

Integración de Carburo de silicio para aumentar el AEP de sistemas de generación eólica basados en DFIG

Antxon Arrizabalaga¹, Aitor Idarreta¹, Mikel Mazuela¹, Iosu Aizpuru¹, Unai Iraola¹,

José Luis Rodríguez², Daniel Labiano², Ibrahim Alişar³

¹Mondragón Unibertsitatea, ²SGRE Innovation & Technology S.L., ³Siemens Gamesa Renewable Enerji A.S.

Abstract— Gracias a sus prestaciones superiores en comparación con los semiconductores de silicio actuales, los semiconductores de carburo de silicio suponen una tecnología con potencial para aumentar la producción energética anual (AEP) de los generadores eólicos incluso en sistemas de generación eólica basados en generadores asíncronos doblemente alimentados (DFIG). En el artículo se ha modelado un sistema de generación eólica basado en DFIG, se simula con IGBTs de Si, semiconductores híbridos de Si y SiC, y MOSFETs de SiC; en ubicaciones y puntos de trabajo diferentes. Los cálculos demuestran que se obtiene un valioso incremento del AEP, junto con un aumento de eficiencia en todos los puntos de trabajo, siendo este último especialmente alto en puntos de operación clave.

Palabras Clave— Energía eólica, Modelado, SiC, DFIG, AEP.

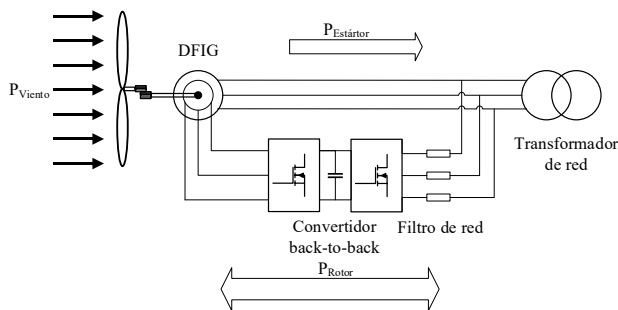


Fig. 1. Sistema de generación eólica basado en DFIG.

I. INTRODUCCIÓN

CON una demanda energética mundial en aumento, y una amenaza constante de alcanzar el punto del cambio climático irreversible, en gran parte por la generación de energía con métodos convencionales (esta última década ha sido la más caliente desde que se recopilan datos [1]), la sociedad está solicitando una revolución energética radical. El objetivo número siete de la Agenda 2030 [2] aprobada por las Naciones Unidas es “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todas las personas”. De forma más específica, el objetivo 7.2 es “De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas”, y el 7.3 es “De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética”. En la Unión Europea también se ha identificado el problema, haciendo que una de las cinco misiones de la nueva iniciativa de investigación científica Horizonte Europa [3] sea “La adaptación al cambio

climático, incluyendo la transformación social”. En este contexto, se considera que cualquier mejora en la eficiencia de sistemas de generación renovable, aumentando así su producción anual de energía (AEP por sus siglas en inglés), es una gran contribución a la resolución de uno de los mayores problemas de la sociedad del futuro.

La tecnología SiC aplicada en los semiconductores de potencia ofrece unas prestaciones superiores a la tecnología basada en Si utilizada hasta ahora [4]–[6]. En [7]–[12] se identifica el carburo de silicio (SiC) como una tecnología con gran potencial para poder obtener dicha mejora en eficiencia de la energía eólica, además de en [13], donde se consigue una gran reducción en el sistema de refrigeración y los componentes pasivos. En [14] se analiza el impacto de utilizar SiC en un sistema de generación eólica basado en una máquina de imanes permanentes y convertidor de potencia completa (PM y FC por sus siglas en inglés), obteniendo resultados sobresalientes. Pero muchos fabricantes de turbinas eólicas (Vestas, Siemens-Gamesa, Acciona, General Electric, Mitsubishi, Alstom, Repower, por ejemplo) ofrecen soluciones basadas en DFIG hasta la potencia de 6 MW (Senvion, Sinovel, por ejemplo), Fig. 1. Debido a que el convertidor de potencia procesa como máximo alrededor del 30 % de la potencia [15], llegando a procesar potencias muy bajas en ciertos puntos de operación, se considera que estudiar el efecto del SiC en esta configuración puede ser de especial interés.

El análisis se realiza mediante simulaciones, conectando modelos de todos los componentes que forman un sistema de generación eólica basado en DFIG, Fig. 1, incluyendo la opción de poder considerar diferentes ubicaciones en la simulación. Esto se consigue mediante una distribución Weibull con factor de forma 2 [16]–[20] que provee a la simulación de diferentes perfiles de viento y de las horas anuales en las cuales se trabaja en cada condición, dependiendo de la velocidad media anual del viento en la región seleccionada.

