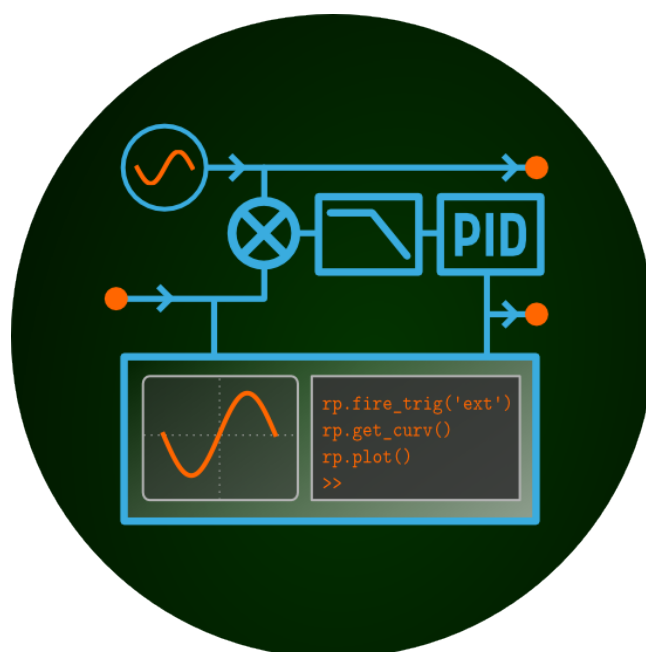


UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Diseños de Sistemas de Control para Convertidores de Potencia

Kaseng Fong Chen

I - 2021



ÍNDICE

1 Sistema a controlar	1
1.1 Especificaciones de diseño	1
2 Control en Cascada	2
2.1 Sistema de control para los paneles solares de 2KW	2
2.1.1 Lazo interno	3
2.1.2 Sintonización	4
2.1.3 Lazo externo	5
2.1.4 Sintonización	6
2.1.5 Anti-Windup Paneles solares.	8
2.2 Sistema de control de la batería de 48V	9
2.2.1 Lazo interno	9
2.2.2 Sintonización	10
2.2.3 Lazo externo	11
2.2.4 Sintonización	12
2.2.5 Anti-Windup Batería	13
3 Control Predictivo	14
3.1 Control Predictivo para los paneles solares de 2KW	14
3.1.1 Cálculo de la Función de Costo J	14
3.1.2 Pruebas del MPC	16
3.2 Control Predictivo para la batería de 48V	18
3.2.1 Calculo de la Función de Costo J	18
3.2.2 Pruebas del MPC	20
3.2.3 Implementación de FeedForward	21

1. SISTEMA A CONTROLAR

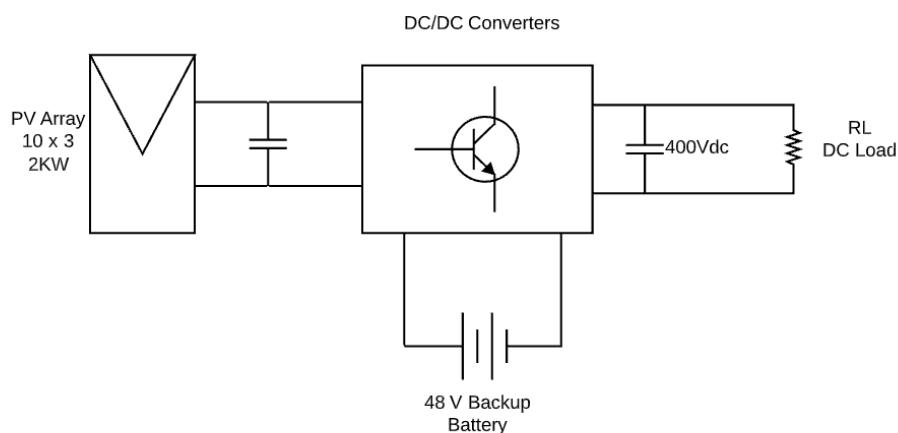


Figura 1.1: Diagrama de bloques para el sistema a controlar.

En la figura 1.1, se tiene un arreglo de 3 columnas de paneles solares donde cada columna posee 10 paneles solares en serie es decir está configurado en 10 x 3 con una capacidad máxima de extraer 2kW de potencia. Le sigue una etapa de convertidor Boost la cual pasa del nivel de tensión de los paneles para alimentar cargas en DC con 400V constantes, además, se tiene una batería de 48V para mantener a la carga RL temporalmente en caso de que el arreglo de paneles solares no pueda extraer la máxima potencia (por ejemplo, el anochecer).

1.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

1. Se requiere diseñar un sistema de control para poder extraer la máxima potencia del conjunto de paneles solares, a través de un convertidor Boost.
2. Diseñar un sistema de control para la etapa de la batería que la conforma un convertidor bidireccional (Half Bridge Converter) para mantener en el capacitor (DC link) a 400V constantes ante cualquier carga que se conecte, además esta debe aportar la potencia necesaria en caso de que los paneles solares no puedan entregar la potencia máxima.
3. bp365 Datasheet (Hoja del fabricante de un panel solar)

Maximun power (Pmax)	65W
Voltage at Pmax	17.6V
Current at Pmax	3.69A
Short-circuit current Isc	3.99A
Open-circuit voltage Voc	22.1V

4. Para el arreglo de 10 x 3 paneles solares de bp365 se tiene

Maximun power (Pmax)	2000W
Voltage at Pmax	176V
Current at Pmax	11.07A
Short-circuit current Isc	11.9A
Open-circuit voltage Voc	221V

2. CONTROL EN CASCADA

La estrategia de control para el circuito de la figura 2.1, es el control en cascada, se va a implementar dos controladores en cascada, uno para la etapa de extracción de energía de los paneles solares y la otra para controlar la tensión del dc link a 400V con la batería. Lo que se quiere lograr es extraer siempre la máxima potencia en los paneles que se pueda, mientras que el dc link se mantenga en 400V ante cualquier carga dc que se le conecte, a demás, en caso de que los paneles ya no pueda suplir potencia, el controlador de la batería debe hacer que la batería pueda suplir lo necesario para mantener la tensión deseada en el dc link.

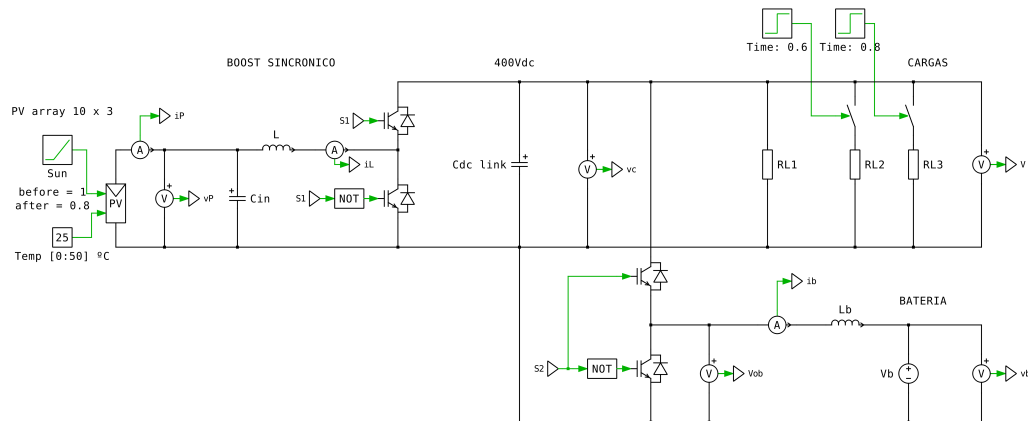


Figura 2.1: Control para un sistema de paneles solares de 2KW con batería de 48V.

2.1. SISTEMA DE CONTROL PARA LOS PANELES SOLARES DE 2KW

En la figura 2.2, se encuentra el circuito convertidor para extraer la máxima potencia de los paneles. Para esta etapa de control, se utiliza la estrategia de control en cascada en conjunto con un MPPT(Maximun Power Point Tracking) como se observa en la figura 2.3.

Esta estrategia de control está conformada por los siguientes elementos:

1. Con el fin de poder extraer y controlar la máxima tensión proveniente de los paneles se implementa un MPPT la cual es un algoritmo programado para encontrar siempre el punto máximo posible en la condición que se encuentre, seguidamente se implementa un control PI externo que recibe la tensión máxima calculada por el MPPT representada por v_p^* es decir, el MPPT establece la referencia al controlador PI externo.
2. EL PI externo se encarga de controlar la tensión v_p , para que esta llegue a extraer la máxima tensión, y para lograr controlar esta tensión, se manipula la corriente i_L^* , esta corriente i_L^* servirá como la referencia para el controlador PI interno.
3. El PI interno recibe la referencia de corriente a través del PI externo, y esta manipulando V_t (tensión de transistor) sintetiza la señal para conmutar los transistores.

