

ESTRATEGIA MPPT PARA CONDICIÓN DE SOMBRAS PARCIALES*

Inthamoussou, Fernando A. y Valenciaga, Fernando

Grupo de Control Aplicado (GCA), Instituto LEICI, Facultad de Ingeniería, UNLP - CONICET
{intha,fval}@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: sistemas fotovoltaicos, MPPT, sombras parciales

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se han propuesto varias estrategias para la obtención del Punto de Operación de Máxima Potencia (POMP) bajo condiciones de sombras parciales [1–4]. Si bien algunas de ellas tratan de adaptar las metodologías empleadas históricamente para la búsqueda y seguimiento del POMP, también se han desarrollado diferentes enfoques basados en el relevamiento de la característica de potencia del arreglo mediante técnicas de barrido. Dentro de este último grupo se encuentran las que realizan un barrido de la característica de potencia a través de la variación del ciclo de trabajo del convertidor [6], las que usan los elementos reactivos en conjunto con las llaves del convertidor [2] y las que agregan un circuito extra entre el arreglo fotovoltaico y el convertidor de potencia [4]. Las estrategias que utilizan el ciclo de trabajo del convertidor o sus elementos reactivos, además de interrumpir la energía entregada a la carga, se ubican entre las más lentas, mientras que las que incorporan un circuito específico dedicado a tal fin logran una mayor velocidad. En cualquier caso, la gran mayoría de estas propuestas usan la información obtenida para determinar la tensión de referencia que luego emplea algún método de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT).

En este trabajo se propone una estrategia MPPT basada en el barrido periódico de la característica del arreglo fotovoltaico. De este barrido se obtiene la tensión a la cual se encuentra el POMP para las condiciones imperantes de radiación y temperatura. Luego, esta tensión es usada como referencia por un controlador por Modos Deslizantes (MD) de primer orden [5], encargado de regular la tensión en bornes del arreglo. Dado que el barrido se realiza en un período de tiempo muy corto, la energía suministrada a la carga no se ve interrumpida. Esto determina que el mismo pueda realizarse de forma periódica a intervalos de tiempo muy cortos evitando así la necesidad de combinar este método con alguna otra estrategia de seguimiento del POMP. Alternativas al barrido periódico podrían construirse en base al monitoreo de alguna variable (i.e. la potencia generada) que, en base a algún umbral de cambio, dispere su realización. De esta forma los barridos periódicos pueden combinarse con barridos demandados por cambios repentinos en las condiciones climáticas. Por otro lado, la utilización de un controlador diseñado por MD permite que los cambios de funcionamiento entre puntos de operación se realicen a máxima velocidad, limitados solamente por los valores de los elementos reactivos del convertidor. Esta es una diferencia importante con otros métodos en los cuales la velocidad de convergencia se encuentra limitada por la dinámica del PWM y la estrategia MPPT asociada.

2. DESCRIPCIÓN DEL EFECTO DE LAS SOMBRAS PARCIALES

En la Fig. 1 se muestra esquemáticamente la interconexión en serie de las celdas que componen un módulo fotovoltaico. En el caso a) todas las celdas están igualmente iluminadas, en el caso

*UNA VERSIÓN DE ESTE TRABAJO FUE PRESENTANDO EN AADECA'20.

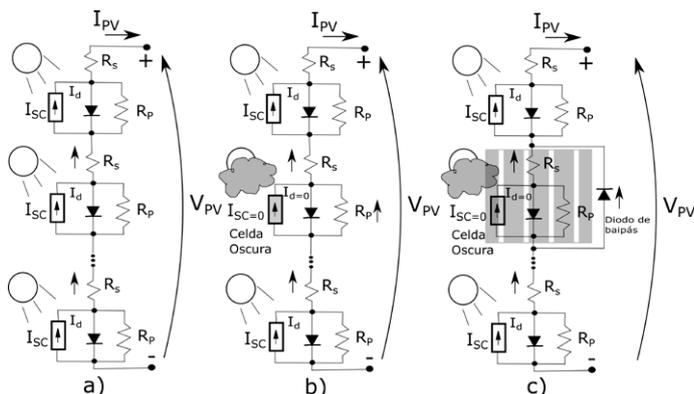


Figura 1: Módulo fotovoltaico: a) uniformemente iluminado, b) una celda oscura, c) con diodo de bypass.

