

VRFT como estrategia de control basado en datos

VRFT as a data-driven control technique

Andrés Felipe Amaya-Pedraza¹, Fabián Leonardo Forero-Ordóñez², Ricardo Alzate-Castaño³

¹Ingeniero Electrónico, andres.amaya5@correo.uis.edu.co, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

²Magíster en Ingeniería Eléctrica, fabian.forero1@correo.uis.edu.co, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

³Doctor en Automatización, ralzatec@uis.edu.co, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Cómo citar: A.F. Amaya-Pedraza, F.L. Forero-Ordóñez, R. Alzate-Castaño, "VRFT as a data-driven control technique". *Respuestas*, vol. 27, no. 1, pp. 6-13, 2022.

Received on September 16, 2020; Approved on November 25, 2021

RESUMEN

Palabras clave:

Control basado en datos,
Técnica VRFT,
Generador de inducción
autoexcitado

El presente artículo aborda la técnica de sintonización por realimentación de referencia virtual (VRFT) para el diseño de controladores y su potencial de aplicación en plantas de modelo desconocido. Se plantean las bases conceptuales para el método y se ilustra su uso en un caso de estudio, correspondiente con un sistema de generación eléctrica basado en una máquina de inducción autoexcitada. Resultados de simulación considerando perturbaciones de carga y suministro de potencia, muestran que esta técnica basada en datos permite obtener un desempeño dinámico satisfactorio a partir únicamente de información de los conjuntos de estímulo y respuesta del sistema.

ABSTRACT

Keywords:

Data-driven control,
VRFT technique, Self-
excited induction generator

In this paper the Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) technique for calculation of control parameters on systems of unknown model is addressed. The conceptual base of the VRFT technique is revisited and then applied to regulate the dynamics of an electrical power generation unit composed of a self-excited induction machine. Numerical simulations performed on the electrical generator subjected to disturbances in the load and input power, allowed to verify a successful dynamical behavior for the controlled loop calculated with only input/output data sets.

Introducción

Las estrategias de control automático pueden dividirse inicialmente en dos grandes grupos: 1) las técnicas basadas en el modelo del sistema y 2) las técnicas basadas en los datos de operación del sistema. En el primer grupo se encuentran todas las metodologías clásicas de diseño de compensadores en el dominio de la frecuencia, y otras tantas en el espacio de estados cuando se asume un conocimiento suficiente de la estructura y de los parámetros del sistema [1].

Por otro lado, se tiene a partir del trabajo de Ziegler & Nichols en 1942, el primer registro documentado del cálculo de los parámetros de un controlador (PID) a partir de experimentos realizados sobre una planta desconocida [2]. Otro tipo de corrientes del control aceptan incertidumbres paramétricas (control robusto) o se adaptan a los cambios del entorno (control predictivo, control adaptativo) [2]. De manera más reciente, se puede hablar de combinaciones de técnicas de identificación de modelos y parámetros del sistema (lógica difusa, redes neuronales, máquinas de soporte vectorial) acopladas con técnicas basadas en el modelo [3]. En cualquier caso, es importante resaltar que un gran número de estrategias se fundamentan en datos para el cálculo de sus controladores (data-driven control). De manera más formal, se considera como pionero el trabajo de M. G. Safonov, quien introdujo por primera vez el concepto de: teoría de control desfalsificada [5]. Posteriormente, otros autores han propuesto estrategias similares para el caso de sistemas en tiempo discreto, permitiendo destacar la técnica denominada: sintonización por realimentación de

*Corresponding author.

E-mail Address: andres.amaya5@correo.uis.edu.co (Andrés Felipe Amaya Pedraza)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0

referencia virtual (VRFT), propuesta por Savaresi y Guardabassi [6]. A su vez, la técnica VRFT presenta adaptaciones más recientes para aplicaciones en sistemas no convencionales según presentado en la literatura [7, 8, 9, 10, 11].

