

Recibido 28 de agosto de 2022. Aceptado 03 de diciembre de 2022. Publicado 23 de diciembre de 2022.

ISSN: 2448-7775

Diseño del Enlace Magnético Múltiple en Alta Frecuencia para Convertidores CC-CC

FRANCISCO J. ARIZAGA AYALA*, JUAN M. RAMIREZ.

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional - Unidad Guadalajara.

*Autor de correspondencia: francisco.arizaga@cinvestav.mx

RESUMEN El presente trabajo muestra el funcionamiento de un convertidor CC-CC (Corriente Continua – Corriente Continua) de múltiples puertos de transferencia de energía mediante un enlace aislado magnéticamente con múltiples devanados en alta frecuencia. Los convertidores CC-CC aislados permiten conectar sistemas de media tensión a sistemas de baja tensión. Un ejemplo de un convertidor CC-CC aislado multi puerto es el puente triple activo. Este convertidor consta de tres puentes activos conectados mediante un transformador de alta frecuencia. Los transformadores de alta frecuencia son utilizados en estas aplicaciones para reducir el tamaño de los transformadores de potencia convencionales. Un buen diseño de un transformador de alta frecuencia permite que los convertidores CC-CC transfieran energía con menores pérdidas. Por esta razón, el enfoque principal de esta investigación es el diseño de un transformador de enlace de alta frecuencia de devanado múltiple de baja potencia nominal (1.5kW).

PALABRAS CLAVE— Triple active bridge, transformador, alta frecuencia.

I. INTRODUCCIÓN

Las microrredes, los dispositivos de almacenamiento de energía, los arreglos fotovoltaicos (PV), las turbinas eólicas distribuidas, los sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías y quizás otras tecnologías han revolucionado la topología de red convencional. [1]-[3]. El avance de la tecnología baja en carbono pone a prueba la confiabilidad, la calidad de la energía y la vida útil de las redes eléctricas existentes. Como resultado, se están desarrollando actualizaciones de red, monitoreo avanzado y tecnologías de control para aumentar el rendimiento de la red eléctrica y, en consecuencia, aumentar el uso de fuentes de energía renovable [4]. El transformador inteligente (ST) es un sistema de electrónica de potencia con capacidades mejoradas de control y comunicación que representa una solución viable a los desafíos mencionados anteriormente. Es una opción viable porque combina alta flexibilidad con flujo de energía, proporciona infraestructura de red y conecta redes de CC a redes de Media Tensión (MT) y Baja Tensión (BT). [5]-[6]. El transformador de estado sólido (SST), compuesto principalmente por electrónica de potencia y un enlace magnético de alta frecuencia (HFML), representa un potencial significativo para resolver los problemas actuales de calidad de la energía. Las configuraciones trifásicas de SST (CC-CC, CA-CC y CC-CA) que utilizan aislamiento de alta frecuencia (HF) se han convertido en las topologías de SST más populares en la etapa de CC-CC. Esto se debe a su capacidad para conectar fuentes de energía distribuidas, regular el flujo de energía bidireccional y equilibrar el voltaje y la corriente al proporcionar energía adicional para cumplir

con los requisitos del transformador inteligente. El SST se divide en etapas de media tensión, alta frecuencia y baja tensión. Los tres pasos trabajan juntos para garantizar que sea efectivo [7]-[8].

El convertidor CC-CC se convierte en el núcleo del dispositivo. Debe cumplir con las especificaciones vinculantes relacionadas con la potencia nominal, el aislamiento y el alto rendimiento. Con respecto al costo, la eficiencia y la confiabilidad, es posible que el SST compita con el transformador tradicional, aunque agrega una gama completa de nuevas funciones que hacen que sea aún más difícil cumplir con los estándares de eficiencia y confiabilidad. Los SST ofrecen varias ventajas sobre los transformadores de baja frecuencia, incluido el control de voltaje y potencia reactiva, el flujo de potencia y la gestión de pérdidas, capacidades bidireccionales, limitación de corriente de falla, filtrado de armónicos y aislamiento galvánico [9]-[10].

El elemento de puente activo dual (DAB) es utilizado ampliamente en los SST debido a su capacidad bidireccional, aislamiento eléctrico y la simplicidad con la que se puede realizar una conmutación simple. Dos puentes activos están conectados a un transformador de alta frecuencia para hacer un convertidor DAB. Un importante estudio científico explora la mejora de la eficiencia de la transmisión mediante la reducción de las pérdidas de transmisión con el aumento de puentes activos conectados a un mismo transformador de alta frecuencia. El convertidor de puente activo múltiple (MAB) utiliza menos transformadores y módulos para cumplir la misma función que una versión basada en DAB.