El estudio se centra en la reducción de pérdidas debido al uso de semiconductores de SiC, cuya mejora de eficiencia impacta directamente en el AEP, permitiendo analizar el impacto que tiene esta tecnología en la resolución del reto global al cual se enfrenta el planeta en la actualidad.

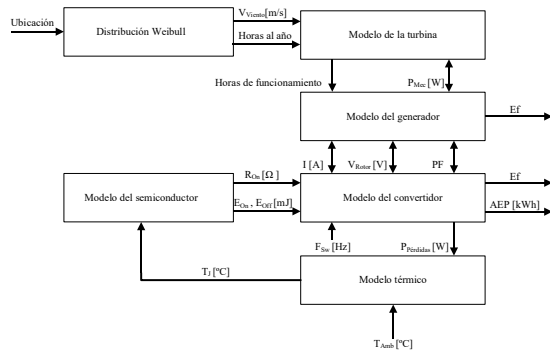


Fig. 2. Diagrama del modelo de un sistema de generación eólica basada en DFIG.

II. MODELO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA BASADO EN DFIG

Basado en un ejemplo de un sistema de generación eólica de 2 MW que se muestra en [15], se modela el sistema presentado en Fig. 1. Para ello se utilizan seis modelos conectados: una turbina de 2 MW, un generador DFIG de dos polos y una tensión nominal de estator de 690 V, un convertidor binivel back to back conectado al rotor, con su modelo térmico, un modelo del semiconductor, en donde se variarán los parámetros analizando semiconductores IGBT de Si, semiconductores híbridos con IGBTs de Si y diodos de SiC y MOSFETs de SiC; y por último, el modelo Weibull que proporcionará los datos de las condiciones del viento a la simulación, Fig. 2.

A. Modelo de perfil de viento basado en distribución Weibull

Una distribución Weibull aplicada a la meteorología, y más concretamente a la eólica, indica la densidad de probabilidad de que haya una velocidad de viento en una ubicación y momento dados. La ubicación es clave, ya que la densidad de probabilidad se desplazará hacia vientos de más o menos velocidad dependiendo de la velocidad media anual del viento en dicha ubicación. Por esta razón, la simulación comienza introduciendo el dato de la velocidad media anual en la región a analizar. Sabiendo la probabilidad de que haya cierta velocidad de viento en un instante y las horas

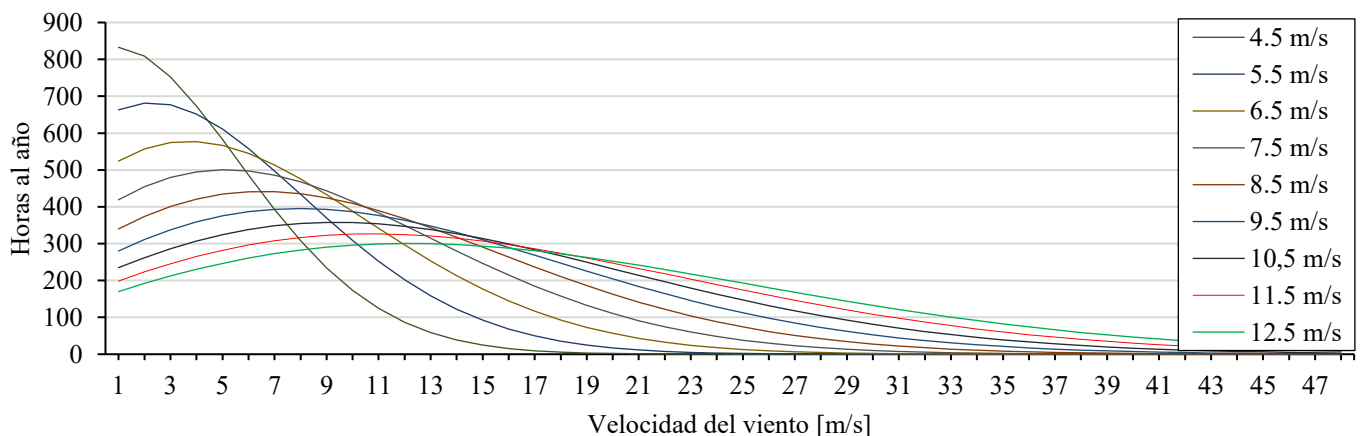


Fig. 4. Horas al año a cada velocidad de viento dependiendo de la media anual de la velocidad de viento de la ubicación.