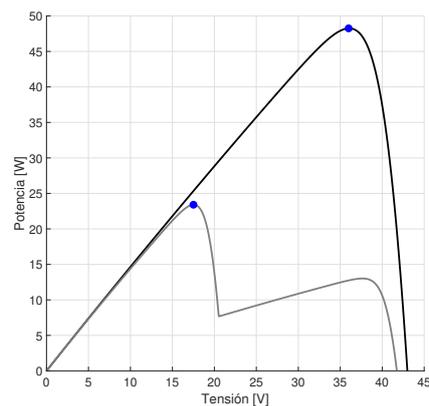


Figura 2: Característica V-P. Negro: uniformemente iluminado, Gris: sombra parcial.

b) una de las celdas está sombreada y en el c) se agrega un diodo de bypass sobre la celda sombreada. Cada celda se representa por el modelo de un diodo, incluyendo su resistencia serie y paralelo.

Ante condiciones de radiación uniforme, caso a), todas las celdas generan idealmente la misma corriente de cortocircuito, siendo la tensión total en bornes la suma de las tensiones de cada una de ellas. Cuando esto ocurre la característica tensión-potencia (V-P) de un módulo presenta la forma que se muestra en negro en la Fig. 2. Supóngase ahora que por algún motivo una de las celdas se encuentra completamente oscurecida, como se muestra en la Fig. 1b). Al no recibir radiación esta celda no genera corriente eléctrica, pero debido a que el resto de las celdas sí están generando, la corriente circula a través de su resistencia serie y paralelo, polarizando en inversa el diodo del modelo. De esta forma, la celda oscurecida no sólo no aporta en la generación, sino que ahora se comporta como una carga. Esto tiene asociados dos inconvenientes: por un lado, la potencia generada por el módulo disminuye drásticamente debido a la caída de tensión que se produce en las resistencias serie y paralelo; por el otro, al comportarse como una carga, la celda no iluminada disipará energía aumentando su temperatura, produciendo así un punto caliente puede llevar a su destrucción. Con el objetivo de evitar estos puntos calientes y aumentar la potencia generada, una práctica común es incorporar un diodo de bypass a cada celda, o grupo de celdas, Fig. 1c). De esta forma, cuando una celda se oscurece, o está menos iluminada que el resto, el diodo añadido se polariza en directa y la corriente circula por él en lugar de hacerlo por las resistencias serie y paralelo. De esta forma, no se disipa energía en las mismas limitándose así la caída de tensión en bornes de la celda oscurecida. Esta tensión corresponde ahora a la del diodo de bypass polarizado en directa. Como consecuencia la característica tensión-potencia se modifica presentando máximos locales de potencia como se muestra en gris en la Fig. 2. Esto trae como inconveniente el posible mal funcionamiento de los métodos MPPT tradicionales ya que pueden quedar atrapados en máximos locales.

3. SISTEMA Y ESTRATEGIA DE BARRIDO

La Fig. 3 muestra el esquema del sistema compuesto por un arreglo fotovoltaico de dos módulos de 30 W conectados en serie, un convertidor DC-DC, un bus de continua y el circuito anexo entre el arreglo y el convertidor para realizar el barrido de la característica V-P.

3.1. Estrategia de barrido

Para obtener la característica V-P del arreglo se realiza un barrido de tensión (circuito resaltado en la Fig. 3) en sus bornes al mismo tiempo que se miden su corriente y su tensión.

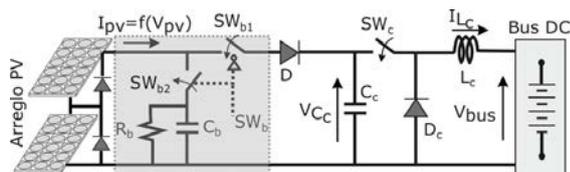


Figura 3: Sistema.

