

Sistema de Transmisión a Frecuencia Fraccionaria basado en el Convertidor Matricial Directo para Planta Eólica Marina

Fractional Frequency Transmission System based on Direct Matrix Converter for Offshore Wind Farm

José Merced Lozano García¹, Alejandro Pizano Martínez¹, Arturo Cabrera Prieto¹

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías del CIS, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Gto., México.
jm.lozano@ugto.mx, apizano@ugto.mx, a.cabreraprieto@ugto.mx

Resumen

Los sistemas de transmisión a frecuencia fraccionaria (STFF) se visualizan como una prometedora opción para la transmisión de la energía generada mediante plantas eólicas marinas que se encuentran a distancias considerables de la costa. Convencionalmente, los STFFs utilizan una frecuencia de operación de un tercio de la frecuencia nominal reducir notablemente la corriente de carga de los cables submarinos utilizados en este tipo de instalaciones, incrementado su capacidad de transmisión. Asimismo, a diferencia de los sistemas HVDC que requieren dos estaciones de conversión de energía, los STFF solo requieren de una estación basada en un ciclo convertidor CA/CA, lo que los coloca como una solución operativamente más práctica y económica. Convencionalmente, los STFF propuestos utilizan ciclo-convertidores basados en convertidores back-to-back (CA/CD/CA), aunque en estudios recientes se ha propuesto la utilización del convertidor matricial multinivel. Con la finalidad de aprovechar las ventajas operativas del convertidor matricial directo (CMD) como ciclo convertidor, en este trabajo se propone su utilización como elemento principal del STFF. Además de su capacidad para la conversión de frecuencias en un amplio rango, y para generar formas de onda con baja distorsión armónica, el CMD contiene un número reducido de semiconductores en comparación con las soluciones convencionales. El STFF basado en el CMD es simulado con la herramienta Simulink de Matlab, para analizar el desempeño del sistema cuando la planta eólica genera a distintas frecuencias. De los resultados de simulación generados se analizan comparativamente los obtenidos para la frecuencia nominal de 60 Hz, y para la frecuencia fraccionaria de 20 Hz (60/3 Hz), a fin de verificar la eficiencia del STFF. De igual manera, la efectividad del CMD para operar como ciclo-convertidor se evalúa en términos de la calidad de las señales generadas. Finalmente, el estudio preliminar conducido demuestra la viabilidad teórica de utilizar el STFF propuesto para la integración de una planta eólica con el sistema de potencia principal.

Palabras clave: frecuencia fraccionaria; planta eólica marina; convertidor matricial directo; transmisión de energía.

Introducción

El incremento incontrolable en la demanda de energía eléctrica a nivel global ha motivado la exploración de nuevas propuestas para su generación, transmisión y consumo (IEA, 2025). En este sentido, las plantas eólicas marinas (PEM) son utilizadas en muchos países como una posible solución a la crisis energética que enfrentamos a nivel global (Chen & Su, 2022). Para transmitir la energía generada por los aerogeneradores en este tipo de instalaciones, existen dos configuraciones para el sistema de transmisión: transmisión en alto voltaje en corriente alterna (HVAC, por sus siglas en inglés) y transmisión en alto voltaje en corriente directa (HVDC, por sus siglas en inglés) (Zhichu *et al.*, 2024). La primera configuración es la más utilizada por ser de más bajo costo; no obstante, los cables submarinos poseen un valor elevado de capacitancia comparados con los cables aéreos, por lo que se incrementan las pérdidas por conducción y se disminuye la capacidad de transmisión del sistema. Este problema se agrava conforme se incrementa la distancia entre el aerogenerador y la costa. La segunda configuración (HVDC) es una propuesta técnicamente novedosa, que elimina el problema de las pérdidas de energía por la capacitancia e inductancia de la línea, así como los problemas de congestión causados por las corrientes de carga en las capacitancias. Por esta razón, se podría considerar como la configuración óptima para la integración de aerogeneradores marinos situados a largas

distancias de la costa. Sin embargo, esta tecnología requiere de dos estaciones de conversión de energía, una mar adentro y otra en la costa, lo que resulta en un costo muy elevado de operación y mantenimiento.

Considerando las desventajas que exhiben estas configuraciones para el sistema de transmisión, recientemente se ha propuesto una tercera configuración que consiste en un sistema de transmisión a frecuencia fraccionaria (STFF) (Wang, 1994). En el STFF la PEM genera energía eléctrica a una frecuencia igual a un tercio de la frecuencia convencional (50/3 o 60/3 Hz) y así se transmite por las líneas submarinas (Hayaat, *et al.*, 2019). Así, un convertidor CA/CA de enlace situado en la costa, eleva la frecuencia al valor nominal (50 o 60 Hz) para integrar la energía con el sistema de potencia principal. Las principales ventajas que se tienen con esta configuración es que los efectos inductivos y capacitivos de la línea se reducen notablemente, haciéndola más eficiente que su contraparte HVAC; además, solo se requiere una estación de conversión CA/CA en la costa, haciendo que sea mucho más económica en construcción y mantenimiento que la configuración HVDC (Liu *et al.*, 2017).

