



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE GIJÓN

LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y SU APLICACIÓN EN EL CAMPO DE LA ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE



POR EL PROFESOR
D. MANUEL RICO SECADES

Doctor Ingeniero Industrial
Catedrático de Universidad
Área de Tecnología Electrónica
Universidad de Oviedo

RESUMEN DEL DISCURSO

LEÍDO EN LA SOLEMNE ENTREGA DE LOS DIPLOMAS ACADÉMICOS A LOS INGENIEROS INDUSTRIALES DE LA 26ª PROMOCIÓN, INGENIEROS EN INFORMÁTICA DE LA 17ª PROMOCIÓN, INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN DE LA 5ª PROMOCIÓN Y TITULADOS EN LOS MÁSTERES DE TICRM E INGENIERÍA MECATRÓNICA

Gijón, 4 de junio de 2010

AGRADECIMIENTOS

Pocas son las ocasiones que nos ofrece la actividad diaria para agradecer el apoyo que muchas personas que nos rodean nos prestan. Gracias a su trabajo, ayuda y consejos somos lo que somos en el campo académico y profesional.

Quiero empezar este agradecimiento por mi familia, mi mujer (María) y mis hijas (Sara y Adriana) por su apoyo, consejos y paciencia, reconociendo que debido a mi dedicación a la Universidad no les presto la atención que debiera.

Quiero mencionar a mis compañeros de la Universidad de Oviedo, de mi **Área de Conocimiento Tecnología Electrónica** y de mi **Departamento Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Computadores y Sistemas**, ya que toda mi actividad y méritos son frutos de trabajo en equipo y colaborativo con ellos. Quiero dedicar esta lección a las nuevas generaciones de ingenieros de mi departamento, y muy en particular a Jorge García García (**Tecnología Electrónica**), Pablo Arboleya Arboleya (**Ingeniería Eléctrica**) y a Pablo García Fernández (**Ingeniería de Sistemas y Automática**), con líneas de investigación muy relacionadas con esta lección que voy a impartir y, que sin duda, podrían impartirla mucho mejor que yo. Ellos representan a una nueva savia con espíritu de agregación y colaboración fundamental para el futuro de nuestra Universidad.

También, en este curso tan especial, en el que la **Universidad de Oviedo** ha obtenido la mención de **Campus de Excelencia Internacional**, y que de alguna forma ha motivado la selección de esta lección, quiero citar aquí a mis compañeros del equipo rectoral, en particular a Silvia Gómez Ansón, José Manuel Cano Rodríguez y David Melendi Palacio, demostrando que no hace falta ir muy lejos para encontrar la excelencia tanto en lo personal como en lo profesional y que, a pesar de todo, quedan personas que todavía sueñan con mejorar nuestra Universidad.

Quiero expresar en primer lugar el orgullo y la satisfacción que me produce el estar presente en este acto tan entrañable e importante, como es la entrega de diplomas académicos a las nuevas promociones de Ingenieros salidos de nuestra Escuela.

Quiero también agradecer a la Dirección de la Escuela, especialmente a su director y compañero de promoción Hilario López García, la deferencia que ha tenido al considerarme como merecedor del honor de impartir esta lección, precisamente en este curso, en el que nuestra escuela, junto nuestro Campus, comienza una nueva etapa de integración en busca de la excelencia.

También es un año especial para mi promoción de Ingenieros Industriales (yo soy de la 2ª promoción de esta escuela) ya que celebramos nuestras bodas de plata (que rápido pasan 25 años).

Por si todo esto fuera poco, este ha sido el año en el que la **Universidad de Oviedo** ha conseguido la mención de **Campus de Excelencia Internacional** y el haber tenido el orgullo y la oportunidad de haber participado en este proyecto es una inmensa satisfacción personal.

Debe de llenarnos a todos de orgullo, mirar el mapa de los campus de excelencia alemanes y franceses de los cuales el gobierno español ha buscado sabiamente los ingredientes para nuestra iniciativa nacional, de los primeros se importan los conceptos de **Centro Internacional de Posgrado, Escuela Internacional de Doctorado y Clúster de Investigación**, mientras que de los segundos se incorpora en concepto de **Agregación**, que permita una masa crítica necesaria para lograr la excelencia, para luego mirar el mapa de **Campus de Excelencia Internacional** de nuestro país y ver a nuestra **Universidad de Oviedo** en este lugar destacado.



Figura 1. Campus de Excelencia Internacional. España año 2010

También en el ámbito local de nuestro **Campus de Gijón** y de nuestra Escuela de ingeniería, es precisamente el concepto de “agregación en busca de la excelencia” lo que hace este momento en el que estamos tan especial. La **Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón** representa todos estos valores de agregación.

La agregación no es tarea fácil, pero los ingenieros sabemos que los grandes proyectos deben de realizarse en equipos multidisciplinares donde la coordinación y el trabajo en equipo son fundamentales.

Y si todos estos ingredientes no fueran suficientes para realizar un guiso excepcional, debe mencionarse un condimento adicional: La mención de calidad de nuestro **Clúster de energía, medio ambiente y cambio climático**.

La **Universidad de Oviedo** en su proyecto de **Campus de Excelencia Internacional** tenía que seleccionar una línea de trabajo estratégica que la condujera a la excelencia y esto, como bien sabéis, no es tarea fácil. En la **Universidad de Oviedo** hay grupos de investigación excepcionales en todas las ramas del saber.

El perfil de transferencia de las áreas de ingeniería (y muy en particular el de nuestro Campus), nuestro tejido empresarial (“Asturias huele a energía”) y el importante apoyo del **Principado de Asturias** y del **Ayuntamiento de Gijón**, han hecho que la apuesta premiada sea una con un perfil tecnológico, fuertemente multidisciplinar y estratégico. Un Clúster muy ligado a la ingeniería, muy ligado a nuestro Campus y muy ligado a nuestro Centro.

Todas estas cosas que he mencionado deben ser un orgullo para todos y un acicate para nuestros graduados que hoy vamos a poner en el mercado.

Vamos a centrarnos en la lección que he seleccionado para este acto de entrega de diplomas.

Precisamente he seleccionado una lección de mi campo de especialidad “**Electrónica de Potencia**” y he querido enmarcarla deliberadamente dentro de uno de los campos de trabajo más interesantes del panorama tecnológico actual, las energías renovables y muy concretamente las energías que se obtienen del mar (lo que se denomina habitualmente energías “offshore” apoyándose

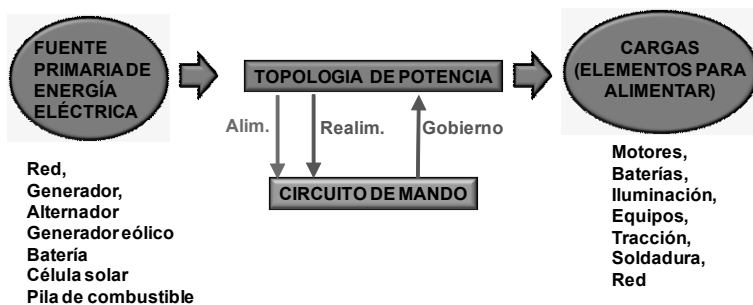


Figura 2. Energía y Electrónica de Potencia

como viene siendo habitual en el correspondiente término inglés).

La **Electrónica de Potencia** se centra en el estudio de los circuitos y técnicas que permiten la manipulación de la energía eléctrica utilizando semiconductores.

Así, tendremos una fuente primaria de energía (la red eléctrica, es lo más habitual, pero puede ser una batería, un generador eólico o cualquier otra de energía eléctrica) que nos presenta la energía de una determinada forma, y nosotros debemos ser capaces de recogerla, de la forma más eficiente posible, respetando los condicionantes y especificaciones que esta fuente energética nos imponga.

