

BENEFICIOS DE LOS CONVERTIDORES DE POTENCIA MODULARES PARA APLICACIONES EN AEROGENERADORES

EL OBJETIVO DEL ANÁLISIS QUE SE PRESENTA EN ESTE ARTÍCULO ES CUANTIFICAR LA IMPORTANCIA DE LOS DIFERENTES FACTORES QUE AFECTAN A LA RENTABILIDAD DE UN AEROGENERADOR. ESTE ANÁLISIS SE HA ENFOCADO EN EL EFECTO DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA, Y TODOS LOS DATOS DE FIABILIDAD EMPLEADOS SE HAN OBTENIDO DE LOS REGISTROS DE SERVICIO Y DE LA EXPERIENCIA EN I+D DE INGETEAM. ESTE ESTUDIO ES VITAL PARA LA EÓLICA MARINA (Y OTROS EMPLAZAMIENTOS DE DIFÍCIL ACCESO), DONDE EL ACCESO PARA MANTENIMIENTO PUEDE SER DIFÍCIL O CARO.

Definición del escenario

El escenario hipotético es una etapa de potencia de 6 MW con la curva de potencia nominal que aparece en la Figura 1. Las velocidades de viento de arranque y parada son de 3 y 26 m/s respectivamente. La velocidad base del viento en el emplazamiento se considera 7 m/s (3.863 horas equivalentes), el período correctivo estándar se considera que es de un mes y la vida útil considerada es de 30 años. El precio del MWh se ha fijado en 100\$ por simplicidad. Con este precio, en el escenario estándar aplica lo siguiente:

- Una reducción del 1% en la Producción Media Anual de Energía implica 231,7 MWh menos al año, y en consecuencia 23.170 \$ menos al año.

En este escenario se han considerado las siguientes desviaciones de los parámetros:

- Modularidad: 1, 2 y 3 líneas de conversión.
- Eficiencia: 97 - 98%.
- Período correctivo: de 1 a 8 (días), de 1 a 4 (semanas), de 1 a 12 (meses).
- Velocidad media del viento: de 5 a 8 m/s.

En los siguientes cálculos se ha considerado una Probabilidad de Fallo del 36%, para el caso de una línea de conversión, del 58% para dos líneas de conversión y del 72% para tres líneas de conversión. Esto resulta de mantener la misma probabilidad de fallo para el control y los componentes auxiliares, y de multiplicar la probabilidad de fallo de los dispositivos de potencia por el número de líneas de conversión.

Análisis de parámetros

En este apartado se analiza el efecto de varios parámetros que afectan a la Producción Media Anual de Energía de un aerogenerador.

Eficiencia de la línea de conversión

Se ha dado mucha importancia a la eficiencia de la etapa de conversión a cargas parciales. Esto, obviamente, afecta directamente a la energía producida por un aerogenerador, pero el efecto no es fácilmente cuantificable. La eficiencia de la etapa de conversión solamente afecta durante la operación a carga parcial (durante el seguimiento de la potencia máxima, MPT, por sus siglas en inglés), una vez que se ha alcanzado la potencia nominal, el regulador de pitch rechaza la energía disponible del viento para evitar sobre-potencias.

Como consecuencia de esto, el efecto de la eficiencia depende enormemente de la distribución del viento en el emplazamiento. En un caso extremo, se puede imaginar un emplazamiento con una velocidad nominal del viento durante todo el tiempo, en este emplazamiento hipotético, la eficiencia de la etapa de conversión es inútil, pues no se produce operación a carga parcial.

BENEFITS OF MODULAR POWER CONVERTERS FOR WIND TURBINE APPLICATIONS

THE PURPOSE OF THIS ANALYSIS IS TO HIGHLIGHT THE IMPORTANCE OF THE DIFFERENT FACTORS THAT IMPACT ON THE PROFITABILITY OF A WIND TURBINE. THIS ANALYSIS HAS FOCUSED ON THE IMPACT OF THE POWER CONVERTER AND ALL THE RELIABILITY DATA HAS BEEN OBTAINED FROM INGETEAM'S SERVICE RECORDS AND THEIR R&D EXPERTISE. THIS STUDY IS VITAL FOR OFFSHORE WIND POWER (AND OTHER HARD-TO-REACH SITES) WHERE MAINTENANCE ACCESS MAY BE DIFFICULT OR EXPENSIVE.

