



CONTROL DE CORRIENTE PICO POR RAMPA DE COMPENSACIÓN APLICADO A UN CONVERTIDOR BOOST (Mayo de 2022)

J. S. Usamá y C. M. Sacro

Resumen - El objeto de este trabajo es diseñar un control de corriente pico con rampa de compensación aplicado a un convertidor Boost, bajo técnicas que nos permitan conocer el funcionamiento del controlador, buscando la estabilidad en el voltaje de salida para diferentes aplicaciones.

Las técnicas de control serán analizadas utilizando el software Matlab con la herramienta Simulink que resulta útil en el proceso de desarrollo ya que ayuda a probar, visualizar y ejecutar diversas simulaciones y perfeccionar el diseño. Dentro de esta herramienta fue necesario realizar modificación con el fin de mejorar el acople del sistema, como: Convertir los números decimales a binarios (0 y 1), ingresar funciones continuas, bloques de ganancia, visualizadores, PWM (moduladores por ancho de pulso), funciones integrativas, derivativas, etiquetas, etc.

Lo anterior predispuesto para la realización del análisis comparativo entre la estabilidad que genera dos tipos de técnicas de control, la corriente pico con rampa de compensación y el PID dentro del marco relacional respectivamente hablando, la corriente pico por rampa de compensación es una técnica que permite un tiempo de estabilización muy rápido y sin sobrepaso, mientras que el PID tiene un tiempo de estabilización más lento y con sobrepaso siendo esto inversamente proporcional.

Índice de Términos – PID, convertidor Boost, rampa de compensación, controlador

I. INTRODUCCIÓN

Un convertidor de potencia es un dispositivo que es capaz de convertir energía y adaptarla para la realización eficiente de distintos procesos. En la electrónica se encuentran distintos tipos de estos convertidores que a su manera desempeñan diferentes funciones, entre algunas de dichas funciones se caracteriza por elevar o disminuir voltaje y corriente, como

también de estabilizar el voltaje para diferentes aplicaciones. [6]

Existen diferentes tipos de convertidores, entre otros los rectificadores, los transformadores e inversores. En la actualidad gracias a los avances en electricidad y electrónica, se han venido desarrollando nuevas fuentes de energía, especialmente las no convencionales o renovables, para ello es indispensable convertir la energía que se obtiene directamente de este tipo y adaptarla a las necesidades que tienen las personas en su entorno.

Los convertidores de potencia también pueden adaptarse a la industria debido a que la mayor parte de esta ya se encuentra en proceso o ya están sistematizados. Para las maquinas que se utilizan actualmente es necesario adaptar distintos niveles de voltaje o corriente para que su funcionamiento sea optimo y por ende sea factible aplicarlos a la actual industria. Dado que se necesita distintos niveles de corriente o tensión. para el adecuado trabajo de los convertidores es necesario aplicar alguno de los distintos tipos de controladores que existen actualmente y de esta manera garantizar su correcto funcionamiento y evitar los posibles inconvenientes que se puedan generar y obstaculicen el funcionamiento óptimo.

Para la aplicación de un convertidor se debe conocer el tipo que se desea utilizar según el proceso que va a desempeñar y de esta manera seleccionar óptimamente la técnica de control pertinente que mejore la estabilidad del sistema, en este caso se utilizara el convertidor elevador BOOST DC-DC que nos va a permitir elevar la entrada del sistema.

El control PID (control proporcional, control integral y control derivador) será el encargado de estabilizar el error que ingresa en el sistema del convertidor permitiendo ser controlado, derivado e integrado por una constante la cual nos va a determinar la sintonización adecuada para la estabilidad del sistema.

El controlador PID no puede ser aplicado al voltaje porque el sistema no se estabilizaría dado que si se censa el voltaje del capacitor de salida (v-out) y aplicándolo directamente al conmutador los resultados presentarían mala estabilidad del sistema.

Razón a ello si cambiamos la variable y censamos la corriente que pasa por el inductor aplicando las ecuaciones del controlador PID, se crearía el controlador por medio de corriente siendo así un controlador de corriente, por ejemplo:

Documento recibido el 20 de mayo de 2022. Este artículo fue apoyado del trabajo de grado titulado Control de corriente pico por rampa de compensación aplicado a un convertidor boost J. S. Usamá, Facultad de ingeniería programa de electrónica, AUNAR, Pasto – Colombia (correspondiente al autor - Cel: 3137050397; e-mail: jacksen103@gmail.com). C. M. Sacro, Facultad de ingeniería programa de electrónica, AUNAR, Pasto – Colombia, (correspondiente al autor - Cel: 3162125364; e-mail: carlossacro4@gmail.com)

si se tiene una corriente de referencia 5 A, la corriente subiría proporcionalmente a este mismo valor, El voltaje que depende de la corriente subiría su valor de tensión, pero no se podría determinar cuál es su valor ya que para ello implicaría censarlo.

