

Regulación del voltaje en inversores UPS (Uninterruptible Power Supply) mediante un controlador basado en redes neuronales¹

Ing. Israel Espinosa Martínez

Escuela de Ingeniería

UNIVERSIDAD LA SALLE

Isra801@hotmail.com

Asesor: Octavio Rodríguez Torres

[Recibido: Abril de 2004. Aceptado: Mayo de 2004](#)

RESUMEN

En los sistemas eléctricos de potencia, existen diferentes fenómenos que distorsionan la forma de onda del voltaje que se utiliza en aplicaciones críticas, estas distorsiones han cobrado muchas vidas por no saber controlarlas, reducirlas o eliminarlas de forma segura. Es necesario suministrar energía de forma eficiente y segura, no sólo a procesos automatizados y de precisión sino también a aplicaciones de calidad y médicas como una sala quirúrgica o en algún instrumento cuya precisión en sus reportes de lectura dictaminan si una persona sigue con vida o necesita someterse a una operación.

Palabras claves: electrónica de potencia, distorsiones electricas, control por redes neuronales.

ABSTRACT

Within power electric systems there are different phenomena that distort the voltage wave shape used in critical applications. These distortions have cost a lot of lives by not knowing how to control them, reduce them, or eliminate them under a safe way. It is necessary to supply power efficiently and safely, not only to automated and precision processes but also to quality and medical applications such a as a surgery room or to some instrument accurate enough as to determine whether a person is still alive or needs to go into surgery.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la electrónica de potencia ha sido útil en el ámbito de la calidad y ahorro de energía proporcionando equipos que funcionan de manera extremadamente rápida, consumen menor energía y tienen mayor eficiencia que los equipos convencionales; sin embargo, la tecnología aunada a la comodidad y necesidad del hombre ha provocado el desarrollo de equipo cada vez más sofisticado, como rectificadores de 6 pulsos, UPS (*Uninterruptible Power Supply*), computadoras de control extra rápidas, etc, cuyo efecto es altamente dañino a los sistemas eléctricos debido a que son fuentes generadoras de corrientes eléctricas que circulan por toda la red eléctrica a frecuencias extremadamente

¹ Trabajo ganador de la Medalla "Hno. Salvador González 2004", Área Ingeniería y Tecnología, Nivel Licenciatura, Categoría Avanzada, XI Jornadas de Investigación, Universidad La Salle, Abril 2004.

altas, provocando gran daño a los equipos de suministro, protección y medición, tales corrientes se denominan ondas armónicas.

Las ondas armónicas son ondas de corriente con frecuencias múltiplos de la frecuencia de línea y son extremadamente dañinas para el sistema de suministro eléctrico, provocando ineficiencia, pérdidas por calentamiento de los circuitos, activación no deseada de circuitos de protección, lecturas erróneas en equipos de precisión, etc.

Para algunos equipos antiguos o aquellos que requieren para su operación una señal senoidal, no trabajarán adecuadamente con una señal distorsionada y si se trata de equipos de medición, éstos proporcionarán lecturas erróneas. Un UPS es un dispositivo que emplea electrónica de potencia y se utiliza para proporcionar energía eléctrica limpia (onda de voltaje sin distorsión) cuando llega a fallar el suministro principal de energía, con el propósito de entregar energía eléctrica a la carga de forma constante.

Sin embargo, el UPS está compuesto además de otros circuitos de un inversor, que no es capaz de entregar energía limpia cuando se le aplican cargas no lineales, como una computadora o un rectificador trifásico industrial.

Una carga lineal es aquella que demanda una corriente de forma senoidal, sin embargo, las cargas no lineales son aquellas que contienen generalmente elementos de conmutación de alta velocidad, cuyo desempeño demanda corrientes de forma no senoidal.

El esquema básico de los componentes de un UPS se muestra en la figura 1.

