

Una mirada matemática dentro de los Aerogeneradores de baja potencia

A mathematical look inside the low power wind turbines

Julio Cesar Hernández Chilán^I*, Orlys Ernesto Torres Breffe^{II}, Jesús Alberto Pérez Rodríguez^I, Ciaddy Gina Rodríguez Borges^I, German Israel Casillas Peña^{III}, Yolanda Llosas Albuerne^I

^IUniversidad Técnica de Manabí, Ecuador

^{II}Universidad Tecnológica de la Habana, “José Antonio Echeverría”, Cujae, La Habana, Cuba

^{III}Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC.EP), Ecuador

*Autor de correspondencia: julio.hernandez@utm.edu.ec

Recibido: 27 de mayo de 2024

Aprobado: 4 de julio de 2024

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

El aerogenerador de imán permanente es el elemento fundamental en el interior de las turbinas eólicas de pequeñas potencias, menores 3MW. El funcionamiento de los componentes internos de los aerogeneradores no es de usual manejo por los ingenieros eléctricos. Este trabajo tiene como objetivo mostrar el comportamiento dinámico de los aerogeneradores con generadores sincrónicos de imán permanente y convertidores de 3 etapas. Se presentan las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico de cada una de las etapas que conforman el aerogenerador, comenzando por la turbina eólica de 3 paletas, que es una de las más eficientes en la actualidad, y terminando en el filtro pasivo necesario para su sincronización con el sistema de potencia. Utilizando las ecuaciones dinámicas obtenidas se hacen simulaciones de cada etapa por separado y se demuestran el funcionamiento de cada una de las partes y del conjunto.

Palabra clave: aerogenerador, ecuaciones dinámicas, electrónica de potencia, filtros, simulaciones.

The permanent magnet wind turbine is the fundamental element inside small wind turbines with power ratings of less than 3MW. The operation of the internal components of wind turbines is little known by electrical engineers. This work aims to show the dynamic behavior of Permanent Magnet Synchronous Generators types with 3-stage converters. The equations that describe the dynamic behavior of each of the stages that make up the wind turbine are presented, starting with the 3-blade wind turbine, which is one of the most efficient at present, and ending with the passive filter necessary for its synchronization with the power system. Using the obtained dynamic equations, simulations of each stage are made separately and the operation of each of the parts and of the whole are demonstrated.

Keywords: wind generator, dynamic equations, power electronic, filter, simulations.

INTRODUCCIÓN

La generación eléctrica basada en la energía del viento tiene mucho protagonismo en la actualidad, pero no todos los profesionales tienen un conocimiento detallado de su funcionamiento [1]. Se conoce que el aerogenerador convierte la energía del viento en energía eléctrica, pero esto, es una visión general de la turbina eólica que no facilita una comprensión integral de los problemas que se presentan con la integración de los aerogeneradores con el sistema de potencia [2].

Existen turbinas eólicas de varios tipos de tecnologías. Las turbinas eólicas de velocidad fija con generadores asincrónicos, las de velocidades variables con generadores de inducción doblemente alimentados (DIFG) y las utilizadas por generadores sincrónicos con imanes permanentes (PMSG). Los aerogeneradores de velocidad fijas con generadores asincrónicos son poco utilizados [3]. Los aerogeneradores de velocidad variable con DIFG son mayormente utilizados en los proyectos de gran potencia, mientras que, los PMSG son más utilizados en generadores de menor potencia [4]. Todas estas tecnologías enfrentan retos y exigencias en los códigos eléctricos de diferentes países, dirigidos a resolver los inconvenientes producidos en la conexión de estas turbinas, al sistema eléctrico de potencia [5].

Los aerogeneradores que utilizan generadores sincrónicos de imán permanente PMSG necesitan que el convertidor tenga la misma potencia que el aerogenerador. En los aerogeneradores DFIG el convertidor solo necesita tener un 30% de la capacidad del generador, por lo que este último es el más utilizado en proyectos de mayor potencia. En los aerogeneradores de tecnología PMSG se utilizan dos tipos de convertidores de electrónica de potencia. Los convertidores de dos etapas conocidos como Back-To-Back y los convertidores de tres etapas unidireccionales. Estos últimos convertidores, aunque tienen más etapas, no tienen un sistema de control tan complejo por lo que su uso es para generadores de menor potencia [6].

En Ecuador, existe el parque eólico Villonaco que es un parque eólico ubicado en la ciudad de Loja conectado a la red de sub-transmisión. Este es el caso de estudio que motivó la investigación. El parque eólico está compuesto por 11 aerogeneradores de 1.5MW (baja potencia) y se desconectan de manera total cuando ocurren fallas en la red eléctrica de la empresa distribuidora. Aunque no se tienen detalles de las partes del parque fotovoltaico objeto de estudio, se conoce que utiliza generadores PMSG y convertidores de 3 etapas. En este trabajo se describen las ecuaciones matemáticas de un generador (PMSG), el convertidor AC/DC, el convertidor DC/DC chopper elevador, el convertidor DC/AC, el filtro pasivo LC y un sistema de control que garantizaría maximizar el recurso.

Los valores utilizados son aproximaciones, en vista que algunos datos son de uso restringido. Utilizando esta modelación se simulará el comportamiento de los aerogeneradores frente a huecos de tensión donde se determinó que es el propio control quien confunde la perturbación y crea sobre tensiones de DC que provocan el disparo de la unidad.