En consecuencia, el convertidor MAB se ha convertido en la opción preferida en las aplicaciones ST [11]-[12]. Este documento propone el diseño de un convertidor de triple puente activo (TAB) con capacidades bidireccionales, que permite transferir energía entre los tres puertos, dependiendo de las condiciones impuestas en sus respectivos terminales. Se desarrolla su modelo y se analizan los resultados para evaluar positivamente su funcionamiento.

II. DESCRIPCIÓN DEL TRIPLE PUENTE ACTIVO

El convertidor TAB consta de tres puentes activos que se asemejan a los que se muestran en la Fig. 1. El uso de TAB para la etapa CC-CC de un transformador de estado sólido minimiza la cantidad de transformadores y módulos necesarios. Además, debido al diseño de conexión cruzada de TAB de la Fig. 2, la energía también podría transferirse directamente entre los módulos de MT a través del transformador de alta frecuencia. Por lo tanto, el convertidor TAB actúa como un "puente" entre los módulos de MT.

El convertidor TAB emplea la modulación por cambio de fase para controlar la cantidad de energía suministrada a cada uno de los tres puentes activos. Esta investigación se centra en la modulación por cambio de fase (PSM) mediante una frecuencia de conmutación única que emplea una relación de trabajo del 50 %.

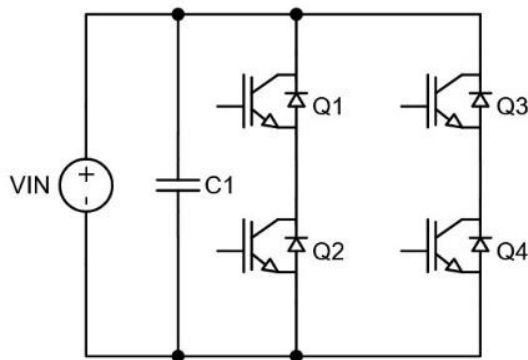


Fig. 1. Circuito de puente activo.

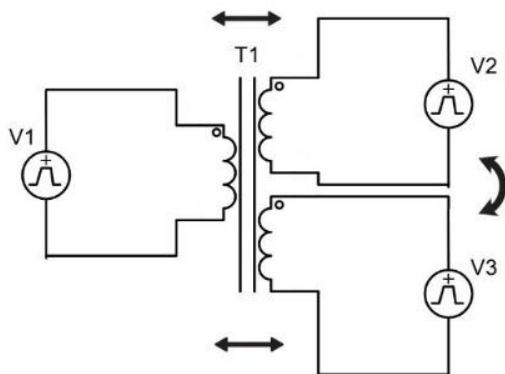


Fig. 2. Puente Triple Activo acoplado a un transformador multidevanado.

El surgimiento de nuevas tecnologías de energía renovable ha resultado en la aparición de múltiples puertos de energía que están conectados entre sí. Por otro lado, el convertidor TAB es adecuado para un SST porque tiene múltiples conexiones de transferencia de potencia, cada una de las cuales puede transferir energía. Como resultado, el convertidor TAB podría considerarse el núcleo principal del SST con sus tres puentes activos. Estos puentes podrían conectarse a una etapa de CA rectificadora o celdas solares.

A. TOPOLOGÍA DEL CONVERTIDOR

Los convertidores CC-CC utilizan puentes activos como componente para la transferencia de energía. La Fig. 3 representa un circuito en el que una señal de entrada de Corriente Alterna (CA) es rectificadora por un circuito rectificador controlado. Una vez que la señal se rectifica se alimenta a un puente activo que la convierte en una señal de CA cuadrada. La señal cuadrada ingresa al transformador toroidal para llegar a los devanados secundarios del transformador.

Las señales de entrada al circuito de puente activo se indican en la Fig. 4; en color amarillo se tiene una señal de entrada de corriente alterna de 50 Vpp y una frecuencia de 60 Hz. Esta señal es rectificadora y mostrada en color azul utilizando un puente rectificador controlado por medio de 4 interruptores MOSFET en configuración de puente completo. Después de ser rectificadora, el puente activo de la Fig. 1, se encarga de transferir la energía del circuito rectificador a través del transformador de alta frecuencia. Los interruptores de cada puente activo realizan una conmutación cada 100 μ s. Por lo tanto, la señal cuadrada generada tiene una frecuencia de 10 kHz.

El puente activo está diseñado con interruptores MOSFET IRF360a, que tienen un voltaje de drenaje a fuente de 200 V y una corriente de drenaje de 9 A. Esto permite transferir una potencia de alrededor de 1.5kW. En la Tabla I, se muestran los parámetros utilizados para la construcción del transformador toroidal.

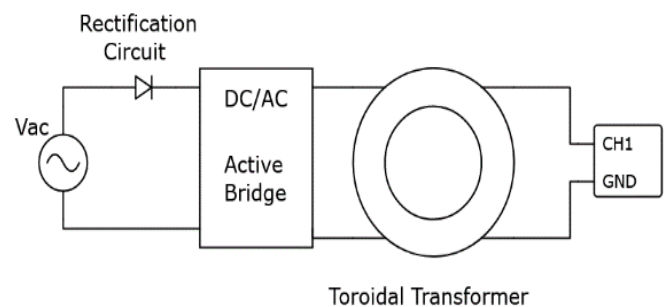


Fig. 3. Circuito de puente activo con enlace magnético de alta frecuencia.

