VI.- AEROGENERADORES MODERNOS

pfernandezdiez.es

VI.1.- INTRODUCCIÓN

Opciones de diseño en generadores y conexión a red.- La parte eléctrica se puede diseñar tanto con generadores síncronos como asíncronos, y con varias formas de conexión del generador, directa o indirecta, a la red.

La conexión directa a red significa que el generador está conectado directamente a la red de corriente alterna (generalmente trifásica).

La conexión indirecta a red significa que la corriente que viene del alternador pasa a través de una serie de dispositivos que ajustan la corriente para igualarla a la de la red; en generadores asíncronos esto ocurre de forma automática.

Opciones de velocidades del generador.- La topología empleada para convertir la energía mecánica procedente del viento en energía eléctrica condiciona directamente el comportamiento de la aeroturbina en cuanto a su velocidad de rotación. La forma en que dicha velocidad pueda variar es decisiva en cuanto:

Al aprovechamiento del recurso eólico, por la variación del TSR
Al impacto por la interconexión del aerogenerador a la red eléctrica
A las solicitaciones mecánicas a las que se ve sometido

Velocidad constante.- En estas máquinas la variación de la velocidad es menor del 2%; para conseguir un mayor aprovechamiento del viento, la configuración más utilizada es la de un motor asíncrono directamente conectado a la red eléctrica; una variante muy extendida es la de emplear un generador asíncrono con dos devanados, uno de 6 polos para velocidades del viento bajas y otro de 4 polos para velocidades del viento mayores.

Velocidad prácticamente constante.- En estas máquinas la variación de la velocidad es menor del 10%; son generadores asíncronos con resistencias en el rotor, de forma que permiten mayores desviaciones de deslizamiento.

Velocidad variable.- Son las máquinas con mayor presencia en el mercado con generadores:

- Asíncronos doblemente alimentados

- Síncronos conectados a la red mediante un enlace de continua

siendo en ambos casos las variaciones de velocidad obtenidas similares.

En la segunda opción se encuentran los sistemas de transmisión directa que utilizan un generador síncrono multipolos sin caja multiplicadora.

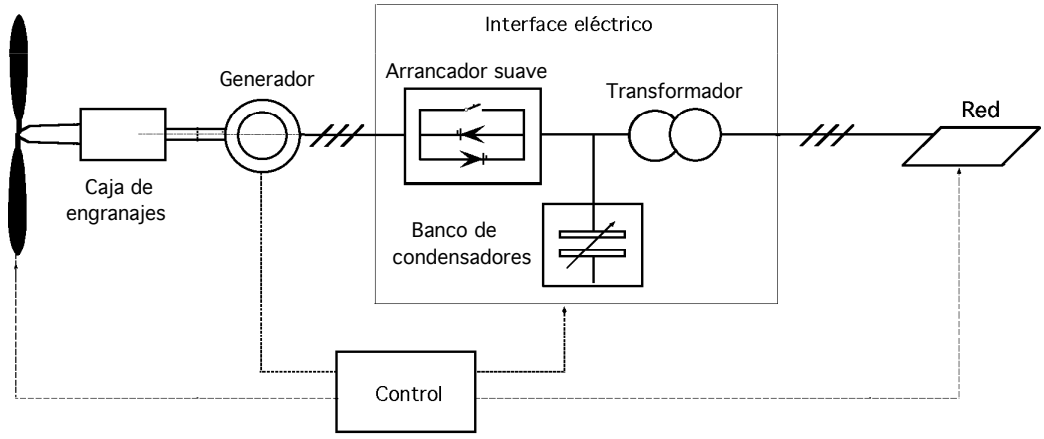


Fig VI.1.- Aerogenerador de velocidad fija con banco de condensadores

Sistema de refrigeración.- Los generadores necesitan refrigeración durante su funcionamiento. En la mayoría de las aeroturbinas la refrigeración se lleva a cabo encapsulando el generador en un conducto, utilizando un gran ventilador para la refrigeración por aire.

Algunos fabricantes usan generadores refrigerados por agua, más compactosa, lo que les proporciona algunas ventajas en cuanto a rendimiento eléctrico, precisando de un radiador en la góndola para eliminar el calor del sistema de refrigeración.

