

Redes neuronales artificiales aplicadas al modelado de la máquina síncrona: una revisión

Artificial neural networks applied to synchronous machine modeling: a review

RENÉ ALEXANDER BARRERA

Ingeniero Electrónico, Magíster en Ingeniería Eléctrica. Investigador de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. rene.barrera@uis.edu.co

SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO

Ingeniera Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. saperez@utp.edu.co

JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

Ingeniero Electricista, Magíster en Potencia Eléctrica, Magíster en Tecnologías de la Información, Doctor en Tecnologías de la Información. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. jjmora@utp.edu.co

Clasificación del artículo: revisión (recreaciones)

Fecha de recepción: noviembre 18 de 2009

Fecha de aceptación: agosto 3 de 2010

Palabras clave: Identificación de parámetros, Máquina síncrona, Computación suave, Red neural artificial.

Key words: Parameter identification, Synchronous machine, Soft computing, Artificial neural networks.

RESUMEN

En este artículo se presenta una revisión bibliográfica de la utilización de computación suave o inteligencia artificial en el modelado e identificación de los parámetros de la máquina síncrona.

Especificamente, se enfatiza en la aplicación de las redes neuronales artificiales (RNA), las cuales han sido muy utilizadas debido a su alta capacidad para establecer una correlación entre conjuntos de datos de entrada/salida para sistemas no lineales.

De acuerdo con la revisión, las RNA han sido aplicadas en sistemas de identificación de los parámetros de la máquina, en sistemas de control y en el análisis de estabilidad de estado estable y transitorio. Como complemento, en la parte final del artículo se presentan brevemente otras metodologías de las cuales se han reportado resultados satisfactorios relacionados con el área de modelado e identificación de parámetros de la máquina.

ABSTRACT

This paper is devoted to present a bibliographic review of the application of soft computing techniques or artificial intelligence strategies in synchronous machine modeling and parameter identification.

Specifically, this paper is emphasized to the application of the artificial neural networks (ANN), due to the common use and their high capability to establish a correlation between the input and output sets in non linear systems.

According to the presented review, the ANN has been applied in parameter identification, control systems, transient and steady state stability analysis. As a complement, at the last part of the paper there is a brief description of other commonly used methodologies successfully applied in synchronous machine modeling and parameter identification.

1. Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia han tenido un gran desarrollo en los últimos años, debido al crecimiento de la población y a la necesidad de brindar un servicio eficiente y de mejor calidad. Asimismo, los sistemas de generación han experimentado una gran evolución, debido a que desempeñan un papel importante dentro del sistema de potencia. Esto ha motivado a desarrollar el análisis del comportamiento de los generadores síncronos bajo operación en estado estable y transitorio, utilizando los modelos más apropiados para la máquina, con el fin de realizar análisis de estabilidad sobre el sistema.

Casi ocho décadas después de la primera publicación del análisis y definición de parámetros en la máquina síncrona [1][2], el tema aún sigue siendo una atractiva y desafiante materia de investigación. Muchos modelos de la máquina síncrona han sido desarrollados empleando diversas aproximaciones y enfoques, para soslayar principalmente la sobrecarga computacional asociada a la compleja dinámica de estos sistemas y a la no linealidad inherente a la representación a gran escala. Probablemente, el modelo de la máquina síncrona más simple disponible para estudios de estabilidad es el que describe una sola máquina síncrona conec-

tada a una barra infinita, a partir de la ecuación de oscilación, usando el ángulo del par y la velocidad del rotor como variables de estado [3] [4]. Un modelo de descomposición de flujo que incluye una o más variables de estado, adicionalmente a las variables usadas en la ecuación de oscilación, fue ampliamente utilizado y discutido en [5]. Sin embargo, cuando es necesario un incremento en la complejidad de la representación, comúnmente se utiliza un modelo de orden cinco o siete para definir una máquina síncrona trifásica [6].

Los modelos simples de la máquina son adecuados para propósitos de análisis académico, pero no lo suficientemente exactos para predecir el desempeño de la máquina en aplicaciones reales, y para propósitos de control y evaluación de estabilidad en sistemas de potencia. En tales situaciones debe ser considerada la no linealidad en el modelo de la máquina, que se presenta debido a los efectos de saturación y flujo ligado, como se expresa en [4], [7]. Los estudios más específicos sobre las propiedades de la máquina síncrona, que presentan de manera detallada el modelo de los excitadores, proporcionan modelos más completos y complicados, que se han implementado para proveer una representación cada vez más exacta. Desafortunadamente, a medida que la complejidad en los modelos aumenta, estos se hacen inapropiados para aplicaciones en

línea y en tiempo real [8].

En un sistema de potencia, una máquina síncrona es un dispositivo no lineal de acción rápida y con múltiples entradas y salidas. Dado su amplio rango de operación, dinámica compleja, no-linealidad y configuración cambiante del sistema, la simulación para el análisis del sistema y evaluación de la estabilidad requiere un modelo muy exacto y, por ende, exige un alto costo computacional. Entre algunas de las metodologías utilizadas para solventar esta situación se encuentran las redes neuronales artificiales (RNA), las cuales han sido ampliamente utilizadas en la identificación y control de sistemas no lineales.