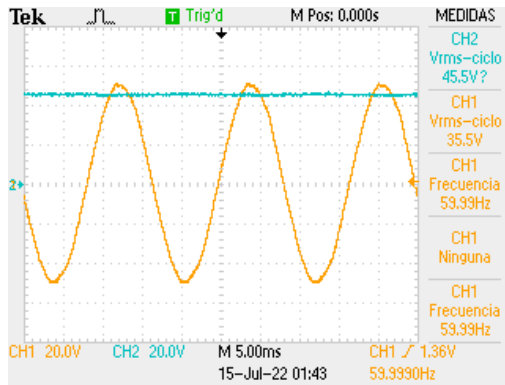


Fig. 4. Señal de entrada del puente activo.

TABLA I. PARÁMETROS DE DISEÑO DE ENLACE MAGNÉTICO.

Parámetros	Puente 1	Puente 2	Puente 3
Frecuencia de conmutación	10 kHz	10 kHz	10 kHz
Ciclo de trabajo	50%	50%	50%
Rds (on)	0.4 Omhs	0.4 Omhs	0.4 Omhs
Voltaje	200V	100V	100V
Corriente	3A	3A	3A

La señal cuadrada de entrada al transformador tiene un ciclo de trabajo del 50 %, una frecuencia de conmutación de 10 kHz y un voltaje máximo de 200 V. Además, debido a que la topología es puente activo, la resistencia Rds (on) de los interruptores y la tensión del diodo son parámetros que se tienen en cuenta en el diseño del transformador.

III. ENLACE MAGNÉTICO DE ALTA FRECUENCIA

Para la construcción de transformadores de alta frecuencia se utilizan una variedad de materiales y formas geométricas. El núcleo toroidal permite la transferencia de menos de 2 kW de potencia con una pérdida mínima en el núcleo. La geometría de un núcleo toroidal se ilustra en la Fig. 5, donde D es el diámetro exterior (OD), d es el diámetro interior (ID) y h es la altura del núcleo.

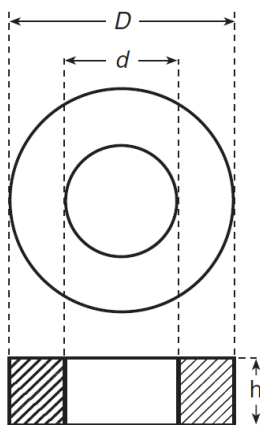


Fig. 5. Dimensiones del núcleo toroidal.

El núcleo toroidal elegido para este proyecto es el EPCOS B64290L0084X087. Este núcleo está construido con material N87 con una permeabilidad de 2200, un diámetro exterior de 102 mm, un diámetro interior de 65.8 mm y una altura de 15 mm. La hoja de datos de EPCOS proporciona las características magnéticas del núcleo de ferrita N87. Sin embargo, estas características se pueden calcular con los diámetros externo e interno del núcleo. Según la ficha técnica, la longitud del camino magnético es de 255.3 mm. La longitud del camino magnético se calcula a partir de la Ec. (1) y se obtiene la Ec. (2).

$$l_e = \frac{\pi(OD-ID)}{\ln\left(\frac{OD}{ID}\right)} \quad (1)$$

$$l_e = \frac{\pi(102mm-65.8mm)}{\ln\left(\frac{102mm}{65.8mm}\right)} = 259.43mm \quad (2)$$

De manera similar, el área de la sección transversal es igual a $267,2 \text{ mm}^2$ en la hoja de datos. El cálculo de A_e se obtiene de la Ec. (3) y el resultado es la Ec. (4).

$$A_e = \frac{(OD-ID)}{2} h \quad (3)$$

$$A_e = \frac{(102mm-65.8mm)}{2} 15mm = 271.5mm^2 \quad (4)$$

En la hoja de datos, el volumen del núcleo se menciona como 68220 mm^3 . Este valor se calcula de la Ec. (5), y el resultado es la Ec. (6).

$$V_e = l_e A_e \quad (5)$$

$$V_e = (259.43mm)(271.5mm^2) = 70430mm^3 \quad (6)$$

La Fig. 6 resume la forma en que se ingresan estos parámetros en ExcellentIT [13]. Este software permite el cálculo del diseño de transformadores con varios núcleos. Para este proyecto se eligió un núcleo toroidal o tipo R del material N87 EPCOS. Utilizando los datos derivados de las ecuaciones, se resuelven los resultados de la Fig. 6.

