

Método de clasificación bibliográfica aplicado a la identificación de sistemas de excitación de generadores sincrónicos

Andrés Julián Saavedra-Montes^a, José Miguel Ramírez-Scarpetta^a

*(a) Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle,
Cali, Colombia*

(Recibido: Abril 28 de 2008- Aceptado: Noviembre 20 de 2008)

RESUMEN

El objetivo de este artículo es presentar un método de clasificación bibliográfica que permitió ubicar nichos de investigación. El método fue aplicado al área de identificación de sistemas de excitación de generadores sincrónicos, hasta ahora no han sido incluidos artículos que presenten el uso de técnicas inteligentes como algoritmos genéticos o redes neuronales. El método de clasificación tiene tres pasos, el primer paso consistió en definir criterios para seleccionar los artículos en el área, el segundo paso consistió en someter los artículos a un sistema de clasificación y obtener una tabla resultante, el paso final consistió en interpretar los resultados. Al final, el método mostró posibles nichos de investigación en identificación de sistemas de excitación, desde la perspectiva de los autores.

PALABRAS CLAVE: Método de clasificación, estimación de parámetros, sistemas de excitación.

Bibliographic classification method applied to the identification of excitation systems of synchronous generators.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present a bibliographic classification method, which locates niches research. The method was applied to the area of identification of excitation systems of synchronous generators, so far have not been included articles that present the use of intelligent techniques such as genetic algorithms or neural networks. The classification method has three steps, the first step was to define criteria for selecting the articles in the area, the second step was to submit articles to a classification system and get a table result, and the final step was to interpret the results. In the end, the method showed potential niches of research in identification of excitation systems from the perspective of the authors.

KEYWORDS: Classification method, parameter estimation, excitation systems.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios o análisis de estabilidad soportan la planeación y operación de los sistemas eléctricos de potencia. La exactitud de los análisis de estabilidad que evalúan las oscilaciones depende de la estructura y los parámetros de los modelos del generador, el sistema de excitación (SE) y el grupo turbina/regulador. Una gran cantidad de las empresas de generación en Latinoamérica, no poseen modelos adecuados para estos estudios, particularmente porque no disponen de los parámetros reales.

Hoy en día existe un renovado interés en la identificación de sistemas de excitación, debido a que organismos reguladores han recomendado modelar e identificar los elementos de las unidades de generación para analizar el sistema eléctrico con mayor confiabilidad. La identificación de SE es un tema maduro, es decir que existe un amplio conocimiento alrededor de éste, lo que genera un reto para quienes quieren investigar en el tema, puesto que los nichos de investigación no son visibles.

Cuando se desea investigar en un área en la que no se tiene conocimiento ni experiencia, es posible coleccionar artículos relacionados con el tema y tratar de identificar algunos nichos de investigación. El éxito de esta tarea suele estar asociado con la experiencia de los investigadores. Sin embargo, para quienes se inician como jóvenes investigadores y para quienes deciden trabajar en áreas que desconocen, las herramientas que apoyen la visualización de los nichos de investigación serán útiles.

El objetivo de este artículo es presentar un método de clasificación bibliográfica que permita ubicar nichos de investigación aplicados al área de identificación de sistemas de excitación de generadores sincrónicos. Es importante anotar que hasta ahora no se han incluido aquellos artículos que presentan el uso de técnicas inteligentes, tales como algoritmos genéticos y redes neuronales.

El método de clasificación bibliográfica tiene tres pasos, el primero consiste definir criterios para seleccionar los artículos en el área, el segundo

consiste en someter los artículos a un sistema de clasificación y obtener una tabla resultante, el paso final consiste en interpretar los resultados. Los resultados de aplicar el método de clasificación a la identificación de SE muestran posibles nichos de investigación que no habían sido evidentes para los autores en la primera revisión bibliográfica.