La idea de las RNA, originada en la década de los cuarenta, ha sido ampliamente empleada en aplicaciones del sector eléctrico y más específicamente en el modelado de la máquina síncrona. Se ha mostrado que esta técnica es una alternativa viable para la solución del problema de la exigencia computacional y de la complejidad del modelo [8], [9]. Las propiedades fundamentales de las RNA se analizan para determinar: a) si el modelo de la red neural puede ser entrenado con medidas disponibles de la máquina síncrona en funcionamiento y para diferentes condiciones de operación, b) cuáles deben ser los patrones de entrenamiento para el modelo de representación de la máquina síncrona, c) la capacidad de adaptación del modelo basado en RNA a los modelos matemáticos ya existentes del generador síncrono, para la evaluación de desempeño y valoración de la estabilidad dinámica, y d) la capacidad de generalización a partir de los casos de entrenamiento y exactitud en la respuesta para los casos del modelo basado en RNA que no han sido entrenados[10]. Adicionalmente, la utilización de RNA requiere la determinación de parámetros propios y arquitecturas definidas que a través del tiempo han sido propuestas y probadas en el modelamiento de la máquina [11], [12]. Considerando lo expuesto, existe una gran cantidad de publicaciones respecto al empleo de RNA en el proceso de modelamiento de la máquina síncrona. Por lo tanto, para el inicio de estudios en esta temática, se hace necesaria una recopilación bibliográfica de

la utilización de las RNA en el modelamiento de la máquina síncrona. Esta recopilación sirve como guía para todo aquel que desee emplear esta técnica de inteligencia artificial o incluso cualquier otra técnica afín al campo de la computación suave (algoritmos de aprendizaje, clasificadores bayesianos, máquinas de soporte vectorial, entre otros), para la representación de la máquina síncrona en estudios de estabilidad y análisis de sistemas de potencia.

Como contenido de este artículo se presenta en la sección 2 una breve descripción de las metodologías clásicas que se han utilizado para la identificación de parámetros de la máquina síncrona. La sección 3 está dedicada a la revisión de metodologías de estimación de parámetros con RNA. Posteriormente, en la sección 4 se ilustra el modelo de caja negra utilizado para la identificación de la dinámica de la máquina con RNA. En la sección 5 se mencionan las aplicaciones de las RNA en la determinación de estabilidad de sistemas eléctricos. En la sección 6 se presentan otras metodologías que han sido exitosas en la identificación de sistemas no lineales y, por ende, empleadas en el modelado de la máquina. Finalmente en la sección 7 se presentan las conclusiones derivadas de esta revisión bibliográfica.

2. Métodos tradicionales en determinación de parámetros de la máquina

Debido a la forma de construcción de la máquina en la cual existe una estructura conocida como estator, que presenta devanados distribuidos, y una estructura móvil denominada rotor en la cual se albergan los devanados de campo y de amortiguamiento – es necesario definir un sistema de referencia común a ambas estructuras. Esta referenciación se realiza en el modelo de Park [6]. Las ecuaciones de Park transforman las variables del estator trifásico en un nuevo marco de referencia que se mueve con el rotor. Las nuevas variables son expresadas en términos de los ejes directo d y en cuadratura q. La teoría clásica de la máquina síncrona utiliza esta transformación

para derivar los circuitos equivalentes y sus correspondientes parámetros. Este modelo es la base de la mayoría de los métodos tradicionales desarrollados para el modelamiento de la máquina síncrona.

Los métodos tradicionales de modelado de la máquina síncrona están bien especificados en el estándar IEEE 115 [13]. Estos métodos asumen que se tiene una estructura de la máquina síncrona conocida. En muchos casos, el tipo de ensayos que se proponen en dichas metodologías resultan poco prácticos, debido a que los datos determinados de esta forma solo tienen validez para una determinada condición de operación. Al ser implementados se necesita la desconexión de la máquina de la red, lo cual no es posible en todo momento ya que implicaría la no continuidad del suministro eléctrico y además, en algunos casos, se puede incurrir en costos elevados debido a la utilización de equipo especializado.

Entre los ensayos más comunes se encuentran la prueba de corto circuito y vacío, las pruebas de respuesta en frecuencia con rotor bloqueado (SSFR), respuesta en frecuencia de circuito abierto (OCFR), método a bajo deslizamiento, cortocircuito trifásico súbito, entre otras. Estas pruebas deben ser desarrolladas principalmente cuando la máquina está fuera de servicio [14-18].

Para solventar los defectos en los métodos tradicionales, los métodos de identificación basados en medidas en línea han ganado atención durante los últimos años [19-27]. Estos métodos pueden dividirse en dos categorías: en la primera, los parámetros físicos de la máquina son estimados a partir de medidas en línea, asumiendo una estructura conocida para la máquina síncrona (igual que los métodos tradicionales). A estos métodos se les suele llamar métodos de modelamiento tipo “caja gris”. La segunda categoría modela el generador síncrono como una “caja negra” usando datos de entrada y salida, con el fin de capturar la dinámica de la máquina. En los modelos del tipo caja negra, la estructura del modelo se asume como desconocida desde el principio y solo es importante la relación que existe entre el conjunto de datos de entrada y salida.

A continuación se realizará la presentación de la recopilación bibliográfica de los conceptos definidos anteriormente.

3. Estimación de parámetros de la máquina síncrona con RNA (modelo caja gris)

Básicamente, el empleo de RNA en la estimación de parámetros de la máquina síncrona busca incrementar la exactitud del modelo, sin abandonar la representación matemática con una estructura definida. A continuación se presentan algunos de los principales trabajos desarrollados en esta área.

