

Diseño de un convertidor de potencia eléctrico para obtener menos pérdidas de energía

Design of an electric power converter to obtain less energy losses

AUSTRIA, León†*, NORIEGA, Raymundo, CANALES, Benito y RUIZ, Luis

ID 1^{er} Autor: *León, Austria*

ID 1^{er} Coautor: *Raymundo, Noriega*

ID 2^{do} Coautor: *Benito, Canales*

ID 3^{er} Coautor: *Luis, Ruiz*

DOI: 10.35429/JTO.2020.13.4.23.29

Recibido 10 de Marzo, 2020, Aceptado, 30 de Junio, 2020

Resumen

En este escrito se propone y se hace conciencia sobre la importancia en el diseño eficaz de la topología del convertidor como la selección de la mejor frecuencia de conmutación y el cálculo de pérdidas de potencia de los componentes electrónicos que se propongan para elevar la eficiencia del mismo, con lo cual se convertirá en mayor autonomía para el vehículo eléctrico producto de la reducción del peso y el tamaño del modulo de potencia que alimentará a sistema de tracción. Se da una introducción al estado del arte y marco teórico en la primera parte sobre las investigaciones encaminadas a vehículos eléctricos. En el desarrollo se describen las mejores topologías para convertidores de potencia, aspectos importantes para la selección de la mejor frecuencia de conmutación y por último como calcular las pérdidas de potencia para los componentes electrónicos y proponer los adecuados para un sistema conmutación de potencia en particular.

Cálculo, Conmutación, Convertidor, Diseño

Abstract

In this paper is proposed and is awareness of the importance in the effective design of the topology of the converter as the selection of the best switching frequency and the calculation of power loss of electronic components that they intend to raise the efficiency of it, whereupon it will become greater autonomy for electric vehicle product of the reduction of the weight and size of the module of power that will feed system of traction. An introduction is given to the State of the art and theoretical framework in the first part on research on electric vehicles. Development describes the best topologies for power converters, important aspects for the selection of the best switching frequency and finally calculate the losses of power for electronic components and propose the suitable for a system power switching in particular.

Calculation, Switching, Converter, Design

Citación: AUSTRIA, León, NORIEGA, Raymundo, CANALES, Benito y RUIZ, Luis. Diseño de un convertidor de potencia eléctrico para obtener menos pérdidas de energía. Revista de Operaciones Tecnológicas. 2020. 4-13: 23-29

* Correspondencia del Autor (Correo electrónico: león_austria@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La investigación sobre vehículos eléctricos (VE) va creciendo a nivel mundial y se debe en gran medida a razones de ahorro de combustibles fósiles y la reducción de la contaminación ambiental producidas por los vehículos de combustión interna. Los orígenes de la tracción eléctrica se remontan a mediados del siglo XIX donde los desarrollos de los vehículos de combustión interna iban a la par de los eléctricos (AUSTRIA, 2008). La investigación encaminada a VE se desarrolló lentamente a partir de 1930, ya que no se encontró solución satisfactoria en ese momento al problema de almacenamiento de corriente eléctrica que recae sobre los acumuladores eléctricos, estos primeros poseían una baja capacidad de energía y un nivel bajo de autonomía aceptable (AUSTRIA, 2015).

Sin embargo durante el siglo XX hubo grandes avances en la electrónica de potencia, hacia finales de la década de 1940, se transformó la industria electrónica con la introducción del transistor, después mejorado en 1948 por la invención del transistor de silicio y posteriormente en 1956 el transistor de disparo PNP o tiristor (NASHELSKY, 1997). Luego a comienzos de los años 80 se inventan los transistores de potencia y los GTO, creándose así los primeros inversores que eran capaces de alimentar los grandes motores de inducción desde una fuente de corriente continua. El siguiente paso importante fue la invención de los IGBT y los motores de imanes permanentes contribuyendo al desarrollo de los sistemas de tracción de los vehículos eléctricos (NASHELSKY, 1997). Al final de la década de los 90 aparecieron vehículos eléctricos pequeños de una a dos plazas, hechos de fibra de vidrio, termoplásticos o materiales compuestos de más o menos 2.5 metros de longitud y con peso de 290 – 600kg.

