

Recibido 03 de noviembre de 2021. Aceptado 15 de febrero de 2022. Publicado 01 de agosto de 2022.

ISSN: 2448-7775

Convertidor CA-CA como alternativa para la generación eólica

DIEGO GUTIÉRREZ TORRES^{1*}, JOSÉ LOZANO GARCÍA², JUAN M. RAMÍREZ¹, LUIS MERCHÁN VILLALBA².

¹CINVESTAV del IPN – Unidad Guadalajara.

²Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca.

*Autor de correspondencia: diego.gutierrez@cinvestav.mx.

RESUMEN En este trabajo se propone un convertidor con estructura matricial para servir de enlace entre la salida de un generador eólico y la red eléctrica, como alternativa al enlace convencional que utiliza corriente directa (CD). Se presentan las diferentes alternativas de convertidores que se han desarrollado para obtener señales eléctricas de corriente alterna (CA) a partir de señales de entrada corriente alterna (CA), destacando las ventajas operativas del convertidor matricial directo. Finalmente, se presenta el sistema WECS (Wind Energy Conversion System) propuesto y se muestran los primeros resultados de simulación del convertidor matricial directo (CMD) CA-CA, utilizando la estrategia de modulación Venturini - Alesina, aplicado en el contexto de la generación eólica, los cuales sirven para validar la efectividad de la propuesta.

PALABRAS CLAVE – Turbina eólica, convertidor matricial, generador síncrono de imanes permanentes.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, cada vez es más importante la penetración de fuentes renovables de energía en los sistemas eléctricos. Lo anterior se debe principalmente a preocupaciones ambientales y a políticas en distintos ámbitos dirigidas hacia el desarrollo sustentable. Una de las fuentes renovables de energía con mayor proyección es el viento, esto debido a su abundancia en la naturaleza. La forma de aprovechar la energía del viento es a través de los Sistemas de Conversión de Energía Eólica denominados WECS (Wind Energy Conversion Systems), conformados por una turbina eólica, un generador eléctrico un convertidor basado en electrónica de potencia y el sistema de control correspondiente [1]. Los dispositivos de electrónica de potencia utilizados en los sistemas WECS son los convertidores de frecuencia CA-CA, que pueden convertir la energía eléctrica alterna de una frecuencia específica, en energía eléctrica alterna a una frecuencia distinta. Además, este tipo de convertidor también tiene la capacidad de controlar la amplitud del voltaje de salida, el ángulo de desplazamiento de la carga en relación con el voltaje de la fuente, el ángulo de desplazamiento entre las corrientes y los voltajes de la fuente (factor de potencia de entrada), así como el flujo de potencia bidireccional a través del convertidor [2]. Por lo tanto, debido a los diferentes tipos de convertidores CA-CA que se han desarrollado, es posible implementar diferentes topologías de sistemas WECS. La estructura convencional CA/CD/CA del convertidor de potencia de dos etapas con almacenamiento de energía, o “back to back” ha sido ampliamente utilizada en controladores de máquinas

eléctricas debido a la facilidad en su control, por lo tanto, ha sido una opción recurrente en la implementación de sistemas WECS [3]. No obstante, los convertidores CA-CA con almacenamiento de energía tienen como principal desventaja operativa que el elemento utilizado en el enlace de CD, comúnmente un capacitor electrolítico, los hace voluminosos y con un tiempo de vida útil limitado. Por esta razón, en años recientes se ha incrementado la utilización de convertidores CA-CA sin enlace de CD, en aplicaciones de compensación de energía, controladores de máquinas eléctricas y como dispositivos de acondicionamiento y enlace para fuentes renovables, resultando en topologías con una mayor densidad de energía y que requieren menos mantenimiento [4]-[6]. Dentro de los convertidores CA-CA sin enlace de CD, destaca el Convertidor Matricial (CM) por sus características operativas que incluyen la reducción de tamaño, el control de frecuencia si restricción en la salida, el control de factor de potencia en la entrada, la corriente demandada con bajo contenido armónico, entre otras [7]. Los CMs se pueden clasificar como Directos (CMD) o Indirectos (CMI). Mientras que los CMIs se prefieren en algunas aplicaciones debido a que su control puede resultar más sencillo, y porque en algunas topologías se puede reducir el número de semiconductores, las estrategias de conmutación desarrolladas para los CMDs les permiten realizar la conversión de energía directamente de CA a CA, generando señales eléctricas de buena calidad [8]. En este trabajo se propone la utilización de un CMD como alternativa para su inclusión dentro de un sistema WECS, dado que las ventajas operativas del CM exhibidas en otras aplicaciones lo posicionan como un dispositivo multifuncional que podría