VI.2.- SISTEMAS DE CONTROL

VELOCIDAD DE LA AEROTURBINA

Funcionamiento por variación del ángulo de paso, (Pitch control).- El control de la potencia por variación del ángulo de paso de las palas, (control del par torsor para evitar sobrecargas en la caja multiplicadora y en el generador), es un proceso mecánico, lo que implica que el tiempo de reacción del mecanismo de cambio del ángulo de paso es un factor crítico en el diseño de la turbina.

En un generador se puede empezar a aumentar el deslizamiento una vez se esté cerca de la potencia nominal de la turbina. La estrategia de control, aplicada en un diseño ampliamente utilizado en turbinas danesas, es la de hacer funcionar el generador a la mitad de su deslizamiento máximo cuando la turbina está funcionando próxima a su potencia nominal.

Se diferencian dos estrategias de control de potencia, según que la potencia generada esté por encima o por debajo del régimen de funcionamiento nominal:

a) Cuando sopla una ráfaga de viento, se supera la potencia nominal; las señales del mecanismo de control hacen que el deslizamiento aumente permitiendo que el rotor gire un poco más rápidamente, hasta que el mecanismo de cambio de paso de las palas pueda hacer frente a la situación, orientándolas, pasando a capturar menos potencia del viento; una vez que el mecanismo de cambio de paso ha hecho su trabajo, el deslizamiento disminuye de nuevo.

b) En el caso de que el viento caiga de repente, el mecanismo aplicado es el inverso. El control comprueba varias veces por segundo la potencia generada, al igual que en el caso anterior, y como interesa capturar la máxima energía posible del viento, el control modifica el ángulo de paso al óptimo.

Aunque estos conceptos puedan parecer simples, asegurar que los dos mecanismos de control cooperan de forma eficiente es todo un reto técnico.

El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele ser hidráulico o mediante motores de continua, alojados en el cubo.

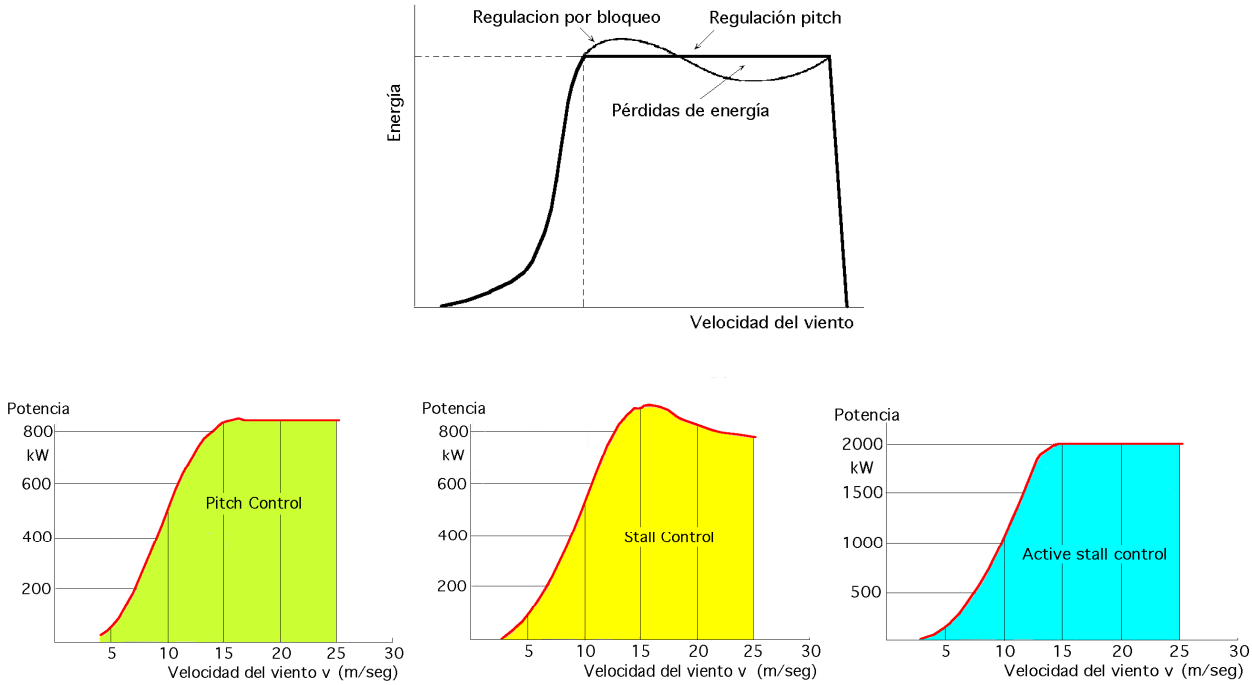


Fig VI.2.- Curvas de potencia para máquinas reguladas por Pitch, Stall y Pitch-Stall