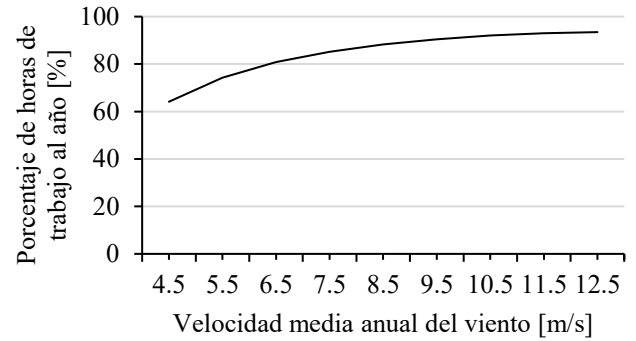


Fig. 3. Porcentaje de horas de trabajo al año dependiendo de la velocidad media anual de viento de la ubicación.

existentes en un año, la distribución Weibull con un factor de forma 2 en este caso, determina cuántas horas al año habrá en cada condición de viento en cada ubicación, Fig. 4. El dato de la velocidad, junto con las horas al año a esa velocidad se trasladan al modelo de la turbina.

B. Modelo de la turbina

El modelo de la turbina es principalmente una representación del comportamiento aerodinámico de la turbina. Se ha basado en el ejemplo de 2 MW disponible en [15], creando look-up-tables a partir de los datos proporcionados por fabricantes. La salida del modelo es la potencia mecánica en el eje rápido, realizando un control MPPT, además de las horas de trabajo anuales en cada ubicación. Este último dato es importante, debido a que, dependiendo de la velocidad media anual de la ubicación, solo un porcentaje total de horas podrá ser aprovechado para generar energía. En la Fig. 3 se muestra el porcentaje de horas totales de trabajo para cada región con cierta velocidad media anual de viento. En velocidades menores a 3 m/s, la turbina estará en el modo parking por vientos demasiado bajos, en cambio, a partir de 25 m/s, la turbina tendrá que ser frenada y puesta en modo parking por seguridad. El umbral para considerar una ubicación para la generación eólica se encuentra a una velocidad media anual de 6,5 m/s [21], siendo las regiones con una velocidad media anual de 9,5 m/s óptimas.

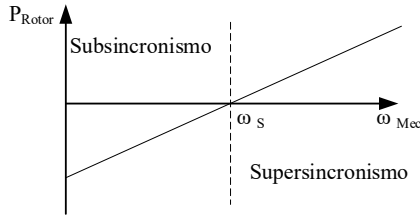


Fig. 5. Potencia en el rotor, dependiendo de la velocidad angular mecánica.

TABLA I

CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR UTILIZADO EN LA SIMULACIÓN

Parámetro	Valor	Unidad	Característica
$P_{Nominal}$	2	MW	Potencia nominal
p	2		Pares de polos
$V_{Estator}$	690	V	Tensión nominal del estator
V_{Rotor}	2070	V	Tensión nominal del rotor
L_m	2,5	mH	Inductancia magnetizante
$L_{\sigma estator}$	87	μ H	Inductancia de fuga del estator
$R_{Estator}$	2,6	m Ω	Resistencia del estator
$L_{\sigma rotor}$	87	μ H	Inductancia de fuga del rotor referenciado al estator
R_{Rotor}	2,9	m Ω	Resistencia del rotor referenciado al estator
$L_{Estator}$	2,587	mH	Inductancia del estator: $L_{Estator} = L_m + L_{\sigma estator}$
L_{Rotor}	2,587	mH	Inductancia del rotor: $L_{Rotor} = L_m + L_{\sigma rotor}$

C. Modelo del generador

Se utilizan ecuaciones analíticas derivadas del modelo eléctrico del DFIG para considerar el funcionamiento del generador [15]. El modelo utiliza la potencia mecánica en el eje rápido, junto con las horas de trabajo proporcionadas por el modelo de la turbina, para generar las corrientes de salida, la tensión en el rotor y el factor de potencia, que serán utilizados por el bloque que representa el convertidor. La principal característica de los generadores DFIG es que pueden generar potencia no solo por el estator, sino que también por el rotor [15], siendo esta una de las razones por las que los grandes fabricantes de turbinas ofrecen esta configuración alrededor de 2 MW de potencia.