En resumen: El MPPT le indica al PI externo cual es la tensión máxima que puede extraer, el PI externo para lograr llegar al nivel de referencia establecido, lo hace manipulando la corriente del inductor, esta corriente i_L^* representa lo que necesitaría el PI externo para llegar a v_p^* , ahora el PI interno recibe el i_L^* y su función es llegar a esa referencia de corriente y lo hace manipulando la tensión del transistor V_t y según el nivel de esta tensión es el que le va a indicar al sintetizador(PWM) como conmutar los transistores y así en cascada poder llegar a v_p .

***NOTA:** La estrategia de control en cascada lo que permite es controlar la tensión y la corriente por separado, la única condición que esta debe tener es que el lazo interno donde se encuentra el PI interno tiene que ser más de 10 veces más rápida que el lazo externo, rápida refiriéndose a la frecuencia de corte con la que se va a sintonizar estos controladores.

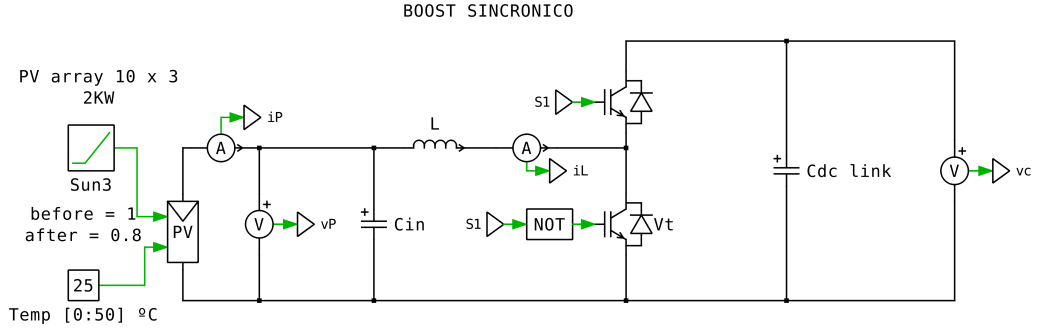


Figura 2.2: Circuito a controlar para la etapa de los paneles solares.

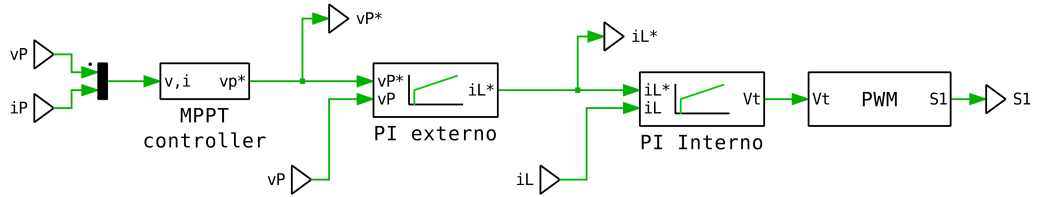


Figura 2.3: Control en cascada para los paneles solares.

En las los siguientes puntos se demuestra como se obtiene las plantas para cada controlador y su respectiva sintonización.

2.1.1. Lazo interno

Primeramente para poder controlar se necesita una planta, dentro de este contexto (panel solar), se puede obtener la planta del lazo interno realizando el LTK en el lazo "1 como se observa en la figura 2.4.

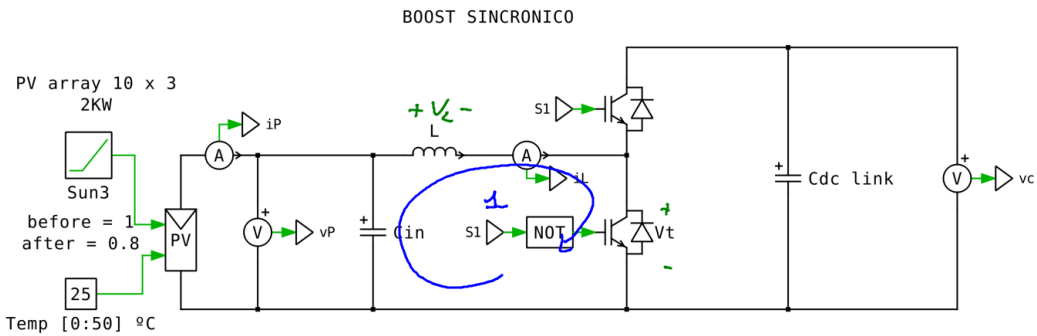


Figura 2.4: Planta del lazo interno de control

$$V_L = V_p - V_t$$

$$L i_L' = V_p - V_t$$

$$i_L' = \frac{V_p}{L} - \frac{V_t}{L} \quad (2.1)$$

Una vez obtenida la ecuación 2.1, se escoge los posibles candidatos para controlar, es decir i_L' es la salida (y), $\frac{V_p}{L}$ puede ser la perturbación (d) y $\frac{V_t}{L}$ la variable manipulada.

Haciendo que $V_t \approx V_t$ y apando vp (superposición) entonces al aplicar Laplace se obtiene la planta integrante negativa en el lazo interno:

$$\frac{i_L(s)}{V_t^*(s)} = \frac{-1}{LS} \quad (2.2)$$

donde $L = 2.5\text{mH}$ entonces la planta para el lazo interno queda como :

$$\frac{i_L(S)}{V_t^*(S)} = \frac{-400}{S} \quad (2.3)$$

2.1.2. Sintonización

Para sintonizar el controlador PI interno, es necesario definir una frecuencia de corte, esto para poder filtrar los armónicos que produce el carrier, para este caso, el convertidor utiliza una frecuencia de 50KHz, por lo tanto el filtro paso bajo debe ser mínimo 10 veces menor a la frecuencia del carrier, por lo tanto la sintonización como se observa en la figura 2.5 se utilizó 500Hz.

```

In[1]:= p = k / s;
c = kp + ki / s;
      c p
      c p + 1

Out[3]= 
$$\frac{k \left( kp + \frac{ki}{s} \right)}{\left( 1 + \frac{k \left( kp + \frac{ki}{s} \right)}{s} \right) s}$$


In[4]:= Simplify[
$$\frac{k \left( kp + \frac{ki}{s} \right)}{\left( 1 + \frac{k \left( kp + \frac{ki}{s} \right)}{s} \right) s}$$
]
Out[4]= 
$$\frac{k (ki + kp s)}{s^2 + k (ki + kp s)}$$


Out[5]= k (ki + kp s)

      k ki + k kp s
      s^2 + k ki + k kp s ≠ 
$$\frac{k \omega^2}{s^2 + 2 \alpha \omega s + \omega^2}$$


Out[6]= 
$$\frac{k ki + k kp s}{k ki + k kp s + s^2}$$


In[5]:= ω = 2 Pi 500;
α = 1;

In[7]:= k = -400.;

In[8]:= Solve[{k ki = ω^2, k kp = 2 α ω}, {kp, ki}]
Out[8]= {{kp → -15.708, ki → -24674.}}
```

Figura 2.5: Sintonización del controlador PI para el lazo interno.

Para asegurarse de que la sintonización del control PI este funcionando de la manera correcta, es necesario realizar pruebas en el controlador para observar si la respuesta de control es adecuada o si se necesita alguna re sintonización, en la figura 2.6 se observa como la salida del sistema (Señal roja) sigue los cambios tal como lo pide la señal de referencia (señal verde), además siempre es importante observar lo que se tiene que pagar para poder mantener la señal de la forma deseada, que para este caso, V_t , es la señal que se paga para controlar la corriente. Lo importante en este punto es que tanto la señal que quiero (verde) con la que tengo (roja) y con lo que pago (V_t), no este trabajando en rangos de saturación y que se encuentre en rangos que el sistema pueda entregar, por ejemplo, si para controlar la corriente se necesita un V_t mayor a 500V, esto no es posible debido a que el diseño electrónico no puede dar más de 400V.

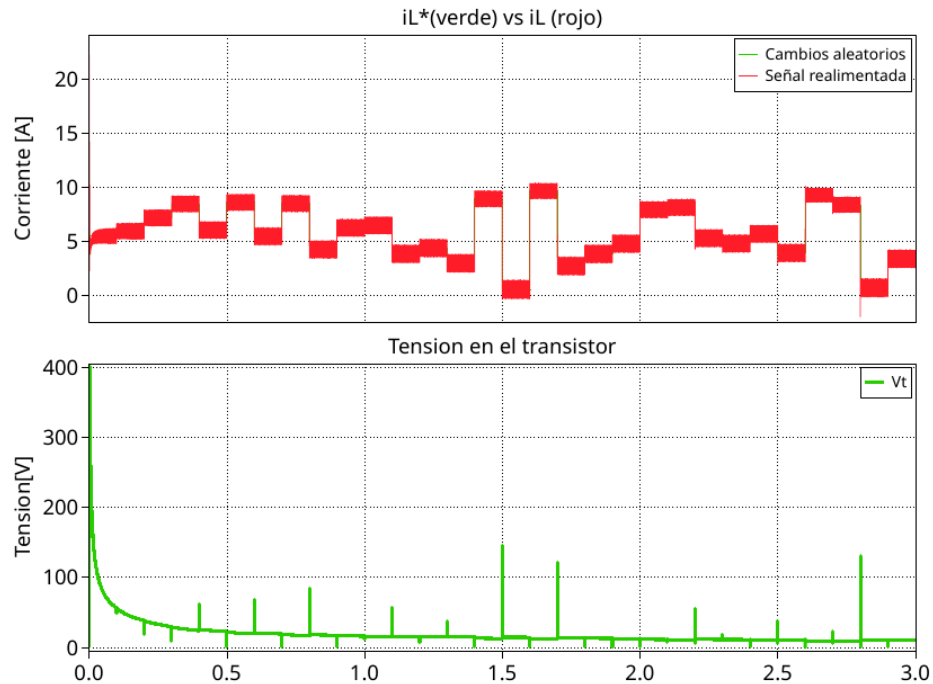


Figura 2.6: Pruebas realizadas al controlador PI interno con cambios aleatorios en la corriente de referencia.