Con el fin de aumentar el grado de confiabilidad en los modelos utilizados para la representación de la máquina síncrona, se ha estudiado la forma de incorporar los efectos de la saturación magnética sobre algunos modelos ya establecidos (modelo $d-q$). Esto, debido a que ante diversas condiciones de operación algunos parámetros de la máquina son altamente influenciados por los efectos del núcleo. Tal es el caso de [10], donde se presenta un modelo del generador síncrono de polos salientes que considera los efectos de saturación utilizando un modelo basado en RNA del tipo *feedforward*, el cual incluye diversas condiciones de carga de la máquina, diferentes niveles de excitación y diversos ángulos del rotor. Se estudia la característica no lineal de una máquina síncrona trifásica de polos salientes y valores nominales de 5kVA y 240 V, entrenando la RNA con datos de respuesta a pequeñas perturbaciones y el algoritmo de estimación de máxima probabilidad. Para este caso, el algoritmo *back-propagation* es utilizado como algoritmo de aprendizaje. Como resultado, se logra que el modelo desarrollado con la RNA brinde la posibilidad de ser utilizado para estudios de estabilidad transitoria, requiriendo pequeñas modificaciones computacionales en la representación del modelo de saturación.

De manera similar, en [17] se emplean RNA para estimación de parámetros de un generador síncrono

de rotor cilíndrico. Se consideran los efectos debidos al nivel de excitación, ángulo del rotor y potencia real generada. El entrenamiento de la red también se hace con datos reales de la máquina para pequeñas perturbaciones; sin embargo, a diferencia de [10], el modelo es validado con otros datos y grandes perturbaciones. Las propuestas presentadas en [10] y [17] utilizan las RNA para estimar el efecto de la saturación de la máquina reflejado en las inductancias del estator de eje directo y eje en cuadratura, l_{ad} y l_{qd} , respectivamente, en cada punto de operación. Por tanto, no se abandona el modelo matemático y solo se modifica la manera en que se hallan las reductancias para cada paso de tiempo en la simulación. Se resalta la utilización de los componentes de eje directo y cuadratura de la tensión y corriente en terminales, y la corriente de excitación como patrones de entrada a la red neuronal.

Por otro lado, una propuesta para la estimación de los principales parámetros del rotor de un generador síncrono de una gran turbina a vapor, basada en RNA, se presenta en [21]. Allí se emplean datos reales para el entrenamiento, que corresponden a las diferentes condiciones de carga y niveles de excitación. Como entrada se utiliza la media y la desviación estándar del ángulo de potencia y la corriente de excitación. El desempeño de la estimación de parámetros es validado con simulación exhaustiva en el dominio del tiempo y también mediante la comparación con los datos suministrados por el fabricante. Se demuestra que los modelos basados en RNA interpolan correctamente, para dar una respuesta adecuada cuando se utilizan como entradas los patrones no usados durante la etapa de entrenamiento.

Cuando se representa a la máquina por medio del modelo de ecuaciones de estado, generalmente las variables utilizadas son: las corrientes en el estator, las corrientes del devanado de campo y las de los circuitos del rotor, cada una de ellas referenciadas en los ejes d y q . Cuando todas estas variables son conocidas, es posible determinar el vector de parámetros de la máquina (resistencias e inductancias de cada uno de los circuitos rotor/estator),

mediante la utilización de algoritmos de estimación recursivos. Pero debido a la imposibilidad de medir directamente las corrientes en los circuitos del rotor, la anterior metodología se convierte en un proceso que requiere un alto esfuerzo computacional para la posible convergencia. Para solventar este problema, en [28] los autores proponen una metodología basada en crear observadores con RNA, que permitan determinar aquellas variables no medidas durante perturbaciones transitorias, para posteriormente determinar el vector de parámetros de la máquina. Los patrones de entrenamiento para la red neuronal son obtenidos a través de simulaciones realizadas sobre una máquina de 7.5kVA, 220V, 1800rpm, conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión. Las entradas a la red son las corrientes medidas, los enlaces de flujo del estator (que con anterioridad son obtenidos de las ecuaciones de voltajes del estator) y voltajes obtenidos durante perturbaciones de tipo transitorio. Las salidas corresponden a las corrientes de los circuitos del rotor. Una vez entrenada la red se procede a comprobar la efectividad de la implementación, al realizar la estimación en línea de las variables de estado para, posteriormente, determinar los parámetros de la máquina utilizando otro algoritmo de estimación. Los resultados obtenidos presentan una buena aproximación a los parámetros estimados, incluso cuando se tiene en cuenta el efecto de la degradación de los datos de entrada por el ruido.

En [29] los autores presentan un análisis más detallado que en [28], ya que ilustran la respuesta del observador ante el efecto de la variación en la inductancia del estator L_{ad} en la resistencia de campo R_{fd} y con ruido. Ante la inclusión de este último en los datos de entrada del sistema, se observó que es necesario fortalecer al observador mediante el aumento de mediciones retrasadas de las variables de estado, lo cual puede llegar a ser complicado al momento de entrenar la RNA, porque se incrementa el número de parámetros. En la conclusión final se hace énfasis en que la metodología no es de directa aplicación sobre máquinas de gran tamaño.

En [30], los autores consideran el problema de la estimación de parámetros de la máquina como un problema de reconocimiento de patrones. Por tal razón utilizan RNA, debido a su ampliamente difundida habilidad de ejecutar tareas de este tipo. El estudio está orientado a determinar los parámetros bajo condiciones de estado estable de máquinas de rotor cilíndrico y polos salientes. El conjunto de datos de entrenamiento para la red lo consiguen resolviendo las ecuaciones que definen la máquina, bajo diferentes condiciones de operación y bajo una variación en un rango determinado de los parámetros de la máquina. Es importante resaltar la observación que realizan los autores acerca de la posibilidad de determinar los parámetros sin necesidad de utilizar la medición del ángulo del par, ya que este ángulo generalmente no es de fácil obtención en la práctica.

