

SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA DE CONVERSIÓN DE UN ARREGLO FOTOVOLTAICO BASADO EN OBSERVADOR

Fernando Valenciaga y Fernando A. Inthamoussou

Grupo de Control Aplicado (GCA), Instituto LEICI, FI-UNLP – CONICET
C.C. 91, CP 1900, La Plata, ARGENTINA
e-mail: intha@ing.unlp.edu.ar- fval@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El avance del cambio climático combinado con la inexorable extinción de los combustibles fósiles y el crecimiento de la población, han determinado un escenario en donde el interés por diferentes tipos de fuentes de energía renovable ha aumentado década tras década [1]. Dentro de la enorme variedad de fuentes renovables, la energía solar es considerada como una de las más prometedoras debido a su vasta presencia e inextinguibilidad (en la escala temporal humana) [2]. Adicionalmente, su libre disponibilidad y especial intensidad en los países menos desarrollados, favorecen las perspectivas de crecimiento de estas regiones que usualmente no poseen fuentes convencionales de energía.

Hoy en día, las plantas de energía basadas en la conversión PV, junto a las granjas eólicas, constituyen una de las principales opciones para nuevos proyectos de generación basados en fuentes renovables. A pesar de todas las ventajas de este tipo de explotación (simplicidad de instalación, bajo mantenimiento, insonoridad, etc.), las plantas de generación PV presentan un costo inicial relativamente alto y sufren de una eficiencia de conversión baja (15%-18%) [2]. Para reducir el costo de producción de la energía es esencial optimizar el proceso de conversión, es decir, operar al sistema en su punto de máxima potencia (PMP) siguiendo las fluctuaciones producidas por cambios en la radiación y temperatura de trabajo a lo largo del día/año [2-4].

En la bibliografía se reportan aproximadamente 40 métodos diferentes para el seguimiento del MPP[3]. Estos métodos pueden ser clasificados y comparados usando diferentes criterios como: velocidad de convergencia, eficiencia, complejidad de implementación, costo de cómputo, número de medidas necesarias, costo, etc. [3]. Debido a su facilidad de implementación y costo moderado, los métodos más usuales están basados en la metodología de perturbar y observar (PyO) [4]. Sin embargo las versiones más sencillas presentan oscilaciones en torno al PMP y divergen ante cambios atmosféricos rápidos.

Este trabajo presenta un nuevo método de búsqueda y seguimiento del PMP basado en un observador del gradiente de potencia combinado con un controlador PI en un esquema de lazo cerrado. El diseño del observador de gradiente de potencia está inmerso en el marco teórico de los modos deslizantes de segundo orden (MDSO), en particular, en el algoritmo super-twisting (STw), presentando tiempo de convergencia finito y robustez ante perturbaciones externas y dinámicas no modeladas [5-7].

La estructura del observador usado en este trabajo corresponde a la adaptación de un observador por MDSO genérico propuesto recientemente por Guzmán et al. 2015 [8], que puede ser utilizado para estimar variables afectadas por coeficientes bipolares variantes en el tiempo [8]. La topología de lazo cerrado propuesta presenta gran exactitud, velocidad de convergencia y seguimiento alta y requiere un bajo costo de cómputo. Su implementación no es compleja, empleando como máximo tres mediciones de tensión/corriente y presenta un costo relativo bajo, similar al involucrado en otras opciones discretas de algoritmos de seguimiento del

punto de máxima potencia (SPMP). El comportamiento de esta propuesta se evalúa a través de simulaciones y resultados experimentales.