Para ello es necesario otro controlador que cense el voltaje de salida en este caso un PI (proporcional e integrador). En cascada, lo que quiere decir que tendríamos que colocar dos controladores en fila, un controlador controlando la corriente del inductor y el otro controlando esa corriente.[7]

Este trabajo indica una metodología cuyo objetivo es realizar un análisis comparativo de la estabilidad producida por los dos tipos de técnicas de control. Para ello se tiene en cuenta un convertidor elevador o comúnmente DC - DC (conocido como convertidor tipo BOOST). Por su topología, este tipo de transductor facilita mucho su análisis. Para la respectiva etapa de control con el fin de mantener la estabilidad en el punto de operación óptimo actual, se requieren varias modificaciones al controlador. intente mejorar y evitar que el convertidor integrado y el sistema de control pierdan estabilidad y provoquen cambios. [7]

II. PROCEDIMIENTO PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO

La presente investigación se enfoca en la aplicación de una técnica de control de corriente pico con rampa de compensación aplicado a un convertidor elevador (boost). Cuyo propósito como su mismo nombre lo dice es elevar el voltaje para diferentes estudios. El plan de esta investigación es estudiar el comportamiento del convertidor aplicando el controlador y que resultados de estabilidad se obtendrán de este proceso. Los convertidores son muy comunes en la electrónica de potencia y bastante utilizados, pero estos presentan problemas como, pérdidas de potencia ya sea en calor, histéresis, entre otros para esto se construyen controladores que permiten que se disminuyan estas pérdidas por control de voltaje o en este caso de corriente. Por medio de simulaciones se pretende comprobar el funcionamiento óptimo de este controlador y de esta manera obtener datos de estabilidad para su análisis y en paralelo aplicar otra técnica de control distinta y determinar cuál de estas es más eficiente en cuanto a mantener la estabilidad del convertidor.

Para el desarrollo de este trabajo, se realizó un análisis del controlador de corriente pico por rampa de compensación y se comparó su respuesta en el tiempo con un controlador PID, pretendiendo así analizar el comportamiento de la corriente y el voltaje para ambos controladores, haciendo una comparación entre estos dos se evidenciará cuál de los controladores es el más adecuado.

I) *convertidor boost*

El convertidor boost es un dispositivo electrónico que permite elevar tensión debido a su configuración de elementos como resistencias, bobinas, capacitores, conmutadores, diodos entre

otros. El arreglo de componentes electrónicos es sencillo en la Fig. 1. Muestra como están ordenados.

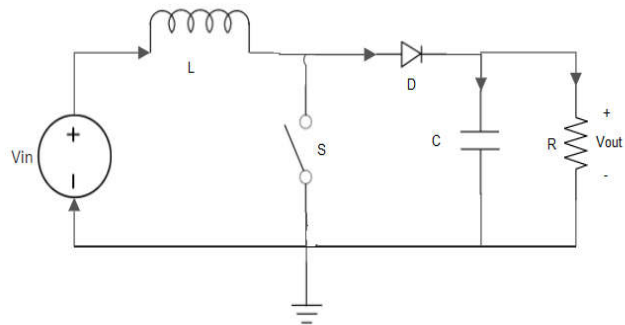


Fig. 1. Convertidor boost

II) *Modo de conducción continua*

El modo conducción continua es denominado de esta forma por el motivo de que en ningún momento la fuente deja de entregar energía. En este modo comúnmente se hace análisis para obtener los vectores de estado para ello se hace el estudio del convertidor que actúa en dos estados cuando el conmutador conduce y cuando no conduce.

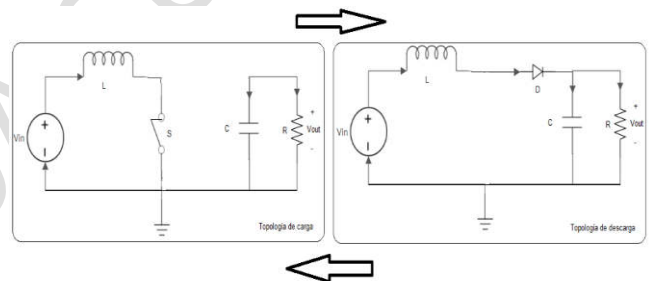


Fig. 2. Interacción entre topologías

Para la topología de carga que es cuando el conmutador conduce, ver en la Fig. 2, el diodo no conduce por lo tanto es como si existiera un circuito abierto y se procede hacer el análisis de la primera malla de corriente donde se encuentra la fuente, la bobina y el conmutador, obteniendo así la primera ecuación diferencial del circuito. Véase en la ecuación (1).

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{v_{in}}{L} - \frac{v_c(1-s)}{L} \quad (1)$$

Donde v_{in} es el voltaje de la fuente, L es el valor del inductor, v_c voltaje en el capacitor i_l corriente del inductor y s el estado del conmutador teniendo en cuenta que 1 está conduciendo y 0 no conduciendo.