utilizarse para implementar diversas acciones de control sobre el sistema, como la reducción del impacto en la variabilidad de la velocidad del viento, el control del flujo bidireccional de potencia, la adecuada integración de la energía generada a la red eléctrica, por mencionar algunas.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la Sección II se presenta una clasificación de las diferentes topologías de convertidores CA-CA, la Sección III aborda el sistema WECS propuesto, mientras que en la Sección IV se presentan los resultados de simulación obtenidos, y finalmente, en la Sección V se establecen las conclusiones generadas del trabajo.

II. CONVERTIDORES CA-CA

La clasificación de los convertidores de frecuencia CA-CA en la literatura técnica es variada, porque el desarrollo de los convertidores discutidos está todavía en curso, Fig.1.

A. CONVERTIDORES CA-CA CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN CD

La topología más tradicional de convertidor de potencia CA-CA es un inversor de fuente de tensión modulada por ancho de pulso (PWM-VSI, *Pulse Width Modulation – Voltage Source Inverter*) con un rectificador de diodos frontal y un condensador como enlace CD, Fig. 2. Este convertidor también se denomina convertidor indirecto de dos niveles con inversor de fuente de tensión (VSI, *Voltage Source Inverter*, por sus siglas en inglés). Un convertidor indirecto consta de dos etapas de conversión, CA a CD y CD a CA, con amplitud y frecuencia variable, además de un elemento intermedio de almacenamiento de energía. El condensador en el enlace de CD desacopla las dos etapas de conversión de energía y asegura su control independiente. El control de las señales de salida se consigue modulando los ciclos de trabajo de los dispositivos de la etapa de inversión para producir corrientes de salida prácticamente sinusoidales, con una amplitud y frecuencia deseadas.

El dispositivo de almacenamiento de energía en CD en los convertidores de frecuencia indirectos es un componente voluminoso. En la solución con Convertidores en Fuente de Voltaje (VSC, *Voltage Source Converter*), los condensadores de enlace son relativamente grandes, reduciendo al mismo tiempo la velocidad de respuesta.

B. CONVERTIDORES CA-CA SIN ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN CD

Estos convertidores CA-CA sin almacenamiento de energía se dividen en tres grupos. El primer grupo contiene al Convertidor Matricial Directo (CMD) que funciona en dos modos: como fuente de tensión, y como fuente de corriente, de manera similar a los convertidores con almacenamiento de energía. El segundo grupo contiene convertidores indirectos

con un enlace CD ficticio. En el tercer grupo están los convertidores basados en recortadores (*choppers*) de matriz-reactancia con interruptores síncronos de fuente o de carga, conectados como en el Convertidor Matricial (CM). Este concepto se basa en la utilización de elementos de almacenamiento de energía en CA regenerativa como pequeños condensadores o inductores. En estos elementos la energía media durante un periodo de las señales es igual a cero.

Dado que en el presente trabajo se considera la utilización del CMD, a continuación, se presenta una breve descripción de tal dispositivo.

1. Convertidor Matricial Directo

El CMD es un convertidor de una sola etapa conformado por un conjunto de interruptores de potencia bidireccionales arreglados en una matriz de $m \times n$ para conectar directamente una fuente de tensión de m fases a una carga de n fases [7], [9]-[12]. En el caso de un CMD trifásico, se utilizan nueve interruptores bidireccionales, los cuales permiten conectar cualquier de las tres fases de la carga con cualquiera de las tres fases de la fuente de entrada. Esta configuración se aprecia en la Fig. 3.