Modelo del sistema PV

El sistema considerado se presenta en la Figura 1. Consta de un arreglo de módulos PV conectados a un bus de DC a través de un convertidor reductor DC-DC. Es conocido que un arreglo con n_p celdas en paralelo y n_s celdas en serie puede ser modelado a través del circuito denominado de 'un diodo', cuya corriente de salida puede ser expresada como [9][10]:

$$I_{pv} = n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{n_s A K T}} - 1 \right),$$

siendo $I_{ph} = I_{sc} + K_I(T - T_r) \sigma_i / 100 e$ la corriente foto-generada e inversa respectivamente. Los parámetros que aparecen en estas ecuaciones son: la carga del electrón (q), la constante de Boltzmann (K), un factor de idealidad (A), la temperatura de referencia (T_r), el coeficiente de temperatura de cortocircuito (K_I) y la resistencia serie del arreglo PV (R_s). Además, el modelo incluye dos variables: la temperatura de la celda (T) y la radiación solar incidente (σ_i).

Las figuras 2 y 3 muestran las conocidas características tensión-corriente y tensión-potencia de una celda PV típica para diferentes valores de radiación y temperatura. En ellas puede observarse la alta dependencia del PMP con respecto a esas variables.

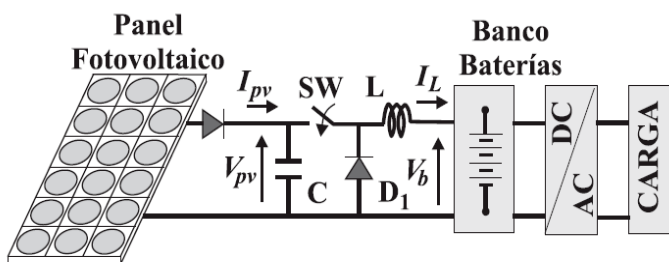


Figura 1: Esquema del sistema PV

donde $\delta \in [0,1]$ es una variable ficticia continua por tramos denominada ciclo de trabajo, que permite manejar el punto de operación del sistema PV. Considerando una señal de conmutación PWM de período constante T , esta variable de entrada se define como $\delta = T_{on} / T$.

El modelo dinámico promediado del sistema puede ser expresado como:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{pv} &= (I_{pv} - I_L \delta) / C \\ \dot{I}_L &= (V_{pv} \delta - V_b) / L, \end{aligned}$$

