http://www.modbus.org>, Technical Resources, MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02, 2006, 44 pags.
 14. SHAFFNER ECOSINE ACTIVE HARMONIC FILTERS, MODBUS Data Type Definition (rev. 05), 13 pags, Suiza 2011.

References

1. SEGUI COTANO, MARTIN, Application of an active harmonic filter in building 8G of the UPV for the improvement of the electrical power quality in the low distribution network, 73 pages, 2016.
2. <http://www.schaffner.com> SHAFFNER HARMONIC FILTERS MANUAL, FN 3420 / FN 3430.
3. ORTS GRAU, SALVADOR, GIMENO SALES, FRANCISCO JOSE', ABELLAN GARCÍA, ANTONIO SEGUI CHILET, SALVADOR, ALCANIZ FILLOL, MIGUEL MASOT PERIS, RAFAEL, New active compensator based on IEEE Std. 1459., IEEE Latin America Transactions. 4, pp. 38 - 46. 2006. ISSN 1548-0992
4. ORTS GRAU, SALVADOR, GIMENO SALES, FRANCISCO JOSÉ, SEGUI CHILET, SALVADOR, ABELLAN GRAC'IA, ANTONIO, ALCANIZ FILLOL, MIGUEL, MASOT PERIS, RAFAEL, Selective shunt active power compensator applied in four-wire electrical systems based on IEEE Std. 1459., IEEE Transactions on Power Delivery. 23, pp. 2563-2574. 2008. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109 / TPWRD.2008.923414
5. MUÑOZ GALEANO, NICOLAS, ORTS GRAU, SALVADOR, SEGUI CHILET, SALVADOR, GIMENO SALES, FRANCISCO JOSÉ, LOPEZ LEZAMA, JESUS MARÍA, Deterministic Algorithm for Selective Shunt Active Power Compensators According to IEEE Std. 1459., Energies. 10, pp. 1 - 14. 2017. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390 / en10111791
6. CASTILLO, ENRIQUE, Active Power Filters for Instant Compensation of Harmonics and Reactive Energy, 250 pages.
7. CASARAVILLA, GONZALO, INDA, JOSÉ, BARBAT, GABRIEL, Stability of Active Selective Shunt Filters Applied in Loads with Reactive Compensation, 7 pags.
8. ASIMINOAEI, LUCIAN, BLAABJERG, FREDE, HANSEN, STEFFAN, Evaluation of Harmonic Detection Methods for Active Power Filter Applications, 7 pages.
9. CASTELBLANCO, NELFOR, Active Filters: DSP Control of an Active Filter for the compensation of Harmonic Currents, 113 pages, Bucaramanga 2006.
10. CASTILLO, ENRIQUE, GUTIÉRREZ, JOSÉ, HADI, ALI, Expert Systems and Models in Probabilistic Networks, 639 pages, USA.
11. MUNERA, LUIS EDUARDO, Artificial Intelligence and Expert Systems, article of the conference on artificial intelligence given at ICESI, 20 pages, 1990.

12. GUERRERO, VICENTE, YUSTE, RAMÓN, MARTÍNEZ, LUIS, Industrial Communications, 410 pages, 2010.
13. <http://www.modbus.org>, Technical Resources, MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02, 2006, 44 pages.
14. SHAFFNER ECOSINE ACTIVE HARMONIC FILTERS, MODBUS Data Type Definition (rev. 05), 13 pages, Switzerland 2011.

Referências

1. SEGUI COTANO, MARTIN, Aplicação de um filtro harmônico ativo na construção 8G da UPV para a melhoria da qualidade da energia elétrica na rede de baixa distribuição, 73 páginas, 2016.
2. <http://www.schaffner.com> MANUAL DE FILTROS HARMÔNICOS DO SHAFFNER, FN 3420 / FN 3430.
3. ORTS GRAU, SALVADOR, GIMENO SALES, FRANCISCO JOSE', ABELLAN GARCÍA, ANTONIO SEGUI CHILET, SALVADOR, ALCANIZ FILLOL, MIGUEL MASOT PERIS, RAFAEL, Novo compensador ativo baseado no IEEE Std. 1459., IEEE Latin America Transactions. 4, pp. 38 - 46. 2006. ISSN 1548-0992
4. ORTS GRAU, SALVADOR, GIMENO SALES, FRANCISCO JOSÉ, SEGUI CHILET, SALVADOR, ABELLAN GRACÍA, ANTONIO, ALCANIZ FILLOL, MIGUEL, MASOT PERIS, RAFAEL, Compensador de potência ativa de derivação seletiva aplicado em sistemas elétricos de quatro fios baseados no IEEE Std. 1459., Transações IEEE no fornecimento de energia. 23, pp. 2563-2574, 2008. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109 / TPWRD.2008.923414
5. MUÑOZ GALEANO, NICOLAS, ORTS GRAU, SALVADOR, SEGUI CHILET, SALVADOR, VENDAS GIMENO, FRANCISCO JOSÉ, LOPEZ LEZAMA, JESUS MARÍA, Algoritmo determinístico para compensadores de potência ativa de derivação seletiva de acordo com a norma IEEE 1459., Energias. 10, pp. 1 - 14. 2017. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390 / pt10111791
6. Filtros de potência ativos CASTILLO, ENRIQUE, para compensação instantânea de harmônicos e energia reativa, 250 páginas.

7. CASARAVILLA, GO NA Z A L O, INDA, JO S, BARBAT, GABRIEL, Estabilidade de filtros de derivação seletivos ativos aplicados em cargas com compensação reativa, 7 pags.
8. ASIMINOAEI, LUCIAN, BLAABJERG, FREDE, HANSEN, STEFFAN, Avaliação de métodos de detecção de harmônicos para aplicações de filtro ativo de energia, 7 páginas.
9. CASTELBLANCO, NELFOR, Filtros ativos: Controle DSP de um filtro ativo para compensação de correntes harmônicas, 113 páginas, Bucaramanga 2006.
10. CASTILLO, ENRIQUE, GUTIÉRREZ, JOSÉ, HADI, ALI, Sistemas e modelos especialistas em redes probabilísticas, 639 páginas, EUA.
11. MUNERA, LUIS EDUARDO, Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas, artigo da conferência sobre inteligência artificial proferida no ICESI, 20 páginas, 1990.
12. GUERRERO, VICENTE, YUSTE, RAMÓN, MARTÍNEZ, LUIS, Comunicações Industriais, 410 páginas, 2010.
13. <http://www.modbus.org>, Recursos técnicos, MODBUS sobre guia de especificação e implementação de linha serial V1.02, 2006, 44 páginas.
14. FILTROS HARMÔNICOS ATIVOS À ECOSINA SHAFFNER, MODBUS Data Type Definition (rev. 05), 13 páginas, Suíça 2011.

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).