Desde la introducción de los STFFs en 1994, investigadores han trabajado en el desarrollo de varias propuestas, como se puede observar en (Liu *et al.*, 2017), (Rakesh *et al.*, 2021), (Reddy *et al.*, 2022), (Cai *et al.*, 2025), (Zhang *et al.*, 2024), (Sadatge *et al.*, 2017). Por su parte, algunos autores han enfocado sus esfuerzos en el dispositivo principal del STFF, el ciclo-convertidor CA/CA. Por ejemplo, en (Cho *et al.*, 2012) presentaron una simulación en el dominio del tiempo para un ciclo convertidor integrado en un sistema de transmisión a baja frecuencia (LFAC). Los mismos autores desarrollaron un estudio centrado en la capacidad de transferencia de potencia y la calidad de la energía del convertidor utilizado en el sistema de transmisión LFAC, para una granja eólica. En relación con las topologías de ciclo-convertidores, el convertidor matricial (CM) es un dispositivo que destaca por sus notables características operativas (Merchan-Villalba *et al.*, 2025). Por esta razón, varios investigadores se han decidido por emplear el CM en configuraciones de STFFs. Por ejemplo, en el estudio desarrollado por (Lin, 2023) se propone la utilización de un CM multinivel para un sistema de transmisión en CA a frecuencia fraccionaria. Mientras que los autores (Luo *et al.*, 2020) enfocan su trabajo en el análisis armónico de un CM multinivel para sistemas de transmisión a frecuencias fraccionarias. Finalmente, en el trabajo presentado por (Zhang *et al.*, 2023) se analiza la operación de un CM modular multinivel para un sistema de transmisión LFAC. En este trabajo se resalta la capacidad del CM para generar señales de voltaje sin un límite teórico de frecuencia, y demandar una corriente de entrada con baja distorsión armónica.

A partir de esta breve revisión bibliográfica, se concluye que el CM es una excelente opción para la implementación de STFFs. No obstante, buscando simplificar la implementación, y control operativo del CM, a diferencia de los trabajos que proponen la utilización de un convertidor multinivel, en este trabajo se propone analizar la operación del convertidor matricial directo (CMD) en la integración de una PEM mediante un STFF. El CMD consta de un menor número de componentes y su estrategia de modulación es menos compleja, además de que en trabajos como el presentado por (Gutiérrez *et al.*, 2023) se demuestra su efectividad en aplicaciones relacionadas con la integración de aerogeneradores al sistema eléctrico.

Configuraciones de Plantas Eólicas Marinas

En la Fig. 1 se muestran esquemas simplificados de las tres configuraciones de sistemas de transmisión utilizados para la integración de PEM (offshore) al sistema eléctrico: 1. Sistema de transmisión HVAC a frecuencia convencional; 2. Sistema de Transmisión HVDC; y 3. STFF a frecuencia fraccionaria igual a un tercio de la frecuencia nominal.

Como se señaló en la introducción, el STFF proporciona ventajas operativas importantes con respecto a las otras configuraciones, por esta razón, este trabajo se centrará en el análisis del STFF. De acuerdo con la Fig. 1, los principales elementos del STFF son: la PEM, el transformador elevador, la línea de transmisión submarina, el convertidor CA/CA y el transformador reductor. En este caso, los convertidores locales back-to-back (CA/CD/CA) de los aerogeneradores se controlan para generar señales eléctricas a 20 Hz, una tercera parte de la frecuencia convencional de 60 Hz. En lo que respecta a los transformadores, el transformador elevador puede resultar un problema, ya que, al disminuir la frecuencia de operación a 20 Hz, se incrementa el peso y el costo de la subestación que debe instalarse lejos de la costa (Liu *et al.* 2017). Por su parte, el transformador reductor al operar con la frecuencia tradicional no presenta ningún inconveniente y se puede utilizar una subestación convencional. La operación del convertidor CA/CA y la línea submarina se abordarán con mayor detalle en las siguientes secciones, debido a su importancia en la operación global del STFF.