Con una demanda de energía entre 9 y 20kwh/100km. Desarrollando una velocidad máxima entre 50 y 90km/h, y tenían un alcance entre 30 y 90km dependiendo del patrón de manejo (AUSTRIA, 2015). Actualmente los vehículos eléctricos son grandes de dos plazas con planta de potencia de 185kW, con una transmisión eléctrica manual de 2 velocidades, y recorren distancias hasta 400km antes de una recarga de sus acumuladores como el coche eléctrico TESLA (AUSTRIA, 2008).

Hoy en día algunos países como Japón tienen severas restricciones de gasolina y tienen preocupación por la contaminación ambiental por lo cual buscan alternativas. La alternativa de la energía eléctrica como fuente primaria de energía tanto para los VE como para la industria, se ha hecho muy interesante. En países desarrollados como Alemania y EUA se han creado organismos y centros de investigación sobre VE, baterías y centros de carga. Además se ha tomado, principalmente en los países desarrollados, una actitud de fomento al uso de energías renovables y no contaminantes (AUSTRIA, 2008).

Los vehículos eléctricos obtienen su capacidad de movimiento por la energía eléctrica liberada por las baterías, estas deberán de tener una mayor energía específica, esta energía es la cantidad de watts-hora de electricidad que la batería ofrece por kilogramo de masa para cierta tasa de descarga específica. El sistema de generación y acumulación de la energía eléctrica constituye el sistema básico para mover un vehículo eléctrico. Los vehículos eléctricos tienen un problema en este sentido ya que existen baterías pesadas y de poca energía específica que hacen baja su autonomía.

La autonomía de las baterías de plomo no es comparable con la de un tanque de gasolina ya que llenar un tanque de combustible tarda solo unos pocos minutos, mientras que la recarga eléctrica tarda horas. Si a esto le sumamos el ciclo de vida útil de la batería y su costo, se tiene un serio problema en el diseño de un VE y su aceptación en el mercado. Los sistemas de recarga de los VE pueden ser recargando la batería del mismo vehículo o con el reemplazo de las baterías descargadas. Ambos sistemas tienen desventajas y todavía no está claro cuál es el más práctico. Los motores eléctricos presentan ventajas con respecto al motor de combustión interna como es: un amplio rango de par-motor a baja velocidad, ahorro de energía y transmisiones más ligeras y eficientes. Abordando sobre el tema del ahorro de energía se encuentra una ventaja importante de los motores eléctricos ya que el 46% de la energía liberada por las baterías sirve para mover el vehículo, lo que indica una eficiencia entre 10-30% superior del vehículo convencional con motor de combustión interna donde se tiene que el 18% de la energía del combustible es utilizada para mover el vehículo, el resto sirve para accionar el motor (AUSTRIA, 2015).

Los vehículos eléctricos tienen ventaja por su baja emisión de contaminantes con respecto de los de combustión interna, lo que significa menos ozono en la atmósfera, claro que esta ventaja dependerá de cómo se genere la energía eléctrica y del grado al cual las emisiones sean controladas en el centro de carga que es una planta generadora de electricidad necesaria para recargar los acumuladores eléctricos (AUSTRIA, 2015).

Después de un pasado como actor secundario, el VE se alza como gran favorito para ocupar el trono de vehículo urbano. Las grandes marcas apuestan por él, ya sea en forma de vehículo eléctrico puro o híbrido, destinando grandes cantidades de dinero a su investigación y presentando prototipos con una prestaciones que cada vez se acercan más a su claro competidor.