DESARROLLO

Estructura General del interior del Aerogenerador objeto de estudio

Los componentes internos de un aerogenerador sincrónico de velocidad variable, con rotor de imanes permanentes y una unidad convertidor de tres etapas unidireccional son mostrados en la figura 1. Se consideraron las etapas para la modelación de dicho aerogenerador y se describen a continuación:

Turbina de 3 paletas con control del pitch [7]

- Generador síncrono con 6 terminales [8]
- Rectificador de 12 pulsos que tendría menos rizado [9]
- Convertidor DC/DC con 3 etapas en paralelo para reducir las corrientes que circulan por las válvulas [10]
- Convertidor DC/AC a la salida con 2 etapas en paralelo [11]
- Filtro LC para reducir los armónicos a la salida [12]

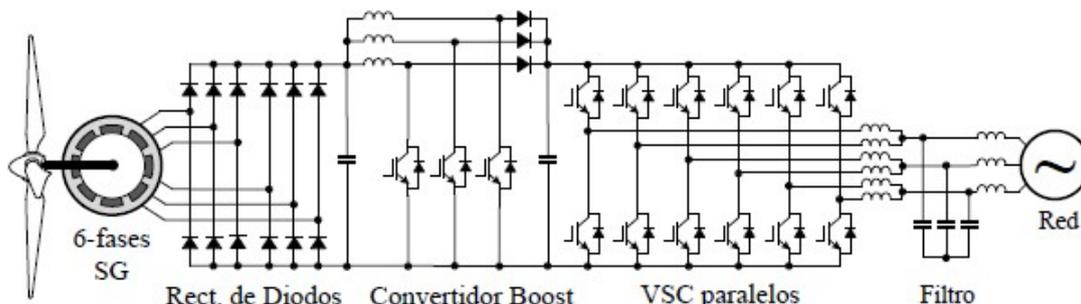


Fig. 1. Imagen de un aerogenerador PMSG con convertidor de 3 etapas

Cada una de estas etapas se modela mediante ecuaciones matemáticas que representa su comportamiento dinámico durante contingencias en el sistema eléctrico de potencia. El estudio del modelo es realizado bajo condiciones dinámicas, régimen propio de fenómenos transitorio como son los huecos de tensión, perturbación esta que origina este estudio.

La turbina eólica de 3 paletas

Los parámetros que gobiernan en la regulación del ángulo de paso de palas, se basan en la aerodinámica, específicamente, un sistema de control de paso de pala regula la incidencia del viento sobre las palas del aerogenerador. El ángulo de paso se define como el ángulo que se forma entre la cuerda del perfil aerodinámico en la punta de la pala y el plano de rotación, una vez alcanzado el valor nominal. [13-16]. La potencia mecánica obtenida del viento se puede calcular como se describe en la ecuación (1):

$$pm = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p (\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

Dónde: ρ es la densidad del viento en Kg/m³; R es el radio de las paletas en metros; v es la velocidad del viento en m/s; C_p es el coeficiente de potencia cuyo máximo valor es el límite de Betz. Este C_p depende de la relación de la velocidad de punta de pala λ y el ángulo de calaje β .

Generadores con rotor de imanes permanentes (PMSG)

Los sistemas de ecuaciones diferenciales del generador de imanes permanentes PMSG [17, 18] y siguiendo el marco referencial de Park, se derivan como sigue en las ecuaciones de la (2-10):

$$V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + L_d \cdot dI_{ds} / dt - \omega_r \cdot \psi_{qs} \quad (2)$$

$$V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + L_q \cdot dI_{qs} / dt + \omega_r \cdot \psi_{ds} \quad (3)$$

$$\psi_{ds} = L_d \cdot I_{ds} + \psi_o \quad (4)$$

$$\psi_{qs} = L_q \cdot I_{qs} \quad (5)$$

$$T_e = 1.5 p \cdot [(L_d - L_q) \cdot I_{ds} \cdot I_{qs} + \psi_o \cdot I_{qs}] \quad (6)$$

$$J \cdot d\omega_m / dt = T_m - T_e - B \cdot \omega_m \quad (7)$$

$$\omega_r = p / 2 \cdot \omega_m \quad (8)$$

$$\omega_m = F / J \quad (9)$$

$$F = P / 2 \cdot \omega_{m/60}. \quad (10)$$

Dónde: R_s es la resistencia de una fase del devanado del estator, Los subíndices d, q, s denotan las magnitudes d-q en el cuadro referencia de Park de las magnitudes del estator (s) respectivamente. La velocidad del PMSG, está representado por ω_r . El flujo permanente en el rotor está representado por ψ_o . T_e es el torque electromagnético del generador. P es el número de polos; T_e es el torque electromagnético que depende de la carga conectada al generador y T_m es el torque mecánico proveniente de la turbina eólica.

B es la constante de amortiguamiento; J es la inercia; ω_m es la velocidad mecánica del generador y F es la fuerza que se ejerce en el eje del rotor del generador. F es la frecuencia eléctrica obtenida por el generador; P, es el número de pares de polos en el generador.

El comportamiento del aerogenerador a medida que cambia la velocidad de entrada del mismo, se muestra en la figura 2. Con mayor velocidad en los inicios de la simulación se nota que las magnitudes de la tensión son superiores, así como también es mayor la frecuencia de la onda de salida trifásica. Instantes después, una vez que se reduce la velocidad de rotación del aerogenerador, se reduce en magnitud y frecuencia.