El objetivo de las técnicas de control basado en datos, está orientado a la obtención de una manipulación dinámica apropiada a partir del menor número de información posible de la operación del sistema, es decir, con reducido costo computacional [12]. En este sentido se destaca el trabajo reciente de Bhattacharyya et al. aproximando modelos lineales para sistemas a partir de pocas mediciones [13]. Esta metodología fue empleada por Amit et al. [14] y Khadrahoui et al. [15]. Otros desarrollos interesantes corresponden con el trabajo de Sanfelice [16] y Campestrini [17]. El presente artículo aborda los principios fundamentales de la técnica VRFT, ilustrado su uso a través de un caso de ejemplo motivado en sistemas de generación eléctrica a partir de recursos renovables.

Materiales y Métodos

Control VRFT

Como ya mencionado, el control VRFT es una técnica de control basado en datos que asume información a priori de un modelo de referencia. La estructura general para este tipo de control se ilustra en la Figura 1. A partir de ella, se destacan los siguientes elementos: $P(z)$ es una planta en tiempo discreto desconocida; $C(z, \theta)$ es un controlador en tiempo discreto parametrizado por el vector θ ; $M(z)$ es un modelo de referencia proporcionado por el usuario, donde $\{u, y\}$ son señales conocidas de la operación del sistema.

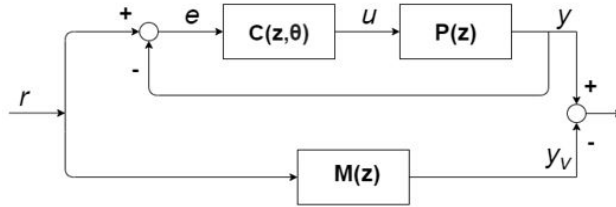


Figura 1. Estructura de control VRFT

De otro lado, la ley de control está sujeta a la minimización del siguiente funcional de costo:

$$J(\theta) = \left\| \left(\frac{C(z, \theta)P(z)}{1+C(z, \theta)P(z)} \right) r - M(z)r \right\|^2 = \|y - y_v\|^2 \quad (1)$$

el cual evidentemente busca igualar las respuestas del sistema original y el correspondiente al modelo de referencia.

Sin embargo, al no conocerse la expresión para $P(z)$, el único camino posible para resolver dicho funcional corresponde con la identificación de un modelo apropiado para la planta. Evitar dicha identificación es precisamente la filosofía del control basado en datos, y por tanto, se realiza la modificación mostrada en el esquema de la Figura 2, a partir del cual bajo la suposición: $y = y_v$ se cumple que $r_v = M^{-1}(z)$ y, siendo $M^{-1}(z)$ el modelo inverso de $M(z)$. Así entonces, se requiere satisfacer la siguiente igualdad:

$$u = u_v = C(z, \theta)e_v = C(z, \theta)(r_v - y) \quad (2)$$

transformado el problema de optimización a la minimización de:

$$J(\theta) = \|u - C(z, \theta)(r_v - y)\|^2 = \|u - u_v\|^2 \quad (3)$$

La equivalencia entre los funcionales de costo dado por (1) y (3) es demostrada en [13]. Por tanto, encontrar el vector de parámetros θ del controlador en tiempo discreto $C(z, \theta)$ que minimiza el funcional de costo (3), corresponde con resolver de manera óptima los requerimientos impuestos por el modelo de referencia $M(z)$.