Parece que la razón que nos impulsó a abandonar el VE es la misma que ahora nos lleva aceleradamente a él: el petróleo. A grandes rasgos, la sociedad empieza a darse cuenta de la necesidad de no depender de un recurso finito. Los pronósticos no son favorables a corto plazo y el mejor de los casos es peor de lo esperado. Cambio climático, calentamiento global, contaminación ambiental, recursos limitados... sin duda todos estos conceptos están íntimamente ligados a los vehículos de combustión. Con unas normativas sobre emisiones cada vez más restrictivas, los ingenieros se enfrentan a retos tecnológicos *a priori* inalcanzables (AUSTRIA, 2015).

Para poder diseñar e implementar el equipo electrónico eficiente (convertidor de potencia) que controle los flujos de corriente eléctrica en el vehículo eléctrico, es importante definir una topología de potencia adecuada para la aplicación y deba ser capaz de transferir energía desde y hacia las baterías en todo momento, a una potencia máxima cercana a la del motor, para así poder entregar (o recibir) en ciertos momentos toda la potencia desde el sistema. Muchos de estos convertidores de potencia para VE en aplicaciones industriales, es preciso el convertir un voltaje fijo de una fuente de DC a un voltaje variable también en DC. El convertidor, cambia de forma directa una magnitud fija a otra DC variable.

El equivalente al convertidor en AC es el transformador. Un convertidor, de la misma manera que lo hace un transformador, se puede utilizar tanto como fuente de DC reductora como elevadora (AUSTRIA, 2015).

Desarrollo

Un convertidor conmutado o convertidor de potencia modo conmutado es un sistema electrónico de potencia, que convierte un nivel de energía eléctrica de entrada en otro nivel a la salida de la carga, por acción de la conmutación de los elementos electrónicos. El convertidor conmutado de CD/CD mostrado en la Fig.1, utiliza semiconductores como dispositivos de control de la conmutación para la transferencia de potencia en forma dinámica, en una fuente de alimentación de corriente directa como entrada conectándola y desconectándola a la carga por algún periodo de tiempo predeterminado. La aplicación para VE de este convertidor conmutado es de regulador elevador de voltaje controlado para alimentación del inversor del motor. En comparación de los convertidores lineales de voltaje, o reguladores lineales de voltaje, las fuentes de poder conmutadas tienen una alta eficiencia en energía y una potencia alta.



Figura 1 Diagrama a bloques del convertidor de potencia de CD/CD

La selección de la topología del convertidor. El convertidor conmutado consiste en un número de elementos eléctricos pasivos y de interruptores electrónicos para el almacenaje de energía que estén conectados en una topología tales que las acciones periódicas de la conmutación de los interruptores controlan la transferencia dinámica de la energía de la entrada a la salida para producir una conversión deseada del CD en la salida. Los elementos del almacenaje (inductor y condensador), tienen que ser conectados generalmente de una manera tal que formen un filtro pasa bajos para entregar un voltaje de baja frecuencia a la salida. Las dos topologías fundamentales de convertidores son el convertidor del *buck* (reductor) y el convertidor del *boost* (elevador).

La mayor parte de las otras topologías derivadas del *buck* o de las del *boost* son equivalentes en cuestión topológica al del *buck* o al convertidor *Boost* (AUSTRIA, 2015). Los convertidores *interleaved* son el resultado de la conexión en paralelo de convertidores conmutados. Estos usualmente tienen algún tipo de filtro en la salida. Los convertidores *interleaved* tienen grandes ventajas sobre los convertidores simples de potencia; una baja corriente de rizo en la entrada y baja capacitancia de salida (capacitor pequeño).

Rápida respuesta al transistor al cambio de carga (carga dinámica). Y proporciona capacidad grande de potencia y elevando a 90% la eficiencia de potencia (AUSTRIA, 2008). Un convertidor *interleaved* puede ser realizado por un manejador de fase de salida de señales de control en cada convertidor en paralelo, resultando en un incremento efectivo en esta frecuencia de conmutación (AUSTRIA, 2015). Esto es usado en aplicaciones donde las cargas demandan un rizo pequeño de la corriente de entrada (ver figura 2).