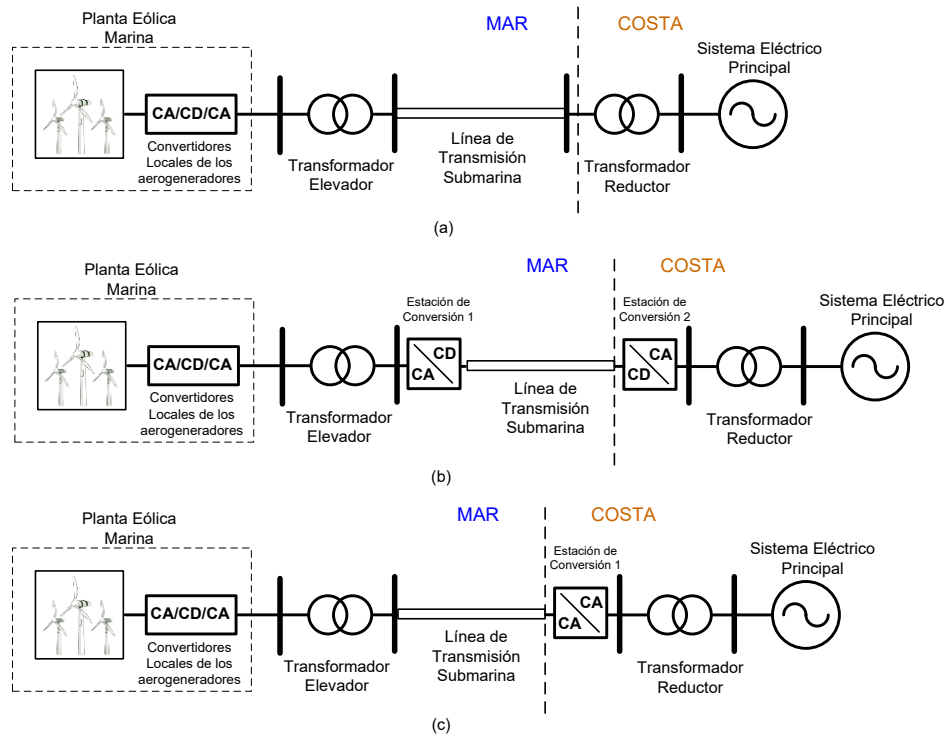


Figura 1. Configuraciones de sistemas de transmisión de energía para plantas eólicas marinas. a) HVAC. b) HVDC. c) STFF. Fuente: Elaboración propia.

Sistema de Transmisión a Frecuencia Fraccionaria

Línea de Transmisión Submarina

La línea de transmisión es un componente clave en la operación del STFF. Para representar la línea de transmisión submarina se utiliza el modelo π clásico de parámetros concentrados, Fig. 2. Es posible indicar que existen tres factores que limitan la capacidad de transmisión de la línea, el límite térmico, el límite de estabilidad y el límite por caída de voltaje (Wang *et al.*, 2006).

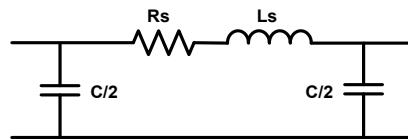


Figura 2. Modelo de líneas de transmisión de parámetros concentrados. Fuente: Elaboración propia.

El límite térmico no es tan significativo en líneas de transmisión de gran distancia. En cuanto al límite de estabilidad, éste puede aproximarse por (Wang *et al.*, 2006),

$$P_{\max} = \frac{V^2}{X} \quad (1)$$

donde V es el voltaje nominal y X la reactancia de la línea de transmisión. En la Ec. (1) se observa que la capacidad de transmisión es proporcional al cuadrado del voltaje e inversamente proporcional a la reactancia.

Asimismo, la caída de voltaje $\Delta V\%$ se puede determinar mediante,

$$\Delta V\% = \frac{QX}{V^2} \times 100 \quad (2)$$

donde Q es el flujo de potencia reactiva de la línea de transmisión. Como se aprecia en la Ec. (2), la caída de voltaje es inversamente proporcional al cuadrado del voltaje y directamente proporcional a la reactancia. Por lo tanto, si se desea incrementar la capacidad de transmisión de la línea es necesario incrementar el nivel de voltaje o reducir la reactancia de la línea de transmisión.

Dado que la reactancia es proporcional a la frecuencia, de acuerdo con la Ec. (3), al reducir la frecuencia se incrementa la capacidad de transmisión.

$$X = 2\pi fL \quad (3)$$

donde L es la inductancia total de la línea de transmisión.

Otro parámetro que es determinante en la capacidad de conducción de una línea de transmisión es la corriente de carga de la línea, I_c , la cual se puede determinar mediante la siguiente expresión (Meere *et al.*, 2014),

$$I_c = 2\pi fCIV \quad (4)$$

donde C es la capacitancia total de la línea, y l su longitud. De igual manera, la corriente de carga de la línea se reduce al disminuir la frecuencia de operación. Por esta razón, al utilizar una frecuencia fraccionaria $f_f = f_{nom}/3$, en el STFF, se aumenta la capacidad de transmisión de potencia de la línea submarina.

Utilizando otra perspectiva para analizar el principio de operación del STFF, tenemos que, si la velocidad de transmisión de la energía eléctrica es aproximadamente la velocidad de la luz, es decir 300,000 km/s, cuando la frecuencia de las señales es igual a 60 Hz, la longitud de onda es de 5,000 km. Para una f_f de 20 Hz, la longitud de onda es de 15,000 km. De esta manera, cuando la frecuencia es de 60 Hz, una línea de transmisión de 1,000 km corresponde a una quinta parte de la longitud de onda, pero para el caso de la frecuencia de 20 Hz, la misma línea corresponde a solo una quinceava parte de la longitud de onda. Lo anterior sirve para demostrar que al disminuir la frecuencia también se reduce la 'longitud eléctrica', y por ende se incrementa la capacidad de transmisión de la línea.

Convertidor Matricial Directo

La estructura del CMD trifásico se presenta en la Fig. 3. El convertidor consiste en un arreglo de nueve interruptores bidireccionales que interconectan las tres terminales de entrada con las tres terminales de salida (Lozano *et al.*, 2015). Las relaciones de los voltajes y corrientes de entrada y salida en el convertidor se expresan mediante las Ecs. (5) y (6),

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} \\ S_{12} & S_{22} & S_{32} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (6)$$

Los elementos de la matriz S representan el estado de los interruptores (*encendido* = 1, *apagado* = 0). Los voltajes (v_A , v_B , v_C) y (v_a , v_b , v_c), corresponden a los voltajes de entrada y salida, respectivamente; mientras que (i_a , i_b , i_c) e (i_A , i_B , i_C), representan las corrientes de entrada y salida del convertidor, respectivamente.