La energía recogida se entrega a una carga de potencia. Ejemplos hay muchos: Iluminación, ordenadores, motores, baterías al cargarlas, la propia red al inyectar energía,... hoy día casi todo precisa alimentación eléctrica: tensión estabilizada, protecciones, cambios de frecuencia, etc.

Todo esto se realiza mediante una topología

de potencia (propriadamente un circuito electrónico, de cuyo estudio es objeto la **Electrónica de Potencia**). En este circuito de potencia solo hay interruptores gobernados (semiconductores), inductancias, transformadores y condensadores. Idealmente no debiera haber elementos disipativos, ya que se busca la eficiencia energética más elevada. Algunas veces parece mentira como tan pocos componentes pueden provocar tantos problemas.

La estructura de conversión energética, se completa con un circuito de mando, que habitualmente pertenece al campo de la Electrónica Analógica, de la Instrumentación Electrónica o de la Electrónica Digital.

En estos casos, se utiliza la electrónica con un propósito distinto, para obtener y manipular información y actuar de la forma necesaria sobre la topología de potencia para obtener las prestaciones deseadas. Los grandes avances en el campo de los microprocesadores y de los microcontroladores permiten la realización de estrategias de control de la energía cada vez más sofisticadas y prestaciones funcionales cada vez mayores.

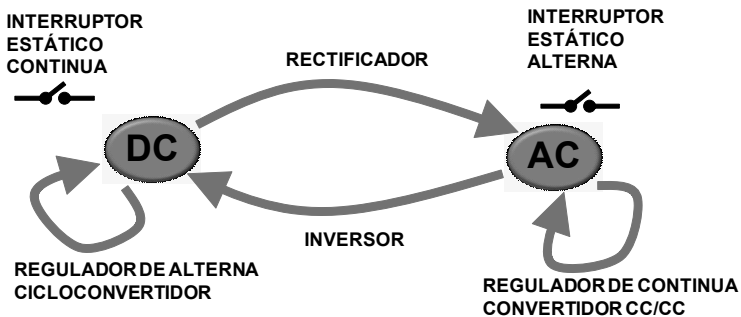


Figura 3. Conversiones energéticas básicas

Obviamente en el campo de la **Electrónica de Potencia**, especificaciones como rendimiento energético, peso, tamaño, interferencias eléctricas, electromagnéticas, entre otras muchas son habituales. Tampoco debemos olvidarnos de aspectos económicos y de sencillez de fabricación.

Las conversiones energéticas básicas están condicionadas por la forma en la que se presenta la energía: en continua o en alterna.

De este modo los pasos de continua a alterna se denominan **inversores**, mientras que los que realizan el proceso contrario se denominan **rectificadores**.

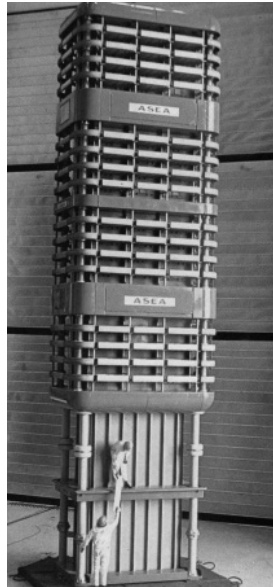
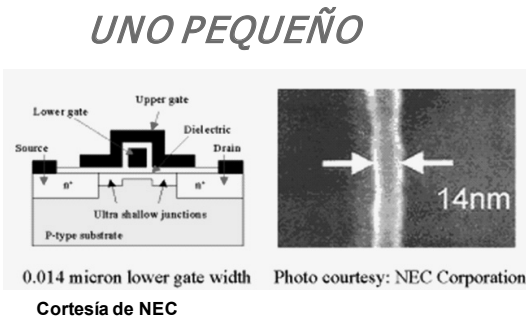
Los **estabilizadores de continua (convertidores continua-continua)** y los **reguladores de alterna (cicloconvertidores, controles diferenciales, controles de fase)** completan todas las opciones de conversión energética.

Se incluyen habitualmente también, los interruptores estáticos, de continua o de alterna, que no representan expresamente una conversión energética, sino la conexión y desconexión de una carga de potencia utilizando semiconductores.

Al pensar en electrónica, en general, nos viene a la mente siempre algo en miniatura, estamos pensando en los microprocesadores, o en los amplificadores, o la electrónica para las comunicaciones, o la instrumentación electrónica y efectivamente esto es cierto en los mundos en los que se ha popularizado esta electrónica.

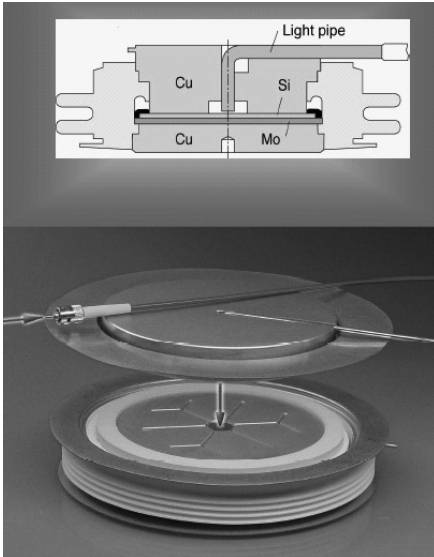
El esquema eléctrico de un microprocesador es increíble y la densidad de transistores por milímetro cuadrado se mide en millones.

Tendríamos que utilizar un microscopio electrónico para poder visualizar uno de estos componentes.



UNO GRANDE

Figura 4. Semiconductor Pequeño (MOSFET de 14 nm fabricado por NEC) y semiconductor grande (SCR fabricado por ABB para un rectificador trifásico de 500 MVA y 500 KV en Inga-Shaba, ZAIRE)



Cortesía de SIEMENS

Figura 5. SCR con disparo de fibra óptica (Tensión de bloqueo de 8 kV y corriente de 3700 A)

Incluso los componentes electrónicos de los circuitos convencionales, montados sobre las bien conocidas placas de circuito impreso, son elementos pequeños, hoy día una buena parte con tecnología de montaje superficial (SMD). Incluso las bobinas y transformadores, que son siempre los elementos más voluminosos, tienen tamaños manejables.

Pero hay otros componentes electrónicos, los de la **Electrónica de Potencia**, espectaculares e inmensos. Al verlos podría pensarse en

una estructura metálica de una obra o incluso de un edificio. Aquí en la figura se recoge un transistor MOSFET pequeño (canal de 14 nm) y un espectacular módulo de varios SCR, para un rectificador controlado de potencia.

Lo más pequeño y lo más grande se dan la mano en el mundo de la **Electrónica de Potencia**. Seguramente en este momento, hay grupos de trabajo buscando aumentar la escala de integración de determinados componentes electrónicos y, simultáneamente, otros grupos buscan como poder diseñar y fabricar componentes electrónicos más grandes y poderosos para poder manejar niveles de energía cada vez mayores. Desde fuera podría pensarse: ¡Están locos estos humanos!

El Rectificador Controlado de Silicio (SCR), o bien como se dice en terminología inglesa, el Thyristor, es el componente electrónico más robusto que existe, y el que permite manejar niveles de potencia mayores (en la figura, tenemos uno de 3700 A con tensiones de bloqueo de 8 kV). El gobierno de estos elementos mediante fibra óptica, permite manejar niveles de tensión de miles de voltios y niveles de potencia de millones de VA con relativa naturalidad y sencillez.