La Fig. 7 presenta los resultados de un transformador toroidal EPCOS N87 con un OD de 102 mm y un ID de 65.8 mm utilizado en un convertidor de topología completa. Para este núcleo tenemos una potencia nominal de 2.8 kW, una potencia de salida de 608.7 W y pérdidas en el núcleo inferiores a 5 W. Además, se puede ver que el devanado primario tiene un valor de inductancia de alrededor de 20 mH y una corriente de magnetización de 200 mA.

Los transformadores con $N_1 = 83$ y un diámetro de alambre de 1.5 mm cumplen con las especificaciones de diseño del transformador toroidal. Utilizando un medidor LCR EXTECH 380193 se mide la inductancia del primario como se observa en la Fig. 8 como 21.85 mH.

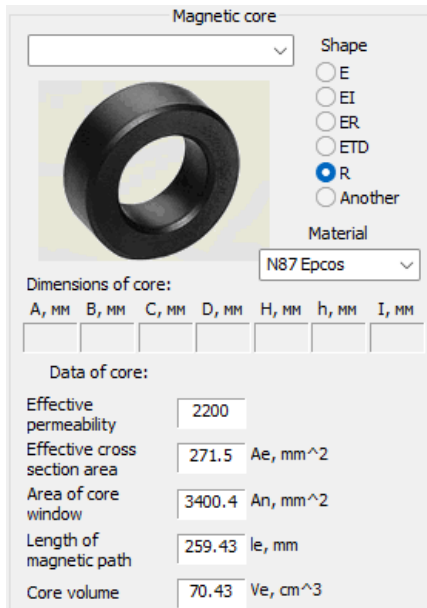


Fig. 6. Características del núcleo magnético.

Converter topology					
<input type="radio"/> Push-Pull	<input type="radio"/> Half-Bridge				
<input checked="" type="radio"/> Full bridge					
Results of calculation					
Core losses	4.838 W				
Estimated rising of the core temperature	< 25 deg.				
Rated transformer power	2871.5 W				
Output power	608.7 W				
Primary inductance	19.931 mH				
Primary magnetizing current	0.201 A				
Amplitude of primary current	4.135 A				
Current consumption	3.934 A				
Efficiency (copper losses are excluded)	94.530 %				
Primary winding turns	83(82.77)				
Wire diameter for the primary winding	1.50 x 1				
Wire skin diameter	1.320 mm				
Output characteristics of converter					
Winding turns	Diameter mm	Voltage min, V	Voltage rated, V	Voltage max, V	
1.	54(53.25)	0.63 x 4	39.32	101.44	172.44
2.	54(53.25)	0.63 x 4	39.32	101.44	172.44
3.					
4.					
5.					

Fig. 7. Resultados obtenidos por ExcellenIT.



Fig. 8. Inductancia del devanado primario.

IV. MODELADO DEL CONVERTIDOR TAB

En esta sección se desarrolla el modelo de un convertidor de triple puente activo (TAB) utilizando la técnica de control por cambio de fase. El modelo asume una pequeña corriente de magnetización del transformador, una pequeña caída de tensión entre los pares de diodos del transistor, pequeños transitorios de conmutación del transistor y una relación de transformador unitaria. Las inductancias en una conexión en estrella se pueden estimar utilizando las inductancias de fuga de los devanados del transformador [13]. El convertidor TAB está representado en la Fig. 9, de las cuales se derivan las siguientes ecuaciones:

$$L_{t12} = L_{t1} + L_{t2} + \frac{L_{t1}L_{t2}}{L_{t3}} \quad (7)$$

$$L_{t13} = L_{t1} + L_{t3} + \frac{L_{t1}L_{t3}}{L_{t2}} \quad (8)$$

$$L_{t23} = L_{t3} + L_{t2} + \frac{L_{t3}L_{t2}}{L_{t1}} \quad (9)$$

Donde L_{t1} , L_{t2} y L_{t3} son las inductancias de fuga del transformador cuyo valor medido es aproximadamente $221\mu\text{H}$, $123\mu\text{H}$ y $156\mu\text{H}$ respectivamente. Asimismo, en esta interpretación, las corrientes del transformador del convertidor TAB son:

$$i_{t1} = -i_{t12} - i_{t13} \quad (10)$$

$$i_{t2} = i_{t12} - i_{t23} \quad (11)$$

$$i_{t3} = i_{t13} + i_{t23} \quad (12)$$

Donde i_{t1} representa la corriente que fluye en el devanado primario, i_{t2} y i_{t3} simbolizan las corrientes que fluyen en el devanado secundario.