Defining the scenario

The hypothetical scenario is a 6 MW power stage with the rated power curve as shown in Figure 1. It has cut in and cut out wind speeds of 3 and 26 m/s respectively. The base site wind speed is understood as being 7 m/s (3,863 equivalent hours); the standard corrective period is taken as one month and the standard lifetime as 30 years. The price per MWh is understood as being \$100 for the sake of simplicity. At this price, in the standard scenario, the following applies:

- A 1% reduction in MAEP represents 231.7 MWh less per year, resulting in \$23,170 on the year in total.

Within this scenario, the following parameter deviations have been taken into account:

- Modularity: 1, 2 and 3 conversion lines.
- Efficiency: from 97 to 98%.
- Corrective period: from 1 to 8 (days), 1 to 4 (weeks), 1 to 12 (months).
- Mean wind speed: from 5 to 8 m/s.

In the following calculations, a PTF of 36% has been taken into account for the single conversion line stage; 58% for the two conversion line stage; and 72% for the three-line stage. This results in keeping the same probability to fail (PTF) for the control and auxiliary components, and by multiplying the PTF of the power devices times the number of conversion lines.

Parameter analysis

This section analyses the impact of the various parameters that affect the MAEP of a wind turbine.

Efficiency of the conversion line

Much importance has been attributed to the efficiency of the conversion stage at partial loads. Obviously this has a direct impact on the energy produced by a wind turbine, but its effect is not straightforward. The efficiency of the conversion stage only impacts during partial load operation (during maximum power tracking or MPT). Once the rated power has been achieved, the pitch control rejects the power available from the wind to avoid overpowering.

As a consequence of this, the efficiency impact largely depends on the wind distribution of the site. In an extreme hypothetical situation, one can imagine a site with full time rated wind speed where the efficiency of the conversion stage is useless, as no partial load operation is present.

Figura 1 | Figure 1

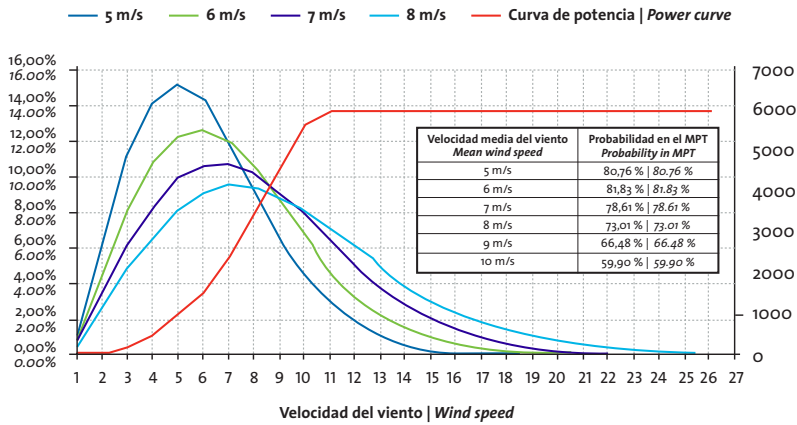
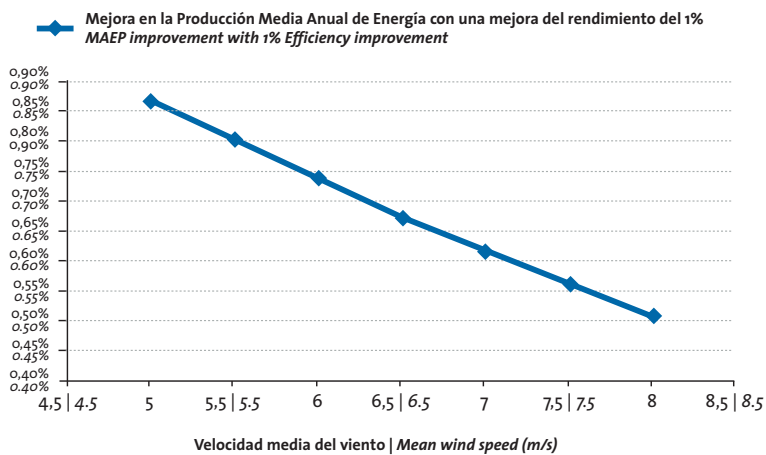