Pero este es un campo que está en continua evolución, el mundo de los altos niveles de potencia, hasta hace poco confinado al uso de diodos de potencia y SCR, ve aparecer

Switch type	GTO	IGCT	BJT	MOSFET	IGBT
Voltage (V)	6000	4500	1200	1000	3300
Current (A)	4000	2000	800	28	2000
Switched-off time (µs)	10-25	2-5	15-25	0.3-0.5	1-4
Pulse bandwidth (kHz)	0.2-1	1-3	0.5-5	5-100	2-20
Drive requirements	High	Low	Medium	Low	Low

Figura 6. Una comparativa de semiconductores de potencia

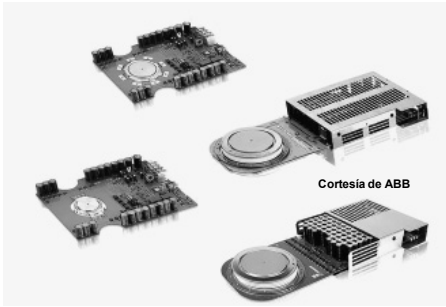


Figura 7. IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristors)

nuevos dispositivos de prestaciones cada vez mayores, que permiten juegos energéticos cada vez más sofisticados y que hoy día están siendo el motor del desarrollo tecnológico en el mundo de la energía eléctrica.

Podemos citar en esta lección al transistor bipolar de puerta aislada, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) que irrumpe con mucha fuerza en el mundo de los acciona-

mientos eléctricos y en el de la transmisión de energía a largas distancias, como veremos posteriormente.

También se debe mencionar el IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristors), componente derivado del GTO (Gate Turn-Off) y que van comiendo terreno y acercándose poco a poco a los niveles de potencia del SCR, aportando mayores prestaciones y posibilidades. Algunos de estos dispositivos ni siquiera tienen, de momento, una traducción al español consolidada. El desarrollo de esta parte de la electrónica, aunque menos visible, es espectacular.

Haciendo más las palabras del ingeniero de ABB Mr Hansruedi Zeller:

“Cuando comenzó la historia de los semiconductores de potencia nadie, ni en sus sueños más disparatados, habría imaginado

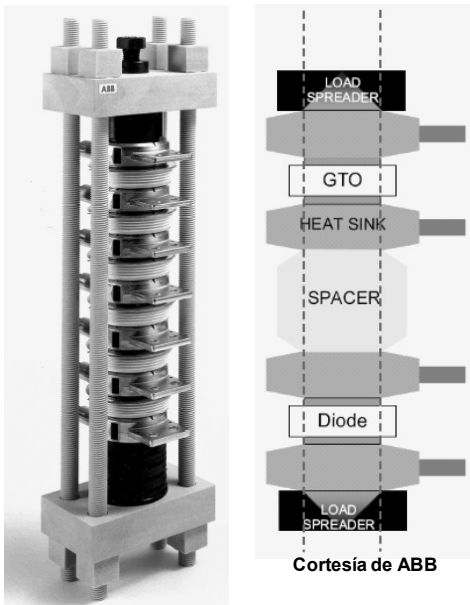


Figura 8. Empaquetado y refrigeración de semiconductores de potencia

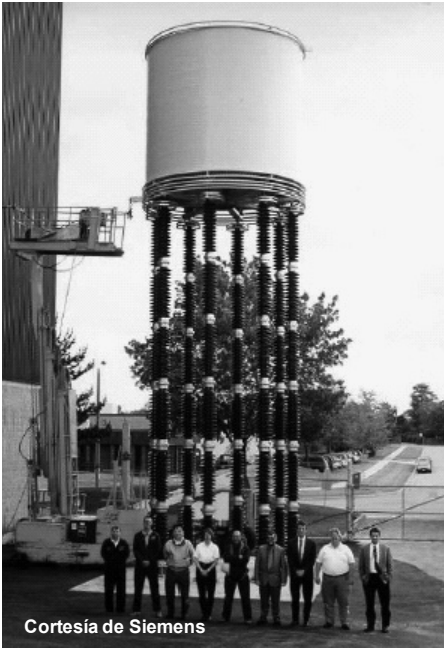


Figura 9. Inductancia de aire (150 mH, 500 kV y 1800 A)

que alguna vez se alcanzaría semejante grado de complejidad, sofisticación y sintonía funcional.

Tampoco podría haber pronosticado nadie, que en el camino entre la central eléctrica y el consumidor final la corriente eléctrica circularía alguna vez a través de uniones de silicio”

No quiero cerrar este apartado sin mencionar que la **Electrónica de Potencia** se

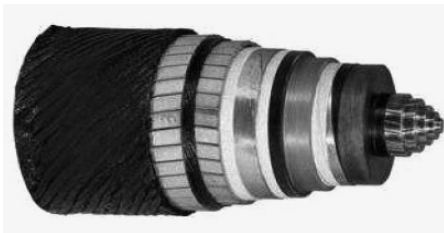


Figura 10. Cable submarino parafasea de HVDC

apoya en todas las ramas de la ingeniería. Los cables no son cables, son diseños de ingeniería mecánica. Las asociaciones de semiconductores engranan también de lleno con el mundo de la ingeniería mecánica. La evacuación de calor y el diseño de intercambiadores de calor y la cogeneración son disciplinas que deben contemplarse en estas instalaciones.

Piénsese en una corriente de 2000 A circulando sobre una unión de silicio con una caída en conducción de tan solo 1 V, hablamos de 2 kW de energía que deben evacuar en calor, en un elemento que podemos tener en nuestra mano. Ingeniería térmica, fluidos, cogeneración diseño mecánico, aislamiento eléctrico, aislamiento térmico, materiales, etc, casi todas las disciplinas de la ingeniería están presentes en el mundo de la **Electrónica de Potencia**.

No hablemos ya de bobinas y transformadores, algunas imágenes de “pequeñas bobinas de 150 mH”, más bien parecen fotos de un grupo de amigos bajo un depósito de agua, o las imágenes de transformadores que parecen traídas de la guerra de las galaxias.

Incluso los cables eléctricos, en este tipo de aplicaciones son elementos de alta tecnología, con problemática de materiales, procedimiento de instalación y de mantenimiento de muy alta complejidad técnica.

Dicho esto, tampoco debemos pensar que en la **Electrónica de Potencia** todo es desmesurado y descomunal.

Se puede decir que las necesidades de manejar energía están en lo pequeño, en lo mediano, en lo grande y, por supuesto, en lo descomunal.

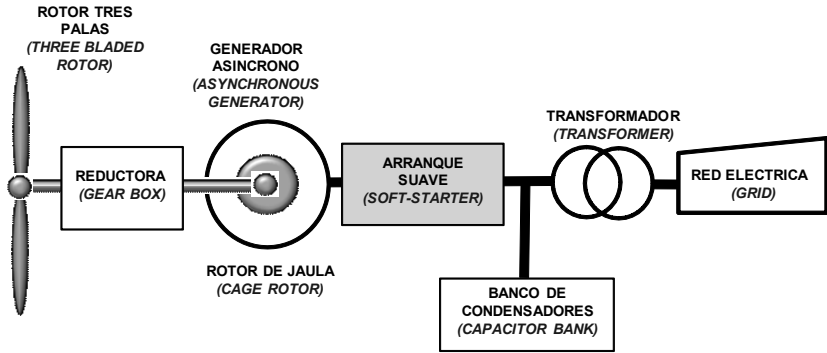


Figura 11. En los primeros generadores eólicos basados en motores asincrónicos (año 1957), la electrónica de potencia estaba sólo presente en el arranque suave (control de fase con SCR). El sistema debía operar a velocidad constante.

También es **Electrónica de Potencia** la transmisión de energía de poco mW para alimentar pequeños dispositivos como marcapasos o implantes electrónicos en el cuerpo humano, con problemáticas tecnológicas que nada tienen que envidiar a las de grandes potencias.

Realmente, la **Electrónica de Potencia** está presente en toda la tecnología, estamos rodeados de tecnología y, de momento, todo hay que alimentarlo.

Fijémonos en los equipos domésticos (Iluminación, equipos de música, televisión, video, electrodomésticos, ...) con potencias del orden de la centena de vatios.