En la topología de descarga cuando el conmutador deja de conducir, véase en la Fig. 2, el diodo actúa como corto dejando pasar la corriente obteniendo así la segunda malla de corriente que consta de la fuente el diodo el capacitor y la resistencia de carga en la ecuación (2) se ve el resultado del análisis.

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{v_c}{RC} + \frac{i_l(1-s)}{C} \quad (2)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{v_c}{RC} \quad (5)$$

Donde C es el valor del capacitor y R es el valor de la resistencia de carga.

Con el vector de estados es $x(t) = [i_l \ v_c]^T$ y el vector de variables a controlar $s(t) = [s \ vin]^T$ se procede a obtener las matrices de estado aplicando la ecuación (3). [6]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) + Bs(t) \\ y &= Cx(t) + Ds(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde A, B, C, D son matrices, las cuales se derivan parcialmente con respecto a las variables de estado y variables a controlar obteniendo así las matrices del convertidor.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-s}{L} \\ \frac{1-s}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{v_c}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{i_l}{C} & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$C = [1 \ 0], D = [0 \ 0]$$

Cabe destacar que como es un controlador por modo de corriente las matrices de salida deben estar con relación a i_l , es decir se debe censar la corriente que pasa por el inductor.

III) Modo de conducción discontinua.

Cuando por algún motivo la corriente por el inductor es prácticamente cero, y el conmutador no está conduciendo la fuente no estaría entregando energía produciendo así que el convertidor llegue a este estado, en la Fig. 3. muestra el modo de conducción discontinua.

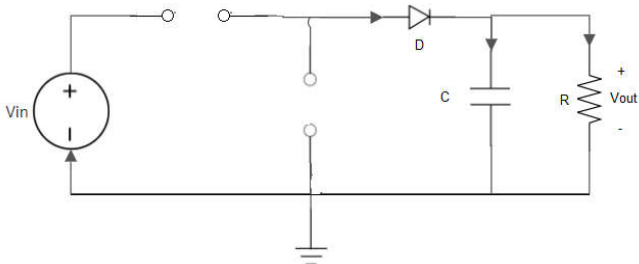


Fig. 3. Conducción discontinua.

Para entender este fenómeno se tiene en cuenta un voltaje de entrada constante y una resistencia de carga constantes, es por eso por lo que se piensa en una posible disminución de voltaje de salida. En la ecuación (5) describe este estado donde se hace el análisis del inductor y el conmutador en estado de no conducción. [6].

Este modo de conducción emplearía una nueva matriz la cual aplicando la expresión (3) obtendríamos que la nueva matriz esté representada así.

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (6)$$

IV) Control En Modo De Corriente Pico Con Rampa De Compensación.

En este trabajo con el fin de comparar un controlador PID y un controlador por modo de corriente pico por rampa de compensación. se analiza por separado cada uno de ellos. teniendo así que el controlador por rampa de compensación implementa dos lazos el de corriente y el de voltaje, en el primer lazo se censura la corriente del inductor multiplicándolo por una ganancia y en el segundo lazo utilizando el voltaje de salida, un divisor de tensión y un controlador PI el cual brindara una corriente de referencia. En la Fig. 4 muestra el esquema tomado de [6].

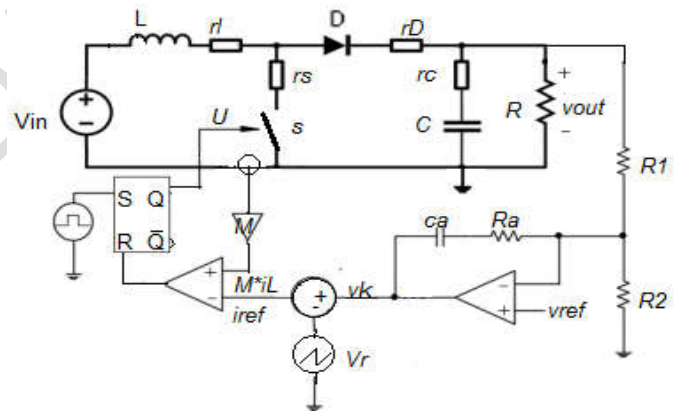


Fig. 4. Control en Modo de Corriente Pico [6]

En el lazo de corriente consta de un flip-flop tipo s que a su entrada set está recibiendo una señal de reloj con un ciclo de trabajo de un 50% es decir que la mitad del tiempo está en estado bajo y la otra en estado alto, cabe destacar que este reloj estará oscilando a una cierta frecuencia la cual tiene que ver con el periodo de conmutación. La principal desventaja de este modo de control es que, cuando el ciclo de trabajo supere el 50% las perturbaciones de corriente son más pronunciadas. es por esta razón que el controlador trabaja con valores menores o iguales al 50% del ciclo de trabajo.[6].