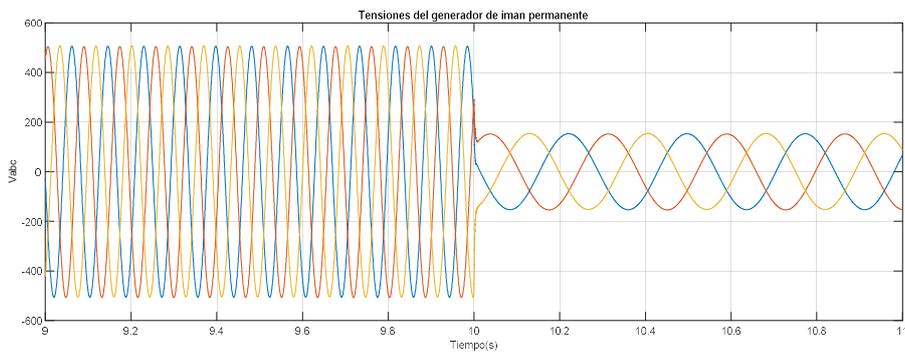


Fig. 2. Formas de ondas del voltaje variando la velocidad de rotación

Las formas de ondas de las tres fases que corresponde a las salidas de uno de los dos grupos de devanados estáticos del generador, es mostrada en la figura 2, el segundo devanado tiene el mismo comportamiento con 30 grados de desfase. Esta realidad en los generadores de imán permanente hace imposible conectarlos directamente en las redes, dado que no estarían sincronizados ni en tensión, ni en frecuencia, ni en ángulo. La necesidad de un convertidor electrónico entre el PMSG y la red es imprescindible.

El rectificador de 12 pulsos

El rectificador en puente trifásico de seis pulsos mejora significativamente la calidad de la tensión continua de salida, los niveles de rizados de la tensión de salida son bajos y se producen a frecuencias que son múltiplos de seis veces la frecuencia del generador [19-20]. Además, para una mejora aún mayor en el desempeño de un rectificador de 6 pulsos y una reducción adicional del rizado en la salida, se puede utilizar una configuración de dos puentes de seis pulsos. A esta configuración se le conoce como convertidor de 12 pulsos. Las tensiones de entradas que alimenta al convertidor rectificador se describen en las ecuaciones de la (11-22):

$$v_{ab1} = V_{max_ab1} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

$$v_{bc1} = V_{max_bc1} \cdot \sin(\omega t + \varphi - 120) \quad (12)$$

$$v_{ca1} = V_{max_ca1} \cdot \sin(\omega t + \varphi + 120) \quad (13)$$

$$v_{ab2} = V_{max_ab2} \cdot \sin(\omega t + \varphi + 30) \quad (14)$$

$$v_{bc2} = V_{max_bc2} \cdot \sin(\omega t + \varphi - 90) \quad (15)$$

$$v_{ca2} = V_{max_ca2} \cdot \sin(\omega t + \varphi + 150) \quad (16)$$

$$V_{DC_ON}(t) = \max \{v_{ab1}(\omega t), v_{bc1}(\omega t), v_{ca1}(\omega t), v_{ab2}(\omega t), v_{bc2}(\omega t), v_{ca2}(\omega t)\} \quad (17)$$

$$V_{DC_OFF}(t) = V_{DC_MAX} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (18)$$

$$\tau = R \cdot C \quad (19)$$

$$R = \frac{V_{max}^2}{P} \quad (20)$$

$$\text{Si } V_{DC_ON} > V_{DC_OFF} \text{ entonces } V_{DC}(t) = V_{DC_ON} \quad (21)$$

$$\text{Si } V_{DC_ON} < V_{DC_OFF} \text{ entonces } V_{DC}(t) = V_{DC_OFF} \quad (22)$$

Dónde: V_{max} es la tensión máxima de la onda de tensión entre las fases, $VDC_ON(t)$ es la tensión de DC cuando los diodos se encuentran conduciendo, $VDC_OFF(t)$ es la tensión de DC cuando los diodos no se encuentran conduciendo, τ es la constante de tiempo del circuito cuando los diodos no están conectados, R es la resistencia que representa la potencia activa, P es la potencia activa que demanda la carga conectada y V_{DC_MAX} es la máxima tensión de DC en el momento que el convertidor deja de conducir.

Las ecuaciones anteriores se cumplen mientras los diodos están en conducción. Pero como a la salida del convertidor AC-DC existe un capacitor, entonces la tensión de DC no siempre es más baja que la tensión de AC y en esas circunstancias, los diodos no conducirán. Se podrá decir que las ecuaciones son válidas siempre que $VDC_ON(t) > VDC(t)$. Sucede que cuando ningún diodo del convertidor esté conduciendo el capacitor estará suministrando la tensión a la carga y la tensión de VDC comenzará a reducirse. En la siguiente figura 3, se muestra la forma onda resultante en los terminales de salida con la carga del rectificador.

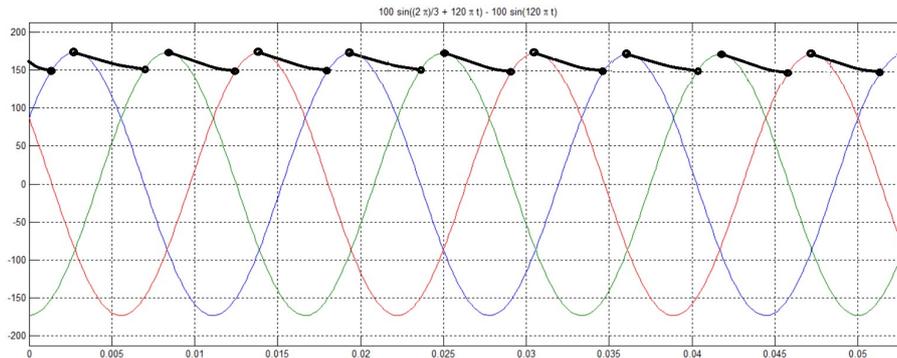


Fig. 3. Forma de onda de la tensión de salida del rectificador

Es fundamental que el rectificador esté conectado a un capacitor en sus líneas de salidas para obtener un voltaje V_{dc} con el menor rizado posible. La capacidad del rectificador se reduce si el rectificador es de 12 pulsos comparados con un rectificador de 6 pulsos.