En la siguiente sección está descrita la metodología de clasificación y se detallan los tres pasos sugeridos para aplicar el método, uno de los cuales incluye un sistema de clasificación. También presentamos la aplicación sobre la identificación de sistemas de excitación. En la sección tres presentamos la tabla que resulta al aplicar el sistema y la discusión de los resultados. Finalmente se presentan las conclusiones, los agradecimientos y las referencias bibliográficas.

2. METODOLOGÍA

El método de clasificación bibliográfica tiene como objetivo encontrar nichos de investigación en un tema específico y en ningún momento evalúa la calidad de los artículos. Está compuesto de tres etapas básicas; la primera consiste en hacer una lista de las características bajo las cuales se puede realizar el proceso de identificación de sistemas, características que sirvieron para definir los intereses de los autores. La segunda etapa consiste en diseñar un sistema que permita valorar los artículos y que esté enfocado en las características ya definidas. Finalmente, la tercera etapa consiste en someter los artículos al sistema de clasificación e ir completando una tabla con la información obtenida desde cada uno de ellos.

2.1 Características de la identificación de sistemas de excitación

En el caso particular de la identificación de sistemas de excitación de generadores se definieron cinco características y con base en ellas se establecieron cuatro condiciones que fueron valoradas en cada artículo revisado. A continuación se presentan las características y las condiciones que fueron definidas para aplicar el método de clasificación bibliográfica:

a. Los SE deben trabajar en lazo cerrado debido a su alta ganancia, por lo tanto la identificación se debe realizar en esta condición. Cuando se identifica un sistema en lazo cerrado las dinámicas de los bloques se afectan entre sí, haciendo más difícil su estimación. El sistema se podría identificar en lazo abierto sin conexión con el generador, pero se presentaría indisponibilidad de la planta y el sistema no sería identificado en su estado más común de operación.

b. Existen varios tipos de sistemas de excitación y cada uno presenta exigencias particulares al proceso de identificación. Por ejemplo, los sistemas de excitación de corriente alterna sin escobillas no tienen disponibles las señales de campo del generador para ser medidas. En este caso se mide la señal del voltaje en terminales, incluyendo el modelo del generador en el proceso de identificación. Los SE estáticos generan ruido inherente debido al puente rectificador, que afecta directamente la señal del campo del generador, aumentando la dificultad en el proceso de estimación. El filtrado de estos ruidos puede generar la pérdida de algunas dinámicas de interés del sistema.

c. Los SE pertenecen a un proceso costoso que funciona continuamente, por lo tanto hay que evitar su indisponibilidad, esto exige que el experimento de identificación deba ser en cortos periodos de tiempo.

d. Los SE están modelados en detalle y también están estandarizados en el ámbito mundial. Son modelos aceptados por quienes analizan el sistema de potencia y la mayoría de software de análisis los trae incluidos en librerías o por lo menos permiten su implementación fácilmente. Esto quiere decir que se poseen estructuras detalladas de los modelos que deberían ser utilizadas en el proceso de identificación.

e. Puesto que el generador puede trabajar en vacío y en línea, la identificación del SE se realiza en los dos regímenes. En el régimen de vacío se debe tener en cuenta la interacción entre las dinámicas de los componentes del sistema de control de excitación (incluso el generador). Sin embargo en este régimen el modelo del

generador es sencillo y bien conocido. En línea “el lazo de realimentación se abre” debido al barraje infinito. Pero el modelo del generador posee una dinámica compleja y el sistema está expuesto a más perturbaciones.

Teniendo en cuenta las características anteriores, se definieron las siguientes condiciones que fueron valoradas en cada artículo:

a. El experimento de identificación se debe realizar en lazo cerrado. El método de identificación debe tener en cuenta las limitaciones de la identificación en lazo cerrado. También deben considerar las estructuras detalladas de los modelos de los SE que además están en el dominio del tiempo continuo.

b. Evitar la indisponibilidad de la planta. Por ejemplo: pruebas cortas, generador operando en línea, señales de excitación con magnitudes que no afecten la operación y la seguridad del generador, etc.

c. Repetibilidad de las pruebas. Pruebas fáciles de implementar por el personal de la planta y señales de excitación repetibles.

d. Necesitar pocas señales medidas e identificar la mayoría de parámetros del sistema de excitación, incluso las no linealidades.