A la entrada de Reset del flip-flop entra la comparación de la corriente medida en el inductor multiplicada por una ganancia y la corriente de referencia que es la obtenida por el controlador PI y el divisor de voltaje. El comparador entrega a su salida un estado alto o bajo según los valores de la corriente

del inductor y la corriente de referencia. Como resultado a la salida del flip-flop se obtendría una respuesta con base a la tabla de verdad de este. véase en la Tabla 1. [1].

R	S	Q	Q'
0	1	1	0
1	0	0	1
0	0	Q	Q'
1	1	Estado no definido	

Tabla 1. Tabla de Verdad de flip-flop

Para el segundo lazo censando el voltaje del capacitor con el divisor de tensión y aplicando un control PI, donde en el control se encuentran los elementos R_1, R_2, R_a, C_a , un amplificador operacional que a su salida se obtiene v_k que se le resta una rampa v_r , que gracias a esta recibe el nombre de control por modo de corriente pico por rampa de compensación. La interacción de estos elementos hace que el controlador funcione correctamente siempre y cuando se encuentre los valores de resistencias, condensadores adecuados y se tenga en cuenta que el periodo y pendiente para la rampa deben coincidir con el periodo de conmutación del reloj.

Para la realización de la simulación y con esto analizar cómo es la respuesta en el tiempo fue necesario utilizar una herramienta que posee Matlab la cual nos permite observar distintos fenómenos que puedan ocurrir aplicando los controladores. Matlab posee diferentes extensiones la muy comúnmente utilizada es Simulink y en este caso se hará uso de esta.

Para la implementación del controlador en Simulink fue necesario aplicar diferentes técnicas, para que el controlador logre hacer su función, en este caso fue necesario incluir un comparador, se utilizó un bloque denominado Matlab function donde permite escribir programación detallada y sencilla. Teniendo en cuenta las entradas y la salida que tiene un comparador y aplicando la lógica que esta emplea se adecuo la programación para este caso. [5].

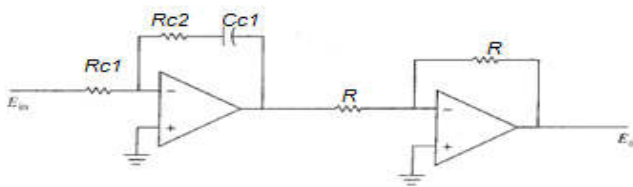


Fig. 5. Diagrama del Circuito del Controlador PI

En la etapa del controlador PI fue necesario aplicar técnicas que permitieron encontrar las constantes necesarias para poder simular el controlador. Basándose en el diagrama de circuito de un controlador PI. vea Fig. 5 y analizando la ecuación (7) se hizo una aproximación de las constantes a utilizar. [7].

$$G_c(s) = \frac{E_v(s)}{E_{in}(s)} = \frac{R_{c2}}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{c1}C_{c1}s} \quad (7)$$

Siendo $\frac{R_{c2}}{R_{c1}}$ la constante proporcional y $\frac{1}{R_{c1}C_{c1}}$ la constante integral. El cálculo de la constante proporcional se realizó analizando el control por modo de corriente pico. Vea figura 4. Donde el paralelo de R_1 con R_2 será R_{c1} , $R_a = R_{c2}$ y $C_a = C_{c1}$ aplicando los cálculos necesarios tenemos que la constante proporcional $k_p = 0.37$ y para la constante integrativa se hizo una sintonización de modo que el controlador no presente sobrepaso y se estabilice en el menor tiempo posible. [7].

V) Controlador PID Censando La Corriente Del

Inductor

Para diseñar un controlador PID es necesario conocer la función de transferencia del convertidor boost. Para ello utilizando las matrices obtenidas anteriormente. ver ecuación (4). Se emplea una programación sencilla en Matlab la cual nos permitirá extraer la función de transferencia del convertidor. Con la función de transferencia obtenida se procede a diseñar el controlador con base al método de malla cerrada de Ziegler y Nichols. Consiste en hacer oscilar de manera periódica el sistema encontrando el valor de ganancia k_{cr} máximo que garantice estabilidad. Al tiempo que pasa entre pico y pico de las oscilaciones se denomina periodo crítico p_{cr} . En la Tabla 2. Se muestran los cálculos para encontrar los valores de las constantes del PID.[2].

Tipo regulador	k_p	T_i	T_d
PID	$0.6k_{cr}$	$0.5p_{cr}$	$0.125p_{cr}$

Tabla 2. Ecuaciones para Constantes de Controlador

Cabe destacar que la función del controlador PID está dada por la ecuación (8)

$$G_c = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (8)$$

Con los valores obtenidos según el método de malla cerrada de Ziegler y Nichols y la Tabla 2. Es posible calcular la constante proporcional $= k_p$, constante integral $= \frac{k_p}{T_i}$, y la constante derivativa $= k_p * T_d$. [2].

