

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- o Factibilidad de la aplicación.- Los resultados obtenidos permiten confirmar la factibilidad de aplicar la metodología de redes de neuronas artificiales al problema de evaluación en línea de la estabilidad transitoria en sistemas eléctricos con estructura longitudinal.
- o Características de la aplicación.- La aplicación está enfocada a la solución práctica de un problema real, presente en la operación diaria de redes eléctricas.
- o Estabilidad transitoria y redes longitudinales.- En redes eléctricas con este tipo de estructura el problema de estabilidad se puede establecer a nivel regional, entre plantas generadoras y centros de carga alejados entre sí. Esta característica, se puede aprovechar para analizar los problemas de estabilidad de diferentes plantas en forma relativamente independiente.
- o Patrones de estabilidad.- El espacio de entrenamiento se generó por medio de 2700 simulaciones de estabilidad en el tiempo. En forma independiente se simularon 540 casos de prueba. Estos últimos se situaron en las regiones de alta generación, donde se tienen mayores probabilidades de encontrar la separación de zonas estables e inestables y la labor de clasificación tiene mayores

dificultades.

- o Dimensiones del modelo.- La generación de los patrones de entrenamiento y prueba se realizó utilizando los modelos de la red y generadores (227 nodos, 330 ramas y 53 generadores), empleados actualmente en las áreas Norte y Noreste de CFE para el análisis de la operación.
- o Variables de entrada.- Se considera adecuada la selección realizada de variables de entrada, utilizando magnitudes de estado estable, debido a que la herramienta es de tipo netamente preventivo. La utilización de la metodología de RNAs requiere efectuar un escalado de las variables de entrada. Se empleó un rango de -1 a 1, de acuerdo a los valores mínimo y máximo observados en cada conjunto de patrones.
- o Variables de Salida.- De las alternativas estudiadas, la mejor opción fué utilizar una variable binaria de salida. Se diseñó un índice de la estabilidad de la planta, basado en el comportamiento angular de las unidades o en la potencia activa generada.
- o Algoritmo de Aprendizaje.- Se utilizó el algoritmo de retropropagación de error, con paso adaptivo e incluyendo una señal de ruido aleatorio normal en cada iteración. Se observó que el promedio de iteraciones necesario para convergencia es menor a 300.
- o Arquitecturas de RNAs.- Se probaron diferentes arquitecturas de RNAs de procesamiento progresivo: Con una y dos capas internas, uno, dos o tres elementos binarios de salida y utilizando dos diferentes variables continuas. El mejor desempeño se obtuvo con una red de una capa interna, doce variables de entrada y una variable de salida con formato binario.

- o Organización de los patrones de entrada.- Es importante elegir una adecuada organización de los patrones de entrenamiento, para reducir el número de errores de clasificación. De las dos alternativas probadas, la mejor resultó ser la separación de los patrones de entrenamiento por tipo de falla. La magnitud de los errores de entrenamiento y de prueba fué mayor al separar los patrones por regiones de generación.
- o Relación de casos inestables/estables de entrenamiento.- Se observó que para valores extremos de ésta relación, cercanos a cero, se obtenían valores de error de entrenamiento mínimos. El excesivo número de casos estables genera una mayor regularidad en los mapeos. Para lograr un equilibrio numérico se requieren valores de RCIE cercanos a 1, sin embargo, por medio del criterio de agrupación 1 se obtuvieron valores de error reducidos aún para valores de RCIE de 7.7%
- o Distribución de Errores.- Se encontró una mayor proporción de errores de clasificación en los patrones de prueba generados considerando una demanda media. La red generaliza mejor en las zonas de demanda cercanas a la máxima o mínima, que fueron incluidas en el entrenamiento.
- o Inclusión de CDSs.- Es posible extender el método para incluir los efectos de controles discretos suplementarios, sin cambios en la formulación del problema. Es necesario entrenar un nuevo grupo de RNAs especializadas en esta condición.
- o Interfaz gráfica.- La presentación de resultados en forma gráfica permite que los operadores del sistema eléctrico puedan visualizar fácilmente el efecto que los cambios en la generación o la activación de controles discretos producen sobre los límites de las zonas de estabilidad.
- o Implementación del sistema basado en RNA's.- Se presenta un plan de

actividades a desarrollar para lograr la implementación del sistema basado en RNA's .