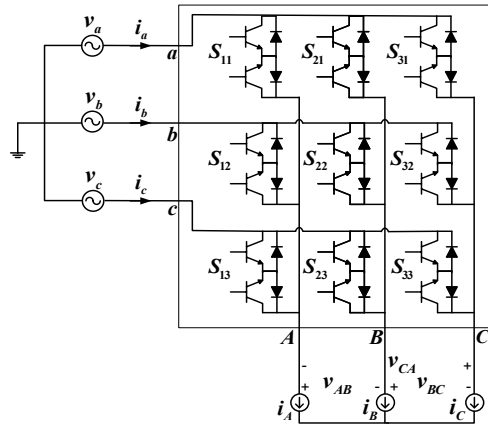


Figura 3. Esquema del convertidor matricial directo trifásico.
Fuente: Elaboración propia.

La técnica de modulación utilizada en este trabajo es la presentada en (Lozano *et al.*, 2015), denominada modulación directa en el espacio vectorial modificada (MDSVM, por sus siglas en inglés). Al regular los tiempos de operación de los interruptores del CMD es posible generar los voltajes de referencia a la frecuencia deseada. En la estrategia MDSVM, las señales eléctricas trifásicas en el dominio del tiempo, son transformadas a vectores complejos en el espacio vectorial mediante la trasformada de Park. Los vectores de referencia $\bar{I}_{in(ref)}$, $\bar{U}_{out(ref)}$, corresponden a las corrientes de línea y a los voltajes entre líneas, en la entrada y salida del convertidor, respectivamente.

Es importante resaltar que, en este trabajo, por cuestiones de espacio, solo se incluye una descripción general de la estrategia MDSVM, para una explicación más detallada consultar (Lozano *et al.*, 2015). En el trabajo mencionado se indica que la modulación utiliza 21 estados operativos para los interruptores bidireccionales, 18 de los cuales generan vectores en el espacio complejo con magnitud variante y ángulo constante, por lo que se les denomina vectores fijos. Los 3 estados restantes generan vectores de amplitud igual a cero, denominados vectores cero. Los vectores de referencia, $\bar{I}_{in(ref)}$, $\bar{U}_{out(ref)}$, se construyen a partir de los vectores fijos adyacentes y los vectores cero, tal y como se ilustra en la Fig. 4. En esta figura se observa que el vector de referencia $\bar{U}_{out(ref)}$ se sintetiza a partir de los componentes $\bar{U}_{out(ref)}^I$ y $\bar{U}_{out(ref)}^{II}$, los cuales se generan al seleccionar los vectores fijos adecuados. En la técnica MDSVM se definen cuatro ciclos de trabajo (m_I , m_{II} , m_{III} , m_{IV}) que representan la proporción de los vectores fijos adyacentes requerida para formar el vector de referencia. Los ciclos de trabajo corresponden a los tiempos que deben aplicarse los estados operativos a los interruptores del CMD. El problema principal de la modulación consiste en determinar los ciclos de trabajo, para lo cual es necesario resolver el sistema definido por las Ecs. (7)-(10),

$$\bar{U}_{out(ref)}^I = \left(\bar{U}_{out}^I m_I \right) + \left(\bar{U}_{out}^{II} m_{II} \right) \quad (7)$$

$$\bar{U}_{out(ref)}^{II} = \left(\bar{U}_{out}^{III} m_{III} \right) + \left(\bar{U}_{out}^{IV} m_{IV} \right) \quad (8)$$

$$\bar{I}_{in(ref)}^I = \left(\bar{I}_{in}^{II} m_{II} \right) + \left(\bar{I}_{in}^{IV} m_{IV} \right) \quad (9)$$

$$\bar{I}_{in(ref)}^{II} = \left(\bar{I}_{in}^I m_I \right) + \left(\bar{I}_{in}^{III} m_{III} \right) \quad (10)$$

donde $\bar{U}_{out(ref)}^I$ y $\bar{U}_{out(ref)}^{II}$ son las componentes del vector de referencia de salida; $\bar{I}_{in(ref)}^I$ e $\bar{I}_{in(ref)}^{II}$ son las componentes del vector de referencia de entrada; m_j , $\bar{U}_{out}^j$, e $\bar{I}_{in}^j$, son el ciclo de trabajo, el vector de voltaje de salida y el vector de la corriente de entrada, respectivamente, relacionados con los cuatro estados utilizados para cada periodo de conmutación ($j = I, II, III, IV$).