En subsincronismo (velocidad angular menor que la velocidad angular de sincronismo), el rotor consume potencia de la red, pero en supersincronismo (velocidad angular mayor que la velocidad angular de sincronismo), el rotor devuelve potencia a la red, Fig. 5. Esto significa que en sincronismo, la potencia procesada por el rotor es idealmente cero, consumiendo solamente la potencia justa para magnetizar la máquina, como se muestra en Fig. 5. Cabe recordar que esta será la potencia que tendrá que ser procesada por el convertidor, 20 % como máximo en esta aplicación, influyendo en el diseño del convertidor y en las pérdidas, a diferencia de la configuración FC, donde toda la potencia generada es procesada por el convertidor.

TABLA II
SEMICONDUCTORES UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN

Tecnología y referencia	Tensión nominal [V]	Corriente nominal [A]	Configuración lado rotor	Configuración lado red
Si IGBT SKiiP 3614	1700	600	3 módulos en paralelo	2 módulos en paralelo
Híbrido 2MSI400VAE-170-53	1700	400	4 módulos en paralelo	2 módulos en paralelo
SiC MOSFET CAS300M17B M2	1700	225	6 módulos en paralelo	3 módulos en paralelo

D. Modelo del semiconductor

El modelo del semiconductor dota al modelo del convertidor de la energía de conmutación y el modelo de conducción de cada semiconductor dependiendo de la temperatura en la unión.

Estos parámetros son estimados utilizando la técnica curve-fitting de las hojas de datos de los proveedores. En [5] se identifica la ventaja de utilizar SiC MOSFETs respecto a Si IGBTs en bajas corrientes. Estas ventajas pueden apreciarse en las características de conducción de los tres semiconductores. En la Fig. 6 (a), se comparan las características de conducción de los tres semiconductores utilizados en esta simulación. Tanto el IGBT de Si como el semiconductor híbrido, que contiene un IGBT de Si, experimentan una caída de tensión directa en conducción. Este efecto no se manifiesta en los MOSFETs de SiC, siendo sus pérdidas en conducción mucho menores en bajas corrientes.

También se analizan las características de conmutación en Fig. 6 (b). La energía necesaria para conmutar un elemento bipolar como el IGBT de Si o el módulo híbrido es mayor a la de un elemento unipolar por la existencia de las corrientes de cola, que no se dan en la estructura unipolar del MOSFET de SiC, debido a que tienen una unión pn menos.

E. Modelo del convertidor

El modelo del convertidor utiliza ecuaciones analíticas para describir el funcionamiento del convertidor binivel back to back en cada punto de operación. La información de los semiconductores es provista por el modelo del semiconductor, mientras que las corrientes de entrada el índice de modulación y el factor de potencia se adquieren del modelo del generador. Nótese que la corriente del lado del generador es mayor que la corriente del lado red, necesitando más módulos en paralelo. La frecuencia de conmutación es impuesta por el usuario, 2,5 kHz en este análisis. El modelo del convertidor calcula las pérdidas, que son dirigidas al modelo térmico, y también son restadas a la potencia generada por el sistema de generación eólica. Con esto, y sabiendo las horas a las que el sistema trabaja en cada punto, se calcula finalmente el AEP.

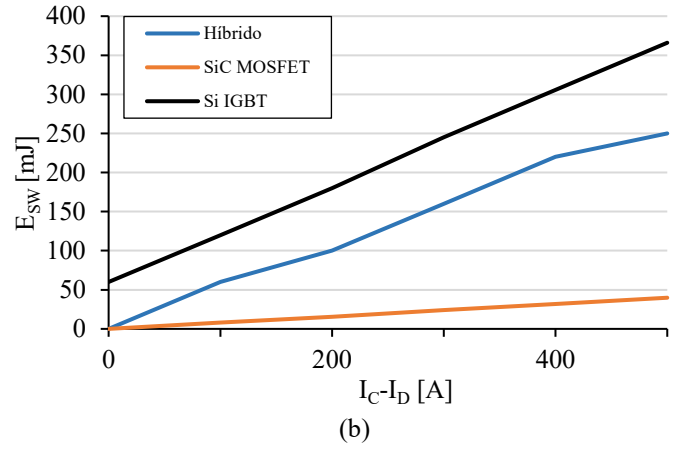
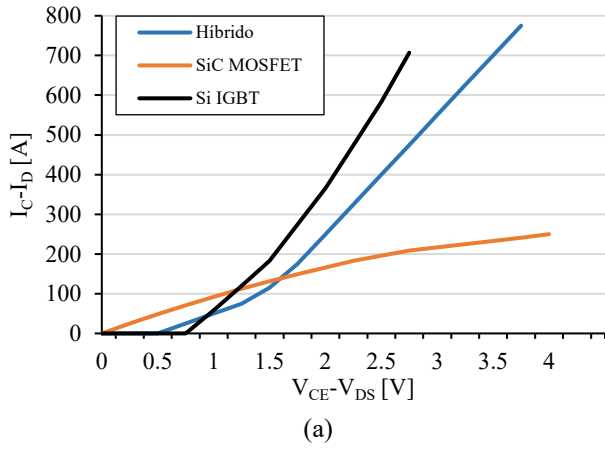


Fig. 6. Comparativa de (a) características de conducción, (b) energía de conmutación de los tres semiconductores utilizados a 150° C.