Figura 2. Mejora de la Producción Media Anual de Energía vs Velocidad media del viento para un aumento de eficiencia del 1% | Figure 2 MAEP improvement vs Mean wind speed for an efficiency increase of 1%



Normalmente, a medida que aumenta la velocidad media del viento en el emplazamiento, el efecto de la eficiencia de la etapa de conversión pasa a ser menos importante, porque son menos probables horas de funcionamiento a carga parcial.

Período correctivo

El período correctivo juega un papel muy importante en la Producción Media Anual de Energía de la etapa de conversión, porque define el tiempo durante el cual la etapa de conversión opera con un evento.

Esto afecta directamente a la energía producida y aumenta la probabilidad de que un segundo (o tercer) evento ocurra. Implícitamente, esto incluye la Probabilidad de Fallo, ya que determina el número y frecuencia de los eventos que ocurren. En una aplicación marina, el mantenimiento correctivo podría llevarse a cabo semanalmente, dado que no siempre es posible el acceso directo a los aerogeneradores, ya sea por razones económicas o por factores climáticos.

Si el mantenimiento correctivo se va a realizar en una base de tiempo diaria, el efecto de la modularidad en la Producción Media Anual de Energía se reduce, ya que un evento solo estará activo durante unos pocos días.

Velocidad media del viento

La velocidad media del viento en un emplazamiento es un factor importante para obtener la Producción Media Anual de Energía de

Generalmente hablando, a medida que la velocidad media del viento del sitio aumenta, el efecto de la eficiencia de la etapa de conversión se vuelve menos importante, ya que son menos probables las horas de funcionamiento a carga parcial.

Corrective period

El período correctivo juega un papel clave en el MAEP de la etapa de conversión, ya que define el tiempo durante el cual la etapa de conversión opera con un evento. Esto afecta directamente la energía producida y aumenta la probabilidad de que un segundo (o tercer) evento ocurra.

Esto incluye implícitamente la probabilidad de fallo (PTF) ya que esto determina el número y frecuencia de los eventos que podrían ocurrir. En una aplicación offshore, el mantenimiento correctivo puede llevarse a cabo con acceso inmediato a las turbinas eólicas, ya que no siempre es posible debido a factores económicos o climáticos.

Si el mantenimiento correctivo va a ser realizado de forma diaria, el efecto de la modularidad en el MAEP se reduce, ya que un evento solo estará activo durante unos pocos días.

Mean wind speed

La velocidad media del viento de un sitio es un factor importante para obtener el MAEP de las diferentes etapas de conversión. Se entiende que las distribuciones de probabilidad de la velocidad del viento siguen la distribución Weibull con un factor de forma de 2. Como se puede deducir, a medida que la velocidad media del viento aumenta, el MAEP de las diferentes etapas de conversión tienden a converger con la línea de conversión única. La razón para esto es que en los sitios de alta velocidad del viento hay un alto nivel de pérdida de energía durante la operación parcial (en el caso de varias líneas de conversión).

the Weibull distribution with a form factor of 2. As can easily be deduced, as the mean wind speed increases, the MAEP of the different multiple conversion lines stages tend to converge with the single conversion line. The reason for this is that at high wind speed sites there is a high level of energy loss during partial operation (in the case of several conversion lines).

Conclusions

Having analysed the different factors that affect the amount of energy produced by a wind turbine, it can be concluded that the most influential parameter in terms of MAEP reduction is the corrective period (which implicitly includes the PTF). Taking in account the theoretical scenario in which a two conversion lines stage has twice the probability to fail (in the power devices) than that of a one, the MAEP is still higher in the former case thanks to its ability to continue to produce energy despite one failed line.