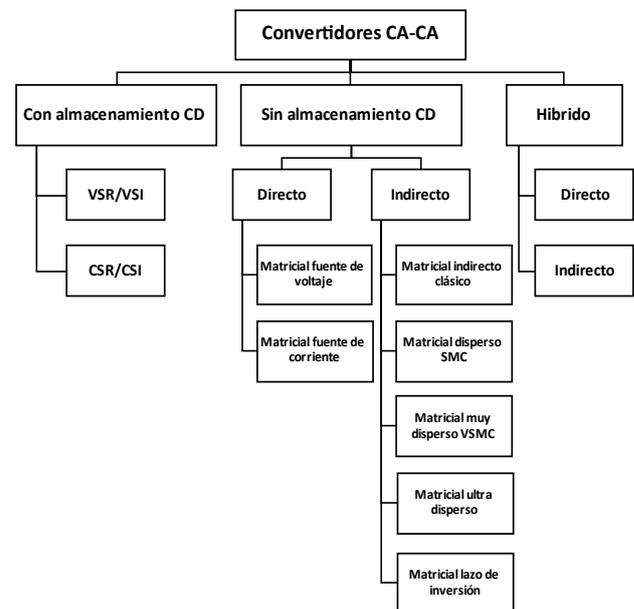


Fig. 1. Clasificación de las topologías de los convertidores trifásicos CA-CA.

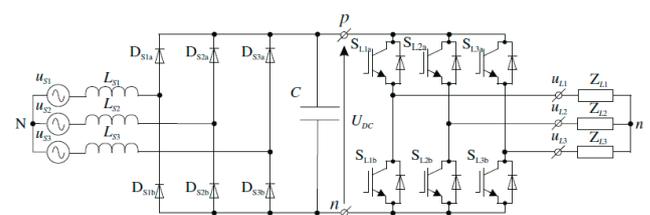


Fig. 2. Convertidor de frecuencia indirecto de dos niveles con inversor de fuente de voltaje y puente rectificador de diodos [14].

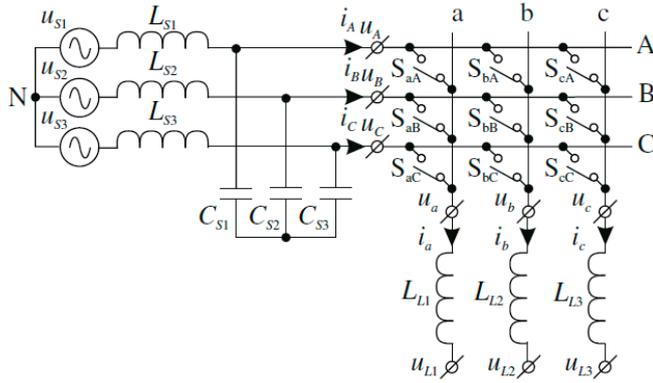


Fig. 3. Circuito simplificado del convertidor matricial trifásico [14].

En el CMD trifásico, las expresiones que describen la relación de tensiones y corrientes, entrada – salida, son las mostradas en las Ecs. (1)-(3).

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{aA} & m_{aB} & m_{aC} \\ m_{bA} & m_{bB} & m_{bC} \\ m_{cA} & m_{cB} & m_{cC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{aA} & m_{aB} & m_{aC} \\ m_{bA} & m_{bB} & m_{bC} \\ m_{cA} & m_{cB} & m_{cC} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\left. \begin{matrix} m_{hA} + m_{hB} + m_{hC} = 1 \\ 0 \leq m_{hk} \leq 1 \end{matrix} \right\} \quad h = a, b, c, \quad k = A, B, C. \quad (3)$$

donde, a cada interruptor bidireccional le corresponde un elemento m_{hk} de la matriz de ciclos de trabajo [7].

III. SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA (WECS)

El sistema implementado en este artículo es comúnmente conocido como WECS (Wind Energy Conversion System) [1], y consta de cuatro subsistemas, Fig. 4: turbina eólica, generador síncrono de imanes permanentes, CM y red eléctrica.

A continuación, se describe cada uno de los subsistemas que constituyen el sistema WECS.

