

Diseño y conexión a la red española de un parque eólico offshore de 21,6 MW

Palabras clave: energías renovables, energía eólica offshore, aerogenerador, parque eólico offshore.

Resumen:

La energía eléctrica es fundamental para el desarrollo de la vida según la conocemos hoy en día, por lo que la investigación de nuevas fuentes de energía y la planificación energética de los países son algunas de las cuestiones que más preocupan en la actualidad.

En España, debido al elevado número de kilómetros de costa con los que cuenta, sería una buena opción la introducción de la energía eólica offshore en su mix energético. Este tipo de energía, a pesar del elevado coste de algunas de sus fases de construcción, tiene multitud de ventajas añadidas sobre la eólica tradicional, como la posibilidad de aerogeneradores mayores en tamaño y potencia, parques de mayores dimensiones o que el ruido deje de suponer un problema.

Key words: renewable energy, offshore wind energy, wind turbine, offshore wind farm.

Abstract:

The electric energy is essential for life development as we know it nowadays, so researching of new energy sources and countries energy planning are two of the issues that worry people the most in the present.

In Spain, due to its large amount of coast kilometres, offshore wind energy would be a fantastic source to add to its energy mix. This type of energy, in spite of the high cost of some of its construction stages, has many advantages compared to traditional wind energy such as bigger wind turbines, bigger wind farms and less problems with the noise.



María del Pilar Morocho Beato

Ingeniero Industrial especialidad eléctrico por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI. Beca de Excelencia de la Comunidad de Madrid en los cursos 2008/2009 y 2011/2012. Erasmus en la University of Southampton durante el curso 2010/2011.



Francisco Javier Martín Herrera

Ingeniero del Dpto. de Seguridad de Red y Análisis de Incidentes en Red Eléctrica de España. Profesor en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI. Ingeniero Industrial especialidad energética/eléctrica por la Escuela Politécnica de la Universidad Carlos III de Madrid. Máster en Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica y Máster en Economía industrial.

Introducción

El futuro energético, así como la sostenibilidad de dicho futuro, es uno de los problemas que más preocupan hoy en día, ya que tanto los países desarrollados como los que están en vías de desarrollo necesitan la energía eléctrica para su funcionamiento.

Por estas razones una planificación energética racional, tanto a nivel nacional como regional, debe considerar las energías renovables como una alternativa real, de manera que se establezcan las medidas oportunas para que, mediante un conjunto coordinado de acciones, se alcance en los próximos 20 años un nivel de aportación equilibrado y coherente con los avances tecnológicos en materia de energías renovables.

Dentro de las renovables, la energía eólica destaca por el grado de madurez tecnológica alcanzado y su competitividad económica, lo que la convierte en una de las mejores opciones renovables hoy en día.

La energía eólica offshore se distingue de la onshore en que la ubicación del parque eólico en cuestión se realiza en el mar:

Los parques eólicos, tanto en tierra como en mar, están formados por una serie de aerogeneradores que captan la energía cinética del viento para su transformación en energía eléctrica. La energía eléctrica producida por cada uno de los aerogeneradores, normalmente a media tensión, es transportada a una estación transformadora que eleva su tensión y posteriormente, mediante una línea de evacuación, se inyecta a la red de distribución o de transporte.

El diseño de un parque eólico marino no dista mucho de uno en tierra. En ambos casos hay que realizar un estudio del viento, diseño del parque y de la subestación.

De manera general, entre sus ventajas cabe destacar:

- La ausencia de turbulencias en el mar repercute en un ahorro de material, al necesitarse torres de menor altura, y mayores rendimientos. Además se aumenta la vida útil de los aerogeneradores, llegando a ser la vida útil media de estos parques de 30 años.

- El ruido deja de ser un problema.
- Se pueden instalar parques mucho más grandes que en tierra, donde las limitaciones de espacio son mucho mayores.
- Se reduce el impacto visual sobre el paisaje al encontrarse más alejados de los núcleos urbanos.