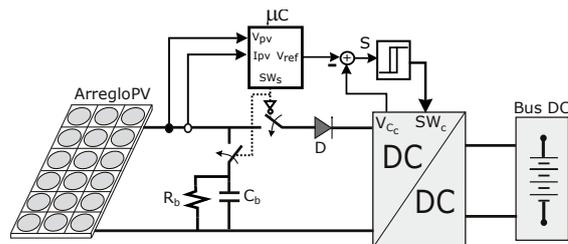


Figura 4: Sistema a lazo cerrado.

Las llaves del circuito de barrido operan de manera complementaria. La secuencia de operación del circuito de barrido presenta los siguientes pasos:

1. Se abre la llave SW_{b1} y se cierra SW_{b2} .
2. Como el capacitor C_b se encuentra descargado fija como punto de operación el correspondiente a una tensión cero en bornes con una corriente determinada por la corriente de cortocircuito del arreglo. A partir de este punto el capacitor comienza a cargarse hasta el punto de tensión de circuito abierto y corriente cero.
3. Mientras se realiza la carga del capacitor (barrido de la característica V-P) se toman muestras de la tensión y corriente.
4. Cuando la corriente del arreglo llega a cero (barrido completado) se cierra SW_{b1} y se abre SW_{b2} . A partir de aquí el capacitor (C_b) se empieza a descargar a través de R_b para estar listo para el próximo barrido.
5. De las muestras de tensión y corriente se obtiene el valor de potencia máxima como así también el valor de tensión al que se da esta potencia.
6. Se actualiza la referencia del controlador con la tensión obtenida.

Observación 1 No es necesario que el capacitor esté completamente descargado, sino que su tensión se corresponda con un valor bajo, de forma tal que permita recorrer la parte substancial de la característica V-P.

3.2. Dimensionamiento de los elementos del circuito de barrido

Para que esta estrategia funcione adecuadamente es necesario diseñar correctamente el capacitor (C_b) y la resistencia (R_b) utilizados en el circuito de barrido. En este sentido se fija como tiempo total de barrido el correspondiente a un período de conmutación del convertidor, del orden de $25\mu s$ con la idea de que el barrido no dure más que este período y así la energía suministrada a la carga no se ve interrumpida. Los pasos de diseño siguen la siguiente secuencia:

1. La evolución de la tensión en el capacitor durante el barrido se puede escribir como:

$$v_{C_b} = \frac{1}{C_b} \int_0^t I_{CC} dt,$$

donde se consideró que el capacitor se carga a corriente constante (corriente de cortocircuito del arreglo). Por otro lado la variación de tensión en C_b puede expresarse como:

$$\Delta v_{C_b} = I_{CC} \Delta t / C_b,$$

fijando $\Delta t = 25\mu s$ se puede despejar C_b :

$$C_b = I_{CC} \Delta t / \Delta v_{C_b}.$$

Luego, considerando que la variación de tensión en el capacitor en este tiempo será de 43 V (dos módulos en serie) y que la corriente de cortocircuito de los módulos es de 1.86 A, el valor de C_b resulta:

$$C_b = 1,86 A \times 25\mu s / 43 V = 1,08\mu F.$$

seleccionando el valor comercial de $1\mu F$.

2. Para el cálculo de R_b es necesario tener en cuenta cada cuanto tiempo se realizará

el barrido, de forma que el capacitor se encuentre descargado cada vez que comience uno nuevo. Asumiendo que el barrido se realiza cada 20 ms y considerando un tiempo de descarga (t_d) de dos constantes de tiempo ($\tau = R_b \times C_b$), el valor de R_b se

determina como:

$$t_d = 2 \times R_b \times C_b \Rightarrow R_b = t_d/2 \times C_b$$

resultando un valor de 10 kΩ. Esta resistencia es lo suficientemente grande como para no afectar la carga del capacitor.