En este punto es importante recordar que el convertidor solo procesa la potencia del rotor, 20 % como máximo en esta aplicación, mientras que la potencia del estátor es considerada solo para computar el AEP. El modelo también permite calcular la eficiencia del convertidor en diferentes puntos de operación. Esta capacidad es de especial interés cerca del punto de sincronismo, ya que el convertidor procesa muy poca potencia, trabaja con bajas corrientes, y la diferencia entre las tres tecnologías estudiadas se ve acentuada en este punto, Fig. 6 (a).

La expresión genérica de las pérdidas de conducción de los semiconductores es (1) [22].

$$P_{Cond} = V_{th} \cdot I_{AV} + R_{ON} \cdot I_{RMS}^2 \quad (1)$$

siendo (2) la expresión resultante en el caso de un MOSFET, (3) para un IGBT y (4) en el caso de un diodo. ma es el índice de modulación (5) en el convertidor realizando la función de rectificador y (6) en el que realiza la función de inversor. Los parámetros de cada semiconductor son introducidos en cada punto de operación y en la ecuación correspondiente. El factor V_{th} presente en las ecuaciones del IGBT y del diodo representa el umbral de tensión de conducción que provoca la caída de tensión directa analizada en la Fig. 6 (a).

$$P_{Cond_MOSFET} = \frac{1}{2} \cdot \left(R_{ON} \cdot \frac{I_{max}^2}{4} \right) + ma \cdot \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{R_{ON} \cdot I_{max}^2}{3 \cdot \pi} \right) \quad (2)$$

$$P_{Cond_IGBT} = \frac{1}{2} \cdot \left(V_{th} \cdot \frac{I_{max}}{\pi} + R_{ON} \cdot \frac{I_{max}^2}{4} \right) + ma \cdot \cos(\varphi) \cdot \left(V_{th} \cdot \frac{I_{max}}{8} + \frac{R_{ON} \cdot I_{max}^2}{3 \cdot \pi} \right) \quad (3)$$

$$P_{Cond_DIODO} = \frac{1}{2} \cdot \left(V_{th} \cdot \frac{I_{max}}{\pi} + R_{ON} \cdot \frac{I_{max}^2}{4} \right) - ma \cdot \cos(\varphi) \cdot \left(V_{th} \cdot \frac{I_{max}}{8} + \frac{R_{ON} \cdot I_{max}^2}{3 \cdot \pi} \right) \quad (4)$$

$$ma_{rectificador} = \frac{V_{ac}}{V_{dc}/2} \quad (5)$$

$$ma_{inversor} = \frac{2\sqrt{2}V_{linea}}{\sqrt{3}V_{dc}} \quad (6)$$

Las pérdidas de conmutación se calculan con (7). Para

cada semiconductor se obtienen los parámetros a , b y c utilizando la técnica curve-fitting en las curvas presentadas en la Fig. 6 (b) y para diferentes temperaturas, utilizando la técnica presentada en [7].

$$P_{Sw} = f_{sw} \cdot \frac{V_{bus}}{V_{100FIT}} \cdot \left(\frac{a}{2} + \frac{b \cdot I_{max}}{\pi} + \frac{c \cdot I_{max}^2}{4} \right) \quad (7)$$

III. SIMULACIÓN Y DISCUSIÓN

En esta sección se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas. Se han dado dos enfoques diferentes a los resultados. En el primero se analiza el efecto de la tecnología SiC en la eficiencia del convertidor back to back en un sistema de generación eólica DFIG a diferentes velocidades de viento. Con ello, se puede observar el impacto de los diferentes semiconductores en todos los puntos de trabajo. El segundo enfoque está relacionado con la producción anual de energía. Debido a que utilizando semiconductores de SiC se reducen las pérdidas del convertidor, el AEP del sistema eólico aumenta.

A. Impacto en la eficiencia del convertidor

Para evaluar el impacto de los semiconductores de SiC en todos los puntos de operación a los que se verá sometido el convertidor, se ha simulado el modelo bajo unas condiciones de viento constante y se ha calculado la eficiencia del convertidor. Se ha analizado todo el rango de operación de la turbina, desde la velocidad de arranque, 3 m/s, hasta la condición de frenado, 25 m/s, Fig. 7.