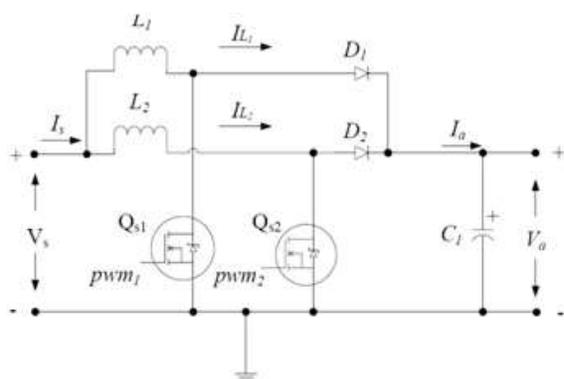


Figura 2 Diagrama eléctrico del convertidor boost interleaved de 2 celdas

El voltaje de entrada V_s es común en ambas celdas, como el capacitor de salida. Las señales moduladas por ancho de pulso (*PWM*) son pwm_1 y pwm_2 , las cuales son desfasadas 180° una con respecto a otra ($2\pi/n$), donde n es el número de convertidores en paralelo, en este caso de $n=2$. La corriente de entrada tiene un rizo pequeño y es igual a la suma de las corrientes de los inductores, $I_{L1} + I_{L2}$ y están desfasadas 180° (AUSTRIA, 2015).

Estas características en combinación con la corriente de entrada continua lo hace ideal para aplicaciones en fuentes para PC, compensadores de factor de potencia y convertidores para vehículos eléctricos (AUSTRIA, 2015). La operación de este convertidor puede ser dividido en cuatro modos, dependiendo de la acción de conmutación de los transistores (ver figura 3).

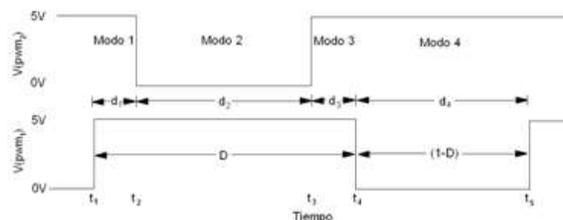


Figura 3 Pulsos modulados en ancho del ciclo útil pwm_1 y pwm_2 del convertidor

Metodología

Para calcular la corriente del rizo de entrada (ver figura 4) se necesita saber calcular el incremento de ΔI_{L1} y la corriente mínima del rizo $I_{L1-\min}$ de cada una de las celdas (ambas son iguales), a continuación se muestra en la ecuación 1 el cálculo del incremento del rizo de corriente en cada celda (AUSTRIA, 2015).

$$\Delta I_L = \Delta I_{L1} = \Delta I_{L2} = \frac{V_s D}{f_{sw} L_1} = \frac{V_s D}{f_{sw} L_2} \quad (1)$$

Donde:

ΔI_L ; Incremento del rizo de corriente en cada celda (Amperios).

f_{sw} ; Es la frecuencia de conmutación del convertidor (Hertz).

V_s ; Es el voltaje de alimentación (Voltios).

D ; Porcentaje del ciclo de trabajo (Porcentaje %).

$L_{1 y 2}$; Valores de las inductancias (Henrys).