El convertidor DC/DC de 3 etapas

A partir de la señal PWM impuesta al IGBT se pueden reescribir las ecuaciones de la siguiente forma desde la (23-31) y se puede hacer un análisis estático, que no es el que corresponde para este trabajo porque el hueco de tensión es un transitorio:

$$F_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{FIL}C_{FIL}}} \quad (23)$$

$$i_{L_{ON}} = \frac{E}{L}DT \quad (24)$$

$$\int_0^{(1-D)T} \left(\frac{di_L}{dt} \right) = \int_0^{(1-D)T} \left(\frac{E - u_c}{L} \right) \quad (25)$$

$$i_{L_{OFF}} = \frac{E - u_0}{L}(1 - D)T \quad (26)$$

$$i_{L_{ON}} + i_{L_{OFF}} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{E}{L} - \frac{u_0}{L} + \frac{u_0}{L}D = 0 \quad (28)$$

$$\frac{E}{L} = \frac{u_0}{L}(1 - D) \quad (29)$$

$$E = u_0 (1 - D) \quad (30)$$

$$u_0 = \frac{E}{(1 - D)} \quad (31)$$

En la gráfica se observa que el comportamiento de la tensión de salida es más estable hasta que el valor de D esté dentro del rango entre 0 y 0.5. Esto quiere decir que se debe controlar el IGBT desde pulsos sin partes positivas hasta pulsos con la mitad de las partes positivas. Este modelo fue comprobado utilizando varias simulaciones. En la figura 4, se muestra el comportamiento de la tensión de DC de salida para un cambio del ciclo de trabajo $D=0$ a $D=0.5$. Nótese que la respuesta al cambio es inmediata, pero se producen oscilaciones leves de la tensión de DC.

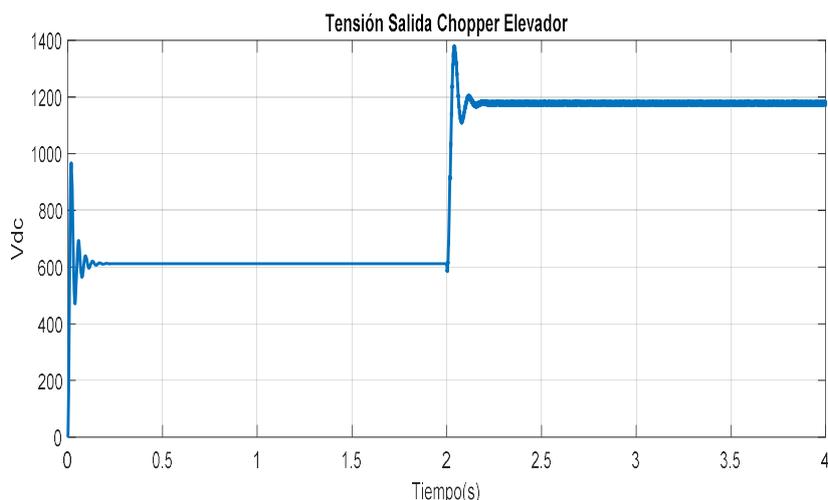


Fig. 4. Tensión de DC en la salida del convertidor DC/DC con cambios del ciclo de trabajo

El funcionamiento del convertidor de DC/DC es solo cambiando el ciclo de trabajo desde $D = 0$ hasta 0.5. Durante la operación del aerogenerador, el ciclo de trabajo es modificado lentamente para subir o bajar la tensión. En verdad, se pueden hacer dos acciones de control, modificar el ciclo de trabajo para controlar la tensión de DC a la salida o modificar el ciclo de trabajo D para controlar la tensión en los inductores. Las corrientes en los inductores es una presentación de la corriente que está circulando y por tanto de la potencia que se está entregando por el convertidor DC/DC. En el caso del aerogenerador, el control se hace utilizando el regulador de corriente del inductor.

El inversor de 2 etapas en paralelo

La técnica de modulación ancho de pulso (PWM) es la que se utiliza en el control del convertidor de 6 pulsos. Esta técnica consiste en comparar una señal moduladora sinusoidal con una señal portadora en forma de diente de sierra. Como resultado de esta comparación, se obtiene una tensión alterna con forma de onda cuadrada. El esquema del inversor de dos etapas en paralelo se muestra en la figura 5. Está compuesto por una fuente de DC real que tiene una resistencia en serie y unos capacitores en paralelo a esta fuente. Los dos convertidores y el filtro, conectado a una carga. Estos capacitores en paralelo no aportan nada, utilizando el modelo de fuente de tensión de DC. En el aerogenerador esta sería la salida del convertidor DC/DC que si utiliza capacitores a la salida.

Se utilizan dos convertidores de 6 pulsos conectados en paralelo y se le pone un filtro a la salida LC. El funcionamiento de este filtro será objeto de otro análisis en próximos epígrafes. El pulso a los IGBTs de los convertidores se lo realiza con un control PWM tal y como se explicó con anterioridad, pero utilizando una señal portadora de 18kHz. La señal de encendido de los IGBTs les llega al mismo tiempo a ambos convertidores.

En este caso no es necesario utilizar ecuaciones matemáticas, es simplemente utilizando un control PWM. Cada uno de los IGBTs del polo positivo se enciende cuando el del lado negativo está apagado. El control PWM necesita una señal de referencia trifásica sinusoidal la que compara con una señal de diente de sierra que sale del control del convertido DC/AC [11].