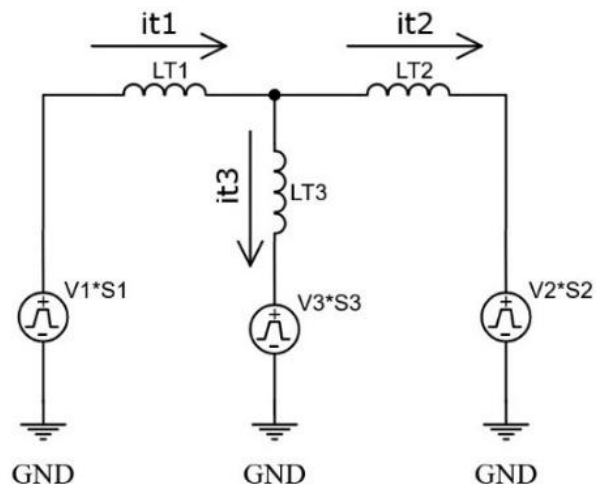


Fig. 9. Modelado del convertidor TAB.

A. ECUACIONES DE ANÁLISIS DINÁMICO

Dado que la técnica de control utiliza modulación por desplazamiento de fase, la señal de conmutación $S_x(\tau)$ viene dada por

$$S_x(\tau) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \tau < T/2 \\ -1, & T/2 \leq \tau < T \end{cases} \quad (13)$$

Donde x podría ser cualquier función de conmutación (S_1, S_2 o S_3) porque todas tienen las mismas características y los voltajes V_P, V_{S2} y V_{S3} se representan de la siguiente manera

$$V_P = S_1(\tau)V_1(t) \quad (14)$$

$$V_{S2} = S_2(\tau)V_2(t) \quad (15)$$

$$V_{S3} = S_3(\tau)V_3(t) \quad (16)$$

Las ecuaciones que representan el convertidor TAB se derivan de la Fig. 9 y la Fig. 10 usando las leyes de corriente y voltaje de Kirchoff.

$$S_2(\tau)i_{t2}(t) = \frac{v_2(t)}{R_2} + C_2 \frac{dv_2(t)}{dt} \quad (17)$$

$$S_3(\tau)i_{t3}(t) = \frac{v_3(t)}{R_3} + C_3 \frac{dv_3(t)}{dt} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} -v_1(t)S_1(\tau) + R_{t12}i_{t12}(t) + L_{t12} \frac{di_{t12}}{dt}(t) + \dots \\ \dots + v_2(t)S_2(\tau) = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} -v_1(t)S_1(\tau) + R_{t13}i_{t13}(t) + L_{t13} \frac{di_{t13}}{dt}(t) + \dots \\ \dots + v_3(t)S_3(\tau) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} -v_2(t)S_2(\tau) + R_{t23}i_{t23}(t) + L_{t23} \frac{di_{t23}}{dt}(t) + \dots \\ \dots + v_3(t)S_3(\tau) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Las ecuaciones dinámicas se pueden expresar de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \frac{dv_2(t)}{dt} = \frac{1}{C_2} S_2(\tau)i_{t12}(t) - \frac{1}{C_2} S_2(\tau)i_{t23}(t) - \dots \\ \dots - \frac{1}{C_2 R_2} v_2(t) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_3(t)}{dt} = \frac{1}{C_3} S_3(\tau)i_{t13}(t) + \frac{1}{C_3} S_3(\tau)i_{t23}(t) - \dots \\ \dots - \frac{1}{C_3 R_3} v_3(t) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{t12}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{t12}} v_1(t)S_1(\tau) - \frac{R_{t12}}{L_{t12}} i_{t12}(t) - \dots \\ \dots - \frac{1}{L_{t12}} v_2(t)S_2(\tau) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{t13}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{t13}} v_1(t)S_1(\tau) - \frac{R_{t13}}{L_{t13}} i_{t13}(t) - \dots \\ \dots - \frac{1}{L_{t13}} v_3(t)S_3(\tau) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{t23}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{t23}} v_2(t)S_2(\tau) - \frac{R_{t23}}{L_{t23}} i_{t23}(t) - \dots \\ \dots - \frac{1}{L_{t23}} v_3(t)S_3(\tau) \end{aligned} \quad (26)$$

V. CONTROL DEL CONVERTIDOR TAB

Los convertidores más efectivos tienen sistemas de control bien diseñados. La etapa de control supervisa la operación del sistema y dirige la transferencia de energía. El ajuste de los parámetros de control permite determinar los valores de ganancia que hacen que el sistema opere de manera perfectamente estable, libre de errores y en tiempo. El error del controlador se puede usar para controlar la planta en sistemas de control de circuito cerrado. Sin embargo, en raras circunstancias, los sistemas pueden tener un pequeño error de control. El diagrama de control de la Fig. 11 representa el control independiente para uno de los puertos de salida del convertidor.