Sin embargo también existen una serie de problemas que dificultan su instalación:

- Mucho más complejo y caro que en tierra, tanto en lo referente a su instalación como al mantenimiento posterior.
- Se necesita una gran inversión en I+D en el desarrollo de nuevas tecnologías.
- Limitación de acceso y dificultades para trabajar en el mar; tanto en la fase de montaje como en el mantenimiento.

Metodología

Para la realización del proyecto se darán los pasos habituales para el desarrollo de proyectos de ingeniería clásicos.

La mayor diferencia entre el proyecto de un parque eólico en tierra o en mar es el estudio del emplazamiento, ya que la profundidad es un factor crítico para su viabilidad técnica y económica. También el cálculo y tendido de la línea submarina dista bastante de las típicas líneas aéreas usadas para la conexión a red de un parque en tierra firme.

Otro factor a tener en cuenta es que todos los elementos instalados deben tener una protección especial contra atmósferas salinas y húmedas. Esto se puede conseguir con revestimientos especiales como en el caso de los aerogeneradores o mediante su instalación en celdas blindadas con SF₆ (gas inerte que sirve como protección), utilizadas en los centros de transformación y en la subestación.

Considerando las características anteriores, para realizar el proyecto lo primero será estudiar la ubicación del parque en cuestión. Consiste en un estudio de la batimetría del océano con el fin de poder ver cuáles son las zonas técnicamente viables para la instalación del mismo, y de un estudio del viento, para poder determinar las zonas de mayor recurso eólico, ya que de esto depende la viabilidad económica del proyecto.

A continuación se diseña el parque, eligiendo los aerogeneradores y su disposición, así como la apartamentación necesaria para sus centros de transformación y la interconexión entre ellos y con la subestación offshore.

Habrà que diseñar también una subestación offshore en la que se elevará la tensión a los 220 kV de nivel de tensión de la red de transporte española, para posteriormente conectarla con la subestación de evacuación del sistema eléctrico. Esta conexión se realizará mediante una línea de transporte submarina, y posteriormente subterránea, hasta que lleguemos al punto de interconexión con la red de transporte de alta tensión.

Una vez diseñados todos los parámetros eléctricos y elegida la apartamentación y dispositivos necesarios para la construcción del proyecto se efectuará un presupuesto del mismo y, basándose en ese presupuesto, se realizará el estudio económico y de viabilidad del conjunto tomando dos hipótesis, la venta de energía al precio de mercado y bajo régimen especial (sistema primado).

Desarrollo del proyecto

En el presente proyecto se han desarrollado todos los aspectos eléctricos, así como un análisis económico de lo que conlleva la ejecución de un parque eólico instalado en el mar, teniendo siempre en cuenta la normativa legal.

El parque eólico se encuentra en el sur de Gran Canaria, a unos 8 km de la localidad de El Tablero. En esa ubicación también se construirá la subestación offshore necesaria para la elevación de la tensión a los 220 kV de la red de transporte. Posteriormente se conectará a la subestación de Santa Águeda.

Para elegir su ubicación ha sido necesario tener en cuenta los siguientes tres factores:

- Mapa de viento de España: se obtiene del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- Normativa del Estudio Estratégico Ambiental del Litoral Español para la Instalación de Parques Eólicos Marinos.
- Batimetría de la costa española.

En este punto la profundidad no supera los 50 m, por lo que se puede utilizar cimentación tipo trípode para los aerogeneradores y *jacket* para la subestación. Este tipo de cimentación ya se ha utilizado con éxito en otros parques con profundidades similares, por lo que debería dar buen resultado también en este proyecto

Respecto al recurso eólico se consiguen generar 5.517,2 MWh/año con cada aerogenerador, lo que equivale a 1.533 horas de funcionamiento del parque. El parque está formado por 6 aerogeneradores Siemens de 3,6 MW cada uno, lo que supone una potencia total de 21,6 MW.