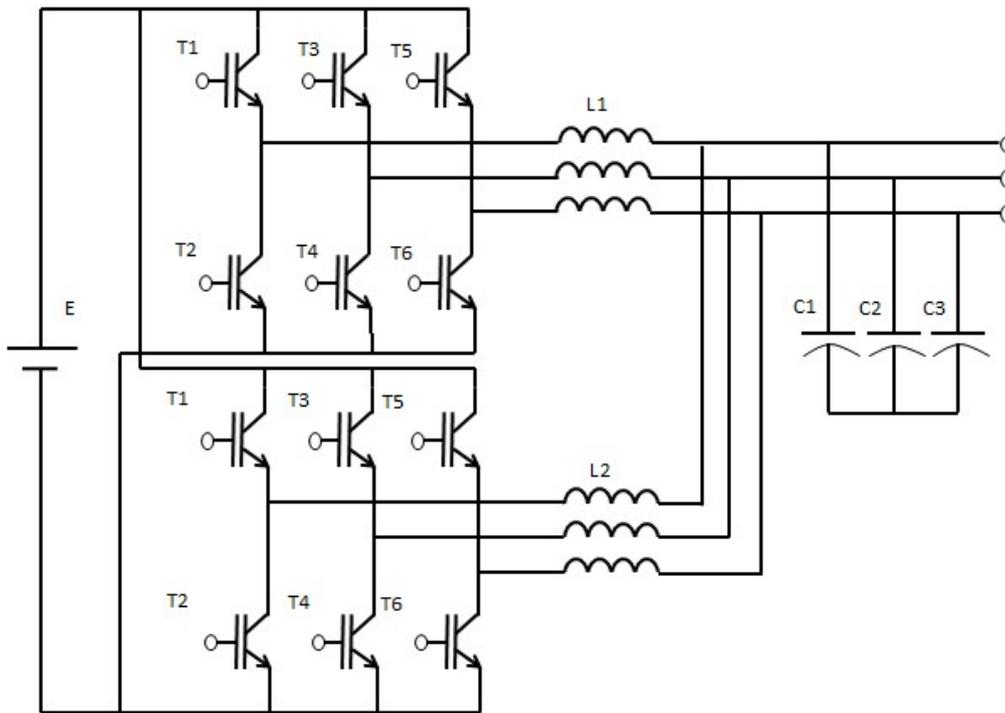


Fig. 5. Modelo del convertidor inversor de dos etapas en paralelo

Las formas de onda que presenta el convertidor inversor, antes del filtro, son mostradas en la figura 6, evidenciando el resultado del control basado en PWM.

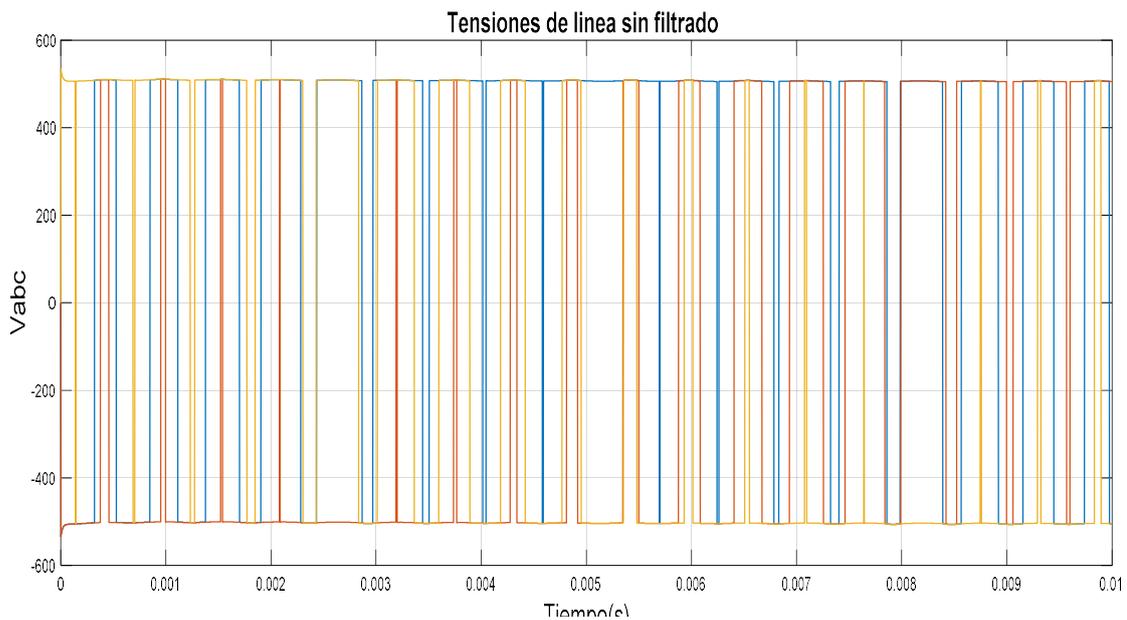


Fig. 6. Forma de onda de la tensión de salida del convertidor

En la figura 6, se muestra la forma de onda a la salida del convertidor. Es una onda AC de una magnitud o un máximo invariable. Lo variable en esta señal es el ancho del pulso de las ondas cuadradas. Como se ha explicado anteriormente esta es la forma en que el convertidor exporta otra señal con una frecuencia igual a la fundamental.

El Filtro LC

El convertidor DC/AC trifásico mencionado en el apartado anterior necesita de un filtro a la salida. Este filtro permite entregar una señal de tensión sinusoidal al sistema de potencia. El convertidor conectado a la red entregará una tensión trifásica que contiene armónicos, lo cual afectará negativamente el funcionamiento de todos los equipos eléctricos conectados a la red. Por esta razón, es de suma importancia utilizar un filtro que se encargue de atenuar los armónicos de elevada frecuencia. En la siguiente figura 7, se observa el filtro pasivo tipo LC [21].