Nota*: Todos los controladores deben tener Anti-windup obligatoriamente, un controlador sin Anti-windup no funciona, NO SIRVE, ya que al no ponerle límites de saturación al controlador, esta puede llegar a perder la controlabilidad del sistema pidiéndole al sistema que de rangos de señales donde físicamente es imposible para el entregarlos.

2.1.3. Lazo externo

La planta del lazo externo no se puede obtener analíticamente, esto debido a que esta planta es la que pertenece a los paneles solares, por lo tanto la manera para obtener la planta, es abriendo el lazo de control (lazo cerrado) de la figura 2.3, se corta el lazo en iL^* de la salida del controlador externo y se aplica un escalón para ver la curva de reacción en v_p tal como se observa en la figura 2.7. Para aplicar un escalón es necesario conocer que cambio es suficiente para obtener una curva de reacción, para este sistema se sabe a partir de la hoja de datos que la máxima corriente que puede producir en un arreglo de paneles 10x3 es de 12A, por lo tanto se aplica un cambio en esta corriente de 11A a 8A.

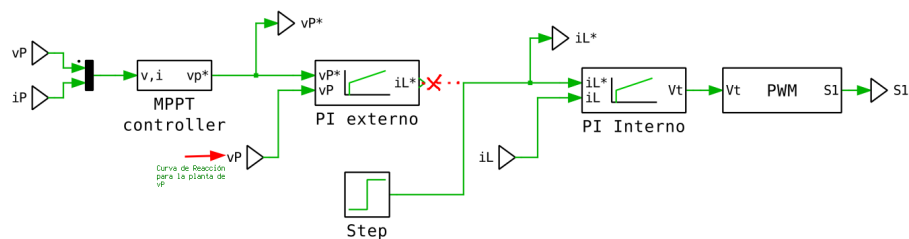


Figura 2.7: Corte del lazo de control en la salida del PI externo para la reacción de v_p .

En la figura 2.8, se encuentra la curva de reacción de la planta de los paneles solares, si se observa, el cambio de escalón que se hizo fue negativa, por lo tanto la planta obtenida es inversa.

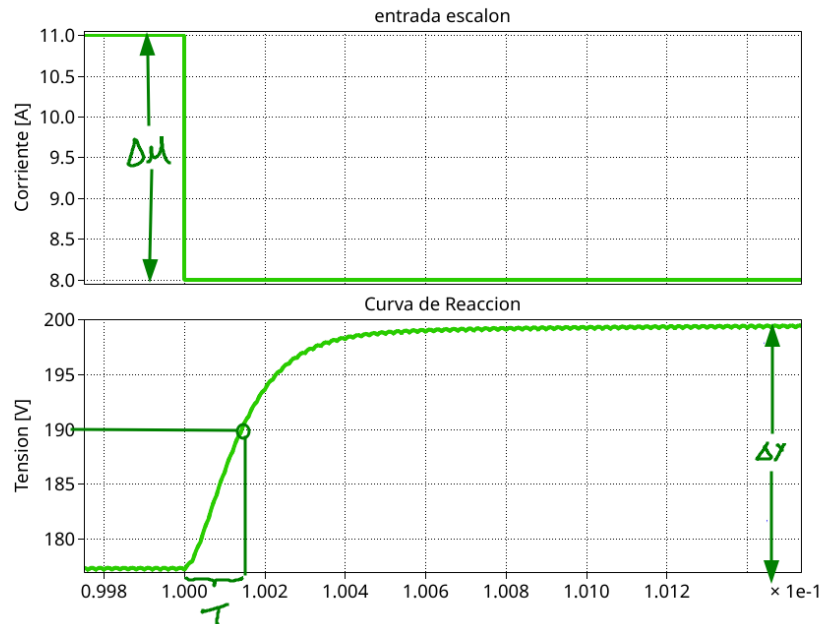


Figura 2.8: Curva de reacción de la planta para los paneles solares.

Una vez obtenida la curva de reacción, se calcula la planta gráficamente con ayuda de cursores utilizando las ecuaciones siguientes:

- $P(S) = \frac{K}{TS+1}$
- $K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$
- T : tiempo que tarda en llegar a $0,632 \cdot \Delta y$ a partir del escalón.

entonces:

$$K = \frac{199V - 177V}{8A - 11A} = 7,33$$

Para la constante de tiempo T

$$\begin{aligned} 0,632 \cdot (199 - 177) &= 13,9V \\ 177V + 13,9V &= 190,9V \end{aligned} \quad (2.4)$$

El tiempo que tarda la señal en pasar de 177V a 190.9V es de $T = 0.00014s$

La planta para el lazo externo está dada por:

$$P(S) = \frac{-7,33}{0,00014S + 1} \quad (2.5)$$

2.1.4. Sintonización

Para que funcione el control en cascada es muy importante que el lazo interno sea mínimo 10 veces más rápido que el lazo externo, esto es para que el controlador PI externo vea al controlador PI interno como si fuera un uno, por lo que es importantes hacer pruebas en en lazo interno hasta que este sintonizado correctamente antes de sacar la curva de reacción del lazo externo.

Para sintonizar el controlador externo, como se mencionó anteriormente, este debe de tener una frecuencia de corte mucho más lento, para esta planta, se utilizó la frecuencia de corte de 5Hz, esta frecuencia es valida debido a que los

paneles solares son sistemas muy lentos por lo tanto utilizar una frecuencia de corte tan baja si es posible, en la figura 2.9 se encuentra la estrategia de sintonización utilizada, esta se hizo cancelando los ceros que resulta la función de transferencia de lazo cerrado (Myr).

```

In[8]:= kp = T * ki;
p = 7.33 / (T s + 1);

In[8]:= c = ki (1 + kp / ki s);

In[8]:= 
$$\frac{c p}{c p + 1}$$


Out[8]:= 
$$\frac{7.33 ki}{\left(1 + \frac{7.33 ki}{s}\right) s}$$


In[8]:= FullSimplify[
$$\frac{7.33 ki}{\left(1 + \frac{7.33 ki}{s}\right) s}$$
]

Out[8]:= 
$$\frac{1. ki}{1. ki + 0.136426 s}$$


In[8]:= 
$$\frac{ki}{ki + 0.136426 s} = \frac{1}{1 + s / (2 Pi f 7.33)}$$


... Set: Tag Times in  $\frac{ki}{ki + 0.136426 s}$  is Protected.

Out[8]:= 
$$\frac{1}{1 + \frac{0.0217128 s}{f}}$$


In[9]:= ki = .
kp = .
T = 0.00014;
f = 5;

In[13]:= Solve[{T == kp / ki, ki == 2 Pi f 7.33}, {kp, ki}]

... Solve: Solve was unable to solve the system with inexact coefficients
a corresponding exact system and numericizing the result.

Out[13]:= {{kp -> 0.032239, ki -> 230.279}}
```

Figura 2.9: Sintonización del controlador PI para el lazo externo.

En la figura 2.10 se realiza las pruebas del lazo externo, se puede observar que la señal que se obtiene (Roja) es la señal controlada, la verde es la referencia que establece el MPPT, mientras que la corriente i_L^* es lo que se paga para poder llegar a las tensiones que pide el MPPT.