Para evacuar la energía producida, el parque se dividirá en dos grupos de tres aerogeneradores cada uno y estos grupos se colocarán de forma simétrica respecto de la subestación marina. La energía producida en cada turbina se eleva de 690 V a 30 kV en el centro de transformación ubicado en la base de cada aerogenerador. Este centro de transformación está formado por un transformador de potencia de 5 MVA y las celdas blindadas que contienen la aparamenta necesaria (interruptores, fusibles...) y los elementos de control y medida. Los transformadores de di-

chos centros serán de aislamiento seco, ya que en este tipo de instalaciones es primordial minimizar el mantenimiento y los problemas derivados del ruido que generan los mismos, menos relevantes por su distancia a los núcleos urbanos.

Posteriormente, la energía de cada grupo será evacuada hasta la subestación offshore mediante una línea submarina de 30kV. Las características de esta línea de evacuación de cada grupo serán análogas a las de la línea de evacuación submarina de 220 kV, que se describirá más adelante.

La subestación será blindada y estará aislada en gas SF₆. Tendrá disposición de simple barra en ambos niveles de tensión y contará con dos posiciones de entrada de línea, una por cada grupo de aerogeneradores, un transformador elevador y una posición de salida de línea.

El transformador de la subestación offshore elevará la tensión de 30 kV a 220 kV, nivel de tensión de la red de transporte española y de la subestación de Santa Águeda, a la que se conectará el parque. Tendrá una potencia de 60 MVA, que es capacidad suficiente para evacuar toda la energía del parque y tendrá aislamiento en aceite. Antes

se ha mencionado que el aislamiento en aceite requiere un mantenimiento que hay que tender a minimizar en las instalaciones offshore, sin embargo, este transformador es suficientemente grande como para que las vibraciones que habría si se construyese con aislamiento diesen importantes problemas. Su capacidad es bastante superior a la de la potencia del parque. Esto es así porque se va a realizar en el estudio económico la posibilidad de ampliación hasta 13 aerogeneradores, que serían los necesarios para utilizar toda la capacidad.

La construcción de la subestación se realiza íntegramente en tierra, donde también se hacen las pruebas necesarias para garantizar su correcto funcionamiento. Una vez está todo en orden, se transporta hasta su localización en alta mar y mediante grúas se ubica sobre la cimentación de la misma, construida previamente.

La interconexión con la subestación en tierra se realiza con una línea submarina formada por tres conductores unipolares y con disposición en capa. Una vez se alcanza la tierra, la línea continuará siendo subterránea, utilizando el mismo conductor, pero en este caso con configuración tresbolillo para minimizar las pérdidas de este tramo. La disposición en tresbolillo reduce las pérdidas de potencia por los efectos de inducción de unos conductores sobre otros, sin embargo, este tendido no es posible en el fondo de mar, por lo que se elige el tendido en capa, con una separación de 0,5 m entre los conductores contiguos.

La puesta a tierra del tramo submarino se realiza al principio y al final del mismo, mientras que en el tramo subterráneo se utilizará *cross-bonding*. De manera análoga al tendido, la puesta a tierra correcta sería *cross-bonding*, pero como no se puede realizar el intercambio de pantallas bajo el mar se utiliza la puesta a tierra en dos puntos. El problema derivado de este tipo de puesta a tierra son las corrientes inducidas por la pantalla, que generan un aumento de la temperatura y la perforación del aislante. No obstante, esto no es un problema en este caso por dos razones: la primera es que sólo se



está utilizando el 10% de la capacidad de la línea, por lo que está trabajando de manera permanente a temperaturas muy inferiores a las admitidas; la segunda es que en el fondo marino las temperaturas son mucho más bajas que en las zanjas subterráneas y las corrientes marinas favorecen la refrigeración de los conductores.

La longitud total de la línea es de 15,423 km, siendo 8.6 km submarinos y 6.8 subterráneos. Su tendido se realiza mediante un buque de tendido en el que se colocan bobinas de cable continuo de la longitud total de la línea. Con ayuda de buzos se va poniendo el cable sobre la superficie marina, de tal manera que se eviten obstáculos o elementos que pudieran dañar el aislamiento del mismo.