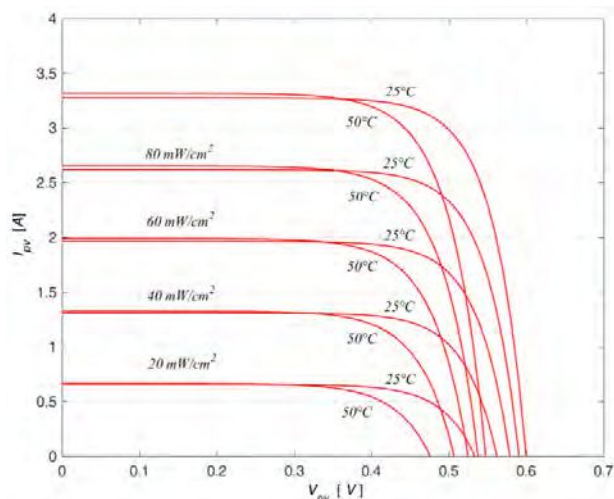


Figura 2: Característica tensión-corriente

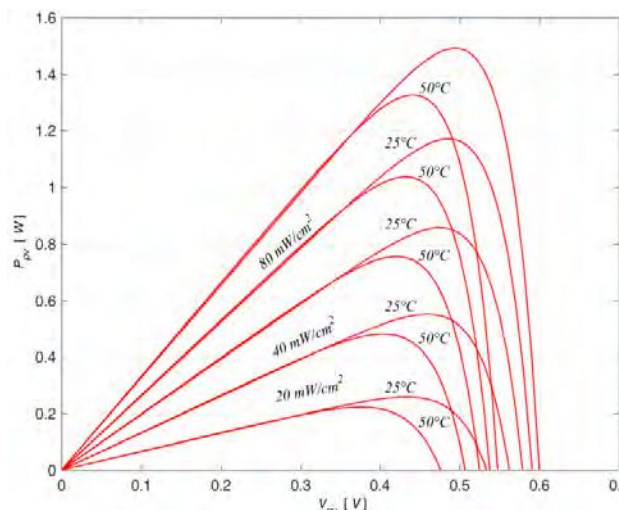


Figura 3: Característica tensión-potencia

Extracción máxima de potencia PV

De acuerdo con la bibliografía reciente, la maximización de la producción de energía PV en términos del seguimiento del MPP es el principal objetivo de las líneas de investigación actuales [3]. Teniendo en cuenta el perfil de potencia de la figura anterior es fácil ver que cualquier método de seguimiento debe conducir al sistema a operar en un valor de V_{pv} en donde la derivada de la potencia con respecto a la tensión en bornes sea idénticamente cero. Además, esta metodología debe ser capaz de mantener esta condición a pesar de las variaciones temporales de radiación y temperatura.

Topología del lazo de control

En este contexto, este trabajo introduce un nuevo método para el seguimiento del MPP basado en la combinación de un observador del gradiente de potencia por MDSO (STw) y un controlador PI. La Figura 4 muestra el diagrama en bloques correspondiente a esta propuesta. Como puede verse, la estimación del gradiente se inyecta directamente al controlador PI el cual

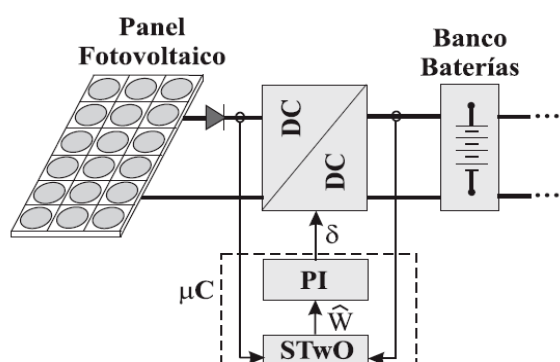


Figura 4: Diagrama del sistema de control

maneja el ciclo de trabajo del convertidor electrónico. Por lo tanto, si el observador produce una estimación real del gradiente de potencia, la acción de control del PI llevará al sistema a operar en una pequeña región en torno al MPP.

El observador del gradiente es diseñado utilizando MDSO (STwO). Este marco teórico define observadores que convergen en tiempo finito al valor real del gradiente (idealmente sin efectos de 'chattering'), robustos ante perturbaciones externas y/o dinámicas no modeladas y que requieren baja complejidad de implementación (bajo costo de cómputo) [5-7].

Diseño del observador SOSM en el Sistema PV

El reciente desarrollo de observadores por MDSO para sistemas con coeficientes variables bipolares [8], puede ser adaptado para diseñar un sistema SPMP a lazo cerrado exitoso. En este sentido, la potencia eléctrica generada por un arreglo PV puede ser escrita como $P_{pv} = I_{pv}V_{pv}$ y por lo tanto su derivada con respecto al tiempo resulta:

$$\dot{P}_{pv} = \frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} \dot{V}_{pv} = W (I_{pv} - I_L \delta) / C$$

Siendo W el gradiente de potencia a ser estimado, el cual depende del punto de operación y de variables externas como radiación incidente y temperatura. El factor entre paréntesis constituye el coeficiente bipolar variante en el tiempo. Luego, teniendo en cuenta las variables de las que depende W , su derivada con respecto al tiempo puede ser escrita como:

$$\dot{W} = \frac{\partial W}{\partial \delta} \dot{\delta} + \frac{\partial W}{\partial T} \dot{T} + \frac{\partial W}{\partial \sigma_i} \dot{\sigma}_i$$

Así, acotando las expresiones de los factores $\frac{\partial W}{\partial \delta}$, $\frac{\partial W}{\partial T}$ y $\frac{\partial W}{\partial \sigma_i}$ para el caso más desfavorable, pueden determinarse las constantes del observador que aseguran su convergencia en tiempo finito al valor real del gradiente. Los detalles de este diseño pueden verse en [11]. Una vez concluido este procedimiento se obtiene la expresión del observador por MDSO (STwO):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{P}}_{pv} &= -k_1 \left| (I_{pv} - I_L \delta) / C \right| |e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(e_1) + \left((I_{pv} - I_L \delta) / C \right) \widehat{W} \\ \dot{\widehat{W}} &= -k_2 \left((I_{pv} - I_L \delta) / C \right) \text{sign}(e_1) \end{aligned}$$