A. TURBINA EÓLICA

El subsistema de la turbina eólica consta del modelo aerodinámico de la turbina eólica, modelo mecánico del tren de transmisión de 2 masas y de un controlador del ángulo de inclinación (*pitch angle*). El subsistema se ilustra en la Fig. 5.

B. GENERADOR DE IMANES PERMANENTES

El subsistema del generador síncrono de imanes permanentes consta de su modelo matemático en el marco de referencia del rotor dq referido al estator, y se describe mediante las Ecs. (4)-(6).

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_m i_q \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_m i_d - \frac{\lambda p \omega_m}{L_q} \quad (5)$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (6)$$

C. CONVERTIDOR MATRICIAL DIRECTO

El subsistema del convertidor matricial directo consta de un arreglo tipo matriz de 9 interruptores bidireccionales (3x3) [7]. Cada interruptor bidireccional está conformado por un arreglo de transistores IGBT en configuración emisor común. Para un buen funcionamiento, el CMD debe incluir un filtro tanto en las terminales de entrada como en las de salida. El filtro de entrada es necesario para minimizar los componentes armónicos en las corrientes de entrada, así como para reducir el impacto de las perturbaciones de la red de suministro, mientras que el filtro de salida se utiliza para eliminar las componentes de alta frecuencia presentes en los voltajes generados. La principal ventaja de los CMs es la ausencia del condensador en el enlace de CD, lo que permite aumentar la eficiencia, la densidad de energía y la vida útil del convertidor. Por otra parte, el convertidor matricial es controlado mediante la estrategia de modulación de Alesina y Venturini Optimizada [13], el esquema del CMD se ilustra en la Fig. 6.

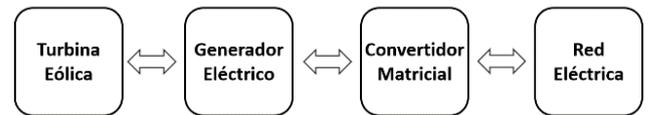


Fig. 4. Dispositivos que constituyen el sistema propuesto.

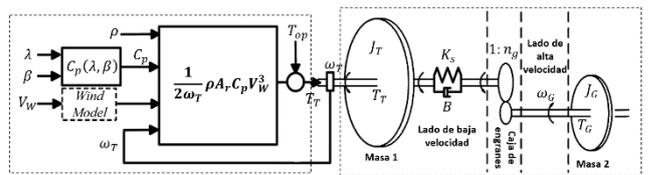


Fig. 5. Subsistema de la turbina eólica.

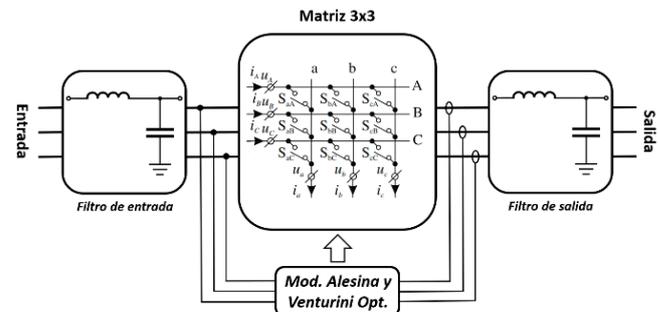


Fig. 6. Subsistema del convertidor matricial.

1. Estrategia de modulación Alesina - Venturini Optimizada

La primera estrategia de modulación para CMs fue propuesta por Alesina y Venturini en 1980 [11], esta asume una entrada de tensión y una corriente de carga senoidal. Algunos aspectos por considerar en esta estrategia es que utiliza un modelo escalar complicado y que la relación entre las tensiones de entrada y salida tiene un valor máximo de 0.5, lo que limita en gran medida la capacidad del convertidor. Para establecer un balance en los voltajes de salida y en las corrientes de entrada es necesario que la estrategia de modulación utilice los voltajes de entrada en la misma proporción para generar los voltajes de salida. La modulación Alesina-Venturini establece relaciones independientes para cada voltaje de salida a partir del muestreo y la distribución adecuada de secciones de los voltajes de entrada, de manera que el promedio de los voltajes de salida sea igual a la referencia establecida. Las relaciones entre los voltajes y las corrientes de entrada y salida para esta modulación son definidas mediante las Ecs. (1)-(3).