4. Representación de la máquina síncrona con el modelo caja negra utilizando RNA

Cuando se pretende obtener la dinámica de la máquina ante diversas perturbaciones o condiciones de operación se puede optar por representar a la máquina por el modelo caja negra, donde no interesa conocer su estructura interna ni sus parámetros sino, por el contrario, identificarla por medio de la relación de sus variables de entrada/salida.

Como primera aproximación al modelo de caja negra de la máquina síncrona, en [8] se emplea una RNA multicapa para representar el modelo no lineal de la máquina. Esta propuesta utiliza el vector de control de la representación del espacio de estados (U_k) y el vector de salida (Y_k) para predecir el vector de estados siguiente (X_{k+1}). Se presentan resultados para el caso más sencillo, un generador síncrono conectado a una barra infinita, sin considerar los efectos de saturación y suponiendo el sistema balanceado. Se presentan resultados para 10 y 20 neuronas en la capa oculta, con lo cual se

concluye que el modelo desarrollado se aproxima y puede ser mejorado al determinarse un número de neuronas óptimo.

Uno de los principales problemas que se tienen en la determinación de un modelo de la máquina síncrona, basado en la relación de entradas y salidas, es la determinación apropiada del conjunto de señales de entrada consideradas para la obtención de resultados satisfactorios en la predicción de la salida. En relación con este aspecto, el uso de la teoría de los conjuntos aproximados (RST, *Rough Set Theory*) se analiza en [24], para determinar el conjunto mínimo de patrones de entrada útiles a una red neuronal de función de base radial (RBF, *Radial Función Basis*). Esta propuesta se utiliza para modelar el comportamiento dinámico no lineal de un generador síncrono de una embarcación a partir de datos reales. Como resultado, el modelo basado en la metodología que combina RST y RBF posee gran exactitud y una alta capacidad de generalización.

En el estudio del modelamiento de la dinámica de la máquina síncrona han sido empleadas muchas arquitecturas de RNA; aun, algunas han sido propuestas para aplicaciones específicas derivadas de la investigación en este campo. Un nuevo tipo de RNA fue propuesto por [23] y aplicado en el modelamiento de un generador síncrono para la simulación en tiempo real. La red usa un algoritmo *back-propagation* para la adaptación de los pesos de la red. Las entradas utilizadas para la RNA son la potencia del torque mecánico y la corriente de excitación; las salidas son la frecuencia y la tensión en terminales del generador. Allí se prueba que los datos obtenidos con la red propuesta son muy cercanos a los datos de un simulador (error medio cuadrático mucho menor que $10E^{-3}$) y además, comparada con otras redes (MLP, *Multilayer Perceptron*), el número de neuronas en la capa oculta es menor, obteniendo una buena generalización.

Los modelos de identificación global en línea del generador síncrono son ampliamente desarrollados y analizados. En [11] se compara el desempeño de

una red tipo MLP frente a una RBF, para la identificación en línea de la dinámica no lineal de un generador síncrono. Se utiliza la variación de las señales a partir de los valores de estado estable y además se investigan las implicaciones en la complejidad computacional para el procesamiento de los datos en el entrenamiento en línea, así como en la generalización y en la convergencia global para simulaciones en el tiempo. Los resultados de las simulaciones muestran que comparada con el MLP, la RBF es más simple de implementar, necesita menos memoria de cómputo, converge más rápido, y logra la convergencia global aun cuando las condiciones de operación cambian. Sin embargo, años más tarde los mismos autores publican de nuevo en [12] la comparación de los modelos basados en MLP y RBF para la representación de la dinámica del generador síncrono, solo que esta vez el generador es analizado como parte de un sistema de potencia, y son considerados el modelo de excitación de la máquina y la turbina. El estudio también se basa en simulaciones en el dominio del tiempo, para evaluar los requerimientos computacionales en el procesamiento de los datos durante el entrenamiento en línea, la convergencia local y global en línea. A diferencia de [11], en [12] se utilizan las señales correspondientes a la potencia mecánica, la corriente de excitación, la frecuencia y la tensión de la máquina, como entradas del identificador; se predice la variación en la velocidad y la tensión en terminales del generador. De [12] se concluye que ambos identificadores se comportan bien. Sin embargo, pese a que las RBF presentan mejores características de desempeño, si solo se usan variaciones de la señales como entradas del identificador, es recomendada la red MLP, puesto que la RBF requiere de cálculos adicionales, como por ejemplo, la determinación de las funciones de los centros de las neuronas de la capa oculta. Adicionalmente para la implementación en hardware en tiempo real se recomienda el identificador MLP, dado que este permite reducir los esfuerzos para determinar los centros de la RBF.

En [31] se aplican RBF específicamente en la

identificación de las características no lineales de la máquina síncrona, utilizando algoritmos recursivos de aprendizaje, como el *k-means*, para actualizar los parámetros de la red cuando la máquina es sometida a diversas perturbaciones. Allí se utiliza un modelo de séptimo orden expresado como modelo no lineal de espacio de estado para una máquina conectada a un barraje infinito. Las variables de entrada del sistema son el torque mecánico y el voltaje de campo. Como variables de estado se utilizan los enlaces de flujo de la máquina en los ejes *d* y *q*, así como la velocidad del rotor y el ángulo de carga (*d*). Las variables de salida seleccionadas son el ángulo de carga y los enlaces de flujo en el eje *d*.