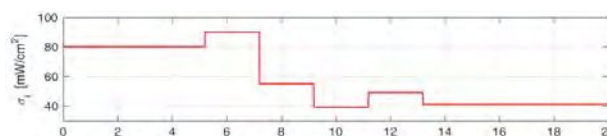
donde $e_1 = \hat{P}_{pv} - I_{pv} V_{pv}$ y k_1, k_2 constantes obtenidas del procedimiento de diseño. Cumpliendo las condiciones requeridas se asegura entonces que las estimaciones de potencia y gradiente convergen a sus valores reales en tiempo finito a pesar de la existencia de dinámica no modelada y/o perturbaciones acotadas consideradas. Una vez que el observador converge al valor real del gradiente de potencia, el control de lazo cerrado usa esta estimación para alimentar el controlador PI el cual, actuando sobre el ciclo de trabajo del convertidor electrónico, conduce al sistema a operar en un punto donde la estimación del gradiente es cero. Cabe remarcar que la implementación del observador requiere medir las variables V_{pv} , I_{pv} e I_L .

RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTALES

El comportamiento del método propuesto es evaluado mediante simulaciones organizadas en dos casos, con el objetivo de demostrar sus características de alcance y seguimiento. Para ello se consideró un sistema PV de 60W con $A = 1,60$, $K_i = 0,0017$, $I_{or} = 2,0793$ [A], $T_r = 301,18$ [K], $E_{g0} = 1,10$ [eV], $n_p = 1$ y $n_s = 72$ y un convertidor medio puente reductor con $C = 100\mu\text{F}$ y $L = 0,342$ mHy. El primer caso (Caso A) considera perfiles de radiación y temperatura escalonados no correlacionados, mientras que el segundo (Caso B) recrea condiciones de operación realistas con perfiles de radiación y temperatura variables y continuos.

En ambas simulaciones puede observarse la correcta estimación del observador de gradiente en términos de su error ($\widehat{W} - W$) y la efectividad del sistema de lazo cerrado propuesto para el SPMP. Debe observarse que en el caso A la efectividad se muestra en términos del seguimiento de la tensión óptima, mientras que en el caso B esta evaluación se realiza en términos de potencia. Cabe aclarar que los picos observados en el error de estimación del gradiente del caso A son producidos por cambios instantáneos en los perfiles de radiación y temperatura no contempladas en la etapa de diseño.