Miremos a las aplicaciones industriales (cargadores de baterías, coches eléctricos, centralitas telefónicas, motores,...) donde las potencias pueden alcanzar ya niveles de kilovatios.

Así, hasta llegar a las grandes aplicaciones de la **Electrónica de Potencia**, la tracción eléctrica y la generación, transporte y almacenamiento de energía, donde ya hablamos de niveles de potencia de megavatios, con tensiones de miles de voltios y corrientes de miles de amperios.

Precisamente, la orientación de esta lección va para una de estas aplicaciones singula-

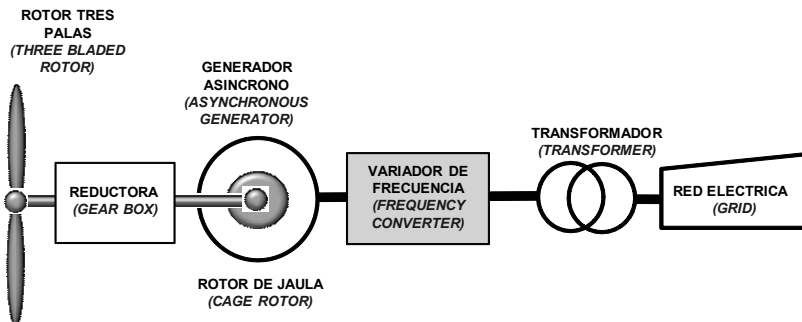


Figura 13. Accionador basado en rectificadores controlados (Accionador LCI)

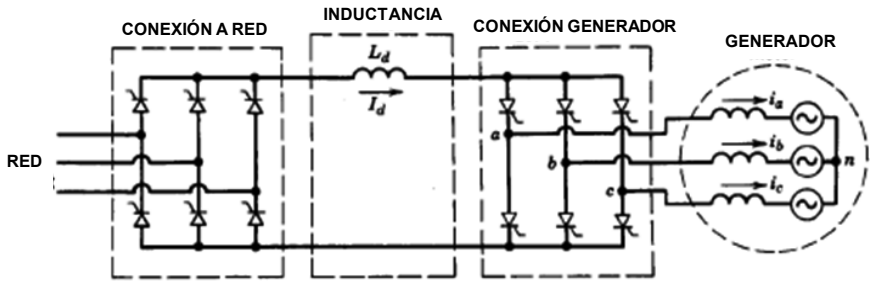


Figura 12. Eliminación del banco de condensadores para compensación de reactiva (velocidad fija, por ejemplo fabricante Wind World) o inversor para control total (velocidad variable). Segunda generación de generadores eólicos basados en motores asíncronos.

res, como es la generación y el transporte de energía con generadores eólicos offshore, es decir, instalados en el mar a kilómetros de la costa.

Y, ¿dónde está la **Electrónica de Potencia** en estas aplicaciones?

Pues básicamente está en los propios generadores eólicos, en las transformaciones energéticas necesarias para transportar la energía por el mar hacia tierra y en la inyección de esta energía a la red eléctrica, con los niveles y restricciones que cada uno de estos puntos imponga a la conversión

energética, para que esta pueda ser lo más eficiente, robusta y económica posible.

Comentemos brevemente algunos detalles y retos tecnológicos en cada uno de estos apasionantes apartados, siendo conscientes, de que cada uno de ellos podría constituir un curso completo de especialización.

En las primeras propuestas de generadores eólicos (allá por el año 1957, no hace tanto), la **Electrónica de Potencia** tenía una tímida presencia, escasamente unos arrancadores suaves basados en SCR. El motor asíncrono de jaula de ardilla, el reductor,

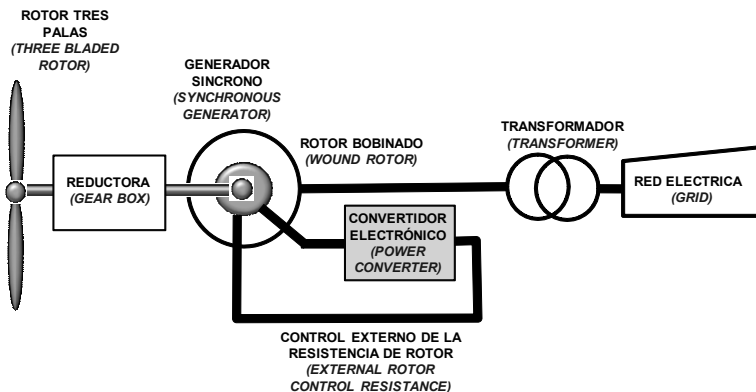


Figura 14. Generadores eólicos basados en generadores síncronos de rotor bobinado. El convertidor electrónico de potencia permite en control externo de la resistencia del rotor. Permite velocidad variable. (Fabricante VESTAS)

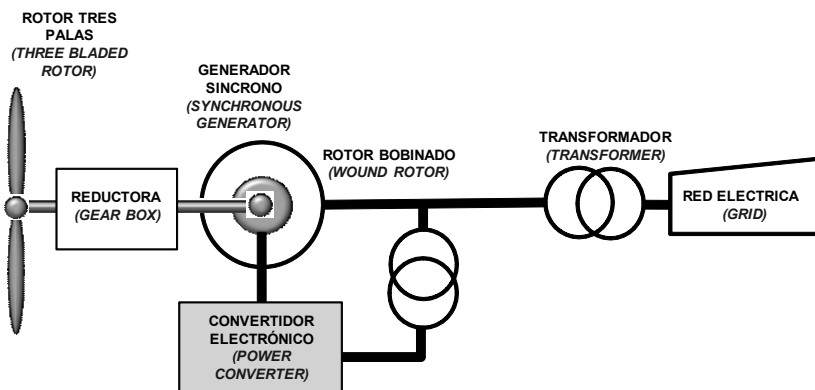


Figura 15. Generadores eólicos basados en generadores síncronos de rotor bobinado doblemente alimentado. El convertidor electrónico de potencia controla directamente la corriente del rotor. (Fabricante GAMESA)

banco de condensadores y transformadores constitúan el alma de estos sistemas iniciales de generación de energía, que debían trabajar a velocidad fija, dadas las propias limitaciones del sistema para compatibilizar su velocidad de giro con la frecuencia de trabajo de la red eléctrica.

La introducción de los variadores de frecuencia, para permitir simplemente la compensación de reactiva del motor (continuaríamos a velocidad fija) o para realizar el control electrónico completo de motor (podríamos trabajar con velocidad de giro variable en el aerogenerador), representan las primeras y

sencillas mejoras que han venido de la mano de la **Electrónica de Potencia**.

Aquí la evolución ha sido muy importante, desde las primeras y robustas estructuras de rectificadores controlados basados en SCR, que permiten el control completo del motor, hasta los más modernos sistemas de inversores (como por ejemplo los nuevos inversores electrónicos multinivel, utilizando los nuevos componentes electrónicos como IGCT o IGBT).