5. Utilización de RNA en estudios de estabilidad

Uno de los propósitos para realizar el análisis de estabilidad en un sistema de potencia consiste en examinar el comportamiento dinámico de la máquina síncrona bajo diversos tipos de perturbaciones. Cuando se desea realizar análisis de estabilidad sobre un sistema de potencia, se puede recurrir a los métodos por análisis de los valores propios del sistema (dominio de la frecuencia), así como por simulaciones en el dominio del tiempo. Pero debido a los altos esfuerzos computacionales para su utilización en línea, su uso se ve restringido a aplicaciones fuera de línea.

En [32], los autores establecen una relación entre los valores propios del sistema y el punto de operación de la máquina dado por la potencia activa, el factor de potencia y los parámetros del estabilizador del sistema de potencia. Así, utilizan las anteriores variables como entradas de la RNA y como salida, la determinación de si el sistema es estable o no lo es. Se propone un algoritmo de entrenamiento que presenta considerables ventajas sobre el *backpropagation*, debido a que converge más rápido.

Comúnmente la representación de la máquina síncrona tiene como finalidad el estudio de la esta-

bilidad en los sistemas de potencia. Aplicaciones a la valoración de la estabilidad ante perturbaciones de pequeña señal son propuestas en [9], [33], [34]. Específicamente en [9] se propone un método para la predicción de los modos críticos (valores propios) empleados en la valoración de estabilidad de sistemas de potencia basados en RNA. Esta publicación se enfoca especialmente en las oscilaciones presentes entre áreas de grandes sistemas interconectados. Se reduce el número de variables de estado para la predicción de los valores propios y así obtener la condición de estabilidad del sistema con gran exactitud (menor al 3.5% para el peor caso). Sin embargo, los estudios de estabilidad de pequeña señal no son un gran reto. La complejidad numérica presente en el estudio de estabilidad ante grandes perturbaciones tiene especial interés. El modelo no lineal de la máquina junto con la interconexión de un gran número de generadores en un sistema de potencia representa un verdadero reto y es el punto de mayor interés para utilizar modelos basados en métodos heurísticos y especialmente RNA.

Las aplicaciones de las RNA al estudio de estabilidad transitoria de ángulo ante grandes perturbaciones han incrementados en los últimos años [22], [25 – 27], [35 - 37]. [27] se propone utilizar RNA para determinar el ángulo del rotor para estudios de estabilidad transitoria de ángulo. La novedad de este aporte reside en el empleo de medidas fasoriales de tensión y corriente, como entradas de la RNA, tomadas en el lado de alta tensión del sistema de potencia. Se demuestra que la estimación directa del ángulo no produce resultados satisfactorios y se propone la implementación de dos RNA para determinar el seno y el coseno del ángulo, lo cual mejora los resultados. La red MLP es entrenada fuera de línea, basada en datos de simulación, y puesta a prueba en aplicaciones en tiempo real en la predicción y control de inestabilidad transitoria. De igual forma, [26] presenta una metodología basada en RNA para la estimación del ángulo y la velocidad del rotor aplicable a estudios de estabilidad transitoria y control en tiempo real. El uso de dos RNA para tal fin se considera un aporte; una

red estima el ángulo del rotor y la otra estima la velocidad de la máquina, utilizando adicionalmente el valor previamente obtenido del ángulo del rotor. Se presentan resultados para un sistema de una máquina conectada a una barra infinita, utilizando el método planteado y su comparación con los resultados obtenidos al emplear el modelo clásico de la máquina síncrona. Debido a que el empleo de las RNA en la representación del modelo de la máquina síncrona tiende a ser predictivo, en [22] se analiza la manera de utilizar técnicas de predicción y filtrado de estados para construir una red neuronal de retardo (TDNN, *Time Delay Neural Network*) y una red de interrelación funcional (FLN, *Functional Link Network*) para capturar la dinámica del sistema de potencia. Adicionalmente se desarrolla una herramienta basada en RNA para determinar la estabilidad e inestabilidad del sistema, luego del despeje de una falla. El método híbrido empleando RNA (TDNN y FLN) permite evaluar exitosamente la función de energía transitoria (TEF, *Transient Energy Function*) como indicador de seguridad.

6. Otras técnicas de inteligencia artificial empleadas en el modelado de la máquina síncrona

Es común encontrar en la literatura técnica aplicaciones de las RNA para el modelamiento de la máquina síncrona y la dinámica del sistema de potencia. Sin embargo, esta técnica no es la única. El empleo de otras técnicas de inteligencia artificial en aplicaciones del sector eléctrico – como en identificación de fallas en sistemas de distribución, tales como la técnica de los K-vecinos más cercanos (K-NN, K-*Nearest Neighbor*) [38], y las máquinas de soporte vectorial (SVM, *Support Machine Vector*) [39 - 42], entre otras – muestran que las RNA no son la única solución; no obstante, son una gran alternativa. En la determinación de la dinámica de la máquina síncrona empleada para estudios de estabilidad se resalta la propuesta presentada en [25], la cual consiste en aplicar las SVM, para determinar la estabilidad transitoria de un sistema de potencia ante el evento de

una falla en las líneas de transmisión. Estrictamente se emplea una estrategia de clasificación basada en SVM para determinar si el sistema es estable o inestable (2 clases). Las entradas del clasificador consisten en atributos tomados de una sola máquina del sistema de potencia, con el fin de disminuir la dimensionalidad del espacio de entrada. Las pruebas se realizan en el sistema IEEE de 50 generadores y se muestra que los atributos tomados de una máquina con coeficiente de inercia pequeño son efectivos para la evaluación de la estabilidad en sistemas de potencia, empleando SVM y *kernel RBF*.