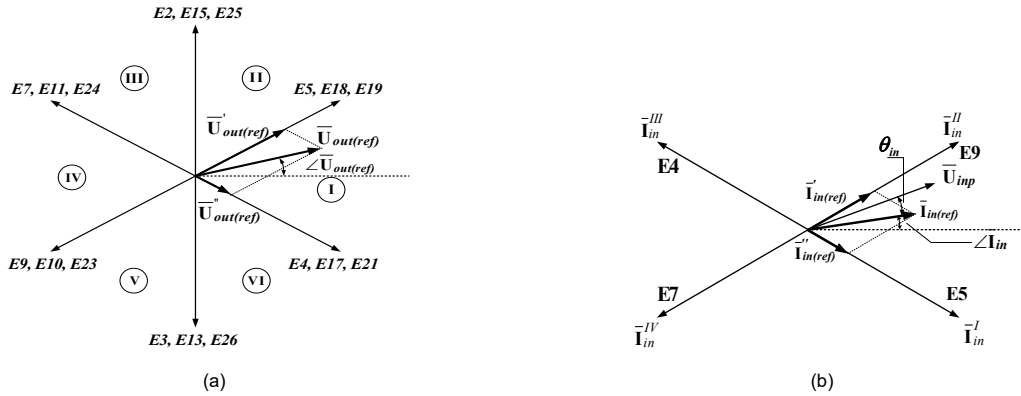


Figura 4. Construcción de los vectores de referencia. a) Voltajes entre líneas de salida. b) Corrientes de línea de entrada.
Fuente: Elaboración propia.

Si se utilizan como ejemplo los diagramas de la Fig. 4, donde los vectores de referencia se encuentran en el sector I, y considerando un factor de potencia unitario en la entrada del CMD, los ciclos de trabajo resultan en,

$$m_I = (-1)^{K_I} \frac{|\vec{U}_{out(ref)}|}{|\vec{U}_{in}|^2} \text{sen} \left(\frac{\pi}{3} - \alpha_{out} \right) (v_{bc}(t) - v_{ab}(t)) \quad (11)$$

$$m_{II} = (-1)^{K_I} \frac{|\vec{U}_{out(ref)}|}{|\vec{U}_{in}|^2} \text{sen}(\alpha_{out}) (v_{bc}(t) - v_{ab}(t)) \quad (12)$$

$$m_{III} = (-1)^{K_I} \frac{|\vec{U}_{out(ref)}|}{|\vec{U}_{in}|^2} \text{sen}(\alpha_{out}) (v_{ca}(t) - v_{bc}(t)) \quad (13)$$

$$m_{IV} = (-1)^{K_I} \frac{|\vec{U}_{out(ref)}|}{|\vec{U}|^2} \text{sen} \left(\frac{\pi}{3} - \alpha_{out} \right) (v_{ca}(t) - v_{bc}(t)) \quad (14)$$

donde K_I es el sector en que se encuentra el vector de referencia de la corriente de entrada, $\vec{U}_{in}$ es el vector de los voltajes entre líneas de entrada y α_{out} es el ángulo medido entre el vector de referencia del voltaje de salida y el vector fijo anterior.

Las Ecs. (11)-(14) son válidas dentro de los siguientes intervalos,

$$-\frac{\pi}{6} < \angle \vec{U}_{out(ref)} < \frac{\pi}{6}, \quad -\frac{\pi}{6} < \angle \vec{I}_{in(ref)} < \frac{\pi}{6}, \quad (15)$$

siendo además necesario el cumplir con la siguiente restricción,

$$m_I + m_{II} + m_{III} + m_{IV} \leq 1 \quad (16)$$

Si la suma de los ciclos de trabajo es menor a 1, se requiere el empleo de los vectores cero.

Resultados de simulación del STFF

La simulación del STFF se lleva a cabo en la herramienta Simulink de Matlab. En la Fig. 5 se muestra el sistema implementado en simulación. Los parámetros más importantes utilizados en la simulación se incluyen en la Tabla 1.

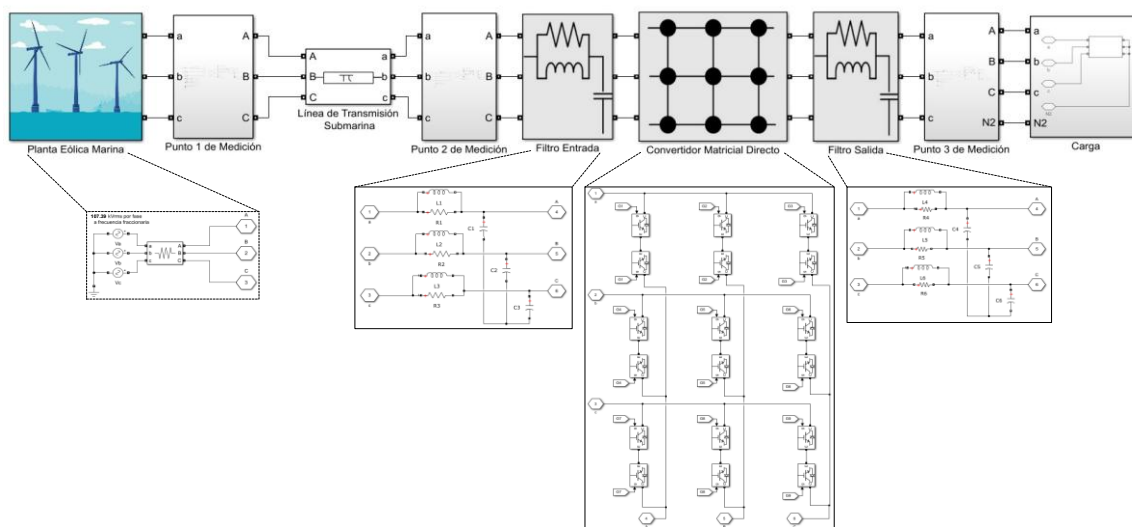


Figura 5. Diagrama del STFF implementado en Simulink.
Fuente: Elaboración propia.