Para la simulación del controlador PID es necesario encontrar las constantes que acompañan a cada uno de los elementos del controlador, esto permitirá observar el comportamiento del

convertidor boost y analizar su desempeño con respecto al primer controlador.

Como primer paso se procede a sacar la función de transferencia, con ayuda de Matlab este proceso resulta sencillo. A partir de las matrices de estado ver expresión (4). y con los valores propuestos anterior mente, la función de transferencia del convertidor está dada por la expresión (9).

$$\frac{1.154x10^5s + 4.41x10^7}{s^2 + 256.4s + 1.068x10^7} \quad (9)$$

Con esto se aplica el método de malla cerrada de Ziegler y Nichols para así obtener k_{cr} en la expresión (10). Se observa cómo queda la función en malla multiplicada por una ganancia k_{cr} .

$$\frac{(1.154x10^5s + 4.41x10^7)k_{cr}}{s^2 + (256.4 + 1.154x10^5k_{cr})s + 1.068x10^7 + 4.41x10^7k_{cr}} \quad (10)$$

Aplicando el criterio de Routh-Hurwitz y despejando se tiene que el valor de $k_{cr} \geq 0.2422$ para encontrar p_{cr} se mide la distancia pico a pico que existen en las oscilaciones este será el periodo crítico el cual nos permitirá encontrar las constantes de controlador aplicando la Tabla 2 y Con la ecuación (8) el valor de $k_p = 0.1453$ que es la constante proporcional, la contante integral tendrá un valor de 1325.9 y la constante derivativa es de $3.98x10^{-6}$ con estos valores se procedió a implementar el controlador. [2].

III. RESULTADOS

Se realizan las simulaciones del convertidor con los siguientes parámetros, [6].

$V_{in} = 9V$, $R = 26\Omega$, $L = 165\mu H$, $C = 150\mu F$, $rL = 0.04\Omega$, $rC = 0.03\Omega$, $rD = 0.01\Omega$, $rS = 0.055\Omega$, $T = 60\mu s$, $V_{ref} = 5V$, $R1 = 100.2k\Omega$, $R2 = 14.5k\Omega$, $Ra = 4.7k\Omega$, $Ca = 2000\eta F$, $M = 0.3$

1) Simulación del control por modo de corriente pico con rampa de compensación.

Simulink es una interfaz gráfica donde se puede interactuar con distintos elementos ya sea eléctricos, de control, bloques de ganancia, bloques programables entre otros, gracias a esto esta interfaz permite utilizar distintas técnicas de implementación. En la Fig. 6. Se muestra la implementación en Simulink del convertidor con control por rampa de compensación. [5]

Para el análisis de la corriente que pasa por el inductor se aplica un valor de rampa igual a cero al controlador, observando así el valor máximo donde la corriente empiece a estabilizarse, cabe destacar que esta corriente esta multiplicada por la ganancia M . Con respecto a este valor se aplica la rampa. En la Fig. 7. muestra el comportamiento de la corriente con compensación de pendiente igual a cero. [6].

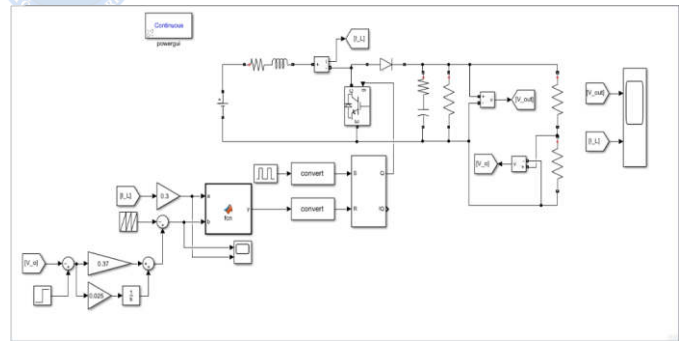


Fig. 6. Diagrama de Simulación del Control por Rampa de Compensación.

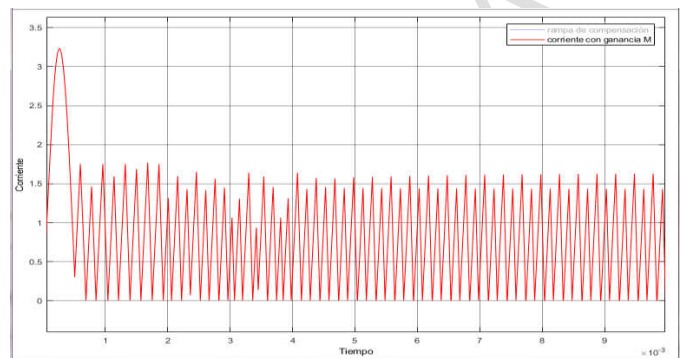


Fig. 7. Corriente con Ganancia M con Pendiente de Rampa igual a cero

Se tiene que los picos de corriente tienden a estabilizarse aproximadamente en 1.5 amperios con esto se determinara el valor de pendiente de la rampa de compensación.