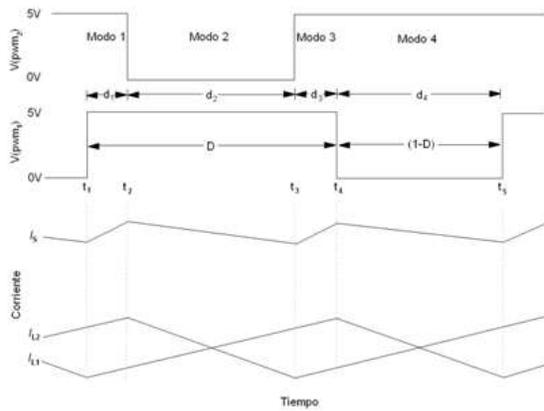


Figura 4 Señales del rizo de corriente de entrada y los rizados de corriente en cada inductor

La corriente mínima del rizo de entrada I_{s-min} cuando los inductores son iguales ($L_1 = L_2$) es igual a:

$$I_{s-min} = \left(\frac{\Delta I_L}{\Delta I} \right) 0.5 + 2I_{L-min} \quad \Delta I_r \begin{cases} D \leq 0.5 & \Delta I_r = 1-D \\ D > 0.5 & \Delta I_r = D \end{cases} \quad (2)$$

Donde I_{L-min} es corriente mínima de cada celda.

La corriente máxima del rizo de entrada cuando los inductores son iguales ($L_1=L_2$) es igual a,

$$I_{s-max} = \left(\frac{\Delta I_L}{\Delta I} \right) |D-0.5| + I_{L-max} + I_{L-min} \quad \Delta I_r \begin{cases} D \leq 0.5 & \Delta I_r = 1-D \\ D > 0.5 & \Delta I_r = D \end{cases} \quad (3)$$

Donde I_{L-max} es corriente máxima de cada celda. Al obtener la diferencia entre I_{s-max} y I_{s-min} se encuentra que ΔI_s ,

$$\Delta I_s = I_{s-max} - I_{s-min} \quad (4)$$

La selección de la frecuencia de conmutación. Otro aspecto muy importante es encontrar la mejor frecuencia de conmutación para el convertidor propuesto que reúna las siguientes cualidades:

- Valor del capacitor e inductor pequeño ya que esto se convierte en menor tamaño del componente ahorrando espacio, peso y costo (ver Figura 5).
- Menores pérdidas de potencia que se convierte en un disipador pequeño ahorrando peso y tamaño (ver Figura 6).

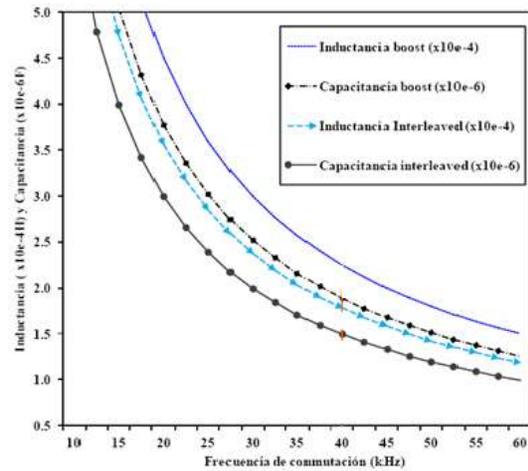


Figura 5 Frecuencia vs. Inductancia y capacitancia del convertidor

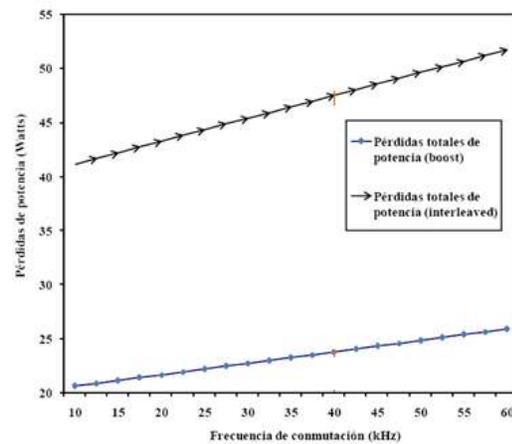


Figura 6 Pérdidas de potencia del convertidor contra la frecuencia de conmutación

La selección de los transistores y diodos que componen la etapa de potencia del convertidor pueden ser calculados a partir del voltaje de entrada, voltaje de salida, potencia de salida, amplitud máxima del rizo corriente de entrada, amplitud máxima del rizo voltaje de salida y la frecuencia de conmutación. Esta selección es muy importante para garantizar que la pérdida de potencia sea la mínima producto por el calentamiento de los dispositivos debido a la acción de conmutación y el manejo de las corrientes de rama.