Todo el proyecto tendrá las protecciones necesarias, estando estas divididas en protecciones de línea, de transformador y de aerogeneradores. Se utilizarán protecciones de diferencial y de distancia para la línea de evacuación, diferenciales de principal y de respaldo para el transformador y sobreintensidad de neutro para los aerogeneradores. Además, se instalarán protecciones de control de sincronismo en los interruptores y contadores de energía en la línea de evacuación, para poder medir la energía que se venderá a la empresa eléctrica correspondiente. Todas estas protecciones estarán conectadas mediante transformadores de intensidad y tensión de clase, y precisión según necesidades.

Estudio económico y viabilidad del proyecto

En el estudio económico se examinan dos variantes para ver la viabilidad del proyecto. Estas corresponden al estudio con los precios de mercado y al estudio con los precios de mercado más las primas al régimen especial existentes hasta principios de año.

Los parámetros a considerar en el estudio económico se reflejan en la Tabla I.

Con esos datos se obtiene que la inversión, con una rentabilidad del 15% sobre el total, se recupera a partir de 36 años sin primas y de 29 años con las primas del régimen especial.

Tabla I. Parámetros del estudio económico

Inversión inicial:		
Aerogeneradores:	18.137.640€	(76.67%)
Subestación offshore:	2.672.070€	(11.30%)
Línea submarina:	265.789€	(1.12%)
Protecciones:	81.200€	(0.34%)
Ingeniería de detalle y otros:	2.500.000€	(10.56%)
Total:	23.656.699€	
Financiación:		
20% fondos propios y 80% financiación externa 5% sobre el 80% de la inversión inicial		
Total: 946.268€		
Gastos de operación y mantenimiento:		
Gastos fijos y variables → 0,01€/kWh		
Total: 331.020€ anuales		
Amortizaciones:		
Vida útil= 30 años		
Amortización anual: 820.099€		
Ingresos:		
Tasa de inflación anual: 2%		
Tasa de interés anual: 3%		
Precio base medio anual: 53,80 €/MWh		
Primas: 9,1 c€/kWh, límite de 17,7 c€/kWh		

Si se considera la vida útil media del parque de 30 años el proyecto sin primas no sería viable, ya que no se recupera la inversión inicial, pero sí que lo sería bajo el régimen primado, con una rentabilidad del 19,65% sobre la inversión inicial total.

Como la vida útil media de los parques offshore es de 30 años, se puede afirmar que el proyecto es rentable bajo régimen especial y que podría llegar a serlo sin primas, ya que 36 años no dista mucho de los 30 de vida útil de media y con un mantenimiento adecuado se puede llegar a prolongar hasta esa duración.

Para terminar, se estudia la ampliación del parque hasta la capacidad máxima del transformador. Esto se consigue instalando 13 aerogeneradores, que supondrían el 88% de la inversión inicial en este supuesto. Todos los demás elementos siguen siendo adecuados, por lo que no se modifica nada más en el presupuesto.

Aunque se ve que los aerogeneradores suponen la mayor parte del coste del parque, con esta capacidad de generación ampliada se consiguen rentabilidades muy superiores, llegando

en el caso del sistema primado a recuperarse más del doble de la inversión inicial para la construcción del parque a lo largo de su vida útil.

Conclusiones

Con lo visto en el proyecto se puede concluir que la energía eólica marina es una buena opción para el mix energético de España. Los resultados obtenidos con ella son muy buenos y su viabilidad económica está garantizada.

Muchos países europeos, entre ellos el Reino Unido o Francia por ejemplo, ya han optado por la explotación de esta energía y en España también sería una buena fuente de energía a utilizar. ■

Referencias

The Crown Estate. *A Guide to an Offshore Wind Farm*. 2009.

Buey, Eduardo. *Energía eólica marina. Gas natural*. Febrero 2010.

The European Wind Energy Association. *Into the Sea*. 2010.

Regidor, Artemi. *Energía Eólica marina en Canarias: 6º Seminario comarcas sostenibles*. 24 de marzo de 2010.