Como referencia de la aplicación de algoritmos evolutivos en estudios de la máquina síncrona, se encuentran los algoritmos genéticos, los cuales buscan fortalecer los posibles problemas relacionados con las RNA. Por ejemplo, cuando se diseña una red pueden presentarse dificultades al momento de determinar la topología de la misma (número de capas, número de neuronas por capa y asignación de los valores iniciales de los pesos y los umbral), la cual define el desempeño de la red. El caso de la aplicación de RNA en la identificación de la máquina no es ajena a esta situación, y por ello en [43] se propone la utilización de algoritmos genéticos orientados a objetos, combinados con el algoritmo *back propagation* en el diseño y entrenamiento de la red respectivamente. De esta aplicación resulta interesante la definición de un cromosoma compuesto, utilizado ante la necesidad de definir el número de capas ocultas y neuronas como un número entero y los valores de pesos y umbral como números reales, con el fin de poder determinarlos en una sola búsqueda.

También se tiene referencia con respecto a la aplicación de otras herramientas, cuando se ha requerido generar la base de datos de patrones de entrenamiento de la RNA. Por ejemplo, para identificar la máquina se ha recurrido a paquetes de simulación como Matlab®, PsCAD®, entre otros, así como a técnicas de modelamiento basadas en elementos finitos como es el caso de [44] y [45]. Allí se utilizó un modelo acoplado de elementos finitos/espacio de estado (CFE-SS), con el fin de representar en una

forma más real el comportamiento de la máquina ante los efectos de salientes del rotor, la saturación, los armónicos en la distribución del flujo, entre otros. Adicionalmente, se utiliza el plano P-Q de la máquina, con el fin de determinar algunos puntos de operación definidos por la corriente de armadura, el factor de potencia y la potencia activa. Posteriormente se determina con (CFE-SS) el ángulo de carga y la corriente de campo, y las reactancias de eje directo y eje en cuadratura. Los autores aclaran que para efectos prácticos, en cuanto a estudios de estabilidad en sistemas de potencia, este tipo de metodología no es aplicable, debido al considerable esfuerzo computacional requerido.

Entre algunas metodologías de identificación de sistemas no lineales que han dado excelentes resultados en otras áreas, está la transformada *wavelet* y las series de Volterra y Hartley. A la búsqueda de la identificación de un modelo de tipo caja negra para la máquina síncrona se suma la propuesta presentada en [46]. En esta publicación se explora la utilización de redes *wavelet* para identificar la dinámica del generador síncrono, basado en el éxito que han tenido en el modelado de sistemas dinámicos no lineales [47]. El método propuesto es aplicado sobre un modelo no lineal de séptimo orden de la máquina síncrona con efectos de saturación. En este estudio la tensión de campo es considerada como la entrada, y la potencia activa de salida y la tensión en terminales de la máquina se consideran como las salidas del generador síncrono. Los resultados muestran una buena aproximación del modelo identificado, aun ante condiciones diferentes de operación.

De igual manera, en [48] se aplica la transformada *wavelet* en la identificación de una micro máquina del laboratorio de 3kVA, 208 V, obteniendo resultados de las variables voltaje terminal, potencia activa y reactiva, así como corrientes de línea muy similares a las medidas. Sin embargo, un problema asociado a esta implementación está relacionado con la adecuada selección de parámetros de la estructura de la *wavelet*.

Otra herramienta utilizada en la identificación de sistemas no lineales como la máquina síncrona son las series de Volterra. En [49] se identifica un modelo no lineal tipo caja negra para la máquina, el cual puede utilizarse posteriormente específicamente para el diseño de estabilizadores de sistemas de potencia PSS.

Definir un sistema no lineal en series de Volterra es expresarlo como una serie en donde están incluidas las entradas, las salidas y los *kerneles* de Volterra. Si se identifican estos últimos, se considera que el sistema está completamente identificado. Los *kerneles* pueden expresarse como funciones ortogonales; a mayor cantidad de estos últimos se considera que mejor es el modelo identificado, pero a la vez mucho más complejo. Los coeficientes de dichas funciones se determinan a través del conjunto de datos de entrada/salida del sistema. Para el caso particular de la máquina, se utilizaron como salidas el voltaje terminal y la potencia activa y como entrada, el voltaje de campo.

Finalmente, otra metodología con la cual se ha trabajado en la identificación de la máquina, específica-

mente en la estimación de los parámetros del circuito de armadura, han sido las series de Hartley [50], las cuales permiten representar a la máquina mediante un conjunto de ecuaciones lineales algebraicas que pueden resolverse usando la matriz seudoinversa para obtener los parámetros desconocidos.

7. Conclusiones

Se presentó una recopilación de algunos de los trabajos más relevantes en el área de identificación del modelo de la máquina síncrona y su dinámica, utilizando técnicas de computación suave como son las RNA. Se distinguen dos categorías según la aplicación de ellas: la primera, para estimación de los parámetros del modelo matemático de la máquina y la segunda, para reemplazar el modelo matemático de la máquina por un modelo de tipo caja negra basado en técnicas heurísticas. El artículo se centra en la segunda categoría por ser una alternativa más atractiva para aplicaciones en tiempo real. Se resalta el uso de redes tipo MLP y RBF en aplicaciones en línea, como la alternativa más favorable en cuanto

a prestaciones y convergencia global.