Resultados caso A



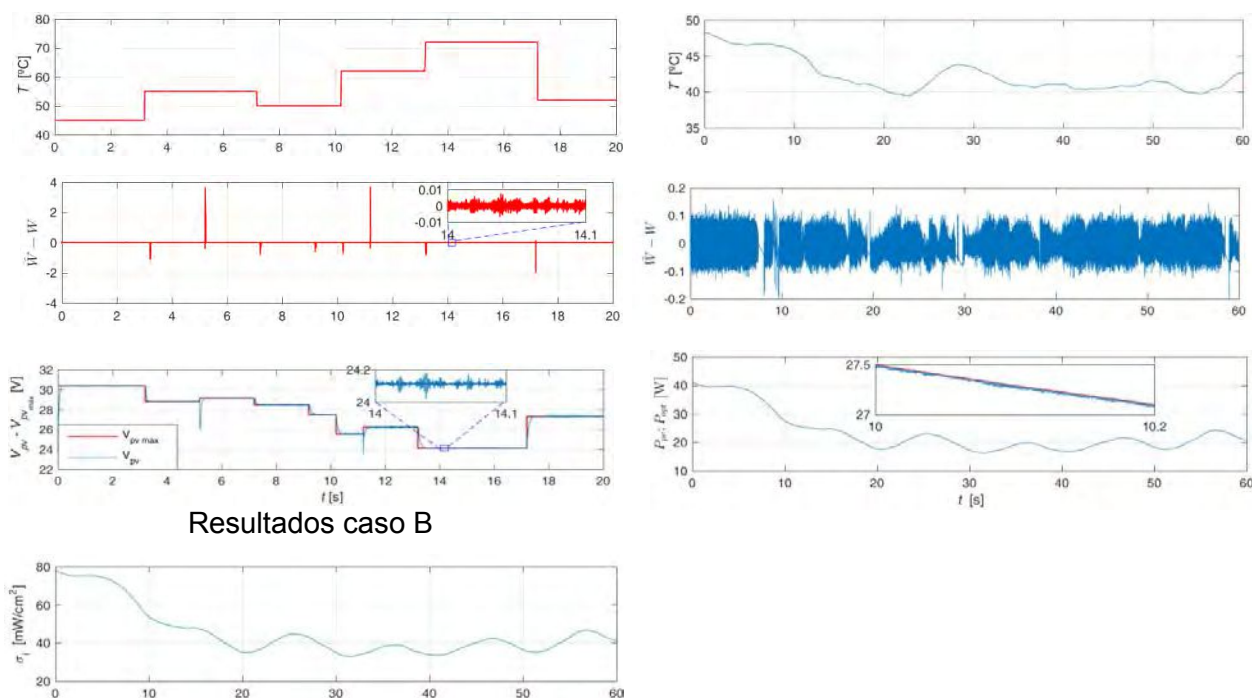


Figura 5: Resultados de dos casos de simulación

Para realizar la evaluación experimental de la propuesta se implementó el sistema de conversión fotovoltaica que se observa en la figura 6. El mismo consta de dos paneles comerciales de 30W conectados en serie, un convertidor reductor medio puente, una placa de adquisición/procesamiento de Texas Instruments y un banco de baterías de 12V con una carga resistiva.

Los resultados experimentales se presentan en la figura 7. Esta figura muestra las dos fases consideradas durante la prueba experimental. La primera de ellas realiza un barrido del ciclo de trabajo del convertidor con el fin de identificar los puntos de potencia máxima y su ubicación en términos de la tensión en bornes del panel para las condiciones ambientales imperantes (desde $t = -0,4s$ hasta $t = 0s$). En el instante cero, el lazo de control se cierra y comienza la segunda fase del experimento. En ella puede verse que, a partir de la exitosa observación del gradiente de la curva de potencia, el sistema logra una rápida convergencia hacia el PMP identificado anteriormente, manteniendo del punto de operación en una estrecha vecindad del PMP.

CONCLUSIONES

Se presentó un nuevo sistema de búsqueda y seguimiento del máximo punto de conversión de potencia para sistemas de generación fotovoltaicos. El mismo está basado en un lazo cerrado de control que combina un observador de gradiente de potencia y un controlador PI. El observador de gradiente se diseñó a partir de técnicas de modo deslizante de segundo orden para sistemas con coeficientes bipolares variantes en el tiempo. La propuesta se evaluó a partir de simulaciones representativas y pruebas experimentales. Los resultados obtenidos muestran un excelente comportamiento no solo ante perfiles escalonados



Figura 6: Sistema experimental

de radiación y temperatura si no también bajo condiciones de funcionamiento reales. El sistema de búsqueda y seguimiento del PMP presenta una rápida velocidad de convergencia y seguimiento y bajo nivel de desajuste alrededor del punto de operación buscado. Otras características interesantes de la propuesta son su bajo costo computacional y la robustez del observador ante perturbaciones externas acotadas y dinámica no modelada.