En 1989, los mismos autores propusieron la estrategia de modulación conocida como Alesina-Venturini Optimizada [13], donde a la tensión de salida de referencia de la modulación original se le agregan tensiones de modo común (incorporando el tercer armónico a las tensiones de la carga) (Ec. 7), lo que permite aumentar la relación entre las tensiones de entrada y salida a 0.866.

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |v_A| \cos(\alpha_o) + |v_a| \frac{\cos(3\beta_i)}{4} - |v_A| \frac{\cos(3\alpha_o)}{6} \\ |v_B| \cos(\alpha_o + \frac{2\pi}{3}) + |v_b| \frac{\cos(3\beta_i)}{4} - |v_B| \frac{\cos(3\alpha_o)}{6} \\ |v_C| \cos(\alpha_o + \frac{4\pi}{3}) + |v_c| \frac{\cos(3\beta_i)}{4} - |v_C| \frac{\cos(3\alpha_o)}{6} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Si la expresión del voltaje anterior de referencia se considera en la función de transferencia de los voltajes de salida, después de algunas simplificaciones, los elementos de la matriz de ciclos de trabajo toman la forma mostrada en la Ec. (8), que es una solución particular considerando un factor de potencia de entrada unitario [13].

$$m_{hk} = \frac{1}{3} \left\{ 1 + 2q \cos \left[\beta_i - \frac{2\pi(k-1)}{3} \right] \left[\cos \left(\alpha_o - \frac{2\pi(h-1)}{3} \right) - \frac{\cos(3\alpha_o)}{6} + \frac{\cos(3\beta_i)}{2\sqrt{3}} \right] - \frac{2}{3\sqrt{3}} q \left[\cos \left(4\beta_i - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right) - \cos \left(2\beta_i + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

D. RED ELÉCTRICA

El subsistema de red eléctrica consta de una fuente de tensión trifásica con una tensión línea-línea de 220 V a una frecuencia de 60 Hz.

IV. RESULTADOS

Para verificar la operación de CMD como parte del sistema WECS, se llevan a cabo una serie de simulaciones numéricas en el software MATLAB/Simulink, donde se simula el sistema completo conformado por los subsistemas descritos en la sección anterior. El sistema tiene como parámetros de entrada: la velocidad de viento (puede ser ingresada como constante o como curva de viento), los parámetros de tensión de la red y carga del sistema. Por otra parte, los parámetros de relación de tensión entrada-salida, frecuencia de entrada y salida son calculados de manera automática por el subsistema del convertidor matricial; esto se logra, primeramente, midiendo la tensión y ángulo de la red eléctrica, posteriormente se estima la tensión en terminales del PMSM mediante la constante de flujo λ y la velocidad mecánica del rotor, y utilizando la Ec. (9) es posible obtener el valor de q aproximado para tener la misma tensión en la salida del CM. El sistema completo se despliega en la Fig. 7 y el bloque interno del CMD en la Fig. 8. Se asume un control del CMD que sostiene un factor de potencia unitario.

$$q = \frac{V_{out}}{V_{in}} \approx \frac{\sqrt{2} V_{red\ rms}}{\sqrt{3} \lambda P \omega_m} \quad (9)$$

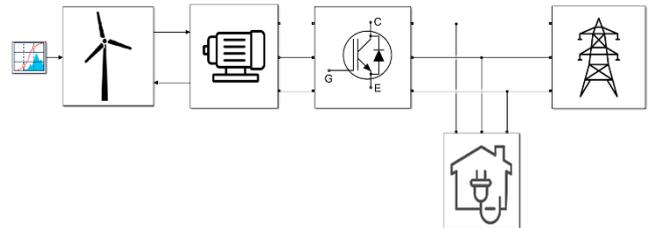


Fig. 7. Sistema completo propuesto (WECS).