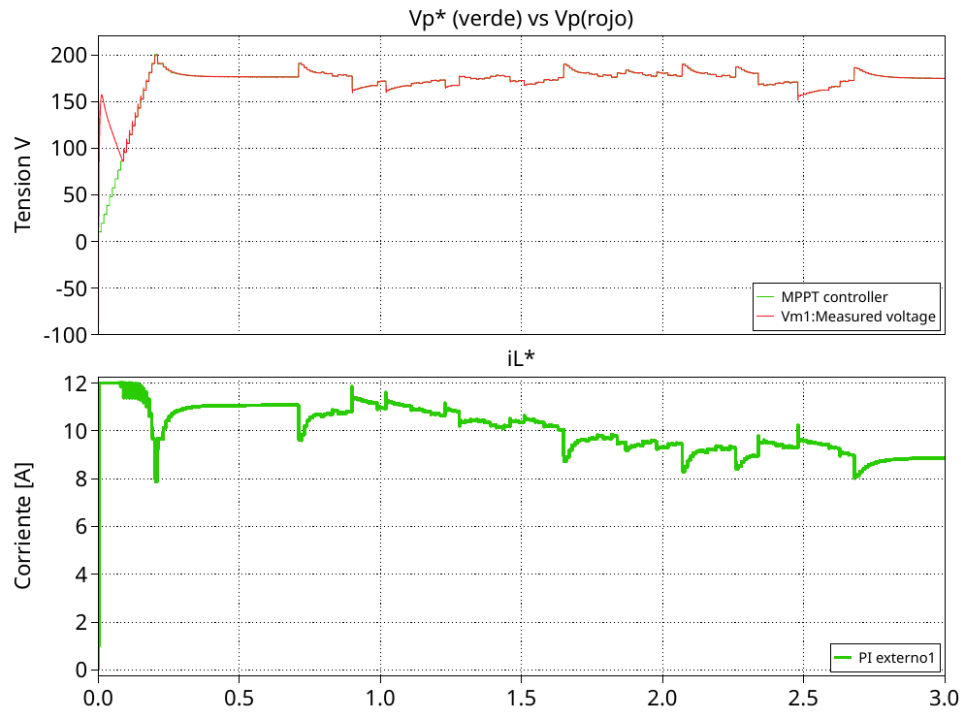


Figura 2.10: PI externo controlando los cambios de referencias del MPPT.

2.1.5. Anti-Windup Paneles solares.

En la tabla 2.1, se encuentra los rangos limites en donde los controladores pueden operar, el PI externo se limita a 12A debido a que los paneles pueden dar un máximo de 13A (corriente de corto), y 400V ya que el rango de V_t , va de 0V a 400V.

Cuadro 2.1: Valores de saturación para el Anti-Windup

Controlador	Umax	Umin
PI Externo	12A	0A
PI Interno	400V	0V

2.2. SISTEMA DE CONTROL DE LA BATERÍA DE 48V

Para el sistema de control se aplica la misma estrategia de control en cascada, esto para poder controlar la corriente del inductor i_b con un PI interno y la tensión del dc link (v_c) con el PI externo. En la figura 2.11 se muestra el circuito que se desea controlar, el objetivo es mantener en la salida del capacitor dc link, una tensión constante de 400V. En la figura 2.12, se encuentra el sistema de control en cascada para el circuito del cargador de batería.

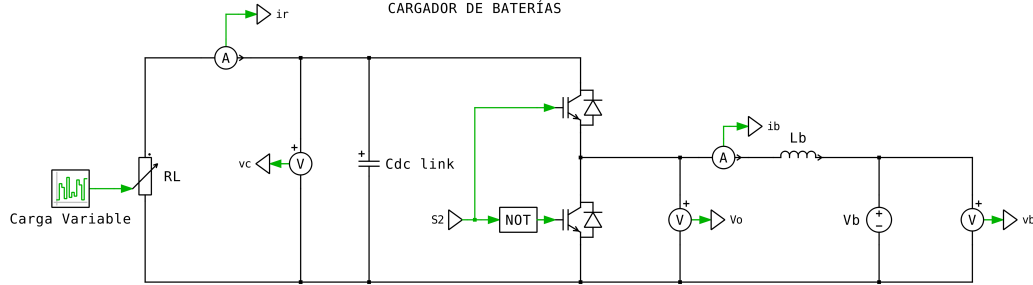


Figura 2.11: Convertidor Half-bridge para el cargador/descargador de batería .

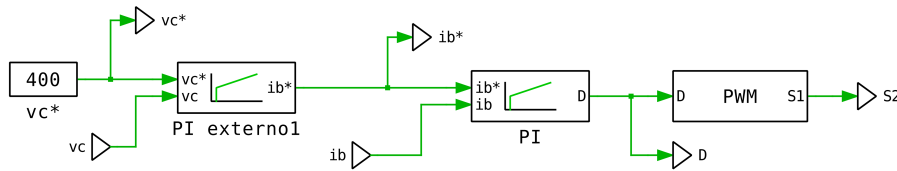


Figura 2.12: Control en cascada para el control de carga de la batería.

2.2.1. Lazo interno

Para poder obtener la planta del lazo interno, observando la figura 2.13, se obtiene mediante un LTK la siguiente ecuación:

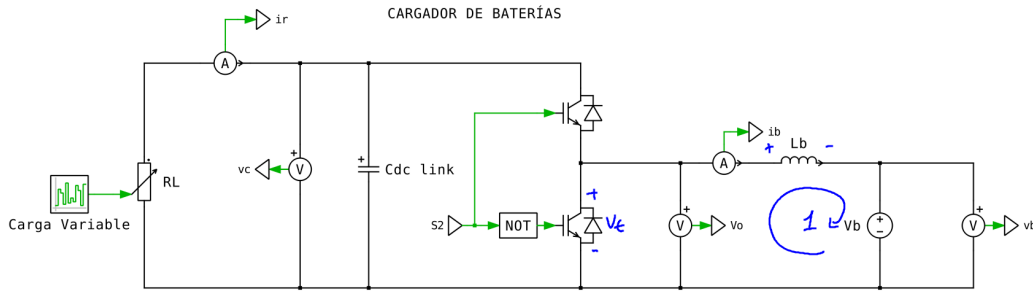


Figura 2.13: Planta de lazo interno para la planta de la batería .

$$V_L = V_t - V_b \quad (2.6)$$

$$L i_b' = V_t - V_b \quad (2.7)$$

En la ecuación 2.7, es donde se puede observar en que condición es que la batería se encuentra entregando o consumiendo potencia, es decir en que manera, la batería se está cargando o descargando.

- si $V_t > V_b$, $L i_b'$ es positivo por lo tanto esta se carga.
- si $V_t < V_b$, $L i_b'$ es negativa por lo tanto se encuentra en descarga.
- si $V_t = V_b$, $L i_b'$ es cero, por lo tanto se mantiene constante.

Despejando la ecuación 2.7, se obtiene:

$$i'_b = \frac{Vt}{L} - \frac{Vb}{L} \quad (2.8)$$

Ahora, debido a que esto es un convertidor boost, Vt depende del estado del transistor:

- si $S2 = 1$, $Vt = Vc$
- si $S2 = 0$, $Vt = 0$

por lo tanto vemos una dependencia de $S1$:

$$Vt = S2 \cdot Vc$$

si utilizamos un ancho de banda adecuado, (adecuado en el sentido de que el ancho de banda es suficiente para filtrar los armónicos que produce el carrier) entonces se puede definir que $S2 \approx D$ entonces

$$Vt = S2 \cdot Vc = D \cdot Vc^* \quad (2.9)$$

$Vc = Vc^*$ debido que para este caso, se quiere que esa tensión se mantenga en 400V por lo tanto, ya se conoce su punto de referencia, al sustituir la ecuación 2.7 y 2.9, aplicando Laplace y apagando la fuente de la batería Vb (superposición), entonces la planta para el lazo interno es el siguiente :

$$\frac{i'_b(s)}{D(s)} = \frac{Vc^*}{LS} \quad (2.10)$$

$$\frac{i'_b(s)}{D(s)} = \frac{400}{2,5mH \cdot s} \quad (2.11)$$

NOTA*: El controlador PI interno controla la corriente, manipulando el ciclo de trabajo D .

2.2.2. Sintonización

Para la sintonización se aplica la misma estrategia que el controlador de los paneles solares, para el controlador del lazo interno se escoge la frecuencia de corte de 5000Hz, el procedimiento de la sintonización se encuentra en la figura 2.14.

```

In[ ]:= p = k / s;
c = kp + ki / s;
      c p
      c p + 1

Out[ ]:= 
$$\frac{k \left( kp + \frac{ki}{s} \right)}{\left( 1 + \frac{k \left( kp + \frac{ki}{s} \right)}{s} \right) s}$$


In[ ]:= Simplify[
$$\frac{k \left( kp + \frac{ki}{s} \right)}{\left( 1 + \frac{k \left( kp + \frac{ki}{s} \right)}{s} \right) s}$$
]

      (k ki + k kp s)
      (k ki + k kp s + s2)

In[ ]:= ω = 2 Pi 5000;
α = 1;
k = 160000.;

In[ ]:= Solve[{k ki = ω2, k kp = 2 α ω}, {kp, ki}]

Out[ ]:= { {kp → 0.392699, ki → 6168.5} }

```

Figura 2.14: Sintonización del controlador PI para el lazo interno de la batería.