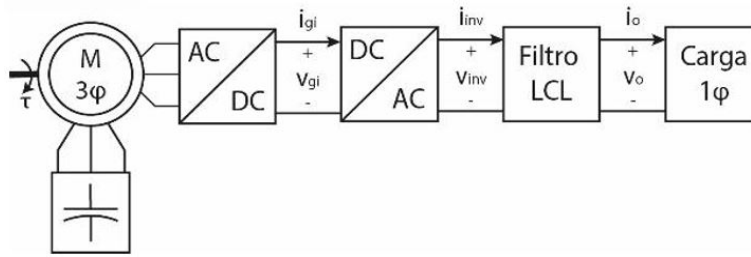


Figura 2. Esquema VRFT modificado

Implementación computacional de la técnica

La solución computacional para el problema de optimización referido, se realiza haciendo uso del conjunto de funciones para MATLAB y de acceso gratuito, desarrollado por *Marco C. Campi et al.* en la Universidad de Brescia en Italia. Implementación computacional de la técnica [14]

Para ejecutar la herramienta se requiere el ingreso de los siguientes parámetros principales:

- Vectores u e y , correspondientes con las muestras de señales de entrada y salida en la planta;
- La función de transferencia M para la relación deseada entre r e y ;
- El vector B de parámetros para una estructura de control predefinida y ponderable linealmente.

Adicionalmente, existen parámetros de uso específico que no serán explorados en el presente trabajo, pero que pueden consultarse en [14]. A partir de lo anterior, el llamado a la función desde la ventana de comandos de MATLAB es el siguiente:

```
>> [C, θ] = VRFT1_ry(u,y,M,B,[ ],[ ],[ ]);
```

entregando como salidas la función de transferencia del controlador óptimo C y el vector de parámetros θ .

Diseño experimental y análisis estadístico

Ejemplo ilustrativo

A manera de ejemplo, a partir del esquema funcional presentado en el diagrama de bloques de la Figura 3, se abordará el diseño de un controlador para regular la generación de tensión en un esquema aislado basado en una máquina de inducción autoexcitada.

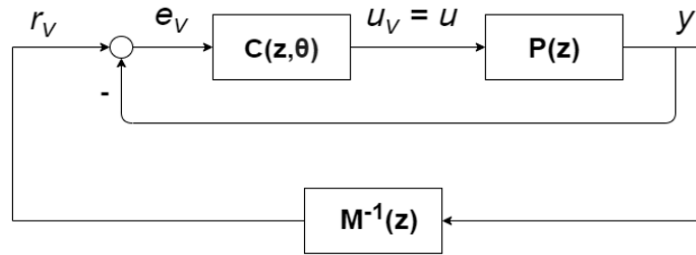


Figura 3. Diagrama de bloques para esquema de generación autoexcitado

De entrada, calcular una función de transferencia para la relación (indirecta a través del índice de modulación del PWM del circuito inversor) entre el par de entrada aplicado al generador y la tensión de salida en los bornes de la resistencia de carga, se hace una tarea compleja desde el punto de vista analítico. Por tal razón, se procede a realizar el cálculo para los parámetros de un controlador PI empleando la técnica VRFT según se describe a continuación.

Señales de entrada y salida para la planta

Empleando un experimento de simulación en MATLAB, constituido a través de la librería SimScape, se procedió a obtener la relación experimental de estímulo de entrada y respuesta de salida en el esquema circuital ilustrado en la Figura 4. Como señal de entrada se aplicó un índice de modulación constante, correspondiente con el valor nominal para la planta. Los valores de parámetros circuitales utilizados replican los desarrollos presentados por Machuca en [15].

Determinación del periodo de muestreo

Posteriormente, se aplicó el cálculo para la respuesta frecuencial del sistema a partir de un segundo experimento de simulación, en el cual se realizó variación sinusoidal para el índice de modulación del circuito inversor alrededor de su valor nominal, y se analizó su magnitud respecto a la variación obtenida en la tensión de salida en la resistencia de carga. La correspondiente relación entrada-salida en decibelios se muestra en la Figura 5, a partir de lo cual se establece como frecuencia máxima de esquina $\omega=157$ [rad/s] y, por tanto, puede justificarse un periodo de muestreo:

$$T = \frac{2\pi}{10\omega} = 4 \text{ [ms]} \quad (4)$$

asumiendo una frecuencia de muestreo de 10 veces la frecuencia máxima del espectro.