Se observa que al encender el circuito se obtiene un sobrepaso de corriente esto es debido al cambio brusco que se produce la fuente al encender el circuito ocasionado así el pico que se observa en el primer rango de tiempo. en la Fig. 7. se obtiene la gráfica corriente tiempo.

Con una pendiente de cero el voltaje no se estabiliza pasándose del valor deseado, además de que se generan oscilaciones notorias debido a que el voltaje reacciona al comportamiento de la corriente. Por tal motivo si la corriente genera picos de corriente alta el voltaje estará con relación a esta y en respuesta subirá el valor. En la Fig. 8. se muestra el voltaje con respecto al tiempo con pendiente de cero.

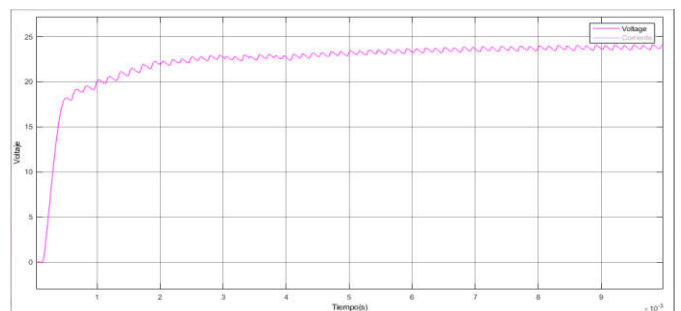


Fig. 8. Voltaje con pendiente de rampa igual a cero

Con una pendiente de 1.5 ya es posible implementar el controlador de manera que la corriente ahora se tienda a

estabilizar siguiendo así a la misma rampa que ahora se asemejara a los valores de corriente del inductor compensando valores y con la lógica del comparador y la tabla del flip-flop entregando al conmutador la respuesta en pulsos deseada, garantizando la estabilidad del voltaje. En la Fig. 9. se muestra la corriente estabilizada.

Se observa un cambio notorio ya que la rampa logra estabilizar de manera uniforme a la corriente, cabe destacar que el pico de corriente que se genera al encender el circuito sigue presente, pero eso no afecta a los valores de voltaje ya que el tiempo donde se presenta esta perturbación es muy pequeño permitiendo así en la respuesta de voltaje no ser notorio.

Una corriente estabilizada también permite que el circuito no genere pérdidas en calor o por picos de corriente no deseados.

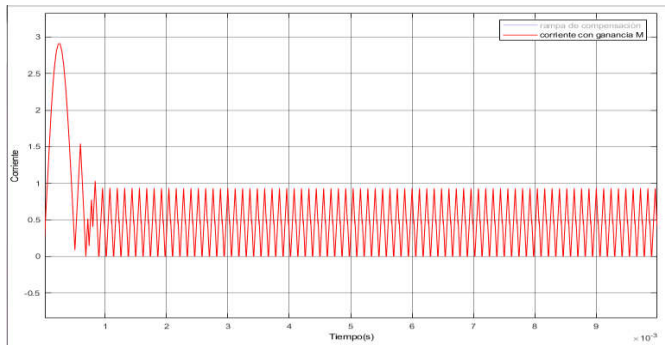


Fig. 9. Corriente Estabilizada.

Un dato que se debe tener en cuenta es que para corrientes altas el calibre del cable de la bobina tiene que soportar la corriente demandada por el circuito ya que si este no soporta dicha corriente el inductor colapsara y terminara quemándose. La interacción entre la corriente y la rampa se ve en la Fig. 10 donde la corriente no sobrepasa a la rampa a excepción en el primer intervalo de tiempo que se observa que la rampa empieza compensar a la corriente a partir del tiempo 0.001 la rampa ya compenso la corriente un tiempo considerable que no afecta la salida de voltaje.

Se observa que la rampa tiene un sobrepaso negativo esto es debido a que como el valor de pendiente de rampa es casi igual a la corriente el exceso de compensación se ve reflejado en la parte negativa.

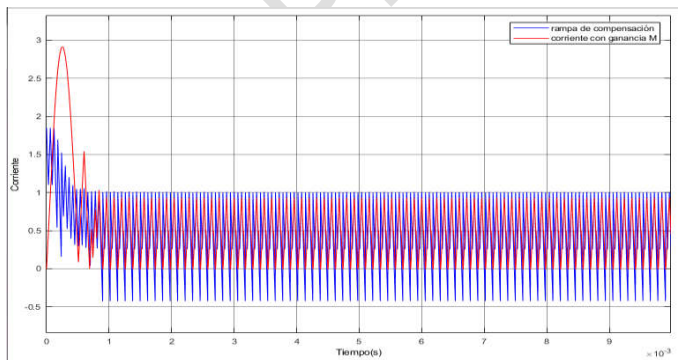


Fig. 10. Interacción de la Corriente con Rampa de Compensación

Se observa que la interacción está realizándose con éxito teniendo así que la rampa de color azul estabilizada y la roja de corriente siguiendo a la rampa, Teniendo así estabilidad en el sistema.