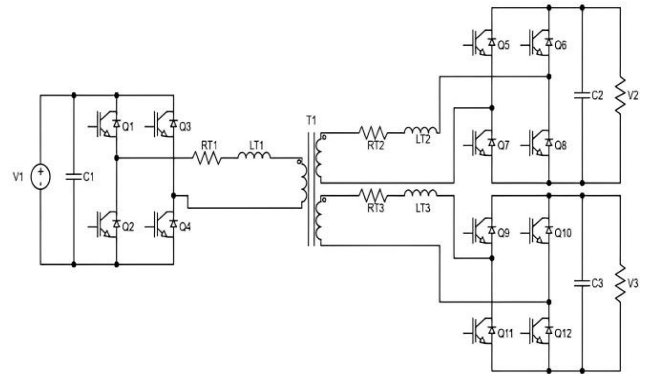


Fig. 10. Modelo completo del convertidor TAB.

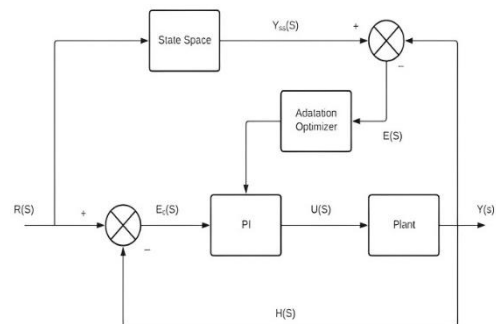


Fig. 11. Diagrama de control.

El diagrama de control observado en la Fig. 11 es el encargado de llevar el voltaje de salida $Y(S)$ de un solo puerto al voltaje de referencia $R(S)$. La diferencia entre el valor de referencia y el valor medido o de salida del sistema real determina la señal de error de control $E_c(s)$. La señal de control es ajustada mediante el control PI que al mismo tiempo es nuevamente ajustada por la diferencia entre la salida de la matriz de espacio de estados $Y_{ss}(S)$ de un puerto de salida y el valor real medido. Esta diferencia genera una nueva señal de error $E(s)$ que en complemento al $E_c(S)$ ajusta los parámetros del controlador y otorga los valores especificados del ángulo de desfase (d) que varía entre 0.01π y 0.45π para cada una de las señales. Si ocurre un pequeño error y el voltaje de salida no es igual al valor deseado, el modelo de espacio de estado tendrá la responsabilidad de actualizar los parámetros para compensar el error.

Las señales de control para los interruptores en el puente activo son generadas por el procesador de señal digital (DSP) Texas Instruments TSM320F28027 de la familia C2000. Este procesador puede generar señales de alta frecuencia con un ciclo de trabajo del 50%. Además, los tiempos de subida y bajada se pueden cambiar cuando los interruptores se encienden y apagan.

La Fig. 12 muestra las señales de control para los cuatro interruptores del puente activo. Se puede ver que las señales en amarillo y rosa son idénticas. Esto se debe a que el puente activo de cuatro interruptores funciona encendiendo dos de ellos al mismo tiempo mientras los otros dos están apagados. Debido a las características anteriores del transformador, se observa que las señales tienen un ciclo de trabajo del 50% y una frecuencia de 10kHz.

Los transistores MOSFET IRF630a tienen un tiempo de encendido típico de 13 nanosegundos y un tiempo de apagado típico de 18 nanosegundos. Por lo tanto, el control debe estar dentro de estos parámetros normativos. La Fig. 13 representa el tiempo muerto entre cada una de las señales. Este tiempo muerto da tiempo a los interruptores para apagarse por completo antes de que se encienda el siguiente par de interruptores.

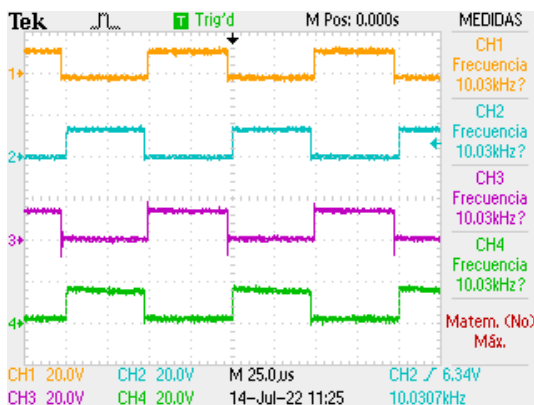


Fig. 12. Señales de control.

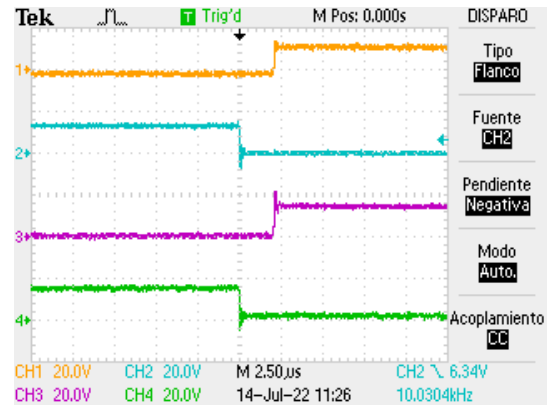


Fig. 13. Tiempo muerto de las señales de control.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Esta sección presenta el caso de estudio donde ambas fuentes son una carga (Fig. 14). En este ejemplo, V1 será responsable de transferir energía entre los dos extremos del convertidor. Como resultado, la Fig. 15 exhibe los niveles de voltaje.