2.2.3. Lazo externo

La planta para el lazo externo se obtiene haciendo sumatoria de potencias, si se observa el circuito 2.13, al hacer sumatoria de potencia se tiene:

$$V_b \cdot i_b = V_L \cdot i_b + V_c \cdot i_c + \frac{V_c^2}{R}$$

Como $V_L = V_t - V_b$ entonces:

$$\begin{aligned}
 V_b \cdot i_b &= (V_t - V_b) \cdot i_b + V_c \cdot i_c + \frac{V_c^2}{R} \\
 -V_t \cdot i_b &= V_c \cdot i_c + \frac{V_c^2}{R} \\
 -V_t \cdot i_b &= V_c \cdot CVc' + \frac{V_c^2}{R} \\
 \frac{-V_t \cdot i_b}{V_c} &= CVc' + \frac{V_c}{R}
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Del resultado de la ecuación 2.12, si tomamos $K = \frac{V_t}{V_c^*}$ donde K es un factor constante donde $V_t = 48V$ y $V_c^* = 400V$ entonces $K = 0.12$ por lo tanto al aplicar Laplace:

$$-K \cdot i_b(s) = C S V_c(s) + \frac{V_c(s)}{R} \tag{2.13}$$

$$\frac{V_c(s)}{i_b(s)} = \frac{-K \cdot R}{RSC + 1} \tag{2.14}$$

Sustituyendo $K = 0.12$, $R = 1\Omega$ y $C = 100\mu F$ entonces la planta de lazo externo está dado por:

$$\frac{V_c(s)}{i_b(s)} = \frac{-0.12}{100\mu F \cdot s + 1} \tag{2.15}$$

2.2.4. Sintonización

La sintonización del lazo externo de control se aplica la estrategia de cancelación de ceros, y dado que el controlador externo tiene que ser mínimo 10 veces más lento que el interno, para la frecuencia de corte se escoge 500Hz (10 veces menor al interno).

```

kp = T * ki;
p = 0.12 / (T s + 1);

In[*]:= c = ki (1 + kp / ki s) ;

In[*]:= 
$$\frac{0.12 \text{ ki}}{0.12 \text{ ki} + s} = \frac{1}{1 + s / (2 \text{ Pi } f 0.12)}$$

Set: Tag Times in  $\frac{0.12 \text{ ki}}{0.12 \text{ ki} + s}$  is Protected.

Out[*]:= 
$$\frac{1}{1 + 0.00265258 s}$$


In[*]:= ki = .
kp = .
T = 0.000100;
f = 500;

In[*]:= Solve[{T = kp / ki, ki = 2 Pi f 0.12}, {kp, ki}]
Solve: Solve was unable to solve the system with inexact coefficients. The i
exact system and numericizing the result.

Out[*]:= {{kp -> 0.0376991, ki -> 376.991}}

```

Figura 2.15: Sintonización del controlador PI para el lazo externo de la batería.

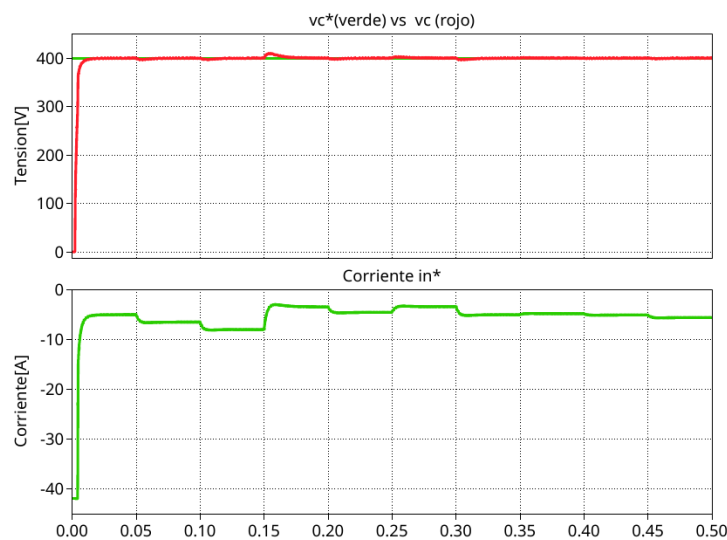


Figura 2.16: Señal del controlador PI para el lazo externo de la batería.

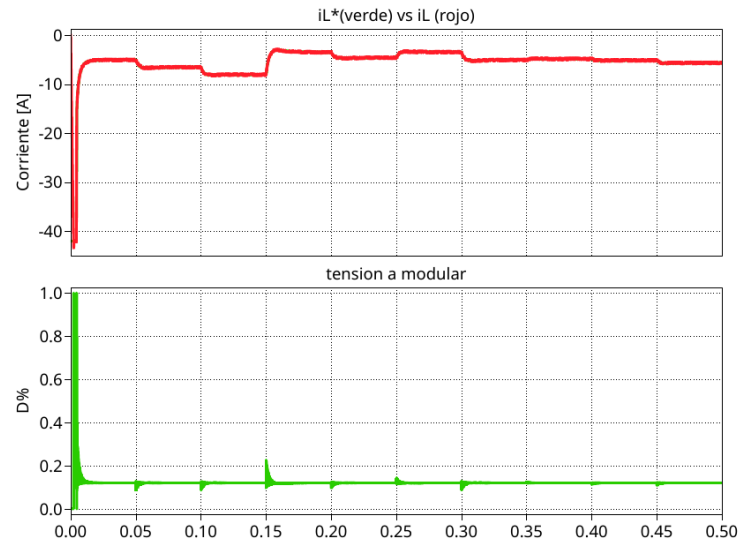


Figura 2.17: Señal del controlador PI para el lazo interno de la batería.

2.2.5. Anti-Windup Batería

Para el anti-windup de los controladores, para el PI interno es de 1 y 0, esto es debido a que se esta controlando la corriente manipulando el ciclo de trabajo D por lo tanto esta solo va de 1 a 0. En el caso del PI externo, los límites se encuentran en 42A y -42A, la razón de esta es por que la batería debe de suplir la misma potencia que hace los paneles 2KW($48V * 42A = 2000W$), ya que se espera que la batería pueda proveer la potencia cuando anochezca y los paneles no esten en operación.

Cuadro 2.2: Valores de saturación para el Anti-Windup

Controlador	Umax	Umin
PI Externo	42A	-42A
PI Interno	1	0

Las simulaciones de todas las etapas y el controlador diseñado para el circuito 2.1, se puede encontrar en:

- <https://github.com/fckseng19/2KW-PV-Array-Controller>

3. CONTROL PREDICTIVO

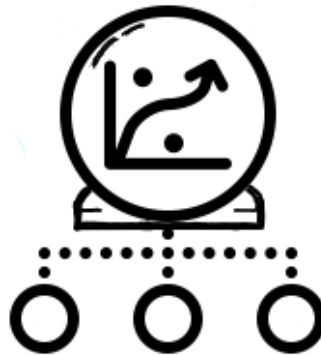


Figura 3.1: MPC

En esta etapa se desea implementar controladores predictivos (MPC) para el lazo de control de la corriente de los inductores utilizados para controlar el sistema de la sección 1. Para ellos se utilizará el control en cascada de la sección 2, reemplazando todos los controladores PI internos por controladores predictivos. Finalmente se implementará todos los controladores de ambas etapas en un solo C-Script que simulará el código en C que se compilaría en un MCU como el TI C2000 MCU (delfino).

3.1. CONTROL PREDICTIVO PARA LOS PANELES SOLARES DE 2KW

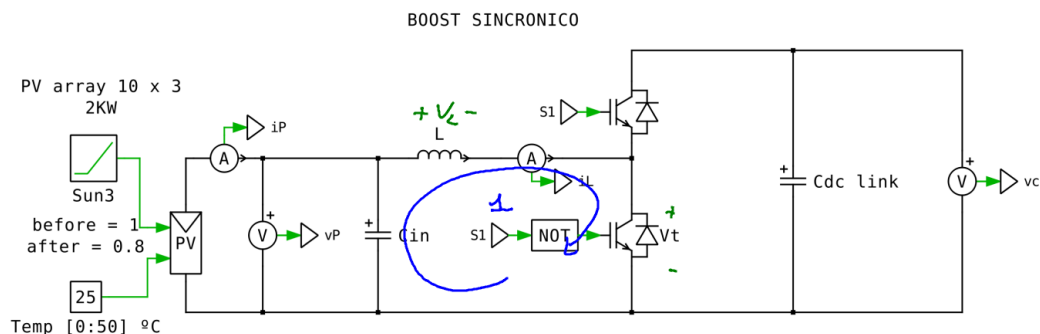


Figura 3.2: Planta del lazo interno de control

Para hacer un controlador predictivo, se tiene que obtener una función de costo, para ellos se realiza una serie de pasos para obtenerlo y finalmente codificarlo en un C-Script.

3.1.1. Cálculo de la Función de Costo J

Para obtener una función de costo, lo que se necesita buscar para este sistema es encontrar la ecuación para $i_L(k+1)$

Paso 1: Función de costo

$$J = |i_L^*(k+1) - i_L(k+1)| \quad (3.1)$$

Paso 2: Definición de restricciones

Para calcular la función de costo para esta planta, se realiza una LTK como se muestra en la figura 3.2 de donde se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$VL = Vp - Vt$$

$$L i_L' = Vp - Vt \quad (3.2)$$

En la ecuación 3.2, se puede observar que el único elemento que depende del estado $u(t)$ es $Vt(t)$, donde:

- $Vt(t) = 0 \rightarrow u(t) = 0$
- $Vt(t) = V_c^* \rightarrow u(t) = 1$

entonces:

$$L \cdot i_L'(t) = Vp(t) - u(t)V_c^* \quad (3.3)$$

Ahora haciendo una aproximación para la derivada de la corriente $L \cdot i_L'(t)$ se puede obtener:

$$L \cdot i_L'(t) \approx L \cdot \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \approx L \cdot \frac{\Delta i_L}{t_s} \quad (3.4)$$

donde $\Delta i_L = i_L(k+1) - i_L(k)$

- $i_L(k+1)$: Corriente “futura” o predicha
- $i_L(k)$: Corriente presente
- t_s : Tiempo de muestreo.