Control por pérdida aerodinámica, (Stall control).- Los aerogeneradores de regulación por

pérdida aerodinámica tienen las palas unidas al cubo en ángulo fijo; el perfil de la pala está diseñado aerodinámicamente para asegurar la pérdida de sustentación al alcanzar la velocidad de diseño.

La principal ventaja de la regulación por pérdida aerodinámica es que se evitan las partes móviles del rotor y el complejo sistema de control.

En contra presenta un problema de diseño aerodinámico muy complejo, con las complicaciones que se derivan de las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación.

El ángulo de incidencia del viento es mayor en la base de la pala (unida al cubo) que en la punta (donde ya se ha desviado el tubo de corriente); la pala está torsionada con el fin de que el ángulo de ataque sea el óptimo en toda ella para provocar gradualmente, a velocidades del viento altas, la pérdida de sustentación a lo largo de la misma.

Control activo por pérdida aerodinámica, (Active stall control).- En los aerogeneradores de mayor potencia se ha incorporado un *active stall* en el que las palas pueden girar sólo unos grados, menos de 10º, *pitch*, para ajustar mejor el perfil de *stall* (pérdida) en la zona de altas velocidades del viento (18÷25 m/seg). Técnicamente estos aerogeneradores se parecen a los de regulación por cambio del ángulo de paso, dado que ambos tienen las palas orientables. Para obtener una fuerza de giro razonablemente alta a velocidades del viento bajas, las palas se orientan (como máximo 10º) como en los aerogeneradores de regulación por cambio del ángulo de paso.

Sin embargo, cuando el aerogenerador alcanza la velocidad nominal presenta una diferencia importante respecto a la regulación por cambio del ángulo de paso; si el generador se sobrecarga, las palas de la turbina se orientan en sentido contrario al que lo harían las reguladas por cambio del ángulo de paso, es decir, se aumenta el ángulo de paso de las palas para que se produzca antes la pérdida de sustentación, con el fin de consumir el exceso de energía del viento generando turbulencias.

La principal ventaja de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia se controla con más exactitud que con la regulación pasiva y, además, la máquina puede funcionar casi a potencia nominal para un amplio rango de velocidades del viento (en el caso de un aerogenerador con regulación pasiva por pérdida aerodinámica, a altas velocidades del viento se produce una caída en la producción de energía eléctrica, ya que las palas tienen una pérdida de sustentación mayor).

El mecanismo de regulación suele ser hidráulico o eléctrico y se aloja en el cubo.

Control de la potencia.- La potencia generada en los aerogeneradores procede del viento, que no es controlable, por lo que se requiere de un sistema de regulación que controle la energía extraída por el rotor. El punto de funcionamiento de la turbina eólica se determina continuamente con la velocidad y la variación del viento, pudiéndose distinguir unos estados operativos básicos, que super-

visa continuamente el sistema de control:

a) Turbina parada, consecuencia de que la velocidad del viento es menor que la velocidad de conexión, (suele ser de 3 a 5 m/seg), o que la velocidad del viento sea muy elevada

b) Turbina a carga parcial, en la que interesa capturar del viento la máxima energía posible para llegar cuanto antes a la potencia nominal, que será la velocidad del viento, entre 12 y 15 m/seg

c) Turbina a plena carga, en la que la velocidad del viento es mayor que la nominal y menor que la de desconexión, del orden de 25 m/seg

El control de aerogeneradores consiste en un sistema de $\begin{cases} Supervisión \\ Control\ de\ la\ potencia\ y\ velocidad \end{cases}$

El sistema de control encargado de la supervisión, a partir de las mediciones, genera:

- Valores de referencia para el sistema de control de potencia y de la velocidad

- Señales de control secuenciales, haciendo posible que el aerogenerador pase de un estado operativo a otro

- Chequeos secuenciales del estado del aerogenerador, realizando las funciones de protección

El sistema de control de $\begin{cases} potencia\ (que\ actúa\ sobre\ el\ rotor) \\ velocidad\ (que\ actúa\ sobre\ el\ convertidor\ que\ gobierna\ el\ generador) \end{cases}$, se puede considerar como dos subsistemas por separado.