Accionadores para generadores de hasta 5 MW, proporcionando interface a la red eléc-

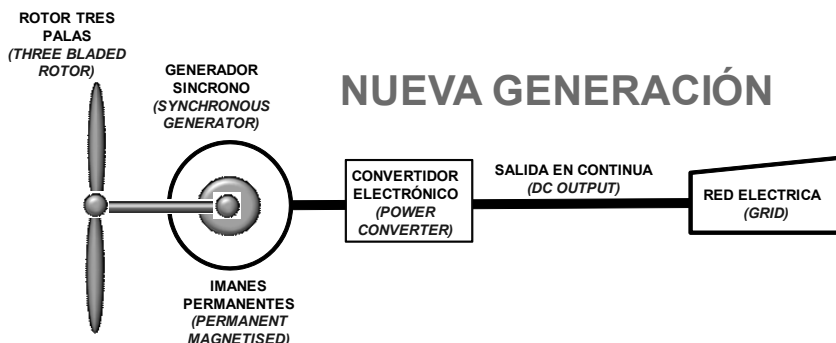


Figura 16. Nueva generación de aerogeneradores basados en motores síncronos de imanes permanentes (PMG), sin reductora (Direct Drive) y salida directa en continua para transmisión eléctrica (propuesta Windformer de ABB)

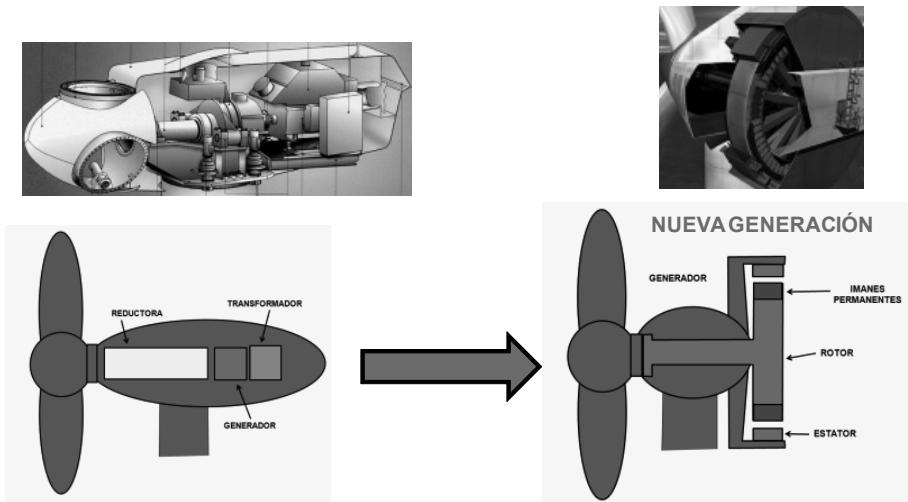


Figura 17. Comparativa entre las soluciones actuales y la nueva generación de aerogeneradores basados en motores síncronos de imanes permanentes (PMG), sin reductora (Direct Drive) y salida directa en continua para transmisión eléctrica (propuesta Windformer de ABB)

trica a tensiones de 20 KV, son hoy día realidades para los principales fabricantes (ABB, Siemens, ...).

rotor (muy utilizado por el fabricante alemán VESTAS) o los sistemas con rotor doblemente alimentado (utilizados por GAMESA).

El uso de los motores síncronos, permitiendo velocidad de giro variable, ha venido también de la mano de los avances de la **Electrónica de Potencia**, como son los sistemas electrónicos de control externo de la resistencia del

Pero los grandes avances están ahora en camino, el grueso del tamaño, del peso, del volumen y de los problemas de un generador eólico convencional, están localizados en elementos como reductoras mecánicas y

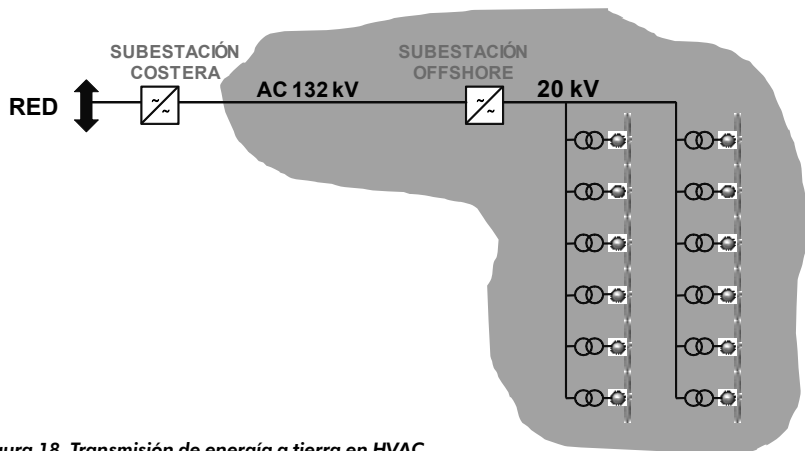


Figura 18. Transmisión de energía a tierra en HVAC

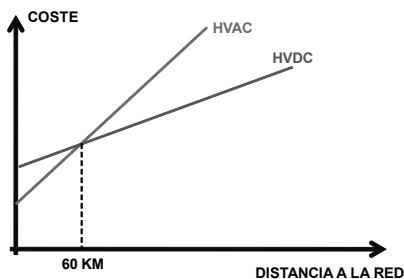


Figura 19. Comparativa de coste respecto a la distancia a la conexión de red para HVDC y HVAC.

transformadores, principalmente, que representan un volumen y peso considerable.

La **Electrónica de Potencia** combinada con generadores eléctricos de alta tensión, están provocando una verdadera revolución en este sentido.

La posibilidad de desarrollar un motor síncrono de imanes permanentes, que permita eliminar la reductora mecánica, está ahora en la mente de los principales fabricantes y son el objeto de los nuevos desarrollos. La electrónica permite la eliminación de la reductora mecánica, realizando una conexión directa entre la hélice y el generador, permite

también el control preciso del mismo y nos ahorra una conversión energética, al implementar una salida en continua de la energía generada. Toda la infraestructura de conversión eléctrica necesita reformarse como veremos posteriormente.

Los nuevos generadores desarrollados por ABB (comercialmente "Wind Power") avanzan por esta senda y ya son realidades los primeros prototipos a escala de 0.5 MW.

Una vez la energía ha sido generada por medio de estas impresionantes instalaciones, esta, debe de ser enviada a tierra e inyectada a la red eléctrica.

La **Electrónica de Potencia** vuelve a jugar su papel en la mejora de estos procesos energéticos.

Inicialmente puede pensarse que la transmisión de energía podría realizarse por medio de líneas eléctricas convencionales (de hecho así sucede para cortas distancias), la denominada HVAC (Transmisión en alterna y en alta tensión).

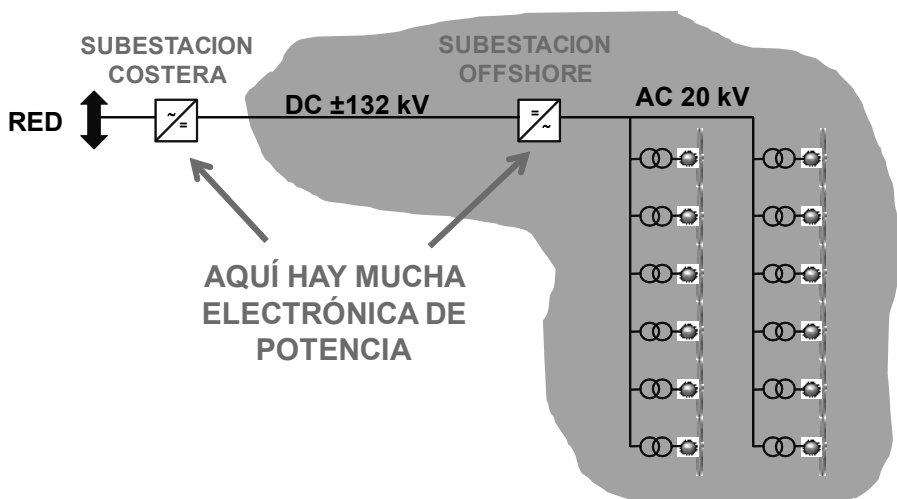


Figura 20. Transmisión alternativa en continua (HVDC)