La Fig. 15 compara el comportamiento de ambas cargas del caso de estudio. En color rojo, la señal del voltaje V2 y en azul, la señal en voltaje V3. A lo largo del tiempo, se muestra un cambio dentro del valor de referencia. Inicialmente, la referencia tiene un valor deseado de 14V y se observa que ambas señales alcanzan el nivel deseado. Después de un tiempo la referencia es modificada a 28V para observar el cambio que existe en las cargas. Se observa que tanto la señal azul y roja alcanzan de nueva cuenta el valor deseado. Por último, la señal de referencia o valor deseado disminuye a 20V y se observa que ambas señales alcanzan sus niveles de referencia.

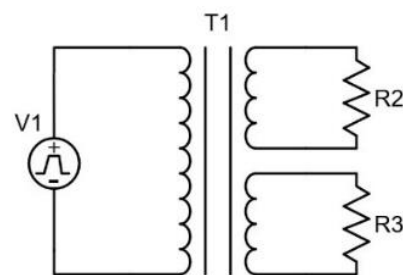


Fig. 14. Caso de estudio donde V2 y V3 son cargas.

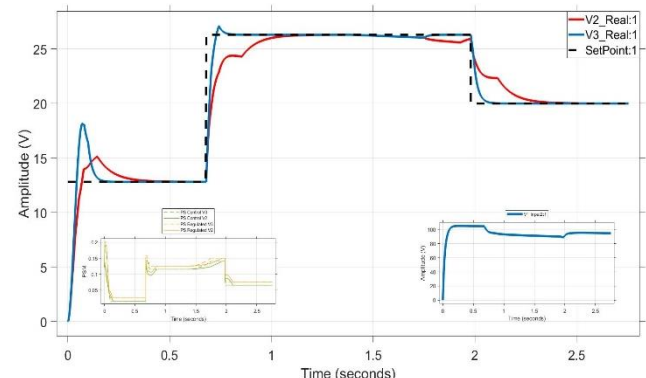


Fig. 15. Señal de salida para el caso de estudio.

Este documento también presenta las señales obtenidas en las salidas del transformador para varios valores de entrada de CA. La transferencia de energía de una señal de CA con una amplitud pico a pico de 20 V CA, Fig. 16. Después de ser rectificado, el puente activo transfiere la señal de 20 V CC al transformador con una relación de $n = 0,64$ ($N1 = 84$ y $N2 = 54$), donde se produce una señal cuadrada de 12,2V.

La salida del transformador toroidal para una señal de entrada de 50 V CA se muestra en la Fig. 17. De manera similar, se puede observar una señal cuadrada de 10 kHz con una amplitud de 32.6 V.

La Fig. 18 muestra la señal cuadrada resultante para una entrada de 100 VCA. Se observa que la amplitud de pico a pico es de 63.2 V, la frecuencia es de 10 kHz y el ancho de pulso es de 50µs.

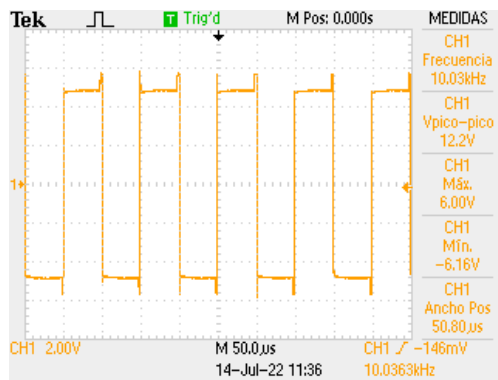


Fig. 16. Transferencia de potencia para 12 V.

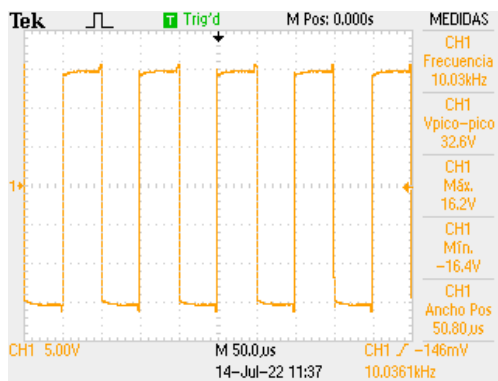


Fig. 17. Transferencia de potencia para 32 V.

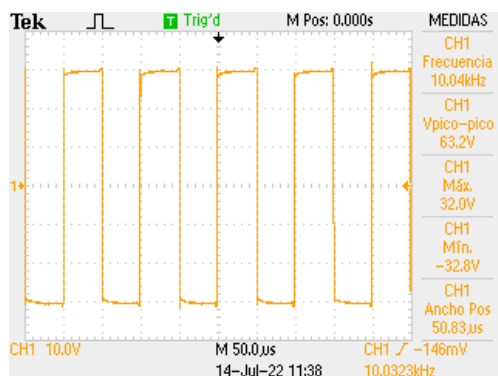


Fig. 18. Transferencia de potencia para 63.2 V.