6.2 Recomendaciones para trabajos futuros

- o Ampliación del sistema.- Basados en la metodología expuesta es posible diseñar conjuntos de RNAs especializados en el análisis de estabilidad de varias plantas generadoras a la vez, para obtener un panorama dinámico más amplio del sistema eléctrico. Se debe analizar la conveniencia de adecuar la interfaz gráfica para no traspasar el umbral de percepción de información por el usuario.
- o Generación de patrones de entrada.- Los patrones de entrada podrían ser obtenidos por medio de un proceso sistemático, en el que sea posible generar fácilmente cualquier condición de operación deseada. De ser posible se debe automatizar la búsqueda de las zonas límite y aumentar la densidad de simulaciones en las áreas cercanas a éstas.
- o Sistema de Control basado en RNA's.- El diseño de un sistema capaz de tomar decisiones en línea, para prevenir la pérdida de estabilidad, por medio de la activación de esquemas de protección, requiere la supervisión de variables dinámicas y una mayor velocidad de operación que la necesaria para el sistema de tipo preventivo.
- o Generación de casos adicionales.- Se propone mejorar el desempeño de las RNAs incluyendo en el conjunto de patrones de entrenamiento, casos cercanos a la frontera de estabilidad. Para aumentar la definición en la zona de demanda media, se deben incluir casos de entrenamiento considerando este nivel de demanda, o varios niveles intermedios entre la demanda máxima y la mínima.

- o Otros algoritmos de aprendizaje.- Se debe considerar la aplicación de otros tipos de RNAs a este problema. Se ha sugerido el empleo de las redes de enlaces funcionales, las redes de Kohonen y las redes de base radial.

REFERENCIAS

- [1] V. Vemuri, "Artificial Neural Networks: An Introduction," *IEEE Computer Society Press Technology Series*, Volume I, pp. 1-12, 1988.
- [2] R. Hecht Nielsen, "Neurocomputing: Picking the Human Brain," *IEEE Spectrum* 25(3), March 1988, pp. 36-41.
- [3] R. Ramírez, J. Rico, O. Chacón, H. Altuve, "Uso de Redes de Neuronas Artificiales en la Detección de fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia," *Memorias de la Cuarta Reunión de Verano de Potencia*, IEEE Sección México, Julio 1991.
- [4] Anderson J. A., "General Introduction," *Neurocomputing: Foundations of Research*, The MIT Press, Cambridge, J. Anderson and E. Rosenfeld Ed., pp. xiii-xxi, 1989.
- [5] Chacón O. L., *Notas del Seminario de Redes Neuronales*, UANL, Monterrey, N.L., 1992.
- [6] James William, "Association," Chapter XVI in *Psychology (Briefer Course)*, New York: Holt, pp. 253-279. Capítulo I de Referencia [4].
- [7] McCulloch W., Pitts W., "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5, pp. 115,133. Capítulo II de Referencia [4].
- [8] Jacek M. Zurada, *Introduction to Artificial Neural Systems*, West Publishing Company, 1992
- [9] Rosenblatt F., "The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain," *Psychological Review* 65, 1958, pp. 386-408. Capítulo VIII de referencia [4]
- [10] Hopfield J.J., "Neural Networks and physical systems with emergent collective

- computational abilities," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 79, pp. 2554-2558. Capítulo XXVII de referencia [4].
- [11] Widrow B., M.A. Lehr, "30 Years of Adaptive Neural Networks: Perceptron, Madaline, and Backpropagation," *IEEE Proceedings*, vol. 78, Num. 9, Sept. 1990.
- [12] T. Kohonen, "The Self-Organizing Map," *IEEE Proceedings*, vol. 78, Num. 9, Sept. 1990.
- [13] K. Fukunaga, *Introduction to Statistical Pattern Recognition*, Second edition, Academic Press, Inc., 1990.
- [14] Elgerd Olle I., *Electric Energy Systems Theory. An Introduction*, second edition, McGraw-Hill, 1982.
- [15] D.R. Davidson, D.N. Ewart, L.K. Kirchmayer, "Long Term Dynamic Response of Power Systems: An Analysis of Major Disturbances," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-94, no. 3, May/June 1975.
- [16] F. Aboytes, editor, *Análisis de Sistemas de Potencia*, CFE-UANL 1990
- [17] R.T. Byerly, E.W. Kimbark, editors, "Introduction to Stability of Large Electric Power Systems," *IEEE Press* 1974.
- [18] G. Arroyo, editor, *Estabilidad Transitoria en Sistemas Eléctricos de Potencia*, CFE-UANL, 1990.
- [19] R. Ramírez, *Análisis y Simulación del Generador Síncrono*, Tesis de maestría, UANL, 1989.
- [20] E. K. Nielsen et al, "An operations view of Special Protection Systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 3, August 1988.
- [21] Hertz, Krogh and Palmer, *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Lecture Notes, Volume I, pp. 8-9, Santa Fe Institute, Addison-Wesley Publishing Company 1990.
- [22] N. Balu et al, "On-Line Power System Security Analysis," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 80, No. 2, Feb. 1992.
- [23] D.C. Park, M.A. El-Sharkawi, R.J. Marks II, "Electric Load Forecasting Using an Artificial Neural Network," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 2, May 1991.