El sistema de control de *potencia* controla el par, suavizando la potencia de salida del aerogenerador, amortiguando las oscilaciones electromecánicas.

El sistema de control de *velocidad* controla el ángulo de paso de las palas, con el fin de:

- Capturar toda la energía posible para unas condiciones atmosféricas dadas

- Proteger el rotor, generador y equipos de electrónica de potencia, de sobrecargas durante ráfagas de viento

- Proteger las partes mecánicas de la aeroturbina después de la pérdida de carga, momento en que crece la velocidad del rotor, pudiéndose producir el embalamiento

A carga parcial se pueden considerar dos tipos básicos de sistemas de control de aeroturbinas:

El primero se basa en que la máxima potencia extraible del viento es para un TSR óptimo. La memoria del sistema de control tiene almacenada la curva característica de potencia de la aeroturbina y, como continuamente se están midiendo la velocidad del viento y del rotor, se calcula el TSR correspondiente y se le compara con el óptimo de referencia. La señal de error se transmite al sistema de control que modifica la velocidad de la aeroturbina minimizando el error.

El segundo se basa en la potencia máxima. Cuando el aerogenerador está en funcionamiento, la velocidad del rotor puede aumentar o disminuir en pequeños incrementos, midiéndose continuamente la potencia generada en función de la velocidad del viento.

Si la variación de la potencia es $\frac{dN}{dw} > 0$, *la velocidad del rotor se incrementa; si* $\frac{dN}{dw} < 0$, *la velocidad del*

rotor disminuye y si $\frac{dN}{dw} \approx 0$*, la velocidad del rotor no se modifica.*

La estructura del sistema de control depende del tipo de aerogenerador utilizado.

Para aerogeneradores de velocidad constante (con variación del ángulo de paso), el sistema de control actúa sobre las palas del rotor.

Para aerogeneradores de velocidad variable se tiene, además, el control de la velocidad.

En algunos casos se utilizan sistemas de control diferentes para el arranque, parada y operaciones intermedias

Las tecnologías de conversión pueden ser varias según:

El tipo de generador que empleen
El control de potencia aerodinámico que les caracteriza
La necesidad de utilizar caja multiplicadora, o no
Empleen convertidor y si éste es para toda la potencia o para parte de la potencia

VI.3.- AEROGENERADORES DE VELOCIDAD CONSTANTE

En los aerogeneradores de velocidad constante, pala fija y regulación por "stall", equipados con generador de inducción asíncrono rotor jaula de ardilla conectado directamente a la red, sin convertidor, es necesario utilizar una caja multiplicadora y un compensador de reactiva para reducir la demanda de potencia reactiva a la red (una solución menos económica consistiría en introducir un convertidor). Para compensar el consumo de reactiva van equipados con un banco de condensadores.

Los aerogeneradores de la Fig VI.3, series I, II y III, están conectados directamente a la red, sin convertidor, por lo que no es posible controlar rápidamente la potencia activa.

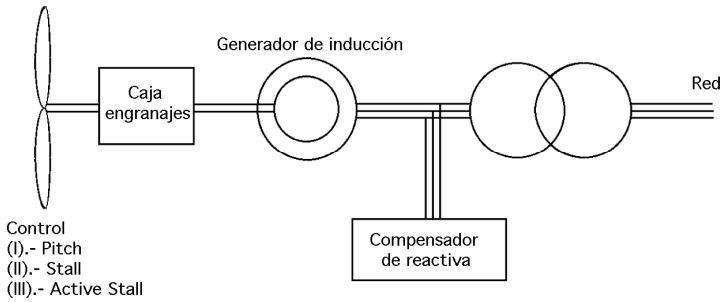


Fig VI.3.- Aerogenerador con generador de inducción, sin convertidor: Tipo I con regulación de potencia por variación del ángulo de paso; tipo (II) por pérdida aerodinámica; tipo (III) por perdida aerodinámica activa

La regulación pasiva por pérdida aerodinámica I no permite limitar la potencia.