Nota:** Estas aproximaciones se hacen para dejar de trabajar con tiempos continuos y trabajar con instantes k .

$$L \cdot \frac{\Delta i_L}{t_s} = Vp - u(k)V_c^* \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} L \cdot \frac{\Delta i_L}{t_s} &= Vp - u(k)V_c^* \\ \Delta i_L &= \frac{t_s}{L} \cdot Vp - \frac{t_s}{L} \cdot u(k)V_c^* \\ i_L(k+1) &= \frac{t_s}{L} \cdot Vp - \frac{t_s}{L} \cdot u(k)V_c^* + i_L(k) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Nota:** El resultado de la ecuación (3.6) representa el valor predictivo, es decir el valor de $i_L(k)$ que tendría en el futuro. Este mismo valor es el que determina la dinámica de este sistema en particular (PV array Boost Converter), es decir, este modelo sería válido solo para esta planta.

Paso 3: Redefinir la función de costo

Tomando la función de costo de la ecuación 3.1, podemos hacer la aproximación $i_L^*(k+1) \approx i_L^*(k)$ entonces:

$$\begin{aligned} J &= |i_L^*(k+1) - i_L(k+1)| \\ J &= |i_L^*(k) - i_L(k+1)| \end{aligned}$$

Sustituyendo el resultado de la ecuación 3.6 en la ecuación 3.1, se obtiene:

$$J = |i_L^*(k) - \left(\frac{t_s}{L} \cdot Vp - \frac{t_s}{L} \cdot u(k)V_c^* + i_L(k) \right)| \quad (3.7)$$

- $i_L(k+1) = \frac{t_s}{L} \cdot Vp - \frac{t_s}{L} \cdot u(k)V_c^* + i_L(k)$ es el futuro, el valor predicho.
- $i_L^*(k)$ es el valor deseado.

Paso 4: Evaluar la función de costo para cada $u(k) = \{0,1\}$

- Si $u(k)=0$

$$J_0 = |i_L^*(k) - \left(\frac{ts}{L} \cdot Vp + i_L(k) \right)| \quad (3.8)$$

- Si $u(k)=1$

$$J_1 = |i_L^*(k) - \left(\frac{ts}{L} \cdot Vp - \frac{ts}{L} \cdot V_c^* + i_L(k) \right)| \quad (3.9)$$

Paso 5: Seleccionar $u(k)$ que haga J más pequeño

La ecuación 3.8 y 3.9 representa la función de costo según el estado de $u(k)$ que se encuentre. Lo siguiente es programar estas ecuaciones en un C-Script y hacer una función que encuentre el menor valor posible para J , el programa tiene que elegir un $u(k)$ al que haga J más pequeño.

La función de costo aumenta cuando hay un cambio de referencias, esto por su error asociado pero el mismo algoritmo trata de minimizarla.

El archivo se puede encontrar en la carpeta "Predictive control" con nombre de "*Paneles_Prueba.plecs*", el C-Script se encuentra dentro del bloque MPC.

- <https://github.com/fckseng19/2KW-PV-Array-Controller/tree/main/Predictive%20Control>

Finalmente se implementa el controlador en cascada pero utilizando un control predictivo para el lazo de corriente o lazo interno como se observa en la figura 3.3

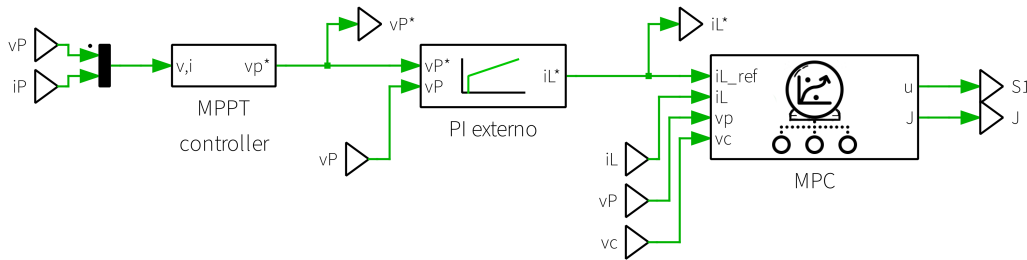


Figura 3.3: Control en cascada con control predictivo

3.1.2. Pruebas del MPC

En la figura 3.4, se puede la señal de control en el lazo de corriente, se observa que la señal de referencia casi no se ve, debido a que el controlador predictivo es demasiado preciso esta sigue la señal de referencia si necesidad de sintonizarse, en la figura 3.5 se aprecia de mejor manera el seguimiento del control predictivo, se aprecia mejor que ante cada cambio, mientras más brusco sea, mayor va ser la función de costo para poder mantener la señal en la referencia.

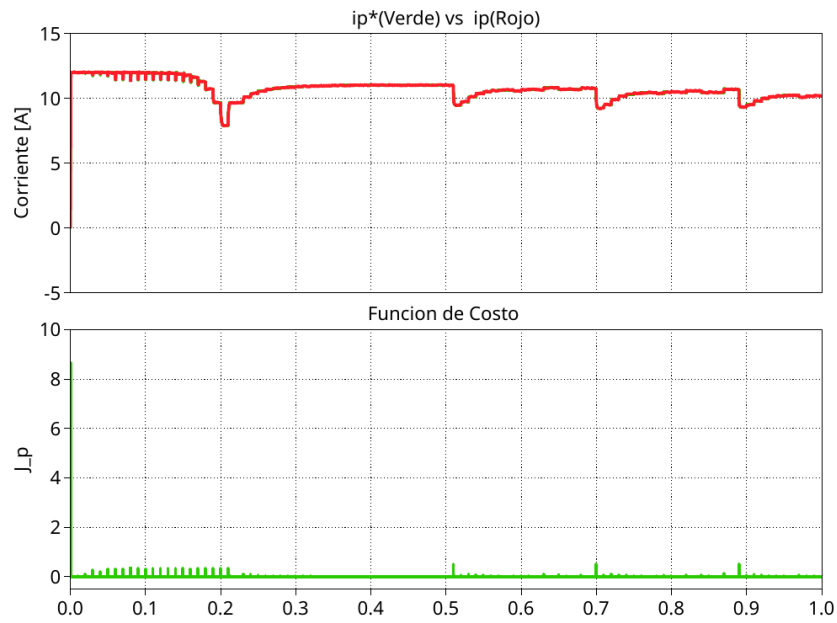


Figura 3.4: Control Predictivo MPC en el lazo de corriente del arreglo de paneles.

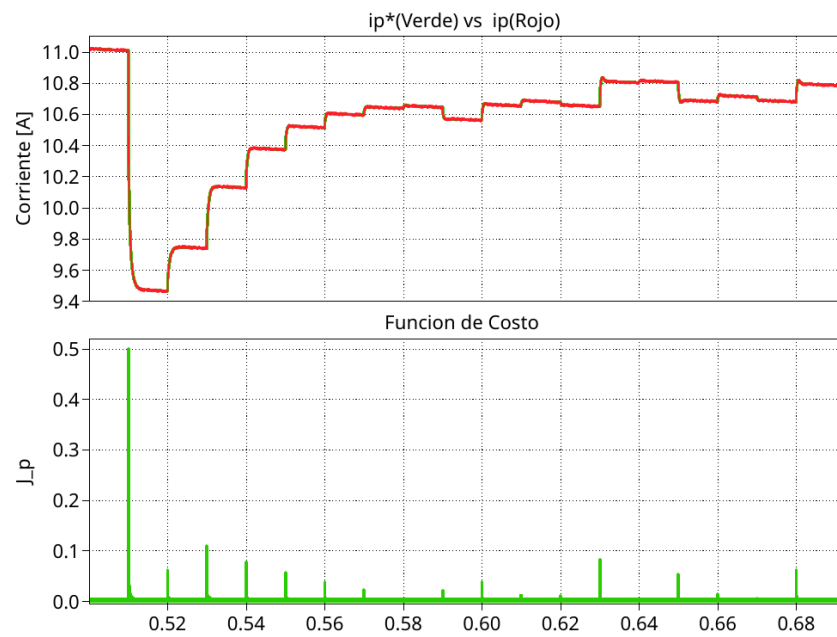


Figura 3.5: Acercamiento de la señal de Control Predictivo MPC en el lazo de corriente del arreglo de paneles.