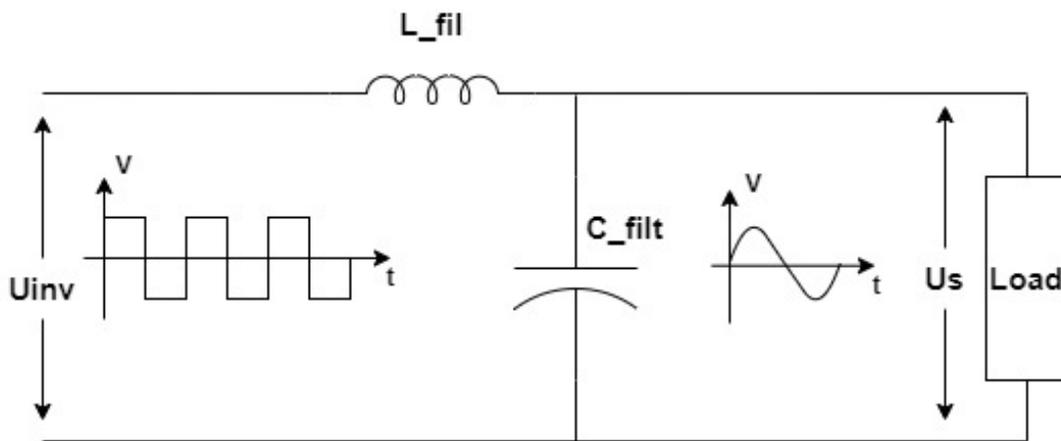


Fig.7. Esquema electrónico de un filtro pasivo LC

En la figura 7, se muestra el modelo del filtro pasivo LC. Este circuito está alimentado por una fuente de corriente alterna en forma de onda cuadrada, lo cual está contaminada con armónicos de elevada frecuencia. El circuito está compuesto por un inductor de filtro L_{FIL} y un capacitor de filtro C_{FIL} . Si el filtro funciona correctamente, la tensión de salida entre los terminales de la carga (V_{load}) debería tener una forma de onda lo más parecida a una señal sinusoidal.

Las ecuaciones que se utilizan para describir el funcionamiento del filtro son las que se describen entre la ecuación (32-37):

$$\bar{U}_{INV} = \bar{U}_L + \bar{U}_C \quad (32)$$

$$\bar{U}_S = \bar{U}_C \quad (33)$$

$$\bar{V}_s = \bar{V}_C = \frac{\bar{V}_{INV} \cdot \bar{Z}_C}{\bar{Z}_L + \bar{Z}_C} \quad (34)$$

$$\frac{\bar{V}_s}{\bar{V}_{INV}} = f_T = \frac{\bar{Z}_C}{\bar{Z}_L + \bar{Z}_C} = \frac{-j \frac{1}{(2\pi f C_{FIL})}}{(j2\pi f L_{FIL}) - j \frac{1}{(2\pi f C_{FIL})}} = \frac{-j}{\frac{2\pi f C_{FIL}}{j4\pi^2 f^2 L_{FIL} C_{FIL} - j}} \quad (35)$$

$$\frac{\bar{V}_s}{\bar{V}_{INV}} = \frac{-j}{j4\pi^2 f^2 L_{FIL} C_{FIL} - j} \quad (36)$$

$$F_{res} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{FIL} C_{FIL}}} \quad (37)$$

Dónde: L_{FIL} inductancias del filtro y C_{FIL} capacitancias del filtro

Si se utiliza un filtro con $L = 0.1\text{mH}$ y $C = 500\mu\text{F}$ y se realiza un barrido de frecuencia a la función transferencial mostrada anteriormente, se podrá comprender el funcionamiento del filtro. Se podrá observar qué sucede con la magnitud de la función transferencial en frecuencias cercanas a 60Hz y en frecuencias elevadas. En la figura 8, se muestra la respuesta de frecuencia del filtro.

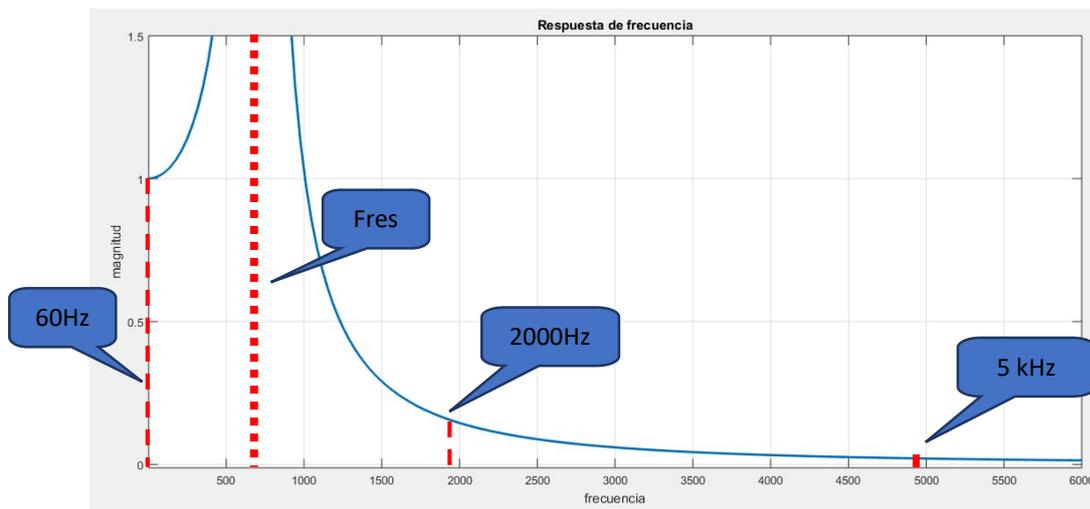


Fig. 8. Respuesta de frecuencia del filtro

Cuando la frecuencia de la señal de entrada aumenta, la amplitud de la función de transferencia disminuye. Esto significa que la señal en esa frecuencia no se transmitirá a la salida, sino que será filtrada. A frecuencia cercana a 60 Hz la magnitud de la función transferencial es 1, lo que indica que la señal de salida es igual a la de entrada. Esto significa que el filtro no altera la señal de entrada si es una señal sinusoidal a 60 Hz. Cuando la frecuencia de la señal coincide con la frecuencia de resonancia, donde la reactancia inductiva (X_L) y la reactancia capacitiva (X_C) se igualan, la salida del filtro se amplifica.