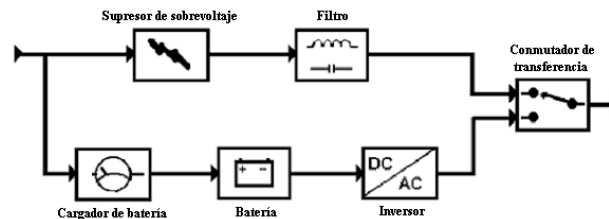


Figura 1. Esquema general de un UPS

La figura 1 muestra que en un UPS la energía eléctrica pasa por un supresor de voltaje para eliminar picos de alta frecuencia y ruido eléctrico y al mismo tiempo carga la energía de un banco de baterías. Cuando el interruptor se encuentra en la posición que indica la figura, la energía eléctrica entregada a la carga es la misma que proviene del suministro de energía pero filtrada, es decir, antes de la carga pasa por un filtro que se encarga de conservar la forma de onda.

Cuando ocurre una falla en el suministro principal de energía, el interruptor conmuta (cambia de posición) para poder descargar la energía del banco de baterías a través del inversor, el cual se encarga de convertir la energía de corriente directa (CD) que proporciona el banco de baterías en energía de corriente alterna (CA) que es la que generalmente usan las cargas eléctricas, lográndose de esta manera una continuidad de energía sin interrupciones.

Sin embargo, los inversores de las UPS no son capaces de proporcionar un voltaje senoidal cuando operan bajo condición de carga no lineal y generan corrientes armónicas de frecuencias demasiado altas, por lo tanto, se requiere tener control de la forma de la señal senoidal para que ésta tenga la menor distorsión. Se han hecho muchos intentos para poder solucionar este problema pero algunos de ellos todavía están

en desarrollo. Se sabe que un sistema de control podría ser de utilidad para corregir dicha distorsión de manera favorable, pero un controlador convencional no resultaría útil para esto, debido a que necesita de un modelo matemático que describa el comportamiento del sistema.

El modelo matemático no puede obtenerse con facilidad porque no se conoce el comportamiento del sistema cuando cambia el tipo de carga aplicada. Existen diversas alternativas para controlar sistemas no lineales, entre ellas se encuentran los controladores que utilizan lógica difusa, redes neuronales y algoritmos genéticos, cada uno de ellos posee características particulares de control.

Se empleará la alternativa de un controlador basado en redes neuronales, porque entre sus características se encuentran el copiar esquemáticamente la estructura del cerebro humano y simular algunas de sus funciones como la gran capacidad de memoria, la adaptación al entorno, la capacidad de aprender de la experiencia y la tolerancia a fallos. Pero, la más importante es que puede emplearse como un estimador del modelo matemático del sistema y cuando cambien las condiciones en la carga, este controlador tiene que ser capaz de estimar el modelo matemático y controlar su comportamiento reduciendo la distorsión en la señal de salida.

Una neurona artificial es una unidad de procesamiento de información que es fundamental para la operación de una red neuronal. En la figura 2 se muestra la forma más común de una neurona biológica y en la figura 3 se muestra el modelo no lineal de una neurona artificial, con el propósito de hacer una analogía.

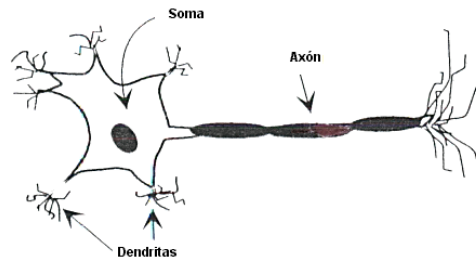


Figura 2. Forma típica de una neurona biológica

La figura 2 muestra que la neurona está formada por las dendritas, que son las encargadas de recibir información; el soma, que es donde se llevan a cabo las operaciones moleculares y biológicas; y, el axón, que es el canal de comunicación con otras neuronas.

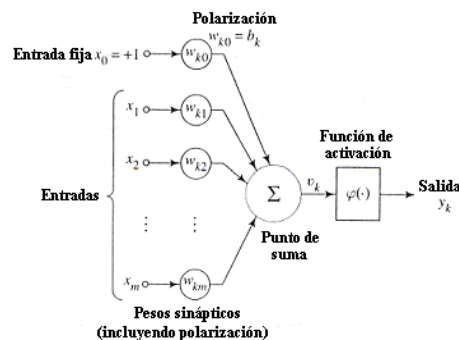


Figura 3. Modelo no lineal de una neurona artificial

La figura 3 muestra que una neurona artificial se asemeja a una neurona natural en que ambas tienen (como sucede normalmente en cualquier sistema) canales de entrada,

elementos de procesamiento o de cálculo y canales de salida, es decir, en la neurona biológica los canales de entrada son las dendritas y en la neurona artificial son terminales (cables, alambres, etc) por donde circulan las señales eléctricas, el elemento de cómputo en la neurona biológica es el soma, mientras que en la artificial es un elemento sumador (circuito electrónico) y finalmente el canal de salida en la neurona biológica es el axón y en la neurona artificial es una terminal o un cable.