- [24] R.K. Hartana, G.G. Richards, "Harmonic Source Monitoring and Identification using Neural Networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 4, Nov. 1990.
- [25] I. Mushin, M.K. Sundareshan, S.I. Sudharsanan, A. Karakasoglu, "Adaptive Excitation and Governor Control of Synchronous Generators using Multilayer Recurrent Neural Networks," *Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control*, Tucson, Arizona, Dec. 1992.
- [26] N. Kandil, V.K. Sood, K.Khorasani, R.V. Patel, "Fault Identification in an AC-DC Transmission System using Neural Networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No.2, May 1992.
- [27] Chao-Rong Chen, Yuan-Yih Hsu, "Synchronous Machine Steady-State Stability Analysis using an Artificial Neural Network," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 6, No. 1, March 1991.
- [28] D.J. Sobajic, Yoh-Han Pao, "Artificial Neural-Net based Dynamic Security Assessment for Electric Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 4, No.1, Feb. 1989.
- [29] Yoh-Han Pao, D.J. Sobajic, "Combined use of Unsupervised and Supervised Learning for Dynamic Security Assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 7, No.2, May 1992.
- [30] M. Aggoune, M.A. El-Sharkawi, D.C. Park, R.J. Marks III, "Preliminary Results on Using Artificial Neural Networks for Security Assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 2, May 1991.
- [31] D. Niebur, A.J. Germond, "Power System Static Security Assessment using the Kohonen Neural Network Classifier," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 2, May 1992.
- [32] H. Mori, Y. Tamaru, S. Tsuzuki, "An Artificial Neural-Net based Technique for Power System Dynamic Stability with the Kohonen Model," *Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 2, May 1992.
- [33] C. Pottle, R.J. Thomas, S. Gruber, "Rapid Analysis of Transient Stability. Computer Hardware Solutions," *Symposium on Rapid Analysis of Transient*

- Stability*, pub. IEEE No. 87TH0169-3-PWR, p.p. 24-29.
- [34] A.A. Fouad, "Applications of Transient Energy Functions to Practical Power System Problems," *Symposium on Rapid Analysis of Transient Stability*, pub. IEEE No. 87TH0169-3-PWR, p.p. 8-15.
- [35] F.S. Prabhakara, G.T. Heydt, "Review of Pattern Recognition Methods for Rapid Analysis of Transient Stability," *Symposium on Rapid Analysis of Transient Stability*, pub. IEEE No. 87TH0169-3-PWR, p.p. 16-23.
- [36] H. Taoka, S. Abe, S. Takeda, "Fast Transient Stability Solution using an Array Processor," *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-102, No. 12, p.p. 3835-3841, December 1983.
- [37] D.M. Anderson, B.F. Wollenberg, "Power System Steady State Security Analysis using Vector Processing Computers," *Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 4, November 1992.
- [38] M. La Scala, A. Bose, D.J. Tylavsky, J.S. Chai, "A Highly Parallel Method for Transient Stability Analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [39] P. Kundur, E.G. Neudorf, P. Henry, J. Fish, J. Mitsche, "Rapid Analysis of Transient Stability: Needs, Benefits and Requirements," *Symposium on Rapid Analysis of Transient Stability*, pub. IEEE No. 87TH0169-3-PWR, p.p. 5-7.
- [40] O. Lutzky, A. Dengel, "A Comparison of Neural Net Simulators," *IEEE Expert*, August 1993, p.p. 43-51.
- [41] George E.P. Box, William G. Hunter, J. Stuart Hunter, *Statistics for Experimenters. An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building*, John Wiley & Sons Ed., 1978.
- [42] K.K. Wang, M.F. DeVries, "Investigation of Manufacturing Processes by Statistical Experimental Design Techniques," in *Engineering Conferences*, University of Wisconsin, Technical paper MR69-263, 1969.
- [43] C. Pozos, I.M. Iglesias, A. Avila, "Aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) en la Verificación del Diseño de un fusible de Media Tensión," *Memorias de la Quinta Reunión de Verano de Potencia*, IEEE Sección México,