Por tanto, no debería generarse ningún armónico con esta frecuencia de resonancia. Sin embargo, si el convertidor genera algún armónico cercano a este valor de frecuencia de resonancia del filtro, este será amplificado. En la siguiente figura 9, se demuestra los resultados de la simulación realizado en el filtro pasivo LC. La forma de onda de color (rojo) pertenece la tensión de la fuente que es contaminada por un armónico de elevada frecuencia de armónico orden 50 y la forma de onda de color (azul) corresponde a la tensión en la carga o a la salida del filtro [22, 23].

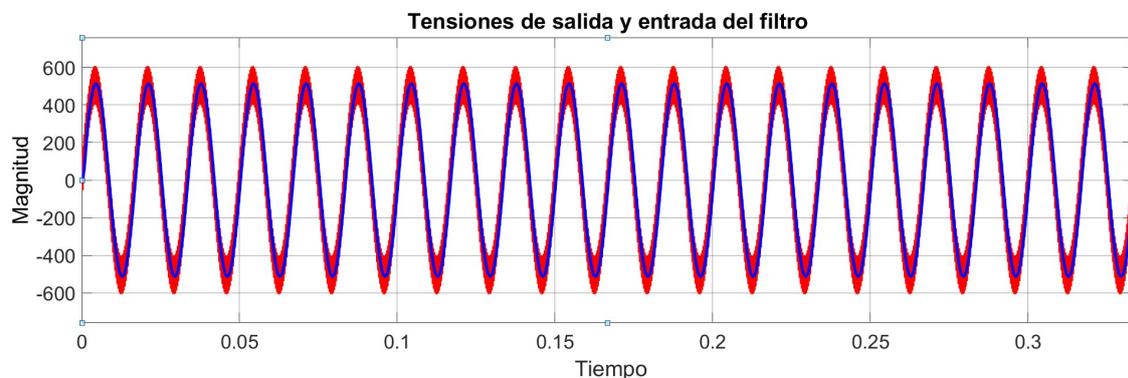


Fig. 9. Forma de onda de la tensión con armónico del orden 50

La región estable de la frecuencia de resonancia (f_{res}) se sitúa entre diez veces la frecuencia nominal y la mitad de la frecuencia de conmutación. En la figura 8, muestran los resultados de las simulaciones realizada en el filtro pasivo L-C, donde se observan las respectivas formas de ondas de las tensiones de entrada y salida del filtro.

CONCLUSIONES

El trabajo arroja las siguientes conclusiones:

- Las ecuaciones que permiten modelar cada una de las partes del interior del aerogenerador para obtener el comportamiento frente a huecos de tensión son ecuaciones dinámicas.
- Los generadores de imán permanente necesitan el convertidor para poder sincronizarse, las variaciones de velocidad del viento afectan el módulo de la tensión y su frecuencia.
- El convertidor AC/DC no controlado elimina la variación de la frecuencia a la salida del generador de imán permanente, pero en esta etapa se mantiene el problema de la variación de la magnitud de la tensión que se refleja en tensión de DC.

- El convertidor DC/DC elimina el problema de la variación de la magnitud de la DC a la salida del generador de imán permanente, pero la tensión controlada está en DC. Este convertidor trabaja con conmutaciones a alta velocidad.
- El convertidor DC/AC es quien convierte en la tensión en AC para poder sincronizarse, pero saca una señal totalmente contaminada de armónicos. Este convertidor también trabaja bajo la técnica PWM a alta frecuencia de oscilación.
- El filtro pasivo elimina la mayor parte de los armónicos superiores que están en la onda de salida del convertidor y solo muestra la señal mayormente sinusoidal a la salida.