2.2 El sistema de clasificación bibliográfica

El sistema de clasificación bibliográfica consiste en una tabla que incluye las cuatro etapas típicas de un proceso de identificación, ver tabla 1: diseño y ejecución del experimento, selección de la estructura del modelo y selección del método para estimar los parámetros y validación de éste. Cada etapa reúne algunas categorías y en cada una de ellas aparecen las acciones o elementos que pueden ser utilizados en un artículo acerca de identificación de sistemas de excitación. Por ejemplo, en la etapa de *Diseño y ejecución del experimento* se generó la categoría *Estado de la máquina*, puesto que el experimento se puede ejecutar con el generador en línea, en vacío o durante algún disturbio.

Estas acciones y elementos fueron valorados de acuerdo a los intereses de los autores, los cuales son planteados en las condiciones del ítem 2.1. En la tabla se observa un número entre paréntesis al frente de cada categoría, que corresponde al valor máximo que podrá recibir ésta. Al frente de cada acción o elemento aparece el valor que le será signado al artículo si cumple con éste.

Tabla 1. Sistema de clasificación bibliográfica.

Etapa I: Diseño y ejecución del experimento, grabar los datos	
1. Estado de la máquina	(2)
• Generador en línea	2
• Generador en vacío	0
• Generador durante transitorio (e.g. Rechazo de carga, falla en el sistema de potencia)	0
2. Señal de excitación	(2)
• SBPA	2
• Señal con el rango de frecuencia de interés	1
• Escalón o senoide (respuesta en frecuencia)	1
• Evento en el sistema de potencia	0
3. Tratamiento de señales	(1)
• Consideración del ruido	0.5
• Tratamiento especial de señales	0.5
4. Consideración de los pares entrada salida	(2)
• Se identifica el modelo completo	2
• Se identifica el modelo por bloques	0
• Combinación (Modelo completo y por bloques)	1
5. Fuente u origen de los datos grabados	(1)
• Pruebas en sitio	1
• Pruebas sobre prototipos	0.5
• Pruebas sobre modelos (detallados) de referencia	0
• Pruebas sobre modelos simplificados	0
Etapa II: Selección de la estructura del modelo	
6. Modelo final	(1)
• Modelo estándar (e.g. IEEE)	1
• Modelo particular no estandarizado	0
7. Número de parámetros	(2)
• Identifica parámetros lineales adicionales a (T_a , K_a , T_f , y K_f)	2
Etapa III: Selección del método para estimar los parámetros	
8. Modelado con el que se hace la identificación	(2)
• Modelado caja gris (Uso de modelos normalizados, e.g. IEEE)	2
• Modelado caja negra (Uso de estructuras polinómicas u otros modelos, e.g. Wavelet, etc.)	0
9. Identificación de las no linealidades	(1)
• Las estima el método de identificación	1
• Las linealizan y las estiman	0.5
• Se calculan con otros métodos	0
• No las consideran	0
10. Tipo de identificación	(1)
• Identificación paramétrica	1
• Identificación no paramétrica	0
Etapa IV: Validación del modelo	
11. Método de Validación	(2)
• Comparación de curvas reales vs simuladas	1
• Cálculo de índices de error	0.5
• Validación estocástica	1
• Comparación de parámetros	0.5
12. Evaluación de la identificabilidad	(2)
• Se hace cuantitativamente	2
• Se discute (Cualitativamente)	1
• No se menciona	0
13. Datos para la validación	(1)
• Datos diferentes a los de la identificación	1
• Los mismos datos que la identificación	0.5
• No lo menciona	0

2.3 Valoración de los artículos a través del sistema de clasificación

Esta etapa consistió en seleccionar artículos que a partir del título y el resumen hacen parte del tema de interés, luego los seleccionados fueron leídos y valorados con el sistema de clasificación bibliográfica. Estos están enfocados específicamente en la identificación de sistemas de excitación de generadores sincrónicos.