El voltaje a la salida del convertidor está representado en la Fig. 11. donde se observa que no tiene ninguna perturbación aun sabiendo que existe un pico de corriente al encender la fuente cuyo pico resulta en beneficio a este voltaje gracias a que este logra impulsar al valor deseado y con el control de rampa mantener ese voltaje.

Cabe destacar que el voltaje obtenido tiene relación con el voltaje de referencia aplicado al controlador este se lo adecuara según la aplicación requerida o según el voltaje que requiera el instrumento que se va a conectar.

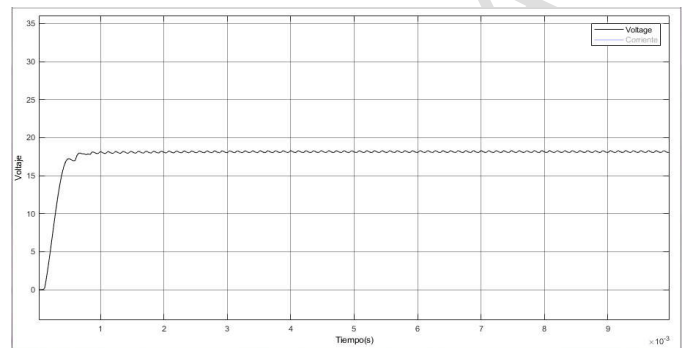


Fig. 11. Salida de Voltaje del Convertidor por modo de Corriente Pico por rampa de Compensación.

II) Simulación del controlador PID aplicado a la corriente del inductor

En la Fig. 12. esta implementado el diagrama del convertidor boost con el controlador PID aplicado a la corriente que pasa por el inductor.

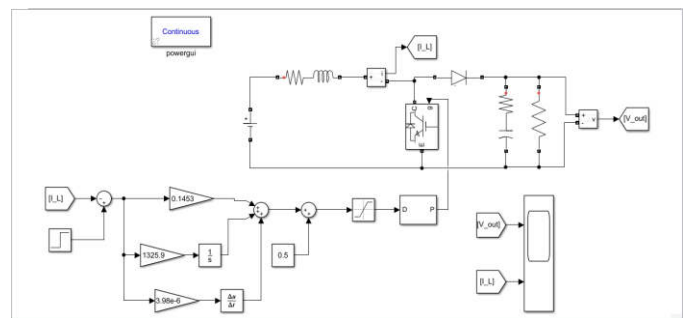


Fig. 12. Diagrama de Simulación del Controlador PID

La parte derivativa hace una anticipación del comportamiento futuro que va a tener la señal de error. el inconveniente de implementar la acción de control derivativa es que es muy difícil de sintonizar aparte de que si el valor de la constante derivativa es muy grande el valor de predicción puede ser erróneo provocando así inestabilidad en el sistema.

En este caso el valor de la constante derivativa es muy bajo haciendo que no tenga un cambio significativo en el sistema. En la Fig. 13. se observa el comportamiento del voltaje y la



corriente aplicando el controlador PID observando que en un determinado tiempo estos se estabilizan.

Teniendo en cuenta que el sistema se estabiliza y la constante derivativa es demasiado pequeña cabe destacar que con un controlador PI sintonizando las constantes es posible controlar el convertidor de forma estable.

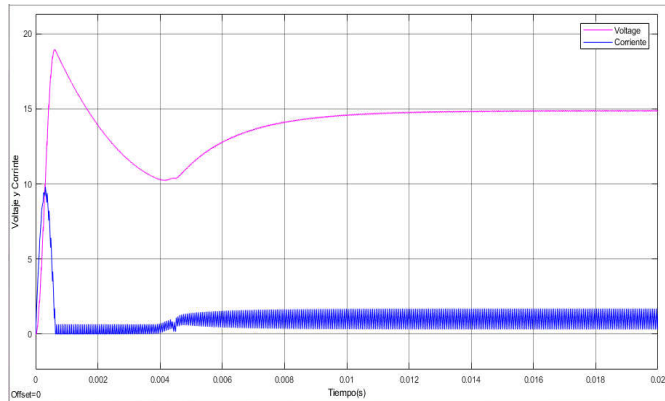


Fig. 13. Corriente y Voltaje Controlados por un PID

El control por modo de corriente pico por rampa de compensación presenta una respuesta de estabilización muy rápida a diferencia del controlador PID, además de que el controlador por modo de corriente pico controla el voltaje de salida algo que el controlador PID no hace. Para que el controlador PID funcione de manera que controle el voltaje de salida es necesario implementar un controlador en cascada, es decir que exista otro controlador que cense el voltaje de salida y con respecto a este controlar el PID propuesto, ya que este solamente controla la corriente que pasa por el inductor. Es por eso por lo que el controlador por rampa de compensación que consta de dos lazos, el que censa la corriente y el control PI que se basa tomando como referencia el voltaje de salida, permite que su implementación sea más sencilla dado a que su lógica consta de una tabla de verdad que la da el flip-flop, a su entrada reset recibe la comparación de corriente censada con ganancia M con la corriente de referencia que es la diferencia de la rampa con el controlador PI.