Figure 4 sets out this scenario and shows how a two conversion lines stage tends to provide higher MAEP (at around 1.07%) thanks to the ability of the wind turbine to keep running when a fault occurs. This could represent an additional income of around \$24,791 per year with a two conversion lines stage.

Taking into account the following scenario obtained from a real case analysis performed by the Wind Department at Ingeteam:

las diferentes etapas de conversión. Se ha considerado que la distribución de probabilidades de la velocidad del viento sigue una función de Weibull, con un factor de forma de 2. Como se puede deducir fácilmente, a medida que la velocidad media del viento aumenta, la Producción Media Anual de Energía de las diferentes etapas de conversión con líneas múltiples tiende a converger con la de la línea de conversión simple. Esto se puede explicar porque en emplazamientos con vientos fuertes la pérdida de energía durante la operación a carga parcial (en el caso de varias líneas de conversión) es alta.

Conclusiones

Después de analizar los diferentes factores que afectan a la cantidad de energía producida por un aerogenerador, se puede concluir que el parámetro que más afecta en términos de la reducción de la Producción Media Anual de Energía es el período correctivo (lo que implícitamente incluye a la Probabilidad de Fallo). Considerando el escenario hipotético en el que una etapa de dos líneas de conversión tiene el doble de probabilidad de fallo (en los dispositivos de potencia) que otra de una sola. La producción Media Anual de Energía es mayor en el primer caso, gracias a la capacidad de producir energía con una de las líneas en fallo.

En la siguiente figura se presenta este escenario y se muestra como una etapa de conversión de dos líneas tiende a proporcionar una Producción Media Anual de Energía mayor (alrededor del 1,07%) gracias a la posibilidad de que el aerogenerador siga en funcionamiento cuando ocurre un fallo. Esto podría implicar un ingreso adicional de 24.791 \$ al año, con una etapa de conversión de dos líneas.

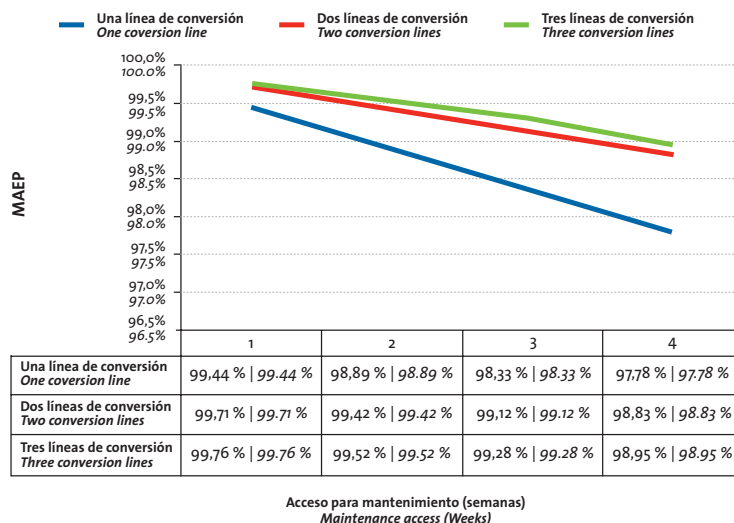
Considerando el siguiente escenario obtenido del análisis de un caso real, realizado por el Departamento Eólico de Ingeteam:

- Eficiencia: 97,8%
- Período correctivo medio: 1 mes
- Probabilidad de Fallo de una línea de conversión: 39,47%
- Probabilidad de Fallo de dos líneas de conversión : 48,81%

Puede observarse como la consideración de doblar la Probabilidad de Fallo (en los dispositivos de potencia) para la etapa de conversión de dos líneas es bastante conservadora, ya que solo es un 9% superior, por lo tanto la diferencia en la Producción Media Anual de Energía será mayor que el caso anterior (aproximadamente un incremento del 1,88% en la Producción Media Anual de Energía para el caso de dos líneas de conversión). Esto implica un aumento en los ingresos de 43.700 \$ al año, gracias a la modularidad en la etapa de conversión de dos líneas.