En la tabla 2 se presenta el resultado de aplicar el sistema de clasificación. En la primera columna aparece el número de referencia del artículo. Al frente del número de referencia aparece la valoración que le corresponde para cada categoría. En la columna final aparece el total de su valoración. En la última fila aparece el porcentaje de aciertos que tuvieron los artículos en cada categoría.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla puede interpretarse por categoría, por ejemplo, en la categoría uno, sólo cuatro autores, el 19%, han realizado la experimentación con el generador operando en línea, en la categoría cinco, quince autores, el 66%, han tomado sus datos en plantas reales. La tabla también puede ser interpretada combinando categorías, por ejemplo. En las categorías uno y cinco se observa que sólo tres autores han realizado la experimentación con el generador en línea y en una planta real. Otra interpretación consiste en ver el total de la valoración y saber cuáles son los artículos que más se ajustan a las características definidas.

A continuación se listan algunas de las interpretaciones que se han hecho a partir de la tabla: en la categoría uno, hasta ahora sólo el 19% de las publicaciones han reportado experimentos con el generador en línea [1, 4] y sólo tres lo han hecho en plantas reales y no en prototipos o modelos como es el caso de [3]. El bajo porcentaje de publicaciones con el generador operando en línea sugiere que es necesario revisar la identificación del sistema de excitación con el generador operando en este régimen, puesto que los resultados que se obtienen en vacío son

Tabla 2. Resultado del sistema de clasificación

Categoría Referencia	Etapa I					Etapa II		Etapa III			Etapa VI			Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Botero, 2005	0	2	0	2	0	1	0	0	0	1	2	0	1	9
Paszek, 2005	0	0	0	2	0	0	2	2	1	1	1	0	0.5	9.5
Rasouli, 2004	2	2	0	0	1	0	2	2	0	1	1.5	0	0	11.5
Ramírez, 2003	0	1	0	0	1	1	0	2	0	0	1	0	1	7
Feltes, 2002	0	0	0	0	1	1	2	2	1	1	1	0	1	10
Xiaoyin, 2001	0	1	0	2	1	1	2	2	0	1	1	0	0	11
Baskar, 2000	0	2	1	0	0	1	2	0	0.5	1	1.5	1	1	11
Chow, 1999	0	0	1	0	1	1	2	0	0	1	1	0	0	7
Vermeulen, 1999	0	2	0.5	1	1	0	0	2	0	1	2	0	0	9.5
Ludwin, 1998	0	2	1	0	0	1	2	0	0	1	1.5	1	1	10.5
Yuan-Yih, 1996	0	1	0.5	2	1	1	0	2	0	1	1	0	0	9.5
To, 1996	2	2	1	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	9
Jin-Cheng, 1995	0	0	1	2	1	1	2	2	0.5	1	1.5	0	0	12
Tzong-Yih, 1995	0	1	0.5	0	1	1	2	0	0	1	1	0	1	8.5
Zazo, 1994	0	1	0	1	1	1	2	0	0	1	2	0	1	10
Chuan-Shen, 1993	2	2	0.5	0	1	0	2	2	0	1	0.5	0	0	11
Benchluch, 1993	0	0	1	2	0	1	2	2	1	1	1.5	1	0	12.5
Liaw, 1992	2	2	0.5	0	1	0	2	0	0	1	0.5	0	0	9
Sánchez, 1998	0	0	0.5	2	0	1	0	2	0	1	0.5	0	0	7
Gibbard, 1995	0	1	0.5	0	1	0	0	2	0	0	1	0	0	5.5
Warchol, 1971	0	1	0.5	0	1	1	0	2	0	0	1	0	1	7.5
Acierto	19%	38%	28%	38%	66%	66%	62%	62%	14%	85%	14%	12%	38%	0%

diferentes, ya que el sistema equivalente del SE y el generador, cambia algunas de sus dinámicas.