VII. CONCLUSIONES

Se demostró que el convertidor TAB tiene una distribución de energía adecuada en cada extremo. Además, el modelado TAB determina cómo funciona el sistema, lo que facilita su uso como modelo de referencia al controlar señales. La evaluación de los tres casos de estudio permite comprender cómo este convertidor puede beneficiar aplicaciones como los transformadores electrónicos de potencia multipuerto.

Finalmente, el sistema de control de la modulación por desfase del convertidor TAB permite entregar energía de forma rápida y precisa entre los extremos del convertidor. Los transformadores de potencia electrónicos son fascinantes porque permiten transferir electricidad entre puertos que no necesariamente están conectados a la misma red. Este tipo de convertidor podría resolver este problema.

REFERENCIAS

- [1] Y. Ko, A. Chub, L. Costa, M. Andresen and M. Liserre, "Smart transformer universal operation", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 1609-1616, 2018.
- [2] Y. Wang et al., "A Dual-Active-Bridge With Half-Bridge Submodules DC Solid-State Transformer for DC Distribution Networks" IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 2, pp. 1891-1904, April 2021.
- [3] J. Nie, L. Yuan, W. Wen, R. Duan, B. Shi and Z. Zhao, "Communication-Independent Power Balance Control for Solid State Transformer Interfaced Multiple Power Conversion Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 4, pp. 4256-4271, April 2020.
- [4] X. Wang, Y. Peng, J. Chai, Y. Xia, W. Wei and M. Yu, "An Ideal DC Transformer for Active DC Distribution Networks Based on Constant- Transformation-Ratio DABC," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 2, pp. 2170-2183, Feb. 2020.
- [5] C. Gao et al., "Accelerated Electromagnetic Transient (EMT) Equivalent Model of Solid-State Transformer," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, July 2021.
- [6] R. Zhu et al., "Smart transformer/large flexible transformer," CES Transactions on Electrical Machines and Systems, vol. 4, no. 4, pp. 264-274, Dec. 2020.
- [7] M. A. Rahman, M. R. Islam, K. M. Muttaqi and D. Sutanto, "Modeling and Control of SiC-Based High-Frequency Magnetic Linked Converter for Next Generation Solid State Transformers," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 1, pp. 549-559, March 2020.
- [8] M. Liserre, G. Buticchi, M. Andresen, G. De Carne, L. F. Costa and Z.-X. Zou, "The Smart Transformer: Impact on the Electric Grid and Technology Challenges," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 10, no. 2, pp. 46-58, June 2016.
- [9] M. A. Hannan et al., "State of the Art of Solid-State Transformers: Advanced Topologies, Implementation Issues, Recent Progress and Improvements," IEEE Access, vol. 8, pp. 19113-19132, 2020.
- [10] L. F. Costa, G. Buticchi and M. Liserre, "Quad-Active-Bridge DC-DC Converter as Cross-Link for Medium-Voltage Modular Inverters," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 2, pp. 1243-1253, March-April 2017.
- [11] X. Sun, H. Wang, L. Qi and F. Liu, "Research on Single-Stage High-Frequency-Link SST Topology and Its Optimization Control," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 8, pp. 8701-8711, Aug. 2020.
- [12] L. F. Costa, F. Hoffmann, G. Buticchi and M. Liserre, "Comparative Analysis of Multiple Active Bridge Converters Configurations in Modular Smart Transformer," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 1, pp. 191-202, Jan. 2019.
- [13] H. Qin and J. W. Kimball, "Generalized Average Modeling of Dual Active Bridge DC-DC Converter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 4, pp. 2078-2084, April 2012.

BIOGRAFÍAS



FRANCISCO J. ARIZAGA AYALA se graduó de la Universidad de Sonora como Ing. en Tecnología Electrónica y M.C. en Electrónica en el 2016 y 2018 respectivamente. Fue maestro de asignaturas en la Universidad de Sonora del 2018 al 2020. En el 2021 inició sus estudios de Doctorado en Ing. Eléctrica en CINVESTAV del IPN Guadalajara. Sus intereses de investigación incluyen aplicaciones de electrónica de potencia, microcontroladores, control y acondicionamiento de señales.



JUAN M. RAMIREZ recibió el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México, en 1992. Se incorporó al Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV, Guadalajara, México, en 1999, donde es actualmente profesor de tiempo completo. Sus intereses de investigación incluyen Smart-grids, microrredes y aplicaciones de electrónica de potencia. proceso de invención, motivos por los cuales se le reconoce la creación del primer laboratorio de investigación industrial.