3.2. CONTROL PREDICTIVO PARA LA BATERÍA DE 48V

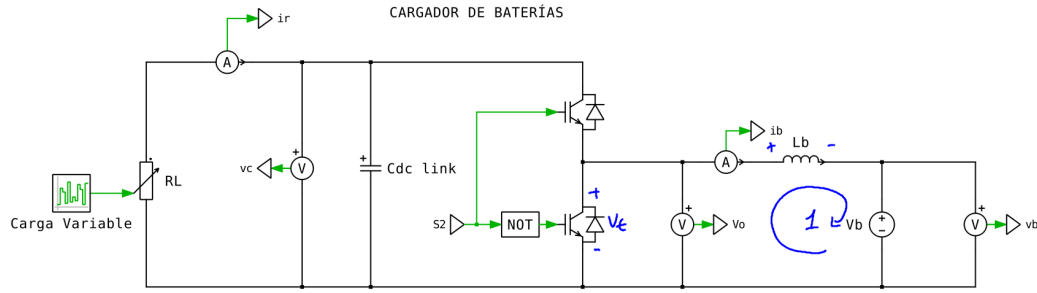


Figura 3.6: Planta del lazo interno de control MPC.

3.2.1. Cálculo de la Función de Costo J

Para obtener una función de costo, lo que se necesita buscar para este sistema es encontrar la ecuación para $i_b(k+1)$

Paso 1: Función de costo

Para el modelo dinámico de la batería $i_L = i_b$, por lo tanto, la función de costo de la batería esta dada por:

$$J = |i_b^*(k+1) - i_b(k+1)| \quad (3.10)$$

Paso 2: Definición de restricciones

Para calcular la función de costo para la planta de la batería, se realiza una LTK como se muestra en la figura 3.6 de donde se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$VL = Vt - Vb$$

$$L i_b' = Vt - Vb \quad (3.11)$$

En la ecuación 3.11, se puede observar que el único elemento que depende del estado $u(t)$ es $Vt(t)$, donde:

- $Vt(t) = 0 \rightarrow u(t) = 0$
- $Vt(t) = V_c^* \rightarrow u(t) = 1$

entonces:

$$L \cdot i_b'(t) = u(t) V_c^* - Vb(t) \quad (3.12)$$

Ahora haciendo una aproximación para la derivada de la corriente $L \cdot i_b'(t)$ se puede obtener:

$$L \cdot i_b'(t) \approx L \cdot \frac{\Delta i_b}{\Delta t} \approx L \cdot \frac{\Delta i_b}{t_s} \quad (3.13)$$

donde $\Delta i_b = i_b(k+1) - i_b(k)$

- $i_b(k+1)$: Corriente “futura” o predicha
- $i_b(k)$: Corriente presente
- t_s : Tiempo de muestreo.

Nota:** Estas aproximaciones se hacen para dejar de trabajar con tiempos continuos y trabajar con instantes k. ts tiene que ser mínimo 10 veces más grande que la frecuencia deseada.

$$L \cdot \frac{\Delta i_b}{t_s} = u(k) V_c^* - Vb(k) \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} L \cdot \frac{\Delta i_b}{t_s} &= u(k) V_c^* - Vb(k) \\ \Delta i_b &= \frac{ts}{L} \cdot u(k) V_c^* - \frac{ts}{L} \cdot Vb(k) \\ i_b(k+1) &= \frac{ts}{L} \cdot u(k) V_c^* - \frac{ts}{L} \cdot Vb(k) + i_b(k) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Nota:** El resultado de la ecuación (3.15) representa el valor predictivo, es decir el valor de $i_b(k)$ que tendría en el futuro. Este mismo valor es el que determina la dinámica de este sistema en particular (Backup Battery half bridge Converter), es decir, este modelo sería válido solo para esta planta.

Paso 3: Redefinir la función de costo

Tomando la función de costo de la ecuación 3.10, podemos hacer la aproximación $i_b^*(k+1) \approx i_b^*(k)$ entonces:

$$\begin{aligned} J &= |i_b^*(k+1) - i_b(k+1)| \\ J &= |i_b^*(k) - i_b(k+1)| \end{aligned}$$

Sustituyendo el resultado de la ecuación 3.15 en la ecuación 3.10, se obtiene:

$$J = |i_b^*(k) - \left(\frac{ts}{L} \cdot u(k) V_c^* - \frac{ts}{L} \cdot Vb(k) + i_b(k) \right)| \quad (3.16)$$

- $i_b(k+1) = \frac{ts}{L} \cdot u(k) V_c^* - \frac{ts}{L} \cdot Vb(k) + i_b(k)$ es el futuro, el valor predicho.
- $i_b^*(k)$ es el valor deseado.

Paso 4: Evaluar la función de costo para cada $u(k) = \{0,1\}$

- Si $u(k)=0$

$$J_0 = |i_b^*(k) - \left(-\frac{ts}{L} \cdot Vb(k) + i_b(k) \right)| \quad (3.17)$$

- Si $u(k)=1$

$$J_1 = |i_b^*(k) - \left(\frac{ts}{L} \cdot u(k) V_c^* - \frac{ts}{L} \cdot Vb(k) + i_b(k) \right)| \quad (3.18)$$

Paso 5: Seleccionar $u(k)$ que haga J más pequeño

La ecuación 3.17 y 3.18 representa la función de costo según el estado de $u(k)$ que se encuentre. Lo siguiente es programar estas ecuaciones en un C-Script y hacer una función que encuentre el menor valor posible para J, el programa tiene que elegir un $u(k)$ al que haga J más pequeño.

La función de costo aumenta cuando hay un cambio de referencias, esto por su error asociado pero el mismo algoritmo trata de minimizarla.

El archivo se puede encontrar en la carpeta "Predictive control" con nombre de "Batería_Prueba.plec", el C-Script se encuentra dentro del bloque MPC.

- <https://github.com/fckseng19/2KW-PV-Array-Controller/tree/main/Predictive%20Control>

3.2.2. Pruebas del MPC

En la figura 3.7, se puede observar que la señal predictiva (señal roja) sigue los cambios de la señal de referencia en verde, es más, en control predictivo es tan preciso que la señal de referencia ni siquiera se nota y esto es debido a que no hay control más preciso que el predictivo, además se observa como la función J es mayor cuando hay cambios más bruscos de perturbación. En la figura 3.8 se muestra un acercamiento de la señal y precisamente se puede observar que la señal cambia de igual forma que la referencia, sin siquiera haberse sintonizado.

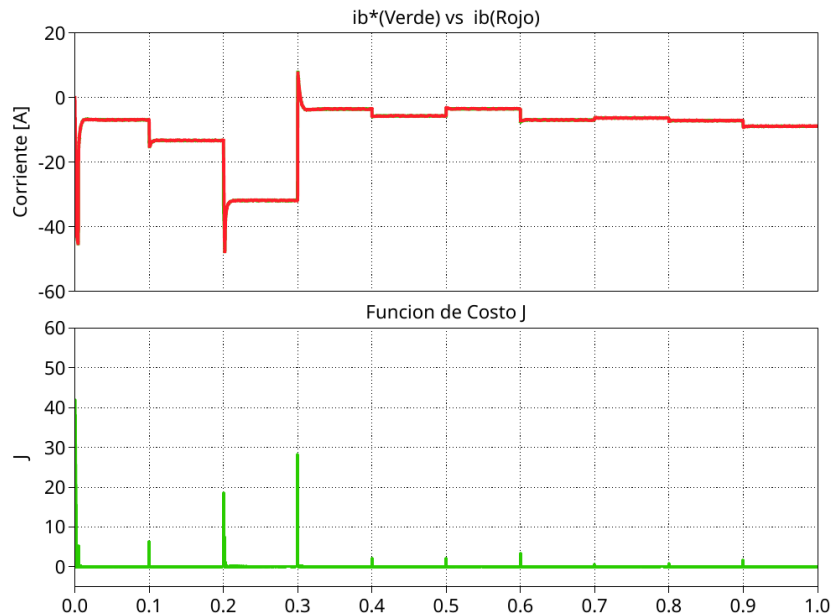


Figura 3.7: Control Predictivo MPC en el lazo de corriente.

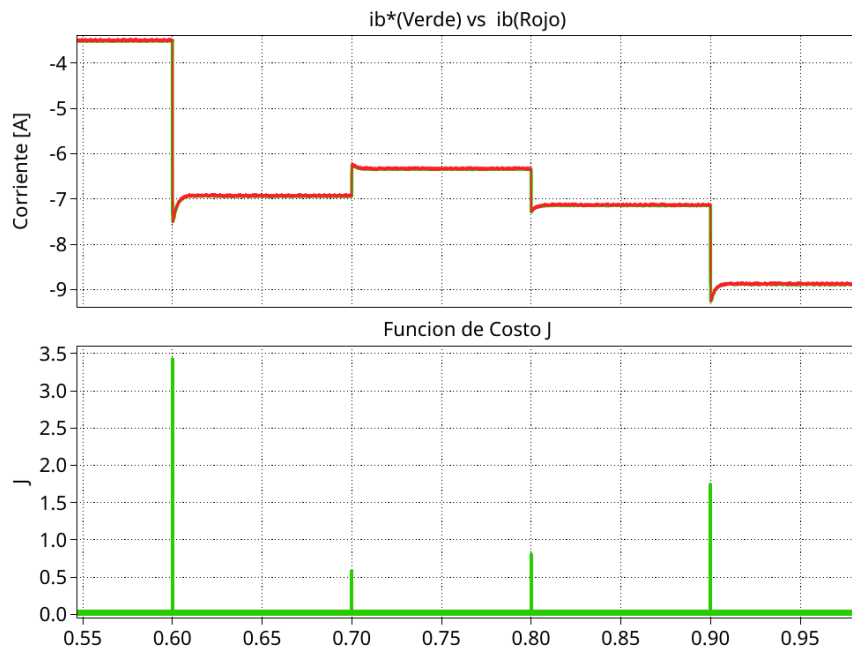


Figura 3.8: Acercamiento de la señal de Control Predictivo MPC en el lazo de corriente.