Para poder tener un buen desempeño en el control de un inversor UPS y reducir significativamente los costos, se debe seleccionar la estructura de la red neuronal de forma adecuada.

Se proponen circuitos electrónicos, que una vez interconectados, tienen un funcionamiento análogo a la red neuronal artificial.

Primeramente se determina la importancia de las entradas de la red neuronal mediante el uso del programa *Neuro Shell Predictor*, de acuerdo con esto, se selecciona la red neuronal (número de entradas suficientes, número de capas ocultas y una salida).

Después se entrena dicha red en el modo fuera de línea y se obtienen los valores correspondientes de los pesos sinápticos, una vez hecho esto, se diseñan los circuitos generadores de sigmoide (función con la que operan generalmente las neuronas artificiales) y se interconecta el número de neuronas correspondiente para armar la red neuronal.

La figura 4 muestra los resultados obtenidos después de ejecutar el programa para determinar la importancia de las entradas.

El criterio utilizado para dicha selección se basó en valores entre uno y cero, es decir, si algún parámetro muestreado resultaba con un valor de importancia de cero, no se tomaba en cuenta y se eliminaba de la muestra, debido a que el tamaño de la red no se ve influenciada por su presencia.

Es por eso que en la figura cuatro sólo se muestran los valores más importantes y los demás parámetros se eliminaron definitivamente.

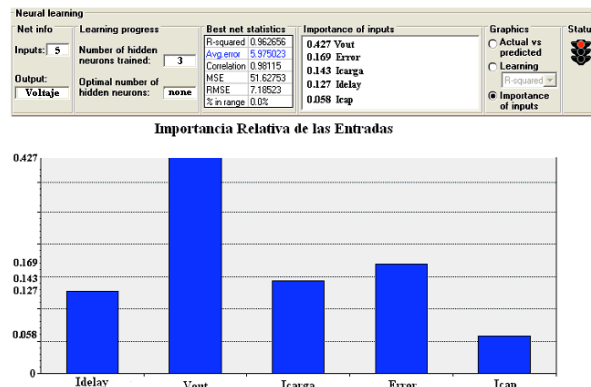


Figura 4. Gráfica de la importancia de las entradas de la red neuronal

La figura 5 muestra el circuito analógico de la red neuronal previamente entrenada, así como las entradas para las señales muestreadas y la salida de la señal deseada.

También se muestra que los valores que contienen los dispositivos discretos son fijos, es decir, se entrenaron para una cierta condición de carga no lineal y pueden llegar a cambiar si las condiciones de carga así lo ameritan.