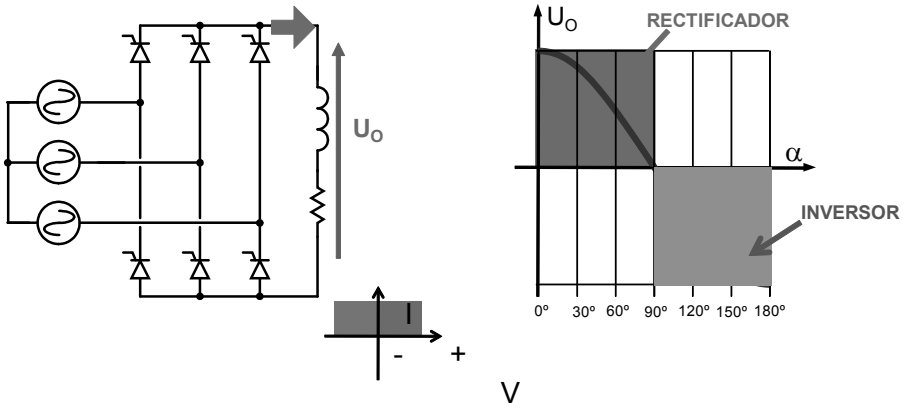


Figura 21. Rectificador controlado trifásico. Operación en dos cuadrantes. Control con el ángulo de disparo (α)

Pero las largas distancias que se van imponiendo para este tipo de instalaciones, adentrándose cada vez más en el mar, junto a la propia presencia hostil del medio marino, hacen que las pérdidas de la transmisión de alterna (sobre todo las inductivas) hagan cada vez más interesante y rentable la transmisión en continua y en alta tensión (HVDC). Hoy día esta frontera se marca en el mar

en torno a los 60 km, pero nuevamente los avances tecnológicos de la **Electrónica de Potencia** van bajando paulatinamente este umbral.

El avance tecnológico hace que ya aparezcan las primeras instalaciones en HVDC en tierra y para distancias relativamente cortas.

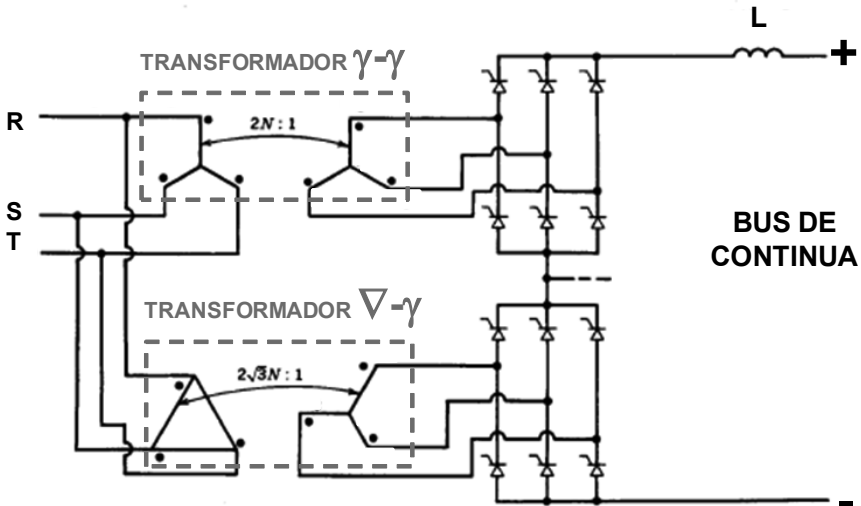


Figura 22. Combinación de dos rectificadores controlados (12 pulsos) con transformadores estrella-estrella y estrella-triángulo para mejorar la corriente de línea

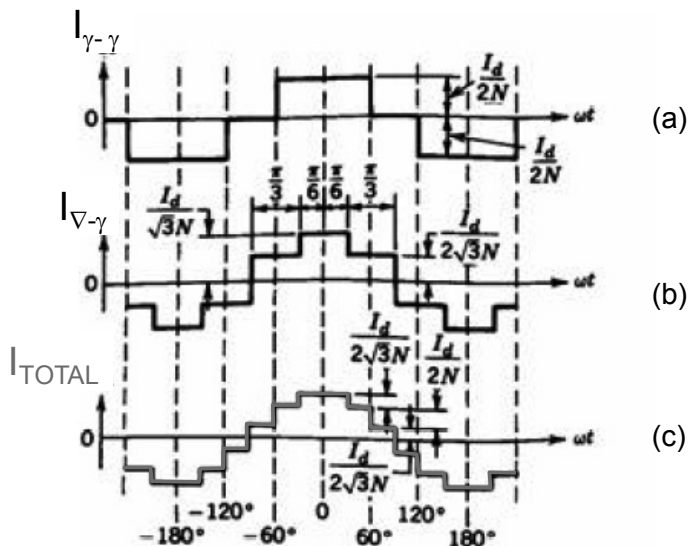


Figura 23. Corrientes de línea: (a) estrella-estrella, (b) triángulo estrella y (c) corriente de línea total

Claro, en la transmisión de energía en continua (HVDC) si hay mucha electrónica, tanto en la estación offshore (en el mar) como en la estación costera.

La más convencional basada en rectificadores controlados, circuitos electrónicos que permiten la operación en dos cuadrantes y que se desarrollan entorno a robusto SCR como semiconductor principal.

Para esta aplicación la **Electrónica de Potencia** ofrece dos soluciones.

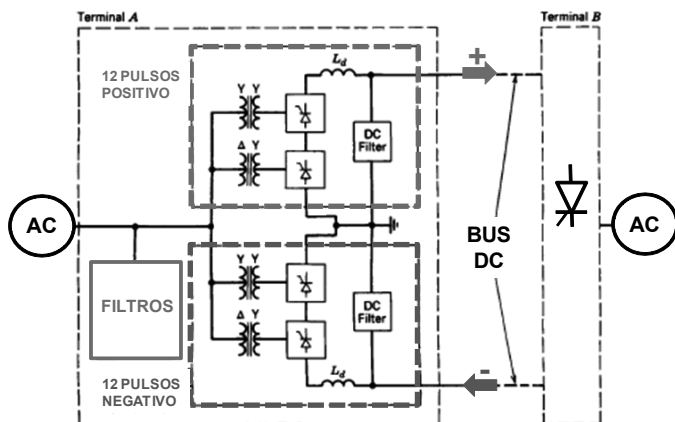


Figura 24. Configuración completa de un sistema HVDC basado en SCR

Por otro lado, las modernas estructuras de inversores, que permiten la operación en cuatro cuadrantes y, por lo tanto, mayores prestaciones y que se desarrollan en torno a semiconductores de última generación como el IGCT o el IGBT.

El rectificador totalmente controlado (basado en seis SCR o, como suele decirse, seis pulsos) es una estructura bien conocida, que mediante el adecuado disparo de los SCR (ángulo de disparo) permite la operación como rectificador o como inversor (es decir, extraer o entregar energía a la red).

Desafortunadamente, las corrientes inyectadas a la red eléctrica son muy poco sinusoidales y dado los niveles de potencia que se manejan, implicarían distorsiones, pérdidas e interferencias inaceptables.

La combinaciones de estas estructuras con transformadores (estrella-triángulo y triángulo-estrella) utilizando 12 SCR (o 12 pulsos), va introduciendo complejidad al asunto, a medida que se mejora la forma de la

corriente inyectada a la red.

Los sistemas de transmisión que se emplean en los parques eólicos offshore, utilizan dos bloques completos de 12 SCR con transformador (una para la tensión positiva y otro para la negativa), incorporando adicionalmente filtros específicos para lograr que las formas de onda sean lo más sinusoidales posibles. Conceptualmente, son sistemas sencillos, pero globalmente configuran un sistema de transmisión complejo y voluminoso.

Podemos mencionar aquí el proyecto Romulo-Cometa (Siemens), que une Valencia con Mallorca, mediante una línea de HVDC de 250 Km, con una potencia de 400 MVA a una tensión de ± 250 kV, utilizando esta tecnología.

La otra alternativa son los inversores, conceptualmente el procedimiento es aún más sencillo.