Como frecuencia de muestreo se eligió emplear 1 MSPS lo cual determina un total de 25 muestras dentro del período que determina la excursión de la corriente de cortocircuito. Como esta corriente cae a medida que se llega al máximo por la resistencia serie del arreglo, el número de muestras que se obtiene es mayor, resultando adecuado para la precisión buscada.

Observación 2 Las técnicas de barrido que usualmente se presentan utilizan 3 o más llaves para realizar esta tarea. En el caso del circuito propuesto sólo se utilizan dos lo cual redundante tanto en un menor costo como en una mayor robustez del sistema. Respecto al tipo de llaves a utilizar, pueden considerarse tanto relés de estado sólido como transistores Mosfet.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

La tensión a la cual se produce el POMP es usada como referencia por un controlador implementado por MD de primer orden [5] a través de un circuito de histéresis. Un esquema de la topología propuesta se presenta en la Fig. 4.

4.1. Dinámica del convertidor

En la Fig. 3 puede observarse que la dinámica del convertidor cambia con la posición de la llave SW_c . Cuando está abierta hay dos sub circuitos aislados, teniendo cada uno de ellos la dinámica correspondiente a un integrador. Cuando la llave está cerrada se obtiene un circuito LC con un par de polos sobre el eje imaginario (despreciando las pérdidas). El comportamiento dinámico del convertidor puede representarse mediante

un modelo único:

$$\begin{cases} \dot{V}_{C_c} = \frac{I_{pv}(V_{C_c})}{C_c} - \frac{I_{L_c}}{C_c} SW_c \\ \dot{I}_{L_c} = -\frac{V_{bus}}{L_c} + \frac{V_{C_c}}{L_c} SW_c \end{cases} \quad (1)$$

donde SW_c representa la posición de la llave electrónica (1 cuando la llave está cerrada y 0 en caso contrario).

4.2. Regulación de tensión

El objetivo de control es regular la tensión en bornes del arreglo (sobre C_c). Se considera entonces la posibilidad de establecer un modo deslizante sobre la recta $S(x) = V_{C_c} - V_{ref} = 0$, siendo x el vector de estados. Se propone entonces $SW_c = 0,5 + 0,5 \text{sign}(V_{C_c} - V_{ref})$ como acción de control.

Esta superficie de deslizamiento cumple con la condición de transversalidad necesaria para la existencia del modo deslizante: $\frac{-I_{L_c}}{C_c} < 0$. Se asegura así que las trayectorias del sistema siempre evolucionen hacia la superficie, cualquiera haya sido su posición inicial. La condición necesaria y suficiente de convergencia se obtiene empleando el método del control equivalente. Su expresión puede obtenerse a partir de la condición de invariancia dada por: $S = 0$ y $\dot{S} = 0$. Realizando estos cálculos se obtiene $SW_{ceq} = I_{pv}(V_{C_c})/I_{L_c}$.

La condición necesaria y suficiente para la existencia del MD es que el control equivalente se mantenga entre los límites de control $SW_c = 0$ (llave abierta) y $SW_c = 1$ (llave cerrada). Es decir, el dominio del modo deslizante sobre la recta $S(x) = V_{C_c} - V_{ref} = 0$ es $0 < I_{pv}(V_{ref}) < I_{L_c}$. En

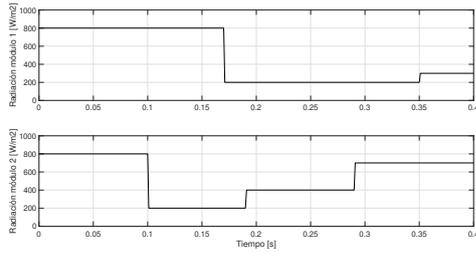


Figura 5: Perfil de radiación en los módulos.