REFERENCIAS

- [1]. Badawi, A. S., *et al.* "Practical electrical energy production to solve the shortage in electricity in Palestine and payback period" International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2019, vol. 9. p. 4610-4611. ISSN 2722-2578. Disponible en: <http://doi.org/10.11591/ijece.v9i6.pp4610-4616>
- [2]. Abas, N., *et al.* "Power quality improvement using dynamic voltage restorer," Journal of Engineering Sciences, 2020, vol. 8, p. 164325-164339, ISSN 2312-2498. Disponible en: <https://www.jespublication.com/upload/2023-V14I4075.pdf>
- [3]. Erdemir, G., Zengin A. and Akinci, T. "Short-term wind speed forecasting system using deep learning for wind turbine applications", International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2021, vol. 10, p. 5779-5784. ISSN 2722-2578. Disponible en: <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i6.pp5779-5784>
- [4]. Yoo, J. I., *et al.* "Frequency stability support of a DFIG to improve the settling frequency" IEEE Access, 2020, vol. 8, p. 22473-22482. ISSN 2169-3536. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969051>
- [5]. Nkosi, N., *et al.* "A review of small-signal stability analysis of DFIG-based wind power system". International Journal of Modelling and Simulation, 2023, vol. 43, n. 3, p.153-170. ISSN 1925-7082. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02286203.2022.2056951>
- [6]. Yaramasu, Venkata, *et al.* "PMSG-based wind energy conversion systems: survey on power converters and controls". IET Electric Power Applications, 2017, vol. 11, n. 6, p. 956-968. ISSN 1751-8660. Disponible en: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0799>
- [7]. Freire, A. S.; *et al.* "Control orientado de voltaje del sistema de generación de energía eólica conectado a la red". Revista Técnica energía, 2022, vol. 19, n. 1, p. 61-70. ISSN 2602-8492. Disponible en: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2602-84922022000200061
- [8]. Amaro Pinazo, M. P. "Control de potencia de generadores síncronos multipolo de imanes permanentes (DD-PMSG) para aerogeneradores". 2021. Tesis de Maestría. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/359231>
- [9]. Saura, J., Mesas, J. J.; Sainz, L. "Average value of the DC-link output voltage in multi-phase uncontrolled bridge rectifiers under supply voltage balance and unbalance conditions". Electrical engineering, 2021, vol. 103, n. 6, p. 3097-3109. ISSN 0948-7921. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/356886>
- [10]. Chakraborty S., *et al.* "DC-DC converter topologies for electric vehicles, plug-in hybrid electric vehicles and fast charging stations: State of the art and future trends". Energies, 2019, vol. 12, n. 8, p. 1569. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en12081569>
- [11]. Rasool, *et al.* "A rapid non-linear computation model of power loss and electro thermal behaviour of three-phase inverters in EV drivetrains". En 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). IEEE, 2020. p. 317-323. ISBN 978-1-7281-7019-0. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9161927>
- [12]. Jayaraman, M., Sreedevi, V. T. "Implementation of LC and LCL passive filters for harmonic reduction in PV based renewable energy systems". En 2017 National Power Electronics Conference (NPEC). IEEE, 2017. p. 363-369. ISBN 978-1-5386-3236-9. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8310486>
- [13]. Ahmed. S. D., *et al.* "Grid integration challenges of wind energy: A review". IEEE Access, 2020, vol. 8, p. 10857-10878. ISSN 2169-3536. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964896>
- [14]. Gonzales, H. Acevedo, "Control de una Turbina Eólica de Velocidad Variable Conectada a la Red Eléctrica". Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Grupo de Investigación en Sistema de Energía Eléctrica (GISEL). Revista UIS Ingenierías. 2008, vol. 7, n. 1. ISSN 2145-8456. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/391>
- [15]. Tang, H., *et al.* "Wake Effect of a Horizontal Axis Wind Turbine on the Performance of a Downstream Turbine", Energies. 2019, vol. 12, p. 1-18. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en12122395>
- [16]. Omar, O., *et al.* "Commercial wind turbines modeling using single and composite cumulative probability density functions." International Journal of Electrical & Computer Engineering. 2021, vol. 11, n.1, p. 47-56. ISSN 2722-2578. Disponible en: <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i1.pp47-56>

- [17]. Amaro, M., Pinazo. "Control de Potencia de Generadores Síncronos Multipolo de Imanes Permanentes para Aerogeneradores". Trabajo fin de Master; Universitat Politècnica de Catalunya UPC-Barcelona Tech; 2021. Disponible en: <https://hdl.handle.net/2117/359231>
- [18]. Saura, J., *et al.* "Average value of the DC-link output voltage in multi-phase uncontrolled bridge rectifiers under supply voltage balance and unbalance conditions". *ElectrEng.* 2021, vol. 103, p. 3097–3109. ISSN 2578-1588. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01296-4>
- [19]. Chen, J., Chen, J. "On reducing the shaft torque ripple of small-to-medium-scale wind energy conversion systems using multi-pulse autotransformer rectifier", *Energies*, 2018, vol. 11, n. 2, p. 1–17, 2018. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en11020379>
- [20]. X. Wang, *et al.* "Harmonic reduction for 12-pulse rectifier using two auxiliary single-phase full-wave rectifiers", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, n. 12, p. 12617-12622. DOI 10.1109/TPEL.2020.2992592. ISSN 1941-0107. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9086775>
- [21]. Jayaraman, M. and Sreedevi, V. "Implementation of LC and LCL passive filters for harmonic reduction in PV based renewable energy systems", *National Power Electronics Conference (NPEC)*, IEEE, p. 363-369, 2018. ISBN 978-1-5386-3236-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/NPEC.2017.8310486>
- [22]. Mohammed S. and Jung, J. "A state-of-the-art review on soft-switching techniques for DC–DC, DC–AC, AC–DC, and AC–AC power converters", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, vol. 17, n. 10, p. 6569-6582. DOI 10.1109/TII.2021.3058218. ISSN 1941-0050. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9351620>
- [23]. Sayed, M., *et al.* "Modulation and Control of a DC-AC Converter with High-Frequency Link Transformer for Grid-Connected Applications", *IEEE Access*, 2021, vol. 9, p. 166058-166070. ISSN 2169-3536. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9646902>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Julio Cesar Hernández Chilán: <https://orcid.org/0000-0002-4894-8111>

Redacción del estado del arte, recolección de datos y procesamiento, simulación, análisis de los resultados, y revisión crítica del contenido hasta su aprobación final.

Orly Ernesto Torres Breffe: <https://orcid.org/0000-0001-7781-2611>

Revisión del estado del arte, diseño de la investigación y revisión crítica del contenido hasta su aprobación final.

Jesús Alberto Pérez-Rodríguez: <https://orcid.org/0000-0002-1578-2565>

Revisión del estado del arte, elaboración de figuras y la revisión crítica de su contenido hasta su aprobación final.

Ciaddy Gina Rodríguez Borges: <https://orcid.org/0000-0003-1097-4194>

Revisión del estado del arte, diseño metodológico y la revisión crítica de su contenido hasta su aprobación final.

German Israel Casillas Peña: <https://orcid.org/0000-0002-3578-7953>

Revisión del estado del arte, redacción de conclusiones y la revisión crítica de su contenido hasta su aprobación final.

Yolanda LlosasAlbuerne: <https://orcid.org/0000-0002-5713-0565>

Revisión del estado del arte, diseño metodológico y la revisión crítica de estilo y adecuación a las normas y la revisión crítica de su contenido hasta su aprobación final.