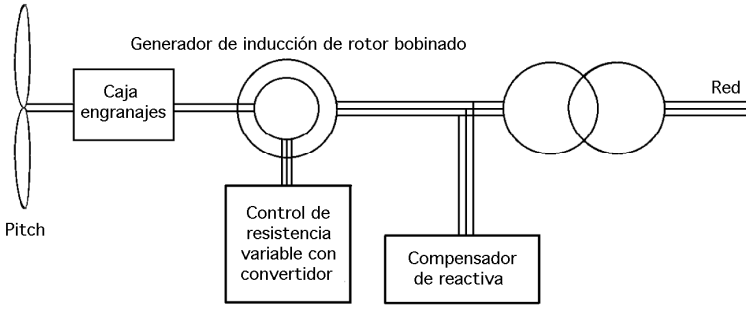
Si se desea un control que no provoque tantos problemas estructurales se recurre a la regulación activa ya sea por $\begin{cases} \textit{variación del ángulo de paso I (Pitch)} \\ \textit{pérdida activa aerodinámica III (Active stall)} \end{cases}$

Para evitar las altas corrientes de arranque se usa un *soft-starter*, (arrancador suave).

En los modelos de mayor potencia, Fig VI.4, tipo IV hasta 2 MW, se incorpora un *active stall* en el que la pala puede girar hasta 10º, para ajustar mejor el perfil de *stall* (pérdida) en la zona de altos vientos (18÷25 m/seg); algunos modelos están equipados con dos generadores:

- *Uno de potencia nominal para vientos medios y altos*
- *Otro de una fracción de la misma, para funcionar a bajas potencias en caso de vientos bajos*

necesita un compensador de reactiva en funcionamiento continuo y un arrancador suave.



Campo de velocidad más alto; Tensiones mecánicas más bajas ; Menores pulsaciones en la red
Mantiene la compensación de energía reactiva ; Usa básicamente colector de anillos
Mejora en OptiSlip (no anillos) ; Campo de velocidades limitado al 5 -10% de la velocidad nominal
Elevadas pérdidas de energía en el rotor

Fig VI.4.- Aerogenerador (Tipo IV) con generador de inducción de rotor bobinado con una resistencia variable controlada por un convertidor, caja multiplicadora y compensador de reactiva

Ante los problemas mecánicos a que se ve sometido el sistema cuando se producen ráfagas de viento, algunos fabricantes han optado por generadores de rotor bobinado que permiten añadir resistencias en el rotor para variar la velocidad en un pequeño rango, controladas con el convertidor electrónico (de poca tensión y elevada corriente), permitiendo actuar sobre la velocidad en la que trabaja el generador. Es, por lo tanto, un controlador dinámico del deslizamiento que ofrece un campo de variación de la velocidad desde la de sincronismo, hasta un 10% más cuando la resistencia del rotor es máxima. Para evitar la presencia de anillos rozantes, las señales de control se transmiten mediante una conexión óptica (sistema *Opti Slip*), que es una variante interesante del generador de inducción de deslizamiento variable que evita los problemas que introducen los anillos rozantes, las escobillas, las resistencias externas y el mantenimiento.

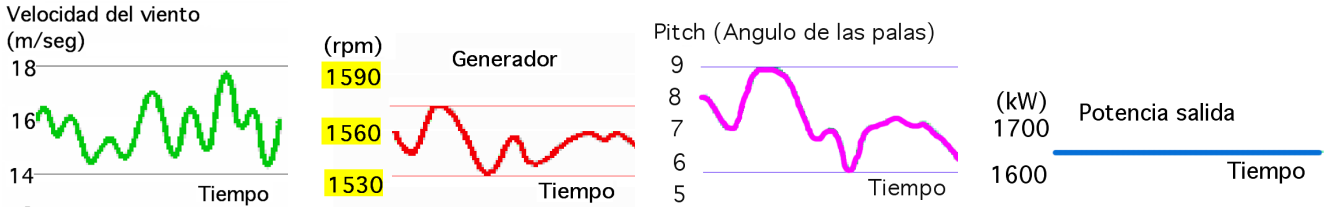


Fig VI.5.- Medidas de la velocidad del viento, velocidad del rotor, ángulo de las palas y potencia de salida

Montando las resistencias externas y el sistema electrónico en el rotor, el problema de cómo comunicarle al rotor la cantidad de deslizamiento que necesita, lo resuelve usando comunicaciones de

fibra óptica, enviando la señal a través de la electrónica del rotor cada vez que pasa por una fibra óptica fija.