Selección para relación deseada entre referencia y salida

El comportamiento deseado para el sistema controlado en lazo cerrado se asume como una respuesta al escalón de tipo sobreamortiguado, con tiempo de establecimiento de alrededor de 4 [s] y valor final de 141.42 [VAC] RMS, lo cual equivale a decir que:

$$M(s) = \frac{141.42}{s+1} \Rightarrow M(z) = \frac{0.2823z+0.2823}{z-0.996} \quad (5)$$

cuando se emplea una aproximación bilineal para efectuar la discretización.

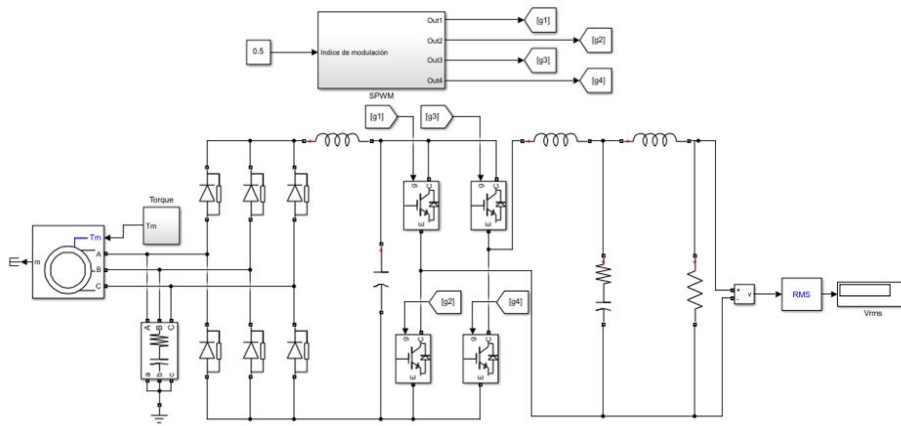


Figura 4. Circuito simulado en MATLAB

Definición para estructura del controlador

Como ya previamente establecido, se asume el cálculo para un controlador PI. Dicho compensador será configurado en la forma de posición con discretización del término integral a través de una forma bilineal; es decir:

$$\begin{aligned}
 U(s) &= k_p E(s) + k_i \frac{1}{s} E(s) && \Rightarrow \\
 U(z) &= k_p E(z) + k_i \left(\frac{T}{2} \frac{(1+z^{-1})}{(1-z^{-1})} \right) E(z) && \Rightarrow \\
 C(z, \theta) &= \frac{U(z)}{E(z)} = [k_p \ k_i] \left[1 \ \frac{T}{2} \frac{(1+z^{-1})}{(1-z^{-1})} \right] && \Rightarrow \\
 C(z) &= \theta B. && (6)
 \end{aligned}$$

Cálculo del controlador óptimo

Una vez definidos todos los parámetros en mención, se realiza el llamado a la función en MATLAB (VRFT1_ry) que realiza el cálculo para la función de transferencia del controlador que satisface los requerimientos a partir del método VRFT. Como resultado se obtiene lo siguiente:

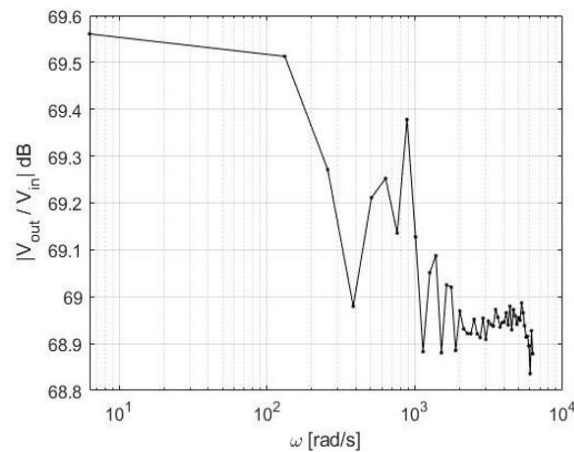


Figura 5. Respuesta en frecuencia del circuito obtenida experimentalmente

Resultados y Discusión

Verificación desempeño sistema controlado

La Figura 6 presenta los resultados de simulación para el sistema controlado con los parámetros óptimos recién calculados.