En la categoría dos, los autores de [1,8] utilizan señales de excitación persistente como la SBPA. Estas señales son ricas en frecuencias y pueden excitar más dinámicas en un sistema. En [4] los autores utilizan una señal cuadrada y una señal triangular. La máxima frecuencia es menor a 3 Hz. Los resultados de validación respaldan el uso de estas señales.

En la categoría tres se destaca el hecho que entre la bibliografía revisada no se hizo una consideración del ruido ni un tratamiento especial de señales desde el 2001 hasta el 2005, en este periodo se publicaron [4, 5, 9, 12].

En la categoría cuatro, el 38% de las publicaciones reporta el uso de los datos de entrada y salida del SE para estimar los parámetros de todo el modelo, sin embargo, si relacionamos este resultado con la categoría siete, podemos ver que sólo el 19% de las

publicaciones estimó más de cuatro parámetros con datos de entrada-salida de todo el modelo.

En la categoría cuatro, podemos ver que el 52% de las publicaciones utilizan los datos de entrada y salida de cada bloque del sistema de excitación, tomados con el generador en vacío, para realizar la identificación. La realimentación hace que las dinámicas se afecten entre sí. Esto requiere técnicas de identificación en lazo cerrado, las cuales no siempre son reportadas.

La estimación de no linealidades del sistema de excitación sigue siendo un tema abierto. Sólo en [10, 13] se reporta la estimación de las no linealidades por el método de identificación. Muchos autores reportan su estimación pero desde pruebas aisladas.

En la categoría diez, la mayoría de las publicaciones reportó el uso de técnicas de estimación paramétrica. En [5] se reportan porcentajes de acierto del 73% utilizando técnicas paramétricas. Sólo en [9, 14, 15] fue reportado el uso de técnicas no paramétricas.

La categoría once muestra el porcentaje de publicaciones que se han enfocado en la validación del modelo. Las que presentan un mayor puntaje son [5, 8, 16].

La capacidad de identificar parámetros del sistema de excitación sólo ha sido tratada en [6, 13]. Este tema se trata en la categoría doce.

Los 4 artículos que obtuvieron mayor valoración fueron [4, 6, 13, 17]. Los autores consideran que estos trabajos cumplen mejor con las condiciones definidas en el ítem 2.1.

Otras publicaciones que tratan específicamente el tema de identificación de SE en generadores sincrónicos, ver [8, 21], han sido tratadas y valoradas por el sistema de clasificación.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un método de clasificación bibliográfica, el cual fue aplicado a una muestra de publicaciones en identificación de sistemas de excitación de generadores sincrónicos. Al final, el método mostró algunos nichos posibles de investigación en este tema desde la perspectiva de los autores.

5. AGRADECIMIENTOS

Andrés Julián Saavedra Montes agradece a la Universidad Nacional de Colombia el otorgamiento de una comisión de estudios y a COLCIENCIAS la asignación de un crédito condonable para adelantar sus estudios de Doctorado.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] C. M. Liaw, T. S. Liu, A. H. Liu, Y. T. Chen, C. J. Lin, *Parameter estimation of excitation systems from sampled data*, Automatic Control, IEEE Transactions on, Vol. 37 No. 5, pp. 663-666, 1992.

[2] L. Chuan-Shen, H. Yuan-Yih, J. Lin-Her, L. Chia-Jen, H. Chiang-Tsung, A. H. Liu, L. Tai-Hsiung, *Identification of exciter constants using a coherence function based weighted least squares approach*, Energy Conversion, IEEE Transaction on, Vol. 8 No. 3, pp. 460-467, 1993.

[3] K. W. V. To, A. K. David, *On-line identification and control of an AC/DC power system*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 18 No. 4, pp. 223-227, 1996

[4] M. Rasouli, M. Karrari, *Nonlinear identification of a brushless excitation system via field tests*, Energy Conversion, IEEE Transaction on, Vol. 19 No. 4, pp. 733-740, 2004.

[5] H. A. Botero, J. M. Ramírez, *A methodology for excitation systems identification*, p. 6 pp., 2005.