Con ayuda de una inductancia entre la red y el inversor, se puede conseguir extraer o

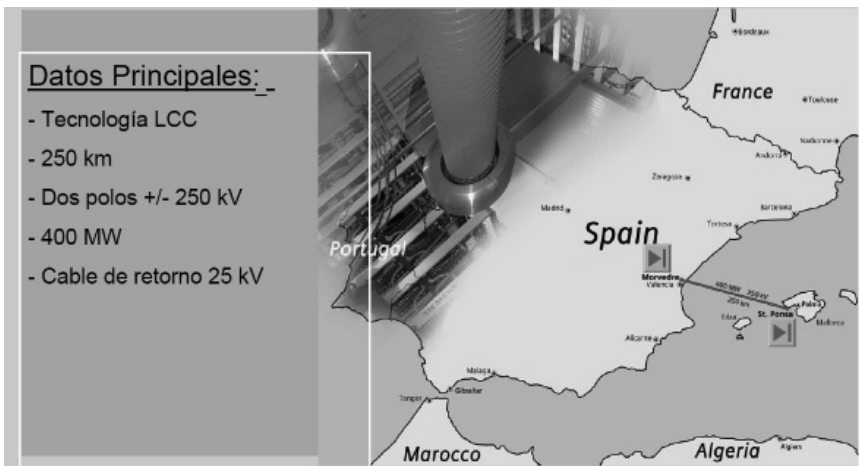


Figura 25. Un proyecto HVDC en España. Proyecto Rómulo-Cometa. Enlace Valencia-Mallorca. 250 KM, 400 MVA y 250 kV. (Cortesía de Siemens)

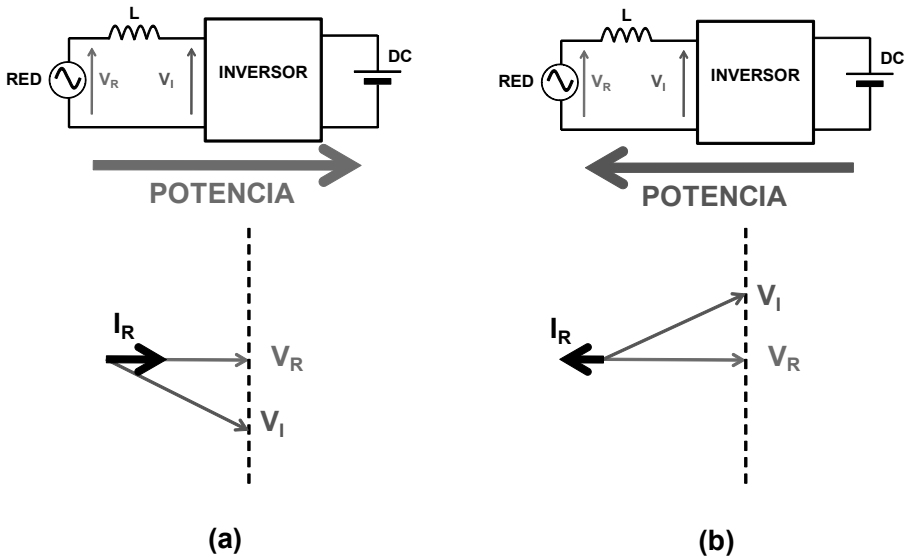


Figura 26. Uso de un inversor monofásico para extraer energía de la red (a) o entregar energía a la red (b) con factor de potencia unidad.

entregar energía con factor de potencia unidad, o cualquier otra posibilidad que deseemos implementar (comportamiento capacitivo o inductivo).

Permitiendo una flexibilidad y posibilidades solo limitadas por nuestra imaginación y por nuestra capacidad técnica para llevarlas a cabo.

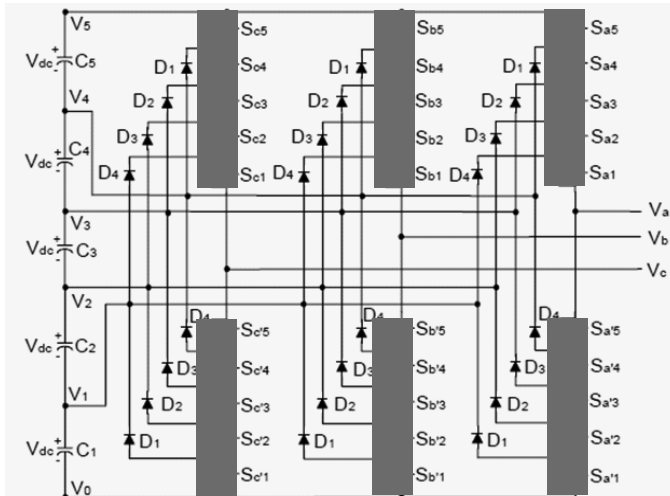


Figura 27. Inversor trifásico multinivel (6 niveles) con enclavamiento por diodo. Utiliza seis módulos de cinco IGBT.

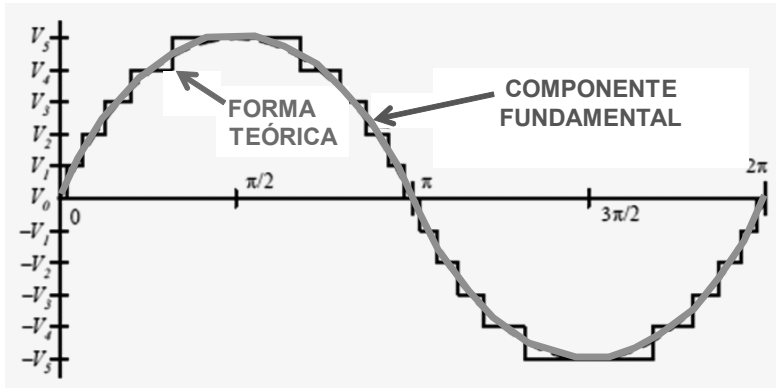


Figura 28. Formas de tensión de una fase en un inversor trifásico multinivel (6 niveles).

Las estructuras de inversores trifásicos multinivel están provocando una verdadera revolución en el campo de la transmisión de energía en continua (HVDC) y, también, en el de las energías renovables en general, en la tracción eléctrica, en los vehículos eléctricos, etc.

Existen varias técnicas:

- Inversor multinivel con puentes en cascada (*Cascaded H-Bridges Multilevel Inverter*), que precisa trabajar con fuentes de continua separadas.
- Inversor multinivel con enclavamiento por diodo (*Diode Clamped Multilevel Inverter - Neutral Clamped*).

miento por diodo (*Diode Clamped Multilevel Inverter - Neutral Clamped*).

- Inversor multinivel con enclavamiento por condensador (*Flying Capacitors Multilevel Clamped - Capacitor Clamped*).

Profundizar en estas topologías y sus técnicas de control caen fuera del objeto de esta lección de entrega de diplomas y sería más bien objeto de un pequeño curso de especialización.

Un inversor trifásico de 6 niveles, precisa de seis módulos de cinco interruptores (por

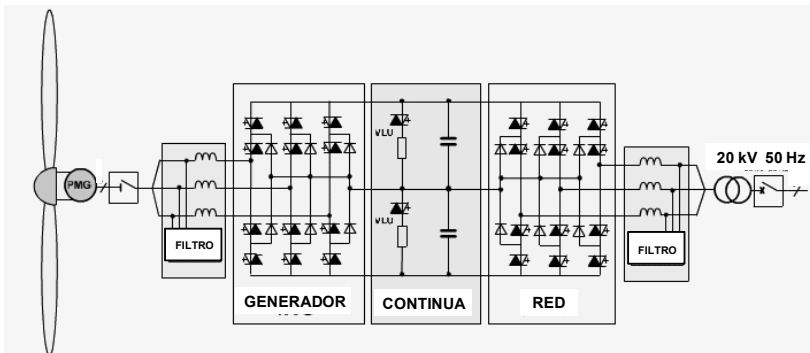


Figura 29. Un accionador basado en inversores multinivel (3 niveles) para un aerogenerador de 5 MW, salida en 20 kV. Los interruptores utilizados son IGCT. Cortesía de ABB.