Comportamiento respecto a la red.- Estas aeroturbinas transmiten las variaciones de potencia del viento a la red sin amortiguarla, por lo que la potencia de salida a la red es muy variable, con fuertes picos en caso de ráfagas de viento. También transmiten el efecto de interferencia que hacen las palas al pasar delante de la torre, en la región de $3 \div 8$ Hz, lo que es una causa de *flicker*, (parpadeo).

La *regulación de la frecuencia* de la velocidad de giro es sólo posible si se puede cambiar el número de polos de la máquina o se tienen dos generadores (uno para vientos medios y altos, y otro para vientos bajos). Lo mismo sucede con la *regulación de la tensión* ya que siempre está consumiendo reactiva, pudiéndose regular sólo un pequeño margen con la batería de condensadores para obtener un factor de potencia (cos j) próximo a la unidad.

Ante los huecos de tensión reacciona aumentando la velocidad de giro de las palas ya que el par eléctrico resistente se reduce con el cuadrado de la tensión, al disminuir ésta por el hueco.

Para evitar el embalamiento de la máquina, ésta se desconecta para protegerla de la sobrevelocidad. Sin embargo, si la duración del hueco es pequeña, por despejarse rápidamente la falta que lo ha producido, se aplica de nuevo el par resistente eléctrico frenándose la máquina. La inestabilidad de la máquina depende del tiempo que se tarde en eliminar la falta, por lo que se puede establecer un tiempo mínimo para evitar que se disparen las protecciones de sobrevelocidad de la máquina.

El tipo de falta, es decir su severidad y grado de generación eólica (magnitud del viento) en el momento de producirse el hueco, influyen en la aceleración que adquiere el aerogenerador, por ser diferentes los pares eléctrico y mecánico producidos.

VI.4.- AEROGENERADORES DE VELOCIDAD VARIABLE

a) Con control Pitch, equipados con generador asíncrono de rotor devanado y convertidor electrónico entre el rotor y la red

El estator está acoplado directamente a la red a través de un transformador; el rango de variación de la velocidad del generador es en uno de cuatro polos, desde $1400 \div 1750$ rpm. La caja multiplicadora es de tres etapas, con una relación de multiplicación 1/60.

El control de la potencia es más exacto ya que se recurre a una regulación activa, variando el ángulo de paso, ó variando la velocidad, optimizando la energía extraída del viento a distintas velocidades del mismo.

Con el uso de convertidores (ya sean pequeños convertidores que controlan la corriente de exci-

tación, como convertidores para toda la potencia del generador) se pueden controlar las corrientes de las dos partes del convertidor, el lado del rotor (rectificador) y el lado de la red (inversor), controlando la energía activa y reactiva descargadas en la red, mejorando la interacción con la red respecto a las condiciones de régimen permanente, la calidad de suministro y la estabilidad de tensión y fase.

- Al controlar la corriente de la parte de la red I_d se obtiene el control de la potencia reactiva por medio de la corriente directa del estator, ligada al flujo del estator

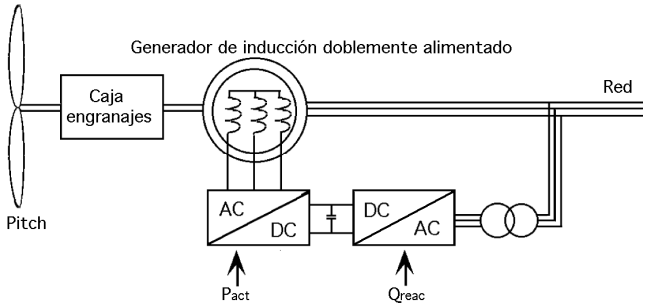
- Al controlar la corriente de la parte del rotor I_q se controla la intensidad en cuadratura ligada al par y, por consiguiente, la potencia activa

Las variaciones rápidas del viento se controlan y suavizan por el convertidor electrónico por su menor tiempo de respuesta; las variaciones del viento más lentas se gobiernan por la actuación del mecanismo de control de paso, mediante actuadores mecánicos que modifican el ángulo de ataque de la pala.