Referencias bibliográficas

- [1] L. Kilgore, “Calculation of synchronous machine constants”, *IEEE Trans*, vol. 50, pp. 1201–1214, dec.1931.
- [2] S. H. Wright, “Determination of synchronous machine constants by test”, *IEEE Trans*, vol. 50, pp. 1331–1351, dec. 1931.
- [3] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*. Ciudad de México: McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [4] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. California: McGraw-Hill, Inc., 1st. edition, 1994.
- [5] C. L. DeMarco, R. X. Qian, “A new result on exit time calculations for electric power system security assesment”, *Procedure of the 1986 North American Power Symposium*, Cornell University, Ithaca, New York, pp. 152-168.
- [6] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, *Electric Machinery*, 6th. edition.

- Nueva York: McGraw-Hill, Inc., 2002.
- [7] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, 1st.edition.Iowa: Iowa State University Press, 1997.
- [8] M. Yuen Chow and R. Thomas, “Neural network synchronous machine modeling”, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol.1, pp. 495-498, 1989.
- [9] S. P. Teeuwsen, I. Erlich, and M. A. El-Sharkawi, “Advanced method for small-signal stability assessment based on neuronal networks”, *Power Engineering Society General Meeting, IEEE Volume 4*, Issue 13-17, pp. 2346 – 2354, jul. 2003.
- [10] H. Tsai and A. Keyhani, “Development of a neural network based saturation model for synchronous generator analysis”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 4, pp. 617-624, 1995.
- [11] J.W. Park, R. G. Harley, and G. K. Venayagamoorthy, “Comparison of MLP and RBF neural-networks using deviation signals for on-line identification of a synchronous generator”, *Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE*, vol.1, pp. 274 – 279, 2002.
- [12] J.W. Park, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, “MLP/RBF neural-networks-based online global model identification of synchronous generator”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 52, no. 6, pp. 1685- 1695, 2005.
- [13] IEEE Standard 115. IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines. Part I—Acceptance and Performance Testing. Part II—Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis. Electric Machinery Committee of the IEEE Power & Energy Society. New York. 2010.
- [14] D. Molenaar, O. H. Bosgra, M. J. Hoeijmakers, “Identification of Synchronous Generator Transfer Functions From Standstill Test Data”. ASME 2002 Wind Energy Symposium, pp. 331-339.January 14–17, 2002 , Reno, Nevada, USA.
- [15] E. Da Costa, J. Jardini, “Identification of synchronous machine parameters using load rejection test data”. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 17, no. 2, pp. 242-247, jun. 2002.
- [16] P. Turner, A. Reece, D. Macdonald, “The D.C decay test for determining synchronous machine parameters: Measurement and simulation”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 4, N° 4,pp. 616 – 623, dec. 1989.
- [17] L. Vicol, T. Xuan, R. Wetter, J. Simmond, I. Viorel, “On the identification of the synchronous machine parameters using standstill d.c decay test”, Reseach report. Technical University of Cluj-Napoca, Romania, jun. 2006.
- [18] E. Da Costa, J. Jardini, “A standstill frequency response method for large salient pole synchronous machines”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 19, N° 4, pp. 1145-1156, dec.2004.
- [19] S. Chen, S. Billings, P. Grant, “Nonlinear identification using neural networks”, *International Journal of Control*, vol. 51, pp. 1191–1214, 1990.
- [20] S. Pilluta, A. Keyhani, “Neural network based saturation model for round rotor synchronous generator”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 4, pp. 1019-1025, 1999.

- [21] H. Bora, A. Keyhani, D. A. Selin, "Neural network based modeling of a large steam turbine-generator rotor body parameters from online disturbance data", *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 16, no. 4, pp. 305-311, 2001.
- [22] M. Boozari, "State Estimation and Transient Stability Analysis In Power Systems Using Artificial Neural Networks", Thesis (M.A.Sc.) - School of Engineering Science - Simon Fraser University, 2004.
- [23] S. Wei-Feng, X. Shi-Long, "A novel chaotic neural networks and application", *Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, 2005, pp. 4651- 4656.
- [24] X. Wang, T. Zhang, J. Xiao, "Ship Synchronous Generator Modeling Based on RST and RBF Neural Networks". Springer-Verlag. Berlin: Lecture Notes in Computer Sciences LNCS Vol3972, pp. 163-169, 2006.
- [25] S. Ye, Y. Zheng, Q. Qian, *Transient Stability Assessment of Power System Based on Support Vector Machine*. Chengdu, China: School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 2006.
- [26] A. D. Angel, M. Glavic, L. Wehenkel, "Using artificial neural networks to estimate rotor angles and speeds from phasor measurements", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1245-1253, 2007.
- [27] A. D. Angel, P. Geurts, D. Ernst, M. Glavic, L. Wehenkel, "Estimation of rotor angles of synchronous machines using artificial neural networks and local PMU-based quantities", *Neurocomputing 70 International Journal*, Volume 70 No.18, October 2007, pp. 2668-2678, 2007.
- [28] S. Pillutla, A. Keyhani, I. Kamwa, "Neural Network Observers for On-line Tracking of Synchronous Generator Parameters", *IEEE Trans on Energy Conversion*, vol. 14, no. 1, pp. 23-30, 1999.
- [29] S. Pillutla, A. Keyhani, "Development and Implementation of Neural Network Observers to Estimate the State Vector of a Synchronous Generator from On-line Operating Data", *IEEE Trans on Energy Conversion*, vol. 14, no. 4, pp. 1081-1087, 1999.
- [30] M. Calvo, O.P. Malik, "Synchronous Machine Steady-State Parameter Estimation Using Neural Networks", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 237-244, 2004.
- [31] M. A. Abido, Y. Abdel-Magid, "On-line identification of a synchronous machine using a Radial basis function network", *Proceedings of the American Control Conference Albuquerque, New Mexico*, jun. 1997.
- [32] C. Chen, Y. Hsu, "Synchronous Machine Steady State Stability Analysis using an Artificial Neural Network", *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 6, no. 1, pp. 12-20, 1991.
- [33] Z. Y. Dong, *Advanced Methods for Small Signal Stability Analisys and Control in Modern Power Systems*. Thesis Doctor of Philosophy in Electrical and Information Engineering, University of Sydney, 1998.
- [34] V. Vittal, P. Sauer, S. Meliopoulos, G. Stefopoulos, (2005). "Online Transient Stability Assessment Scoping Study", Power System Engineering Research Center. [En línea] Disponible://<http://www.pserc.org/ecow/get/publicatio/reports/2005report/>.