Teniendo en cuenta la Fig. 9 y la Fig. 13. observando la corriente del inductor se puede determinar que en el controlador por rampa de compensación existe una estabilidad del sistema rápida aproximadamente el tiempo de estabilización es de 0.001 segundos a diferencia del controlador PID cuyo tiempo de estabilización es aproximadamente 0.016 segundos comprobando así la eficiencia del controlador por modo de corriente pico con rampa de compensación.

También es notorio observar que el controlador PID presenta un sobrepaso en la respuesta del voltaje. Vea Fig. 13. Teniendo así un pico de voltaje que puede afectar el funcionamiento de un sistema que se encuentre conectado a la salida del convertidor, ya que si este último no es robusto y sensible al ruido termine dañándose. Es por eso por lo que otra de las razones por las que el control por rampa de compensación es ideal para cualquier sistema sensible a perturbaciones de voltaje. En la Fig. 11. se observa que no existe ningún sobrepaso de voltaje estabilizándose en el valor deseado.

IV. CONCLUSIONES

Con un controlador PID no es posible controlar el voltaje directamente, debido a que si implementamos el controlador PID censando el voltaje de salida el sistema no se estabilizara. Para ello es necesario aplicar el controlador PID censando la corriente de entrada, pero esto ocasiona que se controle la corriente que pasa por el inductor esto conlleva a que se requiera diseñar un controlador externo de manera que este cense el voltaje de salida y así complementar el controlador.

Censando la corriente de entrada y aplicando el controlador PID al momento de obtener los cálculos se obtuvo que la constante derivativa es muy pequeña por ende el valor de esta no hizo un cambio significativo en la respuesta del controlador, en conclusión, con un controlador PI es posible controlar el circuito y por ende sintonizando las constantes de este, la respuesta de estabilización podría ser más rápida y existir un sobrepaso menor.

Al analizar el controlador por modo de corriente pico con rampa de compensación en el lazo de voltaje y el controlador PI aplicando el análisis correspondiente se obtuvo que la constante integrativa debe ser pequeña para que el sistema se estabilice, de tal manera que la variable se la sintonizo de modo que no afecte la respuesta de voltaje.

Para encontrar el valor de la pendiente de rampa de compensación se lo realizo de manera analítica observando la corriente que pasa por el inductor multiplicada por la ganancia y aplicando como parámetro inicial una pendiente de cero, de esta manera se pretendió que al observar las perturbaciones de corriente y observando el valor pico que más se repetía se aproximó el valor de pendiente.

V. REFERENCIAS

- [1] Brunings, M. (06 de 2016). *SlideShare*. Obtenido de Diferentes tipos de flip flops (jk, sr, d, t) sus tablas de verdad, características de funcionamiento e implementación con compuertas lógicas: <https://es.slideshare.net/MiguelBrunings/diferentes-tipos-de-flip-flops-jk-sr-d-t-sus-tablas-de-verdad>.
- [2] Castaño Giraldo, S. A. (15 de 03 de 2022). *Control Automático Educación*. Obtenido de Todo sobre Ziegler Nichols – Sintonía de Control PID: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sintonia-de-control-pid/>
- [3] Grote, T., Schafmeister, F., Figge, H., Fröhleke, N., Ide, P., & Böcker, J. (2014). Compensación digital adaptable de pendiente para control de modo de corriente pico. *IEEE Xplore*, 50-58.
- [4] López Flores, D. R., Lizarraga Lizarraga, A., & Durán Gómez, J. L. (2005). Diseño y consideraciones de un lazo de compensación para el convertidor tipo Boost (elevador) cd-cd controlado en modo de voltaje. *Ra Ximhai*, 1(2), 349-362. Recuperado el 2021, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46110207>
- [5] MathWorks. (18 de 04 de 2022). *Simulink para el diseño basado en modelos*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>
- [6] Pérez Contreras, A. (2018). Diseño de un nuevo controlador para convertidores de potencia variando el offset en la rampa de control. Manizales, Caldas, Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.



- [7] Ramos Paja, C. A. (1 de 10 de 2020). *Modelado dinámico y control de corriente del convertidor boost*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=7MnZ5L5M7vA>
- [8] Valderrama, F. F., Moreno C, H., & Vega, H. M. (2011). Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia dc-dc tipo boost. *Ingenium Revista de la facultad de ingeniería*, 12(24), 44-55. Obtenido de <http://>

PROHIBIDA SU COPIA