En la Tabla 2 se muestra como con dos líneas de conversión, el número de eventos esperados durante toda la vida útil es mayor que

Figura 3. Período correctivo en un plazo semanal | Figure 3. Corrective period over a week



- Efficiency: 97.8%
- Mean corrective period: 1 month
- Single conversion line PTF: 39.47%
- Two conversion lines PTF : 48.81%

We can see how doubling the PTF (in the power devices) for the two conversion lines stage is quite conservative as it is only 9% higher. As such the difference in MAEP will be higher than in the previous case (approximately a 1.88% increase in the MAEP for the case of two conversion lines). This represents an increase in income of \$43,700 per annum thanks to the modularity in the two conversion lines stage.

Table 2 sets out how, with two conversion lines, the number of events expected over the entire lifetime is higher than for a one conversion line (13 compared to 8). However all of them leave the conversion stage at half its rated power and none fully stop the wind turbine.

Increasing the number of conversion lines slightly increases the MAEP, but it also increases the number of events so additional wind turbine accesses for maintenance should be considered that would in turn increase O&M costs.

This analysis highlights the importance of modularity in offshore wind applications, as optimal energy production can be obtained and maintenance can be scheduled on a more flexible basis.

This has been the basis for Ingeteam to conceive and design the medium voltage product range primarily designed for offshore wind turbines with an output of

Tabla 1. Aumento en la Producción Media Anual de Energía con respecto al caso de una línea de conversión, para emplazamientos con diferentes velocidades medias del viento y para un período de mantenimiento correctivo de un mes | Table 1. MAEP increase with respect to the one conversion line case, for different mean wind speed sites and for a corrective maintenance period of one month

	Velocidad principal del viento / Mean wind speed						
	5,0 5,0	5,5 5,5	6,0 6,0	6,5 6,5	7,0 7,0	7,5 7,5	8,0 8,0
1 línea de conversión 1 conversion line	97,78%	97,78%	97,78%	97,78%	97,78%	97,78%	97,78%
2 líneas de conversión 2 conversion lines	+1,54%	+1,38%	+1,25%	+1,14%	+1,05%	+0,98%	+0,91%
3 líneas de conversión 3 conversion lines	+1,67%	+1,52%	+1,39%	+1,27%	+1,17%	+1,09%	+1,02%

Tabla 2. Número estadístico de fallos en la vida del aerogenerador y sus consecuencias. | Table 2. Number of statistical failures in the wind turbine's life time and its consequences.

	NOL 66%	NOL 50%	NOL 33%	NOL 0%	Annual Energy (MWh)	Mean Annual Energy Production MAEP	Annual Income (M\$)
	NOL 66%	NOL 50%	NOL 33%	NOL 0%	Annual Energy (MWh)	Mean Annual Energy Production MAEP	Annual Income (M\$)
1 conversion line	-	-	-	8	30081	97.3%	3.0081
2 conversion lines	-	13	-	0	30471	98.6%	3.0471
3 conversion lines	17	-	1	0	30536	98.8%	3.0536

con una línea de conversión (13 frente a 8), pero todos ellos dejan a la etapa de conversión a la mitad de potencia, ninguno produce la parada total del aerogenerador.

Aumentar el número de líneas de conversión aumenta ligeramente la Producción Media Anual de Energía, pero también aumentan el número de eventos, por lo que se deberían considerar accesos para mantenimiento adicionales al aerogenerador, lo que aumenta los costes de O&M.

El análisis pone de manifiesto la importancia de la modularidad en aplicaciones de eólica marina, porque se puede conseguir una producción óptima de energía y el mantenimiento se puede programar con mayor flexibilidad. Esta ha sido la base de Ingeteam para la concepción y diseño de su gama de productos de media tensión, orientada fundamentalmente a aerogeneradores marinos con una potencia de entre 6 y 10 MW, con dos líneas de conversión paralelas, consiguiendo un equilibrio óptimo entre la producción de energía y los costes de mantenimiento.