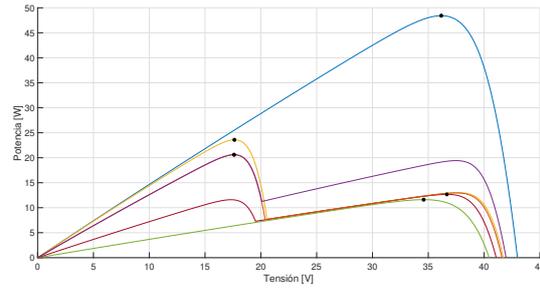


Figura 6: Características V-P para Fig. 5.

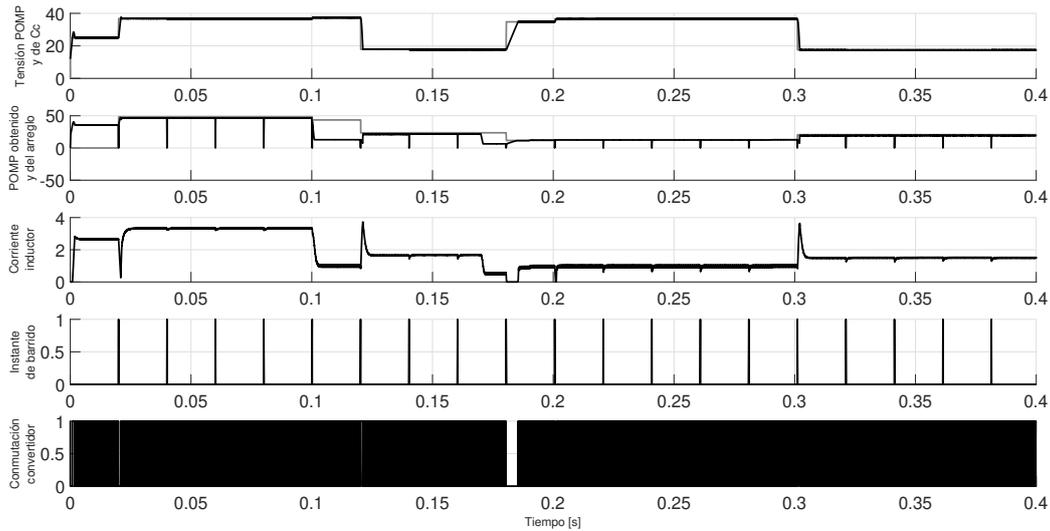


Figura 7: Resultados de simulación.

otras palabras, existirá modo deslizante sobre la recta $V_{C_c} = V_{ref}$ sólo cuando la corriente del inductor excede a la del módulo. La dinámica resultante del modo deslizante se reduce a una de primer orden dada por $\dot{I}_{L_c} = -V_{bus}/L_c + V_{C_c}I_{pv}(V_{C_c})/(L_cI_{L_c})$. De esta ecuación se puede ver que existe un único punto de equilibrio sobre la superficie y que el mismo es estable globalmente. Las coordenadas de este punto de equilibrio son: $V_{C_c} = V_{ref}$ e $I_{L_c} = V_{ref}I_{pv}(V_{ref})/V_{bus}$. Si se reemplaza esta corriente en la condición necesaria y suficiente obtenida previamente, surge que el valor de referencia debe ser $V_{bus} < V_{ref} < V_{OC}$, donde V_{OC} es la tensión de circuito abierto del arreglo. La condición de existencia obtenida es sólo local, sin embargo se puede demostrar, teniendo en cuenta las trayectorias del sistema, que el dominio de MD es globalmente atractivo.

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El sistema fue implementado en el entorno Matlab®/Simulink® utilizando SimPowerSystems® con parámetros reales y lo más cercano a una implementación real posible. Se simuló que cada módulo del arreglo pueda recibir una radiación y temperatura de trabajo distinta. La Fig. 5 muestra los perfiles de radiación utilizados y la Fig. 6 las características V-P para cada caso.