Para comprobar las ventajas operativas del STFF aplicado a la integración de PEMs al sistema de potencia, se realizan simulaciones variando la frecuencia de las señales generadas por los aerogeneradores, en un rango de 10 a 120 Hz con incrementos de 10 Hz. En estas pruebas, el CMD se controla para generar un voltaje de 155 kV (1 p.u.) entre líneas y entregar una potencia de 172.93 MVA (1 p.u.) con un factor de potencia de 0.93. La MDSVM se encuentra configurada para mantener un factor de potencia unitario en la entrada del convertidor. Para cada simulación se registran las magnitudes del voltaje de fase, y la corriente de línea, además de las potencias trifásicas activa, reactiva y aparente. Las mediciones se realizan en tres puntos sobre el sistema: en los extremos de envío y recepción de la línea de transmisión, y en la carga después del filtro de salida del CMD. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 6.

Tabla 1. Parámetros para la simulación del STFF.

Elemento	Parámetro	Valor
Planta eólica marina	Voltaje nominal de línea	155 kV
Línea de Transmisión Submarina	Resistencia serie	25 mΩ/km
	Inductancia serie	0.426 mH/km
	Capacitancia derivación	236 nF/km
	Longitud	100 km
Filtros de entrada y salida del CM	Resistencia	5 kΩ
	Inductancia	70.4 mH
	Capacitancia	1 μF
Convertidor Matricial	Frecuencia de conmutación	6 kHz
Carga	Voltaje nominal de línea	155 kV
	Frecuencia nominal	60 Hz
	Resistencia	130 Ω
	Inductancia	130 mH

Fuente: Elaboración propia.

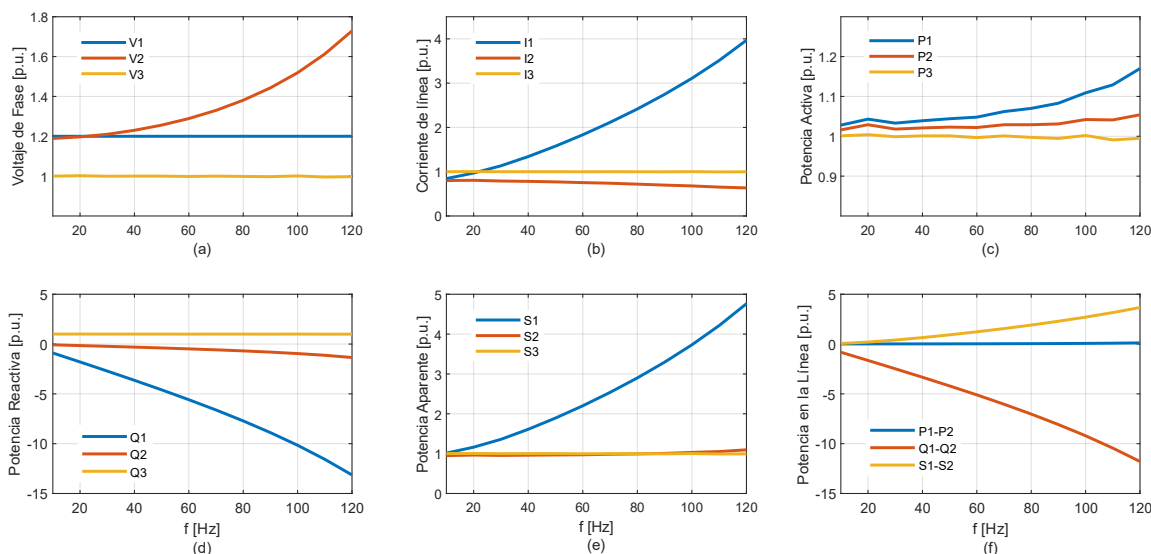


Figura 6. Señales eléctricas en los tres puntos de medición del STFF para distintas frecuencias.
Fuente: Elaboración propia.

Analizando las curvas de la Fig. 6 se tienen las siguientes observaciones. Primeramente, la reactancia inductiva de la línea, X_L , se incrementa junto con la frecuencia, iniciando en un valor de 2.67Ω para 10 Hz y finalizando en 32.11Ω para 120 Hz. En contraparte, la reactancia capacitiva, X_C , disminuye desde un valor de 674.38Ω hasta 56.19Ω . Estas variaciones son los principales factores que determinan el comportamiento de las señales eléctricas de la línea, ya que, por ejemplo, para 20 Hz, la corriente de carga por fase de la línea de transmisión (I_c) es igual a 265.4 A, mientras que, a 60 Hz, $I_c = 796.2$ A. Considerando que para transmitir 172.93 MVA a 155 kV, la corriente de línea es igual a 644.12 A, resulta evidente como el utilizar una frecuencia fraccionaria aumenta la capacidad de transmisión de la línea. Este efecto se verifica en la Fig. 6(b) donde a 60 Hz la corriente de la planta eólica tendría que ser de 1.834 p.u. para lograr transmitir la potencia deseada. Otro efecto de la variación de X_C con la frecuencia se ilustra en la Fig. 6(a), donde el voltaje en el extremo receptor de la línea se incrementa notablemente conforme aumenta la frecuencia, como consecuencia de la disminución de la reactancia capacitiva. En este caso, el control de voltaje empleado en el CMD evita las sobretensiones en la carga.