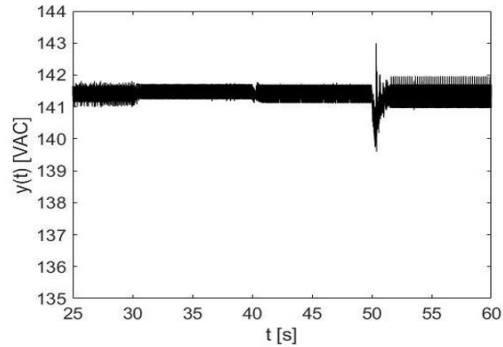


Figura 6. Respuesta del sistema controlado

Como se observa, el sistema restablece el valor final deseado $y(t)=141.42$ [VAC] a pesar de las perturbaciones aplicadas en la carga (pasando de 50 [k Ω] a 500 [k Ω] entre $t=30$ [s] y $t=40$ [s]) y en el par de entrada al generador (modificándose de $1,1$ [Nm] a $0,9$ [Nm] a partir de $t=50$ [s]) y con tiempos de respuesta dinámica consistentes con las características requeridas en el diseño.

Todo lo anterior se obtiene a expensas de un esfuerzo de control que no sobrepasa los límites de saturación (que para el índice de modulación van entre cero y uno), tal y como se indica en la Figura 7.

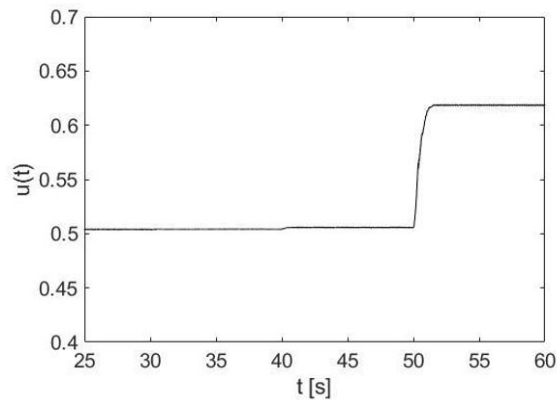


Figura 7. Esfuerzo de control

Estos resultados confirman el apropiado desempeño del controlador calculado empleando la técnica VRFT, y más importante aún, la independencia del conocimiento explícito de la función de transferencia de la planta para efectuar la apropiada sintonización del lazo.

Conclusiones

A partir de los desarrollos y resultados presentados es posible concluir que la técnica de control VRFT facilita la síntesis de controladores para el caso de sistemas con funciones de transferencia no conocidas. En particular, se demuestra la efectividad de la técnica para verificar la regulación en un lazo de control de generación de potencia

eléctrica, empleando como base la información de los conjuntos de datos de estímulo y respuesta del circuito (control basado en datos). Lo anterior presenta una alternativa interesante para muchos problemas prácticos en los cuales se dificulta acceder a representaciones analíticas y valores de parámetros del proceso bajo análisis.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Industrial de Santander por financiar, en el marco del proyecto VIE-UIS 2479 denominado: “Control Centralizado para un Sistema de Generación de Energía con Potencial Aplicación en Zonas Rurales del Departamento de Santander”, las actividades presentadas en el presente artículo.