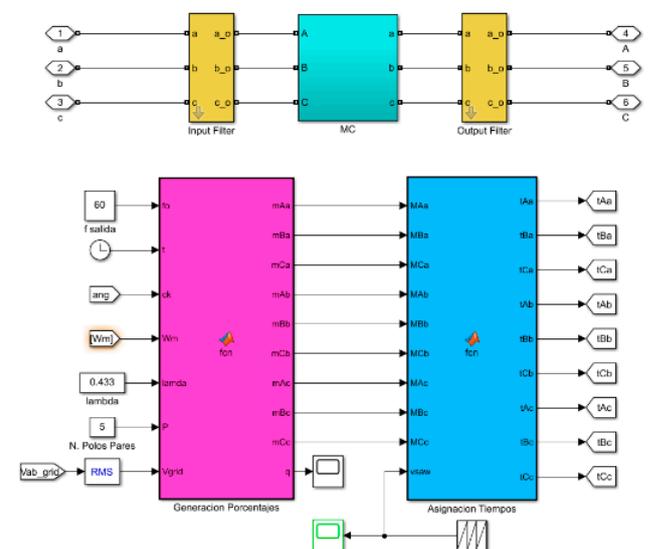


Fig. 8. Bloque interno del subsistema convertidor matricial.

Para las pruebas de simulación se busca simular diferentes condiciones que se pueden dar con el sistema propuesto, para esto se proponen una serie de escenarios. En el primero de ellos se tiene una demanda de potencia por parte de la carga, superior a la generada por el WECS. En el segundo escenario se busca una potencia de generación eólica superior a la demandada por la carga. Finalmente, para el escenario 3 se emplea una condición de nula potencia de generación eólica. La descripción de los 3 escenarios y los resultados obtenidos en potencia activa y reactiva se resumen en la **Tabla I**. Asimismo, en las **Fig. 9** y **10** se exhibe el comportamiento en tiempo de ambas potencias.

De los resultados obtenidos en los 3 escenarios (**Fig. 9** y **10**) podemos observar lo siguiente: en el primer escenario (cuando la potencia demandada por la carga es mayor a la generada por la WECS) el WECS al no poder suministrar la demanda de energía requiere energía de la red eléctrica, por lo que, en este escenario tanto la red eléctrica como el WECS aportan energía a la carga; en el segundo escenario (cuando la potencia demandada por la carga es menor a la generada por la WECS) podemos ver que el excedente de energía generada por el WECS es absorbido por la red eléctrica para ser utilizado en otros puntos de la red; por último, en el tercer escenario tenemos una nula generación, por lo que, toda la energía demandada por la carga es suministrada por la red eléctrica. Por otra parte, de los resultados mostrados en la **Tabla I** es necesario señalar que para las potencias en la carga el signo positivo denota consumo, y como se puede observar del tiempo 0 a 30 segundos el consumo es de aproximadamente 8700 W y 0 Var, mientras que, de un tiempo de 30 a 60 segundos disminuye a 4350 W y 0 Var, lo que muestra que el consumo es puramente resistivo y constante en los distintos escenarios.

TABLA I. DESCRIPCIÓN DE LOS 3 ESCENARIOS Y RESULTADOS OBTENIDOS.

Parámetros	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Velocidad del viento	~12 m/s	~12 m/s	0 m/s
Tiempo inicio	0 segundos	30 segundos	60 segundos
Tiempo final	30 segundos	60 segundos	70 segundos
Tensión entrada	~440 V	~440 V	~440 V
Tensión salida	~330 V	~330 V	~330 V
Frecuencia entrada	Variable	Variable	Variable
Frecuencia de salida	60 Hz	60 Hz	60 Hz
P - red eléctrica	2950 W	-1400 W	4350 W
Q - red eléctrica	0 Var	0 Var	0 Var
P - WECS	5750 W	5750 W	0 W
Q - WECS	0 Var	0 Var	0 Var
P - carga	8700 W	4350 W	4350 W
Q - carga	0 Var	0 Var	0 Var

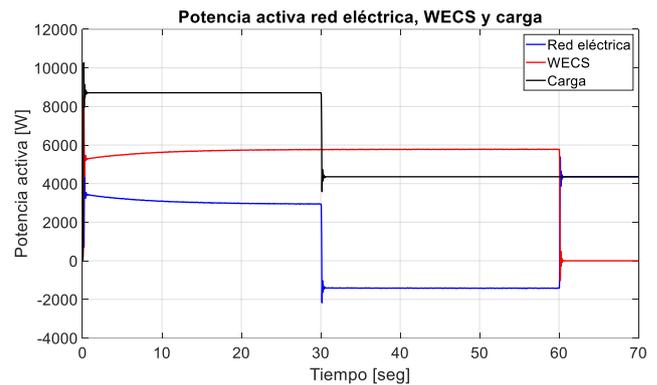


Fig. 9. Comportamiento de la potencia activa del WECS, carga y red eléctrica.