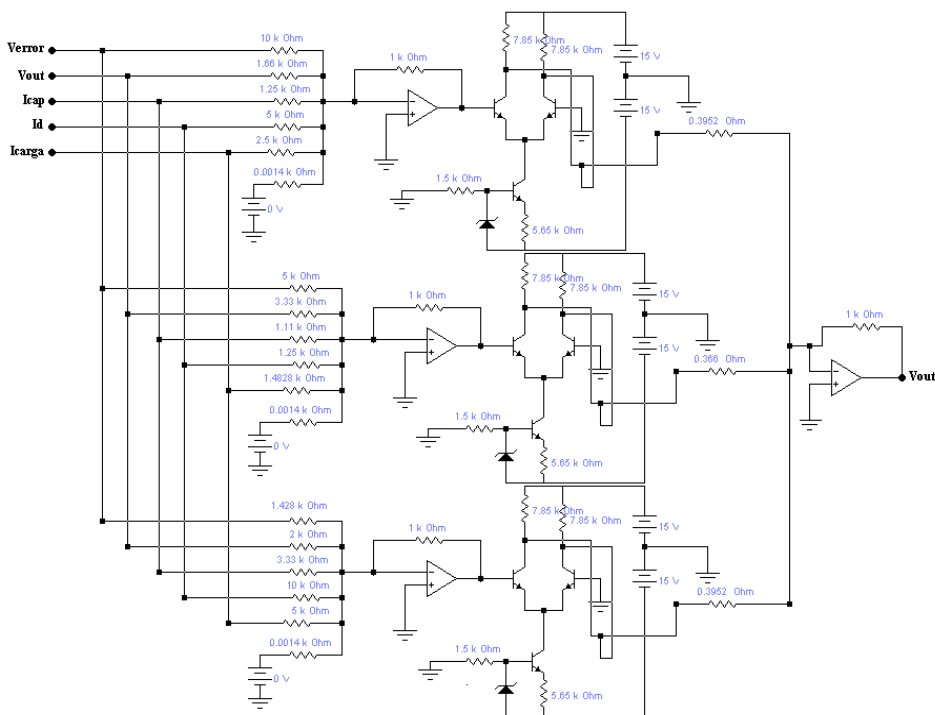


Figura 5. Circuito analógico de la red neuronal

El objetivo del inversor en el UPS es proporcionar un voltaje senoidal de CA, cuya magnitud y frecuencia puedan controlarse por medio de la modulación del ancho de pulso en sus interruptores electrónicos.

Una señal modulada en pulso es una onda cuadrada, ya sea unipolar o bipolar, que tiene un ciclo de trabajo variable, dicha señal se inyecta a los dispositivos de conmutación (interruptores electrónicos del inversor) para poder obtener una señal lo más parecida a una senoide.

La figura 6 muestra una señal PWM (*Pulse Width Modulated*)

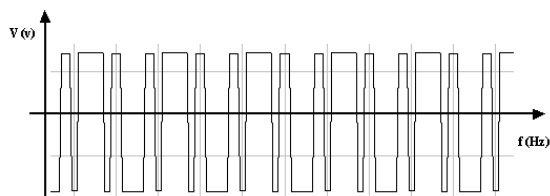


Figura 6. Señal PWM

La figura anterior muestra que una señal PWM tiene un ciclo de trabajo variable, el cual sirve para controlar la apertura o cierre de los circuitos de conmutación, es decir, si la señal tiene un voltaje positivo, el dispositivo de conmutación permanecerá cerrado el tiempo que dure la señal con dicho voltaje positivo y, si la señal tiene un cambio a voltaje

negativo, el interruptor se abrirá y permanecerá abierto el tiempo que dure la señal con el voltaje negativo.

La figura 7 muestra el circuito del inversor modulado en PWM.

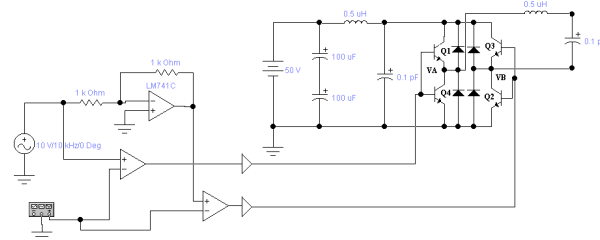


Figura 7. Circuito inversor modulado en PWM

La figura 7 muestra también el control para generar la señal PWM, que emplea un circuito generador de senoide y un circuito generador de onda triangular, cuyas señales alimentan después a circuitos comparadores para generar la señal PWM.

La figura 8 muestra el proceso de comparación de dichas señales.

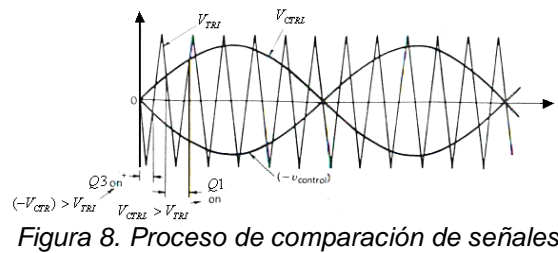


Figura 8. Proceso de comparación de señales

La figura 9 muestra el esquema de control propuesto para reducir de manera significativa el efecto de las corrientes armónicas y mejorar la forma de onda senoidal para obtener energía limpia.