- Julio 1992.
- [44] F. Aboytes, R. Lara, "Aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta al Análisis del Desplazamiento Angular de una Máquina Síncrona," *Memorias del Symposium SIEEEM-88*, IEEE Sección Monterrey, 1988.
- [45] F. Aboytes, R. Lara, "Análisis Directo de Estabilidad Transitoria Mediante Técnicas de Superficie de Respuesta. Parte I. Introducción al Problema," *Memorias de la Segunda Reunión de Verano de Potencia*, IEEE Sección México, Julio 1989.
- [46] Ramírez Arredondo J.M., *Técnicas Modernas para el Análisis de Estabilidad Transitoria en Sistemas Eléctricos Interconectados mediante la Aplicación de Equivalentes Dinámicos*, Tesis Doctoral, U.A.N.L., Monterrey, México, Dic. 1992.
- [47] T.M. Peng, N.F. Hubele, G.G. Karady, "Advancement in the Application of Neural Networks for Short-Term Load Forecasting," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, February 1992.
- [48] Highley D.D., Hilmes T.J., "Load Forecasting by ANN," *IEEE Computer Applications in Power*, July 1993
- [49] G.J. Anders, *Probability Concepts in Electric Power Systems*, p.p. 533-579, John Wiley & Sons Ed., 1990.
- [50] F.F. Wu, Yu-Kun Tsai, Yi-Xin Yu, "Probabilistic Steady State and Dynamic Security Assessment", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-9, February 1988.
- [51] V. Miranda, J.N. Fidalgo, J.A. Pecas Lopes, L.B. Almeida, "Real Time Preventive Actions for Transient Stability Enhancement with a Hybrid Neural Network - Optimization Approach," paper 94SM517-3 PWRS, presented at *IEEE-PES 1994 Summer Meeting*, July 1994.
- [52] E. Hobson, G.N. Allen, "Effectiveness of Artificial Neural Networks for first Swing Stability Determination of Practical Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, May 1994.
- [53] L. Wehenkel, Th. Van Cutsem, M. Ribbens-Pavella, "An Intelligence Framework for on-line Transient Stability Assessment of Power Systems," *IEEE Transactions*

- on Power Systems*, Vol. 4, No. 2, May 1989.
- [54] R.D. Christie, S.N. Talukdar, J.C. Nixon, "CQR: A Hybrid Expert System for Security Assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [55] A.A. Fouad, S. Venkataraman, J.A. Davis, "An Expert System for Security Trend Analysis of a Stability-limited Power System," paper 91 WM 216-2 PWRs, presented at *IEEE/PES 1991 Winter Meeting*, February 1991.
- [56] L. Wehenkel, M. Pavella, E. Euxibie, B. Heilbronn, "Decision Tree based Transient Stability Method. A Case Study," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, February 1994.
- [57] F. Aboytes, M. Flores, "Diseño de Estrategias Operativas Mediante la Utilización de Controles Suplementarios," presentado en la *Conferencia Internacional del IEEE MEXICON-86*, Guadalajara, Jal., Octubre 1986
- [58] H. Altuve, R. Ramírez, J.A. Torres, M.A. Moreno, M. Valenzuela, "Análisis computarizado de la Operación durante Disturbios de Protecciones que Responden a Impedancia," presentado en el *Simposium Internacional de Protecciones*, Monterrey N.L., Noviembre 1993.
- [59] F. Aboytes, F. Sánchez, R. Ramírez, *Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia SISP-PC Manual del Usuario*, CFE-CENACE, Mayo 1993.
- [60] N. Weymaere, J.P. Martens, "On the Initialization and Optimization of Multilayer Perceptrons," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 5, No. 5, September 1994.
- [61] P.P. Van der Smagt, "Minimisation Methods for Training Feedforward Neural Networks," *Neural Networks*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-11, 1994.
- [62] D.J. Sobajic, *Artificial Neural Networks for Electric Power Systems*, Ph.D. dissertation, Case Western Reserve University, 1988.
- [63] M.A. Pai, *Power System Stability - Analysis by the Direct Method of Lyapunov*, North-Holland Publishing Co., 1981.