La Fig. 7 muestra los resultados de simulación al imponerle al sistema los perfiles de radiación antedichos. De arriba hacia abajo se presentan: tensión de referencia del controlador obtenida del barrido (en gris) y tensión en el capacitor C_c (en negro); potencia máxima obtenida del barrido (en gris) y potencia en bornes del arreglo (negro); corriente por el inductor; instantes de barrido y la señal de conmutación del convertidor.

Como se puede ver en la Fig. 7 el sistema arranca ($0 < t < 20ms$) con una referencia de tensión (25V) fijada arbitrariamente. Esto se corresponde con un valor de POMP igual a cero (línea gris en el segundo cuadro) dado que aún no se ha realizado ningún barrido. Si bien podría haberse optado por generar un barrido inicial y luego fijar la referencia inicial, se eligió esta secuencia de arranque para mostrar como el sistema puede iniciar su funcionamiento desde condiciones iniciales nulas en forma autónoma. Una vez que el sistema encontró su primera referencia óptima, opera realizando barridos periódicos (cada 20 ms) de manera de poder seguir las posibles variaciones del POMP.

Desde $t = 0,02s$ hasta $t = 0,1s$ se producen cinco barridos obteniéndose siempre la misma tensión POMP de referencia dado que la radiación se mantuvo constante en este lapso de tiempo. Los picos que se observan en la potencia en bornes del arreglo (segundo cuadro del gráfico) se corresponden con los instantes de barrido. De todas formas, la corriente suministrada a la carga no se ve interrumpida como lo muestra la gráfica que presenta la corriente en el inductor.

En $t = 0,1s$ (situación que se repite en $t = 0,17s$), el barrido y un cambio abrupto en la radiación de uno de los módulos ocurren simultáneamente. Como consecuencia, la tensión de referencia obtenida no corresponde al POMP determinado por la radiación final. Esto genera un error que se mantiene 20 ms como máximo, que es el intervalo previo al siguiente barrido ($t = 0,12s$). Esta circunstancia particular no se considera relevante ya que los perfiles de radiación no varían tan abruptamente en situaciones reales. De todas formas este tiempo puede ser reducido de tres formas. La primera, y más simple, consiste en disminuir el tiempo entre barridos. La segunda consiste en acoplar esta técnica con algún algoritmo de seguimiento del POMP estándar (i.e. P&O). La tercer opción consiste en realizar los barridos como se ha comentado agregando otra condición que dispare un barrido antes de lo estipulado. Esta condición podría por ejemplo estar dada por una caída o aumento rápido en la potencia generada. Luego, fijado un umbral en la variable seleccionada podrían dispararse barridos condicionados que incluso permitirían que el tiempo entre barridos periódicos bajo circunstancias normales sea extendido.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran la aplicabilidad de la propuesta y su buen desempeño. La gran velocidad de barrido en combinación con el control por MD permiten prescindir de las técnicas estándar de seguimiento aunque la propuesta se puede adaptar al empleo de este tipo de estrategias.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por UNLP (I253 e I258) y CONICET (PIP 0837).

REFERENCIAS

- [1] S. Hosseini et. al., *A High-Performance Shade-Tolerant MPPT Based on Current-Mode Control*. IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 34, no. 10, pp. 10327-10340, 2019.
- [2] S. Selvakumar et. al., *High-Speed Maximum Power Point Tracking Module for PV Systems*. IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 66, no. 2, pp. 1119-1129, 2019.
- [3] J. Ahmed. et. al., *An Accurate Method for MPPT to Detect the Partial Shading Occurrence in a PV System*. IEEE Trans. on Industrial Informatics, vol. 13, no. 5, pp. 2151-2161, 2017.
- [4] R. Ahmad et. al. *An MPPT technique for unshaded/shaded photovoltaic array based on transient evolution of series capacitor*. Solar Energy, vol. 157, pp 377-389, 2017.
- [5] Y. Shtessel et. al. *Sliding Mode Control and Observation*. Springer, 2014.
- [6] A. Kouchaki et. al. *A new maximum power point tracking strategy for PV arrays under uniform and non-uniform insolation conditions*. Solar Energy, vol. 91, 2013, pp. 221-232.