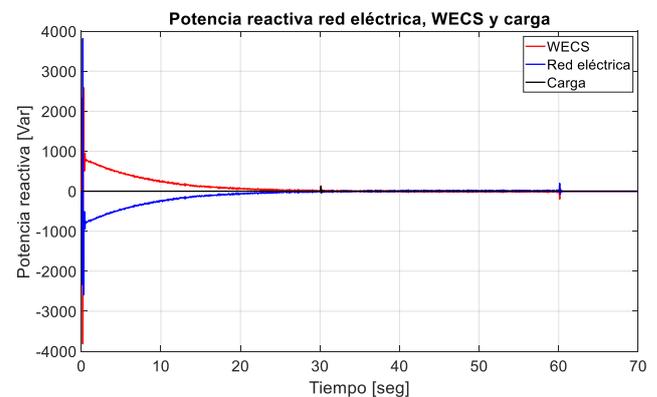


Fig. 10. Comportamiento de la potencia reactiva del WECS, carga y red eléctrica.

Respecto a la red eléctrica es necesario aclarar que el signo negativo en potencias denota que la energía es absorbida, donde en el escenario 1 es positiva (2950 W) lo que denota que la potencia es suministrada por la red, mientras que, en el escenario 2 al ser negativa (-1400 W) denota que es absorbida por la red (para ser consumida en otro punto), por último, en el escenario 3 al carecer de generación del WECS, la potencia entregada por la red es la misma que la demandada por la carga. Para los resultados del WECS se utiliza la misma convención de signos que la red eléctrica, donde en los escenarios 1 y 2 se tiene una generación aproximada de 5750W y en el escenario 3 es nula. La potencia reactiva que es posible apreciar a inicio del escenario 1 (generada por la WECS y absorbida por la red eléctrica) es debido a los elementos reactivos del sistema en general.

En diferentes investigaciones se ha utilizado el generador síncrono de imanes permanentes, razón por la cual se ha empleado aquí. Entre sus bondades yace la autoexcitación, lo que permite un desempeño con un factor de potencia muy conveniente y una alta eficiencia. Una deficiencia puede ser el funcionamiento síncrono, que provoca un desempeño pobre en caso de cortocircuitos exteriores y en casos de una fuerte intermitencia en el comportamiento del viento; esto puede dar origen a inestabilidades.

Aunque el CM aún resulta poco popular en las aplicaciones industriales ya que no se puede utilizar con motores de inducción estándar porque la relación de transferencia de tensión máxima entre la entrada y la salida sólo puede ser del 86%. El potencial de este convertidor convencionalmente se ha centrado en aplicaciones en las que también se puede controlar el diseño del motor, y en las que el espacio y el peso son muy importantes, como en los accionamientos de motores integrados, aplicaciones aeroespaciales y marinas o navales. No obstante, en este artículo se propone el empleo del CM como un elemento integral en la conversión de energía eólica. Los resultados de simulación presentados indican que efectivamente el CM tiene grandes posibilidades de éxito en este contexto. Actualmente se trabaja para presentar resultados de esta investigación con un prototipo de pequeña escala.

V. CONCLUSIONES

Las fuentes de energía renovable se han convertido en una prometedora fuente de energía alternativa, representan nuevos retos cuando se conectan a la red eléctrica. Tal es el caso de la generación eólica. Un aspecto relevante para este tipo de generación yace en el hecho que siempre fluctúa debido a las condiciones climáticas. Asimismo, la inyección de energía eólica en una red eléctrica afecta a la calidad de la energía debido a la naturaleza fluctuante del viento y a los tipos comparativamente nuevos de sus generadores. Este trabajo presenta un sistema de convertidor matricial como alternativa para el WECS cuando se emplean un generador de imanes permanente como convertidor de energía. Los resultados son muy apropiados y prometedores para continuar esta investigación con la implementación de prototipos de pequeña escala.