Referencias

- [1] J. D. Correa, D. Rayo y J. Solano, “Macroscopic energy representation and simulation of a permanent magnet synchronous machine”, *Respuestas*, vol. 25, no. 3, pp. 154–164, July 2020.
- [2] J. Ziegler y N. Nichols, “Optimum settings for automatic controllers”, *Transactions of the ASME*, vol. 64, no. 1, pp. 759–768, October 1942.
- [3] F. Moreno, J. Ramirez y O. Ortiz, “Supervisory and control system for experimental bench of refrigeration compression”, *Respuestas*, vol. 21, no. 1, pp. 97 – 107, January 2016.
- [4] E. Ibarguen, J. Montoya y M. Vergel, “Mathematical model of the aquatic phase in the population growth dynamics of *Aedes aegypti* contaminated with *Wolbachia*”, *Respuestas*, vol. 25, no. 2, pp. 102 – 108, November 2020.
- [5] M. G. Safonov and T. C. Tsao. *The unfalsified control concept: A direct path from experiment to controller*. Berlin, Germany: Springer, 1995.
- [6] G. O. Guardabassi, y S. M. Savaresi, “Virtual reference direct design method: an off-line approach to data-based control system design”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no. 5, pp. 954–959, August 2000.
- [7] T. Ortegón y C. Serrano, “Simulation of the subprocess of filling, capping and pasteurized for the automation of a brewery”, *Respuestas*, vol. 21, no. 2, pp. 57 – 70, March 2016.
- [8] S. P. Bhattacharyya, L. H. Keel and D. N. Mohsenizadeh. *Linear Systems: A Measurement Based Approach*. Delhi, India: Springer, 2013.
- [9] A. Bhaya, E. Herrera y O. Diene, “Revisiting the maximum power transfer for linear n-ports with uncoupled loads and applications to power systems”, *Int. J. Circ. Theor. Appl.*, vol. 44, no. 1, pp. 1631–1656, June 2016.
- [10] S. Khadraoui, H. Nounou, M. Nounou, A. Datta y S. P. Bhattacharyya, “A model-free design of reduced-order controllers and application to a DC servomotor”, *Automatica*, vol. 50, no. 8, pp. 2142 – 2149, September 2014.

- [11] A. Sanfelice, L. Campestrini L. and D. Eckhard, *Data-driven controller design*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2012.
- [12] M. C. Campi, A. Lecchini y S. M. Savaresi, “Virtual reference feedback tuning (VRFT): a new direct approach to the design of feedback controllers”, no. 39 in *IEEE Conference on Decision and Control Proceedings*, (Sydney), pp. 623-629, IEEE, 2000.
- [13] A. Lecchini, M. C. Campi S. M. y Savaresi, “Virtual reference feedback tuning for two degree of freedom controllers”, *European Control Conference*, (Porto), pp. 2416-2421, IEEE, 2001.
- [14] G. Rallo, S. Formentin, C. R. Rojas y S. M. Savaresi. “Robust Experiment Design for Virtual Reference Feedback Tuning”, *IEEE Conference on Decision and Control*, (Miami), pp. 2271-2276, IEEE, 2018.
- [15] A. Kumar, Y. Zhang y M.-S. Chiu, "VRFT-based digital controller design using a generalized second-order reference model", *Computers & Chemical Engineering*, vol. 142, p. 107049, November 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107049>
- [16] M. C. Campi, A. Lecchini y S. M. Savaresi, “Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers”, *Automatica*, vol. 38, no. 8, pp. 1337-1346, April 2002.
- [17] A. Corleta, C. Lorenzini, J. Flores y L. Campestrini, “Data-driven control design applied to uninterruptible power supplies”. *IEEE Conference on Control Applications* (Buenos Aires), pp. 1312–1317, IEEE, 2016.
- [18] M. C. Campi y S. M. Savaresi, “Direct nonlinear control design: the virtual reference feedback tuning (VRFT) approach”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 51, no. 1, pp. 14–27, March 2006.
- [19] A. Care, F. Torricelli, M. C. Campi y S. M. Savaresi, “A Toolbox for Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT)”, no 18 in *European Control Conference*, (Naples), pp. 4252-4257, IFAC, 2019.
- [20] J. A. Machuca, “Control droop de un generador de inducción en una microrred simple,” B.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Univ. Ind. Santander, Bucaramanga, Colombia, 2020. [Online]. Available: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2020/179030.pdf>