Definiciones

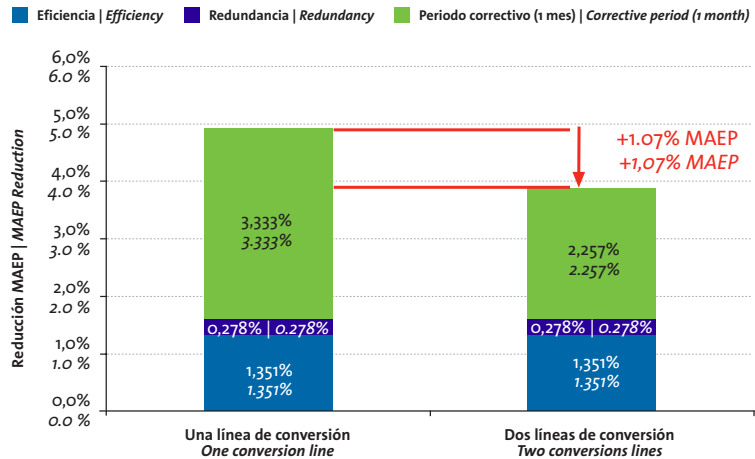
En este artículo se han utilizado los siguientes acrónimos y definiciones:

- Línea de conversión: es la asociación de inversores en topología back to back, caracterizada por el hecho de que un fallo en cualquiera de sus semiconductores conduce a la parada total de la misma.
- Etapa de conversión: es la asociación de líneas de conversión en paralelo para formar una unidad de mayor potencia.
- Período correctivo: es el tiempo que transcurre entre la ocurrencia de un evento y las acciones de mantenimiento que se ejecutan para restaurarlo. Si un fallo ocurre un lunes, pero el personal de servicio no puede acceder para solventarlo hasta el viernes, el período correctivo sería de cinco días.
- Probabilidad de Fallo: indica la probabilidad de que un componente o subsistema falle a lo largo de una año de funcionamiento. Este indicador es inherente al propio componente y a los requisitos de la aplicación.
- Número de ocurrencias en la vida útil: es el número de veces que ocurre un evento o situación durante toda la vida útil de la etapa de conversión.
- Producción Media Anual de Energía: es la reacción entre la energía real producida por la etapa de conversión y el máximo que puede estar disponible en el emplazamiento. Se calcula teniendo en cuenta la vida útil de producción. En este análisis, este último parámetro se ha considerado como la función a maximizar y el valor de comparación para determinar la mejor solución.



Mikel Zabaleta
Ingeteam

Figura 4: Aumento en la Producción Media Anual de Energía con respecto al caso de una línea de conversión y para un periodo de mantenimiento correctivo de un mes | Figure 4: MAEP increase with respect to the one conversion line case and for a corrective maintenance period of one month.



between 6 and 10 MWs with two paralleled conversion lines, thereby achieving an optimal trade-off between energy production and maintenance costs.

Definitions

The following terms and acronyms have been used throughout this document:

- Conversion line: is the association of inverters in a back-to-back topology characterised by the fact that a failure in any of its semiconductors leads to its total shutdown.
- Conversion stage: is the association of parallel conversion lines to form a higher output power unit.
- Corrective period: is the elapsed time between the occurrence of an event and the maintenance actions performed to restore it. If a failure occurs on Monday but the service personnel cannot access to fix it until Friday, the corrective period would be 5 days.
- PTF (Probability to Fail): indicates the probability of a component or subsystem failing during one year of operation. This indicator is inherent to the component itself and to the application requirements.
- NOL (Number of Occurrences in Lifetime): is the number of occurrences of an event or situation during the entire lifetime of the conversion stage.
- MAEP (Mean Annual Energy Production): is the ratio between the actual energy produced by the conversion stage and the maximum that have been available in the site. It is calculated by taking into account the useful production lifetime. In this analysis, this last parameter is understood as being the function to be maximised and the comparison value to establish the best solution.