- [35] D. Koester, S. Ranka, G. Fox. “Power systems transient stability - a grand computing challenge”. NPAC Technical Report - SCCS 549. School of Computer and Information Science and The Northeast Parallel Architectures Center. Syracuse University Syracuse, NY, 1992.
- [36] M. Pavella, D. Ernest, D. Ruiz-Vega, *Transient stability of power systems: a unified approach to assessment and control*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [37] G. Morales, S. Pérez, J. Mora, “Estrategia de reentrenamiento de RNA para mejorar el control de la excitación de una máquina síncrona”, *Revista Scientia et Technica*, vol. 32, pp. 37–42, dec. 2006.
- [38] R. Barrera, G. Morales, J. Mora, “Determinación de la distancia de falla en sistemas radiales empleando una estrategia de regresión basada en el método del vecino más cercano k-nn,” IV Simposio Internacional Sobre la Calidad de la Energía Eléctrica, Manizales, Colombia, nov. 2007.
- [39] G. Morales, A. Gómez. (2005). “Estudio e implementación de una herramienta basada en Máquinas de Soporte Vectorial aplicada a la localización de fallas en sistemas de distribución”. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander. [En línea]. Disponible: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/derautor.jsp?parametros=118738>
- [40] G. Morales, H. Vargas, J. Mora, “Concepto de zonas para localizar fallas en sistemas de distribución por medio de una herramienta de inteligencia artificial clasificadora”, in *Proc. III Congreso Internacional de Ingenierías Eléctrica y Electrónica. IEEE Branch*, Bogotá, Colombia, mar. 2007.
- [41] G. Morales, J. Mora, G. Carrillo, “Evaluación comparativa de tres métodos de clasificación aplicados al problema de la localización de fallas de cortocircuito en sistemas de distribución de energía eléctrica”, *Revista Scientia et Technica*, vol. 8, pp. 19-24, 2007.
- [42] J. Mora, Localización de Faltas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica usando Métodos Basados en el Modelo y Métodos Basados en el Conocimiento, (2006). Tesis doctoral. Universidad de Girona, España.
- [43] Z. Ji, L. Yingli, Z. Jianhua, C. Xiang, “A Neural Network Identifier of Synchronous Machines Trained by Object Oriented Genetic Algorithm and Back Propagation”, *IEEE. Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 239 – 242, 2000.
- [44] S. R. Chaudhry, S. Ahmed-Zaid, N. A. Demerdash, “An Artificial Neural Network method for the identification of saturated turbo generator parameters based on a coupled finite element/ state-space computational algorithm”, *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 10, no. 4, pp. 625-633, dec. 1995.
- [45] S. R. Chaudhry. “A Neural Network Approach to the Identification of Saturated Turbogenerator Parameters Based on a Coupled Finite Element / State Space Modeling Technique,” Tesis Doctoral, ECE Department, Clarkson University, Postdam, New York, 1994.
- [46] M. Ravan, R. Dallirooy-Fard, M. Karrairi, “Synchronous generator black-box identification using continuous wavelet networks,” in *Bulk Power System Dynamics and Control conference*, Cortina d’Ampezzo, Italy, august 22-27, 2004. pp. 125-135.
- [47] G. P. Liu, S. A. Billing, V. Kadirkamanathan, “Nonlinear system identification using

- wavelet networks”, *International Journal of Systems Science*, vol.31, no.12, pp. 1531-1541, dec. 2000.
- [48] M Karrari, O.P. Malik, “Identification of Synchronous Generators using adaptive wavelets networks”, Elsevier Journal on Electrical Power and Energy Systems, Vol.27 pp. 113-120, June 2005.
- [49] R. Dalirrooy, M. Karrari, O. P. Malik, “Synchronous Generator Model Identification for Control Application Using Volterra Series”, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 852 – 858, dec.2005.
- [50] J. J. Rico, G. Heydt, A. Keyhani, B. Agrawal, D. Selin, “Synchronous Machine Parameter Estimation Using the Hartley Series”, *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 16, no. 1, pp. 49 – 54, mar. 2001.