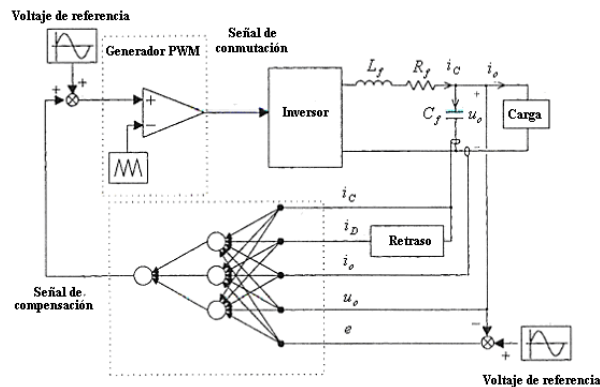


Figura 9. Esquema de control basado en redes neuronales

La figura anterior muestra que si se desea obtener un voltaje senoidal a la salida del sistema, de la misma forma que el voltaje de referencia, se tiene que generar una señal PWM para poder controlar la apertura y cierre de los interruptores del inversor, es por eso que se compara una señal senoidal con una triangular por medio de un circuito electrónico comparador. Una vez obtenida esta señal, servirá de entrada al inversor y éste generará su voltaje senoidal.

Es necesario tomar muestras significativas de voltaje y corriente de salida (corriente del capacitor, voltaje de salida, error de voltaje, corriente del capacitor retrasada y corriente de carga) para que sirvan como señales de entrada al controlador basado en redes neuronales (previamente entrenado) y éste haga las correcciones necesarias para obtener una señal de salida, la cual tiene que ser muy parecida a la de referencia, ya que después se compararán y la diferencia (error) servirá como señal actuante para generar la señal PWM adecuada.

El controlador propuesto sólo se utilizará para condiciones de carga fija, por lo tanto, si en algún momento llegara a cambiar la condición de carga, se tendrán que recalcular los valores de entrenamiento, además de modificar el circuito analógico de la red neuronal.

Sin embargo, en situaciones reales las condiciones de carga cambian y este tipo de controlador resultaría muy lento para llevar a cabo el control. En ese caso, se tendría que emplear un entrenamiento en línea y usar circuitos electrónicos que tengan la capacidad de adaptar sus valores cada vez que se requiera.

La forma de onda de voltaje que proporciona un inversor bajo la aplicación de carga no lineal se muestra en la figura 10.

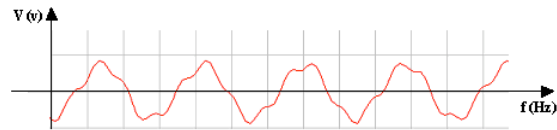


Figura 10. Forma de onda de voltaje distorsionada proporcionada por un inversor

Al aplicar el esquema de control la forma de onda de voltaje resultante tiene la forma mostrada en la figura 11.

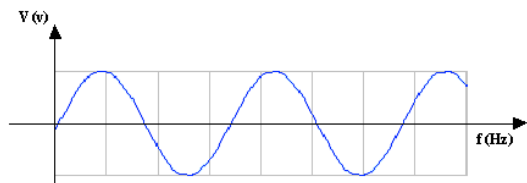


Figura 11. Onda de voltaje corregida después de la aplicación del controlador.

RESULTADOS

Se observó que una carga no lineal distorsiona el voltaje de salida, lo cual no es aceptable para las cargas críticas. Al momento de entrenar la red neuronal para estas condiciones de carga y colocarla como controladora de voltaje, se observa claramente cómo corrige la distorsión que tenía la señal de salida.

Si se desea cambiar las condiciones de carga, habrá que re entrenar la red con esas nuevas condiciones y ponerla a trabajar una vez entrenada.

Al realizar un análisis con un programa que emplea la transformada rápida de Fourier, se calculó una THD (*Total Harmonic Distortion*) de 9.45% en la señal distorsionada y, una vez aplicado el control, se calculó un THD de 1.22% en la señal corregida.

El THD es una manera de medir el contenido armónico de cualquier señal distorsionada y en la actualidad un valor aceptable de THD en una onda tiene que ser igual o menor a 5%.

Es decir, si una señal tiene un factor THD más del 5%, quiere decir que su distorsión puede causar problemas en un sistema eléctrico, sin embargo, si el TDH de dicha señal se encuentra por debajo del 5%, no causará problemas al sistema.