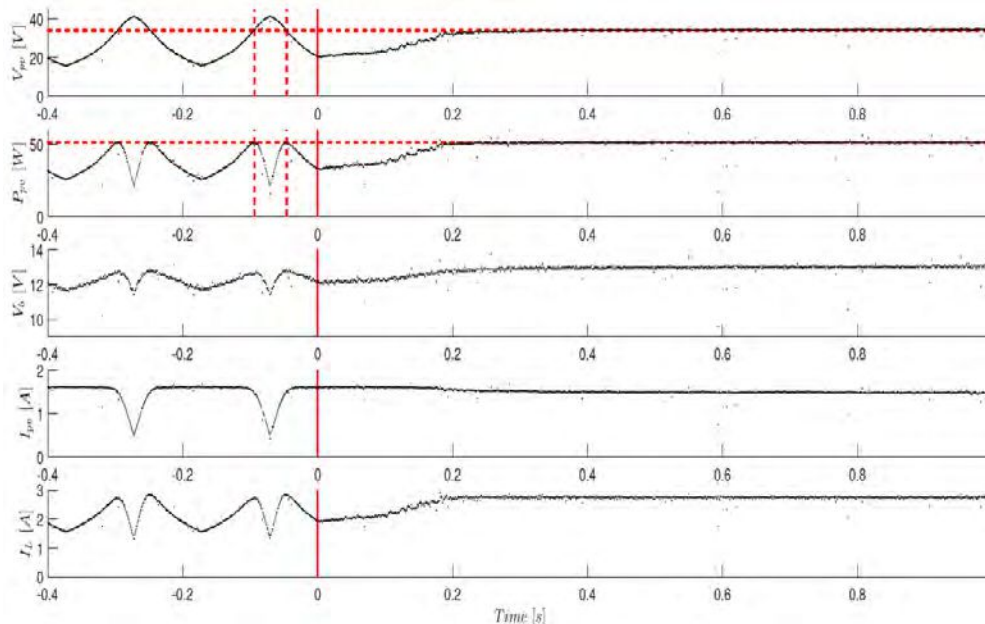


Figura 7: Resultados experimentales

REFERENCIAS

- [1] R. R. 2017, Global status report, Tech.Rep.,REN21 Secretariat-ISBN978-3-9818107-6-9 (2017).
- [2] Çelik, A. Teke, A hybrid mppt method for grid connected photovoltaic systems under rapidly changing atmospheric conditions, *Electric Power Systems Research*, 152 (2017), pp. 194–210. Doi:org/10.1016/j.epsr.2017.07.011.
- [3] D. Verma, S. Nema, A. M. Shandilya, S. K. Dash, Maximum powerpoint tracking (mppt) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2016),pp. 1018–1034. Doi: org/10.1016/j.rser.2015.10.068.
- [4] A. Kchaou, A. Naamane, Y. Koubaa, N. M'sirdi, Second order sliding-based mppt control of photovoltaic applications, *Solar Energy*, 155 (2017), pp. 758–769. Doi: 10.1016/j.solener.2017.07.007.
- [5] L. Fridman, J. Moreno, R. Iriarte, *Sliding Modes after the first Decade of the 21st Century: State of the Art*, Springer, New York, 2011.
- [6] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, L. A, *Sliding Mode Control and Observation*, Springer, New York, 2014.
- [7] A. Chalanga, S. Kamal, L. Fridman, B. Bandyopadhyay, J. Moreno, Implementation of super-twisting control: Super-twisting and higher order sliding-mode observer-based approaches, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (6) (2016), pp. 3677–3685. Doi: 10.1109/TIE.2016.2523913.
- [8] E. Guzman, J. Moreno, Super-twisting observer for second-order systems with time-varshing coefficient, *IET Control Theory and Applications*, 9(4) (2015), pp. 553–562.doi: 10.1049/iet-cta.2014.0348.

- [9] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, M. Osakada, Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 142(1) (1995), pp. 59–64. Doi: 10.1049/ip-gtd:19951577.
- [10] J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Dordrecht, The Netherlands: John Wiley & Sons Inc., 1991.
- [11] F. Valenciaga, F.A. Inthamoussou, A Novel PV-MPPT Method Based on a Second Order Sliding Mode Gradient Observer, *Energy Conversion and Management*, 176 (2018), pp. 422-430. Doi:10.1016/j.enconman.2018.09.018