REFERENCIAS

- [1] D. K. Bhutto, J. A. Ansari, S. S. H. Bukhari, F. A. Chachar, "Wind energy conversion systems (WECS) generators: A review," in Proceedings of iCOMET 2019, pp. 1-6, Sukkur, Pakistan, 2019.
- [2] Gyugyi, L. and Pelly, B. R. Static power frequency changers: theory, performance, and application / L. Gyugyi, B. R. Pelly Wiley New York 1976.
- [3] K. Senthilnathan and K. I. Annappoorani, "A review on back-to-back converters in permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion system," in Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 2, no. 3, pp. 583 – 591, June 2016.
- [4] B. Wang and G. Venkataramanan, "Dynamic voltage restorer utilizing a matrix converter and flywheel energy storage", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, pp. 222-231, 2009.
- [5] V. Kumar, R. Chand Bansal, R. Raj Joshi, "Experimental realization of matrix converter based induction motor drive under various abnormal voltage conditions," in Int. J. Control, Autom. Syst., vol. 6, no. 5, pp. 670-676, 2008.
- [6] O. Abdel-Rahima, H. Abu-Ruba, A. Kouzouc, "Nine-to-three phase direct matrix converter with model predictive control for wind generation system," in Energy Procedia, vol. 42, pp. 173-182, 2013.
- [7] P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham and A. Weinstein, "Matrix converters: a technology review," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 2, pp. 276-288, April 2002, doi: 10.1109/41.993260.
- [8] J. M. Lozano, M. A. Hernandez-Figueroa, J. M. Ramirez, "An operative comparison of two DVR topologies based on a matrix converter without

- energy storage," in Proceedings of the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 6054-6060, Montreal, Canada, 2012.
- [9] S. M. Ahmed, A. Iqbal, H. Abu-Rub, J. Rodriguez, C. A. Rojas and M. Saleh, "Simple Carrier-Based PWM Technique for a Three-to-Nine-Phase Direct AC-AC Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 11, pp. 5014-5023, Nov. 2011, doi: 10.1109/TIE.2011.2134062.
- [10] S. M. Ahmed, A. Iqbal and H. Abu-Rub, "Generalized Duty-Ratio-Based Pulsewidth Modulation Technique for a Three-to- S_k Phase Matrix Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 9, pp. 3925-3937, Sept. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2098373.
- [11] M. Venturini and A. Alesina, "The generalised transformer: A new bidirectional, sinusoidal waveform frequency converter with continuously adjustable input power factor," 1980 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1980, pp. 242-252, doi: 10.1109/PESC.1980.7089455.
- [12] Kwon, W. H. and Gyu-Hyeong Cho. "Analyses of static and dynamic characteristics of practical step-up nine-switch matrix convertor." (1993).
- [13] A. Alesina and M. B. G. Venturini, "Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct AC-AC converters", in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 4, no. 1, pp- 101-112, Jan 1989, doi: 10.1109/63.21879.
- [14] Paweł Szczesniak, "Review of AC-AC Frequency Converters", *Three-Phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology*, edición no. 1, London, Springer-Verlag, 2012, capítulo 2, sección 2.3.2, página 24, DOI: 10.1007/978-1-4471-4896-8.

BIOGRAFÍAS



DIEGO A. J. GUTIÉRREZ TORRES recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2019. Actualmente cursa el programa de Maestría en Ciencias del CINVESTAV, Guadalajara, México. Su área de interés incluye convertidores de energía.



JOSÉ M. LOZANO GARCÍA recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen convertidores de energía, microrredes y redes inteligentes.



JUAN M. RAMÍREZ 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.



LUIS R. MERCHÁN VILLALBA recibió el título de Ingeniero Electrónico por la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, en 2014, y el título de Maestro y Doctor en Ingeniería Eléctrica por parte de la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2016 y 2020, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, estado estable y modelos dinámicos de dispositivos FACTS.