CONCLUSIONES

En la actualidad, la energía eléctrica es muy importante para numerosas actividades, constantemente se busca que sea de buena calidad y que esté disponible en cualquier momento que se le requiera.

Sin embargo, aunque las plantas generadoras de energía hacen su mejor esfuerzo por diseñar eficientemente sus sistemas de distribución y protegerlos de manera adecuada contra posibles fallas de diversa naturaleza, no quedan exentos de sufrir alguna anomalía, ya sea por fenómenos naturales o por algunas cargas que al entrar en operación distorsionan la señal del voltaje.

Por otra parte, con la demanda creciente de energía eléctrica debido al incremento de la población y el uso de equipo sofisticado de electrónica de potencia altamente eficiente, se ha ido incorporando poco a poco al dominio de las cargas no lineales, las cuales distorsionan el voltaje senoidal.

A pesar de que existen diversas propuestas para solucionar el problema de la distorsión de la señal senoidal, son escasas las propuestas de control inteligente, así que esta propuesta de solución mediante redes neuronales es una alternativa más.

Los países del primer mundo tienen tecnología de punta para solucionar este problema y venderlo a países subdesarrollados sin dar la menor pauta del funcionamiento o al menos de qué es lo que contiene ese sistema por dentro.

Por lo tanto, este trabajo fomenta el desarrollo tecnológico para México y así dar los pasos, poco a poco, hasta poder llegar algún día a desarrollar un sistema como los del primer mundo. Es necesario saber cómo está formado un sistema para poder desarrollarlo.

Se investigó por medio de la simulación que estos filtros ayudan a darle forma a la señal de salida del inversor, es decir, filtran algunas frecuencias parásitas y ruido en el sistema para limpiar la onda de salida.

Aunque el objetivo de este trabajo no es la implantación ni el entrenamiento en línea de la red, queda propuesta la idea y se describen circuitos integrados programables para poder llevar a cabo ese propósito en algún trabajo futuro que requiera usar esta tesis como sustento teórico o de referencia.

Se comprobó que al no estar controlado el sistema, la distorsión en la señal de voltaje es muy grande, sin embargo, se demostró que al aplicar el controlador propuesto, se logra reducir el valor THD de la señal distorsionada y corregir su forma de onda.

Se propuso y analizó un circuito electrónico acerca de la generación de una onda sigmoide mediante el uso de un par diferencial, se mostraron los resultados y graficas de la señal generada.

Este trabajo propone un controlador basado en redes neuronales tan simple como sea posible, para tener un bajo costo y un buen desempeño del mismo, verificando su comportamiento a través de una simulación. Aunque se dan pautas para una posible implantación del controlador, no se llevará a cabo.

Se realizaron diversas simulaciones mediante el uso de software para seleccionar el tamaño de la red neuronal, entrenarla fuera de línea y verificar el desempeño de la misma.

También se realizaron simulaciones para poder comprobar el funcionamiento por separado de todos los componentes que forman al sistema y para observar el comportamiento del sistema completo una vez controlado, comparando las formas de onda de la señal del voltaje antes y después del control.

El software se emplea para analizar y diseñar los circuitos electrónicos del sistema de control y verificar el funcionamiento de los inversores bajo carga no lineal controlados mediante la red neuronal.

En general, se propuso sólo la simulación y la ventaja de esto es que los valores de los componentes pueden modificarse en cualquier momento. Sin embargo, se planteó una representación analógica para el sistema de control que quizá sea más accesible que adquirir algún otro dispositivo de control.

BIBLIOGRAFÍA

Choi, Taura. *Digital control scheme of UPS inverters to improve the dynamic response*. Japan, McGrawHill, 1996.

Del Brío, Bonifacio. *Redes neuronales y sistemas borrosos*. España, McGrawHill, 2000.

Edminister, Joseph. *Circuitos eléctricos*. México, Schaum, 1999.

Freeman, James. *Redes neuronales, algoritmos, aplicaciones*. USA, Addison-Wesley, 1998.

Goodman, Hilbert. *The pharmacological basis and function of the human brain and its structure*. USA, McMillan, 1998.

Gottlieb, Irving. *Power supplies, switching regulators, inverters and converters*. USA, McGraw-Hill, 1995.

Grainer, John. *Análisis de sistemas de potencia*. USA, McGrawHill, 1997.