El ciclo útil de la señal de control puede ser calculado a partir del voltaje de entrada y salida.

$$D = \frac{V_a - V_s}{V_a} \quad (5)$$

Donde V_a es el voltaje de salida y V_s es el voltaje de entrada. La corriente de entrada puede ser calculada a partir de la potencia de entrada.

$$I_s = \frac{P_s}{V_s} = \frac{I_a}{(1-D)} \quad (6)$$

Donde P_s es la potencia de entrada. La resistencia de carga se puede calcular como sigue:

$$R = \frac{V_a^2}{P_a} \quad (7)$$

Donde P_a es la potencia de salida.

Con los resultados anteriores podemos seleccionar los interruptores de potencia, ya que deben cumplir con los requerimientos del sistema. Es importante realizar una comparación de pérdidas de potencia entre diversos componentes electrónicos y así obtener transistores que tengan las menores pérdidas totales debido por la acción de la conducción y la conmutación del sistema de conversión. Con la ecuación 8 se puede calcular:

$$P_{transistor} = P_C + P_{sw} \quad (8)$$

Con la ecuación 9 podemos encontrar la P_C :

$$P_C = P_Q + P_D \quad (9)$$

P_Q = Pérdidas por conducción.

P_D = Pérdidas de conducción del diodo interno del transistor.

Para encontrar P_Q se calcula como el promedio de la potencia instantánea:

$$P_Q = \frac{1}{T} \int_0^{DT} p(t) dt \quad (10)$$

Donde $P(t)$ es la potencia instantánea $P(t) = i^2(t) R_{DS(on)}$.

Y para encontrar las pérdidas por conmutación del transistor P_{sw} se pueden calcular con la ecuación 11.

$$P_{sw} = (E_{on} + E_{off}) f_{sw} \quad (11)$$

Donde E_{on} y E_{off} son las energías pérdidas en cada tiempo y f_{sw} es la frecuencia de conmutación.

Las pérdidas por conmutación son causadas por la superposición de las formas de onda de la corriente y el voltaje en el transistor durante los instantes de incremento y decremento de estas dos señales, como lo muestra la figura 7. Durante los intervalos de encendido t_{on} y apagado t_{off} la pérdida de energía está dada por:

$$E_{on} = \frac{V_a I_a}{2} t_{on} \quad (12)$$

$$E_{off} = \frac{V_a I_a}{2} t_{off} \quad (13)$$

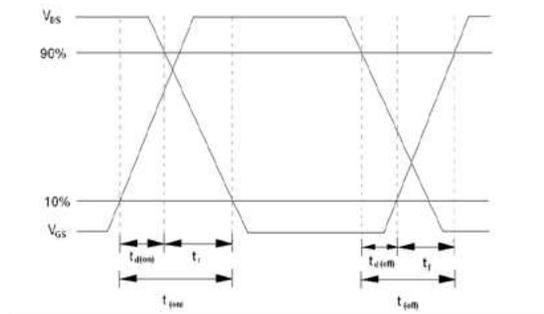


Figura 7 Tiempo contra voltaje de compuerta del mosfet del convertidor

Los tiempos de conmutación los obtenemos de las hojas técnicas de los dispositivos proporcionados por el fabricante. Para encontrar las pérdidas totales en el diodo se necesita calcular la pérdida por recuperación inversa (P_{rr}) y la pérdida por conducción (P_D) y sumarlas. Con la ecuación 14 se puede calcular las pérdidas por recuperación inversa (AUSTRIA, 2015).

$$P_{rr} = f_{sw} (V_a I_a t_{cr} + V_a Q_{rr}) R_{DS(on)} \quad (14)$$

Donde,

f_{sw} es la frecuencia de conmutación.