En relación con las potencias, en la Fig. 6(e) se observa que, para transmitir una potencia de 172.93 MVA (1 p.u.) a 20 Hz, se deben generar 201.11 MVA (1.163 p.u.), mientras que para transmitir la misma potencia a 60 Hz la potencia se incrementa a 380.61 MVA (2.201 p.u.). Estos valores dejan en evidencia la disminución drástica que se alcanza en la eficiencia del sistema al operar a 60 Hz. Por otro lado, la regulación del factor de potencia unitario en la entrada del CMD se refleja en un aumento considerable en la potencia reactiva capacitiva en la planta eólica, Fig. 6(d). Finalmente, a partir de la Fig. 6(c) se determina que las pérdidas de potencia en la línea aumentan desde 1.4% a 20 Hz, hasta 2.6% a 60 Hz.

Por otro lado, para verificar la efectividad del CM directo como principal elemento del STFF, en la Fig.7 se presentan las señales eléctricas a la entrada y salida del convertidor, cuando la planta eólica genera a 20 y a 60 Hz.

Las formas de onda mostradas en la Fig.7 dejan en claro que el CMD no tiene ninguna dificultad para modificar la frecuencia de los voltajes de entrada, y en este caso, generar señales controladas a 60 Hz. Además, tanto los voltajes de salida como las corrientes de entrada del CMD exhiben niveles muy bajos de distorsión armónica, lo cual se puede verificar con los valores de la distorsión armónica total (THD) mostrados en la Tabla 2. Solo las corrientes en la planta eólica exhiben una distorsión elevada, lo cual es debido a la interacción de las señales conmutadas del CMD con los parámetros de la línea de transmisión.

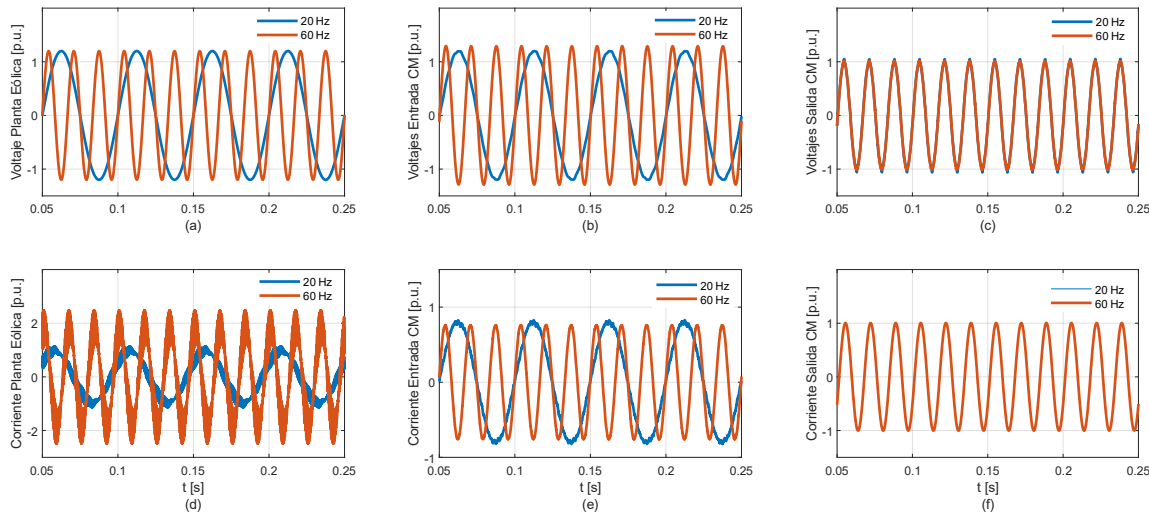


Figura 7. Voltajes y corrientes instantáneas en los tres puntos de medición del STFF para 20 y 60 Hz.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Valores del THD de los voltajes y corrientes en el STFF.

Señal	THD (20 Hz)	THD (60 Hz)
Voltaje planta eólica marina	0.00%	0.00%
Voltaje entrada del CM	0.52%	0.31%
Voltaje salida del CM	0.97%	1.02%
Corriente planta eólica marina	17.01%	23.17%
Corriente entrada del CM	1.05%	1.22%
Corriente salida del CM	0.45%	0.30%