En cada punto de operación el rotor trabaja a potencias diferentes, siendo esa la potencia a procesar por el convertidor. Durante todos los puntos de operación la eficiencia del convertidor de SiC MOSFETs es mayor a los otros dos, variando la diferencia a lo largo del rango de operación. A velocidades bajas, la potencia en el rotor es grande, siendo además consumida por la red. En estas condiciones de alta corriente las pérdidas de conducción se igualan, Fig. 6 (a), pero debido a que la energía de conmutación es menor en todo el rango de operación para el SiC MOSFET, Fig. 6 (b), la eficiencia del convertidor con este último semiconductor es mayor.

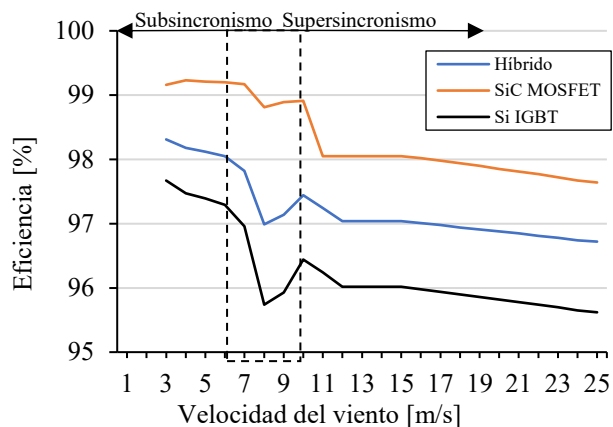


Fig. 7. Eficiencia del convertidor para los tres semiconductores analizados en los rangos de velocidad de la turbina.

Al aumentar la velocidad del viento, y con ello la velocidad angular de la turbina, la potencia en el rotor disminuye, ya que se acerca al punto de sincronismo (ω_s). En este punto, las corrientes en la entrada del convertidor descienden, y el efecto de la caída de tensión directa en el IGBT se acentúa, provocando una caída drástica de la eficiencia. Al no sufrir este efecto, las prestaciones del SiC MOSFET se mantienen.

Al alcanzar el punto de sincronismo (8 m/s), las corrientes en el rotor se invierten, y pasa a devolver potencia a la red en su operación de supersincronismo. A altas corrientes, el IGBT de Si sí es competitivo en términos de eficiencia. A medida que sube la velocidad, la corriente sigue aumentando, siguiendo una tendencia similar en la caída de eficiencia entre las tres tecnologías de semiconductores.

B. Impacto en la producción anual de energía

Debido a que la diferencia en las pérdidas es variable durante el rango de operación del convertidor, se ha calculado la producción anual de energía en diferentes ubicaciones con los tres semiconductores analizados. Se analizan ubicaciones con velocidades de viento medias anuales entre 4,5 y 12,5 m/s siendo los más comunes en regiones continentales [23], ya que comúnmente no se consideran sistemas de generación eólica basados en DFIG para offshore. En las regiones con velocidades de viento medias anuales bajas, se trabaja muchas horas en puntos de operación donde la velocidad del viento es menor al punto de sincronismo, Fig. 4. En estos puntos de operación la diferencia de eficiencia entre las tres tecnologías es mayor, Fig. 7; por lo que el porcentaje de incremento de energía aumenta exponencialmente según se reduce la velocidad del viento media anual, Fig. 8. Este análisis se ha realizado respecto al AEP calculado para el mismo sistema con la solución convencional de IGBTs de Si en el convertidor, y sin tener en cuenta las pérdidas auxiliares.

C. Aplicación de los resultados

En Fig. 7 se observa que el convertidor con los SiC MOSFETs tiene una mejor eficiencia en todos los puntos de operación, llegando a ser un 3,07 % mejor en el punto de sincronismo. Esto significa que este convertidor tendrá

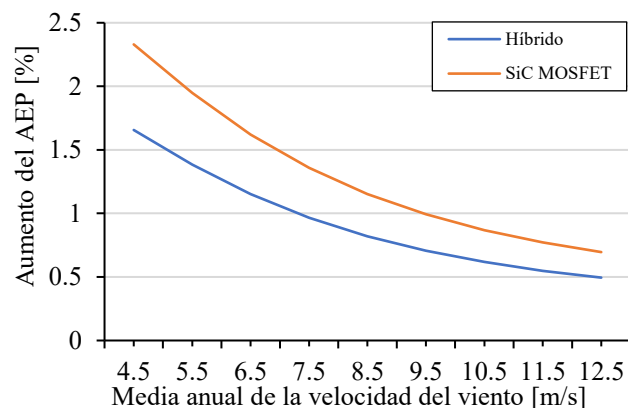


Fig. 8. Aumento del AEP respecto a la tecnología convencional de IGBTs de Si con el uso de los semiconductores de SiC, dependiendo de la media anual de la velocidad de viento de la ubicación.