[6] E. Ludwig, M. L. Crow, L. Erickson, K. Shah, *A feasibility study of on-line excitation system parameter estimation*, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 13 No. 3, pp. 910-916, 1998.

[7] R. Bhaskar, M. L. Crow, E. Ludwig, K. T. Erickson, K. S. Shah, *Nonlinear parameter estimation of excitation systems*, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 15 No. 4, pp. 1225-1231, 2000.

[8] H. J. Vermeulen, J. M. Strauss, *Off-line identification of an open-loop automatic voltage regulator using pseudo-random binary sequence perturbations*, pp. 799-802 vol.2, 1999.

[9] J. M. Ramírez Scarpetta, A. J. Saavedra Montes, H. Vásquez Palacios, *Modelado de los sistemas de control de la central hidroeléctrica de Salvajina; Parte II: Control de Excitación*, en V congreso nacional de la ACA, Medellín, Colombia, 2003.

- [10] J. W. Feltes, S. Orero, B. Fardanesh, E. Uzunovic, S. Zelingher, N. Abi-Samra, *Deriving model parameters from field test measurements*, Computer Applications in Power, IEEE, Vol. 15 No. 4, pp. 30-36, 2002.
- [11] Y. Xiaoyin, G. G. Karady, R. G. Farmer, B. L. Agrawal, *Estimation of generator excitation-system parameters by tabu search*, pp. 1185-1190 vol.3, 2001.
- [12] S. Paszek, A. Bobon, J. Kudla, J. Bialek, N. Abi-Samra, *Parameter estimation of the mathematical model of a generator, excitation system and turbine*.
- [13] S. M. Benchluch, J. H. Chow, *A trajectory sensitivity method for the identification of nonlinear excitation system models*, Energy Conversion, IEEE Transaction on, Vol. 8 No. 2, pp. 159-164, 1993.
- [14] M. J. Gibbard, Q. H. Kaan, *Identification of excitation system parameters*, Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, Vol. 94 No. 4, pp. 1201-1207, 1975.
- [15] E. J. Warchol, F. R. Schleif, W. B. Gish, J. R. Church, *Alinement and modeling of hanford excitation control for system damping*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90 No. 2, pp. 714-724, 1971.
- [16] A. Zazo, J. L. Zamora, L. Rouco, F. L. Pagola, *Identification of excitation systems from time response tests*, IEE Conference Publications, Vol. 1994 No. CP389, pp. 839-844, 1994.
- [17] W. Jin-Cheng, C. Hsiao-Dong, H. Chiang-Tsung, C. Yung-Tung, C. Chung-Liang, H. Chiung-Yi, *Identification of excitation system models based on on-line digital measurements*, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 10 No. 3, pp. 1286-1293, 1995.
- [18] J. H. Chow, M. T. Glinkowski, R. J. Murphy, T. W. Cease, N. Kosaka, *Generator and exciter parameter estimation of Fort Patrick Henry Hydro Unit 1*, Energy Conversion, IEEE Transaction on, Vol. 14 No. 4, pp. 923-929, 1999.
- [19] H. Yuan-Yih, L. Chuan-Sheng, L. Tain-Syh, C. Chung-Liang, L. Ah-Shing, C. Yung-Tien, H. Chiang-Tsung, *Experience with the identification and tuning of excitation system parameters at the second nuclear power plant of Taiwan power company*, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 11 No. 2, pp. 747-753, 1996.
- [20] G. Tzong-yih, L. Chuan-Shen, C. Yung-Tien, K. Chung-Kuang, H. Chiang-Tsung, *Identification of model parameters of excitation system and power system stabilizer of Mingtan#6 via finalization field tests*, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 10 No. 2, pp. 795-802, 1995.
- [21] J. J. Sanchez-Gasca, C. J. Bridenbaugh, C. E. J. Bowler, J. S. Edmonds, *Trajectory sensitivity based identification of synchronous generator and excitation system parameters*, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 3 No. 4, pp. 1814-1822, 1988.