La regulación del convertidor junto con la regulación del paso de la pala, permiten obtener una curva de salida de potencia con menos variaciones que en los casos I a IV.

El tipo V Fig VI.6 utiliza un convertidor (formado por dos unidades *back to back* de IGBT unidos por una conexión en CC con un condensador de alisamiento) cuya potencia es del orden del 25 al 30% de la potencia nominal de la turbina.

El empleo de semiconductores permite la utilización de convertidores para potencias y frecuencias cada vez mayores, posibilitando, como sabemos, el control de la potencia activa, de la reactiva y de la velocidad por encima y por debajo de la velocidad síncrona del generador.



Campo de velocidades limitado entre -50% a + 30% alrededor de la velocidad sincrónica
Convertidor de energía a escala reducida (bajas pérdidas de energía) (bajo precio)
Control completo de energía activa P_{act} y de reactiva Q_{react} ; Necesita colector de anillos y caja de engranajes

Fig VI.6.- Aerogenerador (Tipo V), con generador de inducción doblemente alimentado,convertidor para el rotor bobinado, caja multiplicadora y compensador de reactiva

La potencia nominal del rotor es proporcional a la potencia nominal del estator por lo que, teóricamente, la variación de la velocidad puede ser del 100%, pero se reduce normalmente a un 30%; de esta forma, la electrónica de potencia se dimensiona para un valor cercano a 1/3 de la potencia nominal del generador.

Comparado con las configuraciones con generador de inducción I a IV, ofrece mayores posibilidades de control. Las variaciones de la velocidad del rotor se compensan ajustando las corrientes del rotor; la presencia del convertidor permite que este tipo V pueda controlar la potencia activa y reactiva, lo que le da un mejor comportamiento de cara a la conexión a red, sin necesidad de compensador de reactiva, pero sí con un arrancador suave.

Comportamiento respecto a la red.- Las turbinas de velocidad variable y generador doblemente alimentado (DFIG) tienen unas posibilidades de control mayores:

- La regulación de tensión se puede hacer actuando sobre la parte del convertidor conectado a la red controlando su corriente I_d. Se puede absorber o producir potencia reactiva aunque su rango de variación depende de las dimensiones del convertidor.

- La regulación de la frecuencia es posible actuando sobre la parte del convertidor del lado del rotor, que hace variar el par y, por consiguiente, la potencia entregada; sin embargo, su capacidad para poder soportar huecos de tensión es limitada; ante huecos importantes se deberá desconectar de la red.

No obstante, existen soluciones para evitar esta desconexión en base al uso de IGBT sobredimensionados y a separar transitoriamente el estator de la red mediante un dispositivo electrónico, lo que evita que se reflejen las corrientes estatóricas elevadas en el rotor por efecto transformador.

También se puede cortocircuitar el rotor por medio de un dispositivo llamado *active crowbar* con dos disposiciones de diodos o tiristores situados entre el rotor y la parte del convertidor conectado a él, con lo que se evita que las elevadas corrientes del rotor entren en el convertidor y, posteriormente, una vez que se detecta que se han alcanzado valores normales, volver a conectar el convertidor.

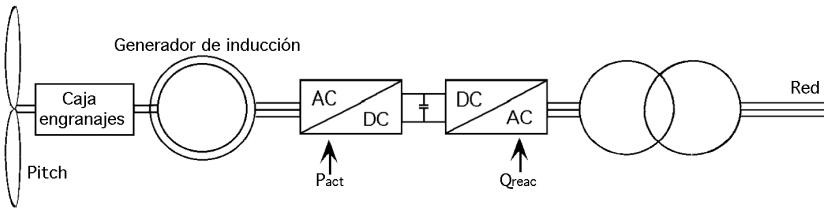
b) Con control de paso de pala, ***- equipados con generador síncrono, salvo el VI***
- acoplados directamente al eje de la turbina VIII y IX .- La
- a través de una caja multiplicadora VI y VII

última tecnología de aerogeneradores de velocidad variable utiliza un