menos pérdidas en todos los puntos de trabajo. Esta reducción de pérdidas permite reducir la necesidad de refrigeración del convertidor. Teniendo en cuenta que el volumen del convertidor es en gran medida debido al sistema de refrigeración, esta medida reducirá el volumen y el peso del convertidor final. En este punto, se podría llegar a plantear una refrigeración por aire en vez de refrigerar el convertidor con líquido. Esta medida ahorraría todo el coste y volumen del circuito hidráulico, además de cambiar el consumo de la bomba por el de un ventilador.

Además, el incremento del AEP podría hacer que las regiones hasta ahora no consideradas para la generación eólica sean planteadas para ese fin. El aumento del AEP en regiones con velocidades de viento medias anuales de 4,5 m/s es del 2,3 %. Es cierto que, aunque el aumento sea muy considerable, el AEP neto de dichas regiones no permite la instalación de sistemas de generación eólica; sin embargo, en ubicaciones consideradas óptimas para la instalación de generadores eólicos (9,5 m/s), el incremento del AEP es del 0,99 %, siendo un porcentaje realmente interesante para los fabricantes. En regiones con medias anuales de velocidad de viento menores y hasta ahora no utilizadas para la generación eólica (7,5 m/s como por ejemplo en el oeste de África o la estepa de Kazajistán [23]), el aumento del AEP es mayor al 1.3 %.

Si ese incremento en la producción energética dada en una ubicación ideal (9,5 m/s) tuviese que ser generada con carbón, en vez de forma renovable, se produciría la emisión de 9464 kg de CO_2 [24]. Este número equivale a conducir 72800 km anualmente, con un vehículo que cumpla los objetivos de emisiones marcados a los vehículos por la Unión Europea en 2015 [25]. Cabe recordar que todos estos cálculos equivalen a la producción de una sola turbina y sin considerar las pérdidas auxiliares, pudiendo ser muy superiores en un parque eólico de varias turbinas.

Estas aplicaciones están completamente alineadas con los objetivos y retos marcados por las Naciones Unidas y la Unión Europea para el futuro inmediato, mencionados en la introducción de este artículo, siendo una contribución importante a la sociedad en su conjunto.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo identifica dos enfoques en los cuales la aplicación del carburo de silicio mejora las prestaciones de los sistemas de generación eólica basados en DFIG. En subsincronismo se mejora la eficiencia del convertidor hasta un 1.91 % con MOSFETs de SiC y un 0.76 % con semiconductores híbridos. En supersincronismo la mejora es de hasta un 2.02 % con MOSFETs de SiC y del 1.08 % con semiconductores híbridos. En sincronismo, la mejora llega a ser del 3.07 % con MOSFETs de SiC, maximizando sus características de conducción respecto a los IGBTs. Estas eficiencias superiores permiten reducir los sistemas de refrigeración y el volumen final del convertidor.

En cuanto al incremento que supone esta mejora de eficiencia en el AEP, se ha identificado que el impacto es mayor en regiones donde la velocidad media anual del viento es inferior. En ubicaciones óptimas para sistemas de generación eólica (9,5 m/s) se obtiene un incremento del 0.992 % con MOSFETs de SiC, siendo el incremento del 0.705 % con semiconductores híbridos. Se observa también un aumento superior al 1.3 % en regiones con velocidad del viento media anual de 7,5 m/s con el uso de MOSFETs de SiC, haciendo que estas ubicaciones adquieran interés para la instalación de sistemas de generación eólica. El trabajo es replicable parametrizando los modelos para un sistema concreto. El coste asociado al uso de semiconductores de SiC podría verse compensado tanto con el aumento del AEP, como con la reducción de la refrigeración, aunque este análisis requiere información detallada de fabricantes de semiconductores, y no se ha abordado en este trabajo.

Tanto la mejora en eficiencia, como el aumento del AEP que ello conlleva, son contribuciones a la búsqueda de soluciones a uno de los mayores retos de la sociedad del futuro, estando completamente alineados con los objetivos y líneas de investigación científicas definidas por las Naciones Unidas y la Unión Europea.