3.2.3. Implementación de FeedForward

Para esta etapa además del control en cascada conformada por el PI y el MPC también se le implementa una estrategia de control de FeedForward, esto es necesario para poder mantener una tensión lo más constante posible en el DC-Link de 400V, debido a que las cargas no se conocen, estas al conectarse ocasiona una perturbación en el DC-Link, por lo tanto al implementar un FeedForward se puede anticipar estas perturbaciones y conseguir una tensión en el DC-Link con cambios menos bruscos y mantener la tensión constante. Se implementa en esta etapa ya que el controlador de la batería es la que se encarga de mantener este nivel de tensión en el capacitor.

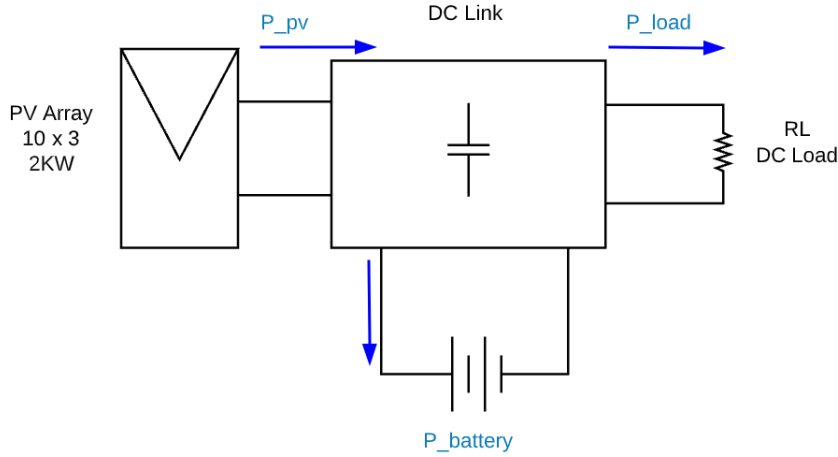


Figura 3.9: Red de tres puertos.

En la figura 3.9, si tomamos el capacitor del DC-Link como una red de tres puertos, y asignando la convención del flujo de potencia como se ve en la figura, a partir de un análisis de sumatoria de potencias se obtiene que la potencia del capacitor DC-Link está dada por:

$$\begin{aligned} P_{pv} - P_{battery} - P_{load} &= P_{DC-Link} \\ P_{pv} - P_{battery} - P_{load} &= CV'_c \cdot V_c \end{aligned} \quad (3.19)$$

Debido a que el objetivo es mantener el DC-Link lo más constante posible, estas perturbaciones ocurren cuando el sistema está en estado estacionario ya que para este momento, la tensión en el capacitor es de 400V, entonces, asumiendo que el sistema se encuentra en estado estacionario entonces $V'_c = 0$. Además, la variable que se desea despejar es la corriente del inductor de la batería i_b que la vamos a llamar $i_{b_feedForward}$, esto es por que, al implementar el control en cascada, la prealimentación se realiza en la salida del control PI externo, la cual manipula la corriente del inductor i_b^* . Por lo tanto se tiene que medir la corriente $i_{b_feedForward}$ para sumársela a la corriente de i_b^* en la salida del PI externo tal como se muestra en la figura 3.10

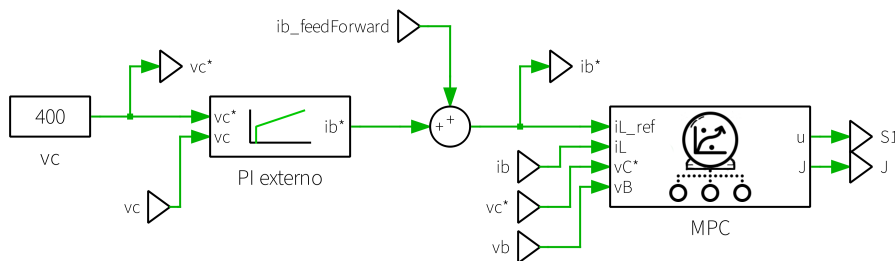


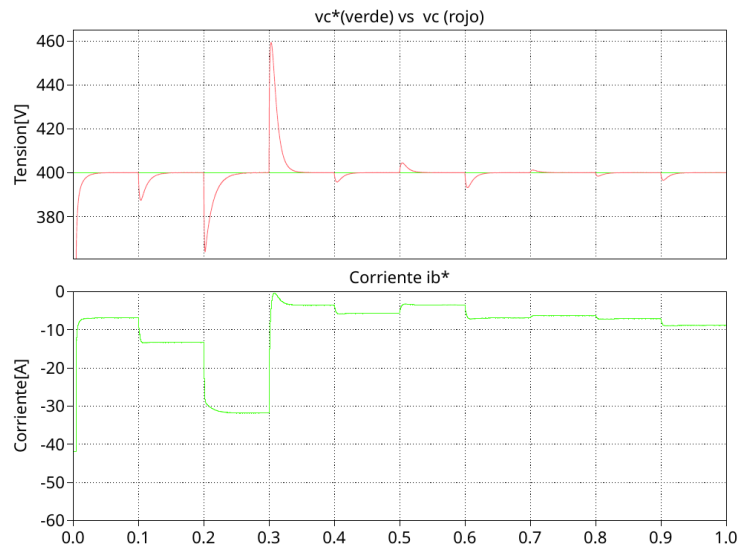
Figura 3.10: Implementación de una prealimentación para el controlador de la batería.

$$\begin{aligned} P_{pv} - P_{battery} - P_{load} &= 0 \\ V_p \cdot i_p - V_b \cdot i_{b_feedForward} - V_o \cdot i_R &= 0 \end{aligned} \quad (3.20)$$

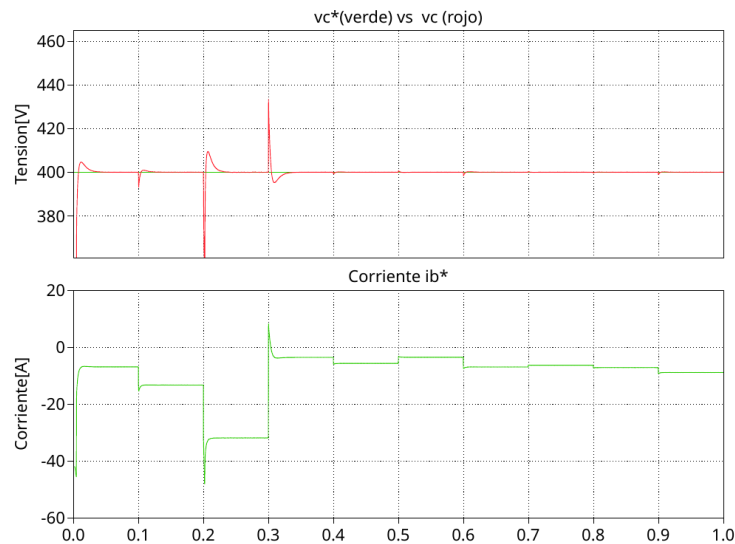
$$ib_{feedForward} = \frac{V_p \cdot i_p - V_o \cdot i_R}{V_b} \quad (3.21)$$

La ecuación 3.21 representa el valor de $ib_{feedForward}$ que tiene que sumarse a la salida del PI externo, esta se tiene que calcular ya sea en un bloque de función o dentro del C-Script.

En la figura 3.11, se puede observar ambos casos de la respuesta de control ante perturbaciones en la tensión DC-Link de 400V, en la sub figura 3.11a se puede ver que ante alguna carga conectada, la tensión alcanza los 460V, esta misma perturbación se puede observar en 3.11b, donde claramente se ve como las perturbaciones son anticipadas y se logra rechazarlas, aunque no sea perfecto, se puede apreciar que, el tiempo que le toma al controlador en rechazar las perturbaciones y que la respuesta vuelva al punto de referencia es mucho más rápida que el controlador que no tiene FeedForward



(a) Respuesta a las perturbaciones sin feedForward.



(b) Respuesta a las perturbaciones aplicando feedForward.

Figura 3.11: Respuesta del sistema Con FeedForward y Sin FeedForward