$R_{DS(on)}$ es la resistencia entre sus terminales en estado de conducción del diodo.

V_a es el voltaje de salida.

I_a es la corriente de carga.

t_{cr} es el tiempo de carga.

Q_{rr} es la máxima carga de recuperación inversa.

Resultados

Con base a las recomendaciones que se dieron en el desarrollo; se propuso el diseño de un convertidor elevador de potencia con celdas en paralelo (*boost interleaved*) como una de las mejores estrategias para ser implementarlo en un VE. Los cálculos se comprobaron en el programa PSIM (software de simulación numérica de circuitos electrónicos de potencia). En la figura 8, se muestra el ejemplo del convertidor *boost interleaved* propuesto.

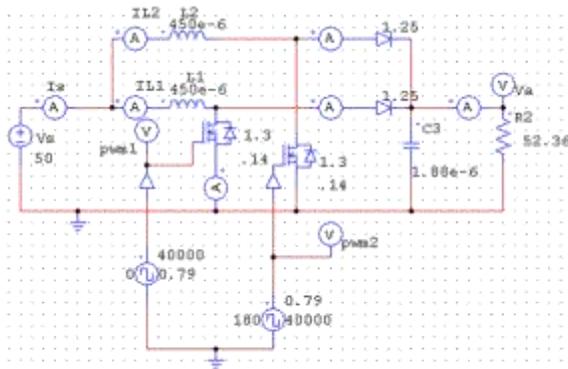


Figura 8 Simulación en PSIM de un convertidor boost interleaved propuesto

En la figura 9, muestra las señales de voltaje que entrega el programa de simulación donde se puede observar el valor del voltaje de entrada y salida con un sobre impulso y un rizo. Esta respuesta se tomo a una frecuencia de conmutación de 40kHz y un valor de ciclo útil de trabajo de 0.79 propuestos.

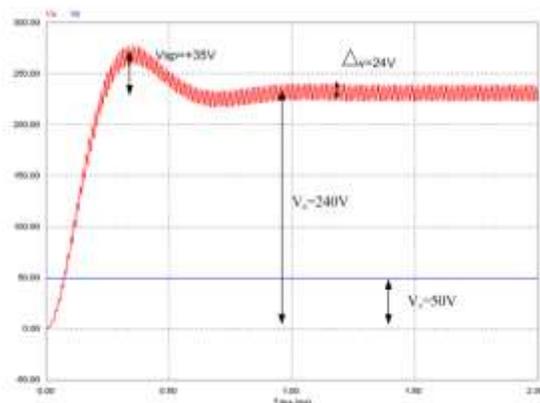


Figura 9 Voltaje de salida y entrada contra tiempo

Conclusiones

La selección de la mejor una topología del convertidor, frecuencia de conmutación y componentes electrónicos reducirán las pérdidas de potencia del sistema de conversión y elevarán la eficiencia del mismo, lo cual se convertirá en mayor autonomía para el vehículo eléctrico reduciendo el peso y tamaño del módulo de potencia que alimentará a sistema de tracción. Por tal motivo, es importante hacer conciencia de que un diseño eficaz con un estudio y cálculo preciso de los componentes para poder transferir la mayoría de potencia de los acumuladores a los motores del sistema de tracción del vehículo y optimizar el manejo de energía.

Referencias

AUSTRIA L, MURO B, (2008). Diseño y control de un convertidor paralelo de potencia. IPN México.

AUSTRIA L, NORIEGA R, CANALES B. (2015). Investigaciones, estrategias y medios en la práctica educativa, Importancia del diseño eficaz del convertidor de potencia eléctrico en el ahorro de energía y autonomía de un vehículo eléctrico. Cenid. México. ISBN: 978-607-8435-03-6.

NASHELSKY L. (1997). Electrónica: Teoría de Circuitos. Prentice Hall.