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

En el presente trabajo se propuso la utilización del convertidor matricial directo en un sistema de transmisión a frecuencia fraccionaria aplicado a una planta eólica marina. El principal objetivo del STFF es el incrementar la capacidad de transmisión de energía al reducir la frecuencia de las señales eléctricas, y en comparación con el sistema HVDC, solo requiere de una estación de conversión de energía, lo que lo convierte en una solución más práctica y económica. Como parte del estudio desarrollado se simularon distintos escenarios operativos, en los cuales se utilizaron los convertidores locales de los aerogeneradores para generar energía a distintas frecuencias, analizando particularmente el desempeño del sistema cuando se genera a una frecuencia fraccionaria de un tercio (20 Hz) de la frecuencia nominal (60 Hz). Para el STFF se utilizó como dispositivo principal el CMD como ciclo-convertidor para modificar la frecuencia de las señales generadas por la PEM y suministrar una carga a 60 Hz. A diferencia de la mayoría de las investigaciones en las que utilizan el CM multinivel como ciclo-convertidor, en este estudio se propuso la utilización del CMD para reducir el número de semiconductores y la complejidad en la modulación, resultando en una topología que contribuye con la reducción del costo total del STFF. Los resultados de las pruebas realizadas mostraron que al transmitir una potencia de 172.93 MVAs a través de una línea submarina de 100 km, con 20 Hz se tuvo una eficiencia del 85.98%, mientras que con 60 Hz la eficiencia disminuyó hasta el 45.43%. Asimismo, se demostró la efectividad del CMD como convertidor de frecuencia al generar voltajes, y demandar corrientes, a la frecuencia requerida y prácticamente sin distorsión armónica ($THD < 1.05\%$). En conclusión, el STFF basado en el CMD se visualiza como una excelente opción para la integración de PEMs al sistema de potencia principal, aunque se debe continuar con la realización de investigaciones más completas alrededor de este tópico.

Bibliografía/Referencias

- Cai, Z., Wei, C., Peng, S., & Wang, X. (2025). Comprehensive reliability analysis of fractional frequency offshore wind power systems considering environmental impact and overall structure: a case study in China. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 10(1), 64-75. doi: 10.23919/PCMP.2023.000285.
- Chen, C.-H., & Su, N. J. (2022). Global trends and characteristics of offshore wind farm research over the past three decades: A bibliometric analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1339. <https://doi.org/10.3390/jmse10101339>.
- Cho, Y., Cokkinides, G. J., & Meliopoulos, A. P. (2012). Advanced time domain method for remote wind farms with LFAC transmission systems: Power transfer and harmonics. *Proceedings of IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 1(7), 17-20.
- Cho, Y., Cokkinides, G. J., & Meliopoulos, A. P. (2012). Time domain simulation of a three-phase cycloconverter for LFAC transmission systems. *Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 1(8), 7-10.
- Gutiérrez, D. A., Ramírez, J. M., & Lozano, J. M. (2023). Implementing a simplified power controller with a direct matrix converter for a PMSG-based WECS. *IET Power Electronics*, 16(16), 2782-2791. <https://doi.org/10.1049/pel2.12601>.
- Hayaat, Z., Farooq, O., Ahad, A., Ahmad, S., Bhat, H., & Gupta, P. (2019). Fractional frequency transmission system: A literature review. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods*, 7(5), 1-5.
- International Energy Agency (IEA). (2025). Global Energy Review. www.iea.org.
- Lin, K. (2023). Modelling and stability analysis of fractional frequency offshore wind power system with modular multilevel matrix converter. University of Birmingham. P.H. Thesis.
- Liu, S., Wang, X., Ning, L., Wang, B., Lu, M., & Shao, C. (2017). Integrating offshore wind power via fractional frequency transmission system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(3), 1253-1261, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2435993.
- Luo, J., Zhang, X. P., Xue, Y., Gu, K., & Wu, F. (2020). Harmonic analysis of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(3), 1209-1219. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2939312.
- Merchan-Villalba, L. R., Lozano-García, J. M., Pizano-Martínez, A., Hernández-Robles, I. A. (2025). Enhanced singular value decomposition modulation technique to improve matrix converter input reactive power control. *Energies*, 18(15), 3995. doi: 10.3390/en18153995.
- Rakesh, R., Gunaga, S. R., Ugare, R., R. S., CP, C., & Reddy, G. H. (2021). Performance of offshore wind power plant for larger distance power transmission. *Proceedings of the 2021 Conference on Design Innovations for 3Cs Compute Communicate Control*, 31-34. doi: 10.1109/ICDI3C53598.2021.00015.
- Reddy, G. H., Kumar, A. N., Raju, M., Gope, S., & Bhukya, M. N. (2022). Performance evaluation of off-shore wind farms with fractional frequency. *Proceedings of the International Conference on Smart and Sustainable Technologies in Energy and Power Sectors*, 350-355. doi: 10.1109/SSTEPS57475.2022.00092.
- Sadalge, S., Bhoskar, S., Chavan, A., Kabaj, R., & Maskar, P. M. (2017). Fractional frequency transmission system. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(3), 900-905.
- Wang, X. (1994). The Fractional Frequency Transmission System. *Proceedings of International Sessions in IEE Japan, Power and Energy Society Annual Conference Tokyo*.
- Zhang, H., Han, J., Sha, Z., Wei, F., Wang, X., & Wang, X. (2024). System wide-band oscillation analysis of fractional frequency offshore wind power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 18, 4386-4398. Doi: 10.1049/gdt2.13328.
- Zhang, Z., Jin, Y., & Xu, Z. (2023). Modeling and control of modular multilevel matrix converter for low-frequency AC transmission. *Energies*, 16(8), 3474. <https://doi.org/10.3390/en16083474>.

Zhichu, C., Koondhar, M. A., Kaloi, G. S., Yousaf, M. Z., Ali, A., Alaas, Z. M., Bouallegue, B., Ahmed, A. M., & Elshrief, Y. A. (2024). Offshore wind farms interfacing using HVAC-HVDC schemes: A review. *Computer and Electrical Engineering*, 120(part B). doi: 10.1016/j.compeleceng.2024.109797.