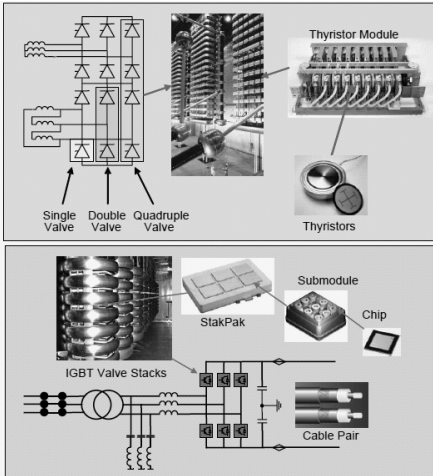


Figura 30. Conversión HVDC con rectificadores controlados respecto a inversores (cortesía de Siemens)

ejemplo IGBT) y de una compleja estructura de control y de gobierno de cada uno de los interruptores, por el contrario se pueden obtener formas de onda muy sinusoidales, con un excelente reparto de esfuerzos en cada uno de los interruptores.

El número de trabajos, publicaciones y desarrollos en este campo es de creciente actualidad, haciendo felices a los expertos en

control y simulación digital que han encontrado en este tema un interesante campo de trabajo, abierto a complejas y elaboradas técnicas de control.

La transmisión de energía en HVDC por este procedimiento se abre camino frente al sistema convencional (en principio más robusto, pero sistema más voluminoso y pesado). Solo hay que pensar en nombre comercial que ha dado a este sistema uno de los principales fabricantes como ABB: lo denomina "HVDC LIGHT".

Estos nuevos sistemas, más ligeros, de conversión a alterna a continua (y viceversa) unido a los anteriormente desarrollos de motores asíncronos de imanes permanentes y de alta tensión, son la antesala del futuro, donde la conversión a continua está integrada en el propio aerogenerador y no hacen falta conversiones energéticas intermedias, en un medio hostil como es el marino.

Algunos fabricantes como Siemens, ya imaginan un futuro con líneas de transmisión en continua (autopista de tensión continua) inter-

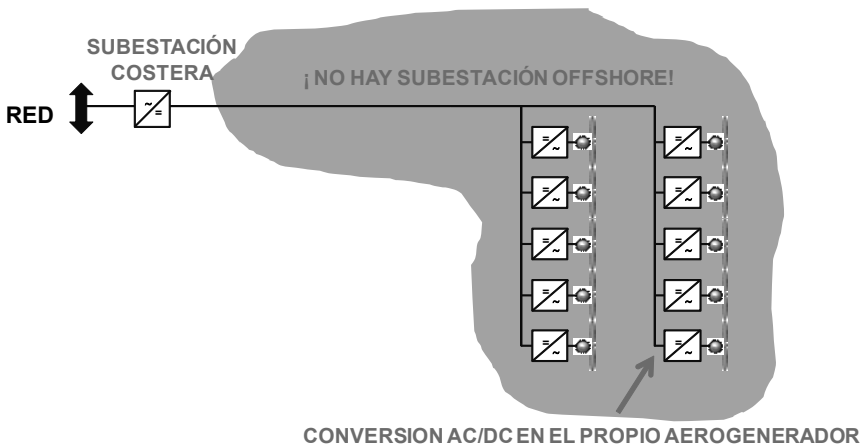


Figura 31. Estrategia de futuro. Generadores de imanes permanentes, con accionamiento directo, salida directamente en continua y sin subestación offshore.

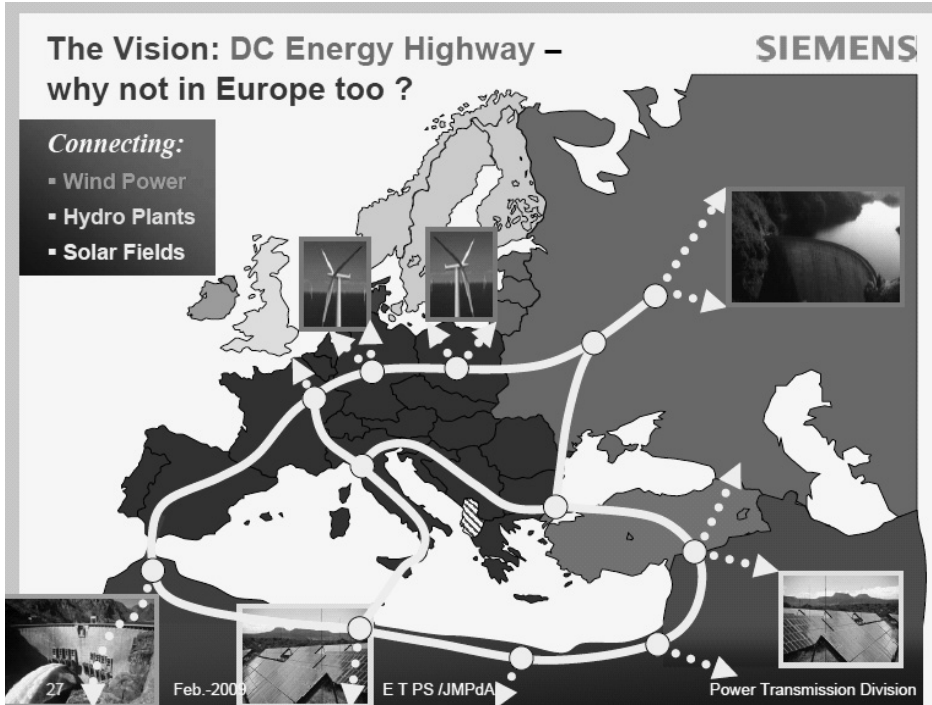


Figura 32. ¿Líneas de transmisión en continua que interconectan todas las fuentes europeas de energías renovables?. Cortesía de Siemens.

conectando los sistemas limpios de generación de energía y permitiendo un reparto y utilización más eficiente de la energía generada.

Y con esto voy a acabar mi lección, y quiero acabarla como la empecé, enfatizando la necesidad de la agregación y de la multidisciplinariedad de la que tanto sabemos los ingenieros.

Habréis visto que es este campo, como en otros muchos, la ingeniería electrónica, la eléctrica, la mecánica, la mecánica de fluidos, los materiales, la trasmisión de calor, la cogeneración y un largo etcétera se dan la mano para abordar retos que están en la frontera de la tecnología.

Quiero dejar constancia también, que es una satisfacción para un profesor de esta Escuela, contactar con empresas que se dedican a actividades en este campo y encontrarse con ingenieros formados en nuestra Escuela, que desarrollan exitosamente su actividad en estos campos tecnológicos tan punteros, a partir de la formación que hemos sabido y podido transmitirles.

“En la Universidad hay y se forman personas capacitadas para abordar estos y otros retos tecnológicos y técnicos”

Acabo con una imagen prestada por la Universidad de Ciencias Aplicadas de Bremerhaven – Alemania. Entre otros temas, se



Figura 33. Las obras de ingeniería también son cultura. Aerogenerador del parque eólico offshore alemán ALPHA-VENTUS. Cortesía de University of Applied Sciences Bremerhaven.

dedican a trabajar en temas de acuicultura ligados a parques eólicos offshore y que, en principio, no son sospechosos de ser ingenieros. La imagen reivindica a las grandes obras de ingeniería como parte integrante de nuestra cultura (como las grandes catedrales o monumentos).

Mucha suerte en vuestra actividad profesional o académica que hoy empezáis oficialmente.

Muchas gracias a todos por la atención prestada.