REFERENCIAS

- [1] "2019 Was the Second-Hottest Year Ever, Closing Out the Warmest Decade - The New York Times." [Online]. Available: <https://www.nytimes.com/interactive/2020/01/15/climate/hottest-year-2019.html>. [Accessed: 17-Jan-2020].
- [2] "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development .. Sustainable Development Knowledge Platform." [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>. [Accessed: 09-Jan-2020].
- [3] "Mission area: Adaptation to climate change including societal transformation | European Commission." [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/horizon-europe-next-research-and-innovation-framework-programme/mission-area-adaptation-climate-change-including-societal-transformation_en. [Accessed: 09-Jan-2020].
- [4] T. Kimoto, "Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 4, 2015.
- [5] "Industry's First Reliable All-SiC Power Module for High-Efficiency Power Conversion Solutions," *Bodo's Power Syst.*, pp. 48–50, 2013.
- [6] A. Fayyaz, "Performance and Robustness Characterisation of SiC Power MOSFETs," *University of Nottingham*. 2017.
- [7] H. Zhang and L. M. Tolbert, "SiC's Potential Impact on the Design of Wind Generation System," 2008.
- [8] I. Kortazar, I. Larrazabal, and P. Friedrichs, "Analysis of hybrid modules with Silicon Carbide diodes, comparison with full silicon devices and the impact in Wind applications," in *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2016 ECCE Europe*, 2016.
- [9] W. L. Erdman, D. Grider, and E. Vanbrunt, "4500 volt Si/SiC hybrid module qualification for modern megawatt scale wind energy inverters," in *2nd IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications, WIPDA 2014*, 2014, pp. 1–6.
- [10] A. Hussein and A. Castellazzi, "Variable frequency control and filter design for optimum energy extraction from a SiC wind inverter," in *2018 International Power Electronics Conference, IPEC-Niigata - ECCE Asia 2018*, 2018, pp. 2932–2937.
- [11] R. Dey and S. Nath, "Replacing silicon IGBTs with SiC IGBTs in medium voltage wind energy conversion systems," in *India International Conference on Power Electronics, IICPE*, 2017, vol. 2016-Novem.
- [12] A. Hussein and A. Castellazzi, "Comprehensive design optimization of a wind power converter using SiC technology," in *6th IEEE International Conference on Smart Grid, icSmartGrids 2018*, 2019, pp. 34–38.
- [13] A. Castellazzi, E. Gurpinar, Z. Wang, A. S. Hussein, and P. G. Fernandez, "Impact of wide-bandgap technology on renewable energy and smart-grid power conversion applications including storage," *Energies*, vol. 12, no. 23, pp. 1–14, 2019.
- [14] H. Zhang and L. M. Tolbert, "Efficiency Impact of Silicon Carbide Power Electronics for Modern Wind Turbine Full Scale Frequency Converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, 2011.
- [15] G. Abad, J. López, M. A. Rodríguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, *Doubly Fed Induction Machine*. 2011.
- [16] L. Van Der Auwera, F. De Meyer, and L. M. Malet, "The use of the Weibull three-parameter model for estimating mean wind power densities," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 19, no. 7, pp. 819–825, 1980.
- [17] A. Sarkar, G. Gugliani, and S. Deep, "Weibull model for wind speed data analysis of different locations in India," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 7, pp. 2764–2776, 2017.
- [18] A. N. Celik, "A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey," *Renew. Energy*, vol. 29, no. 4, pp. 593–604, 2004.
- [19] A. S. S. Dorvlo, "Estimating wind speed distribution," *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 17, pp. 2311–2318, 2002.
- [20] E. Gómez-Lázaro *et al.*, "Probability density function characterization for aggregated large-scale wind power based on Weibull mixtures," *Energies*, vol. 9, no. 2, pp. 1–15, 2016.
- [21] H. Cetinay, F. A. Kuipers, and A. N. Guven, "Optimal siting and sizing of wind farms," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 51–58, 2017.
- [22] B. Ozpineci, L. M. Tolbert, S. K. Islam, and M. Hasanuzzaman, "Effects of silicon carbide (SiC) power devices on HEV PWM inverter losses," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2, no. C, pp. 1061–1066, 2001.
- [23] "Global Wind Atlas." [Online]. Available: <https://globalwindatlas.info/>. [Accessed: 09-Jan-2020].
- [24] "Carbon Dioxide Emission Factors for Coal." [Online]. Available: https://www.eia.gov/coal/production/quarterly/co2_article/co2.html. [Accessed: 09-Jan-2020].
- [25] "Reducing CO2 emissions from passenger cars | Climate Action." [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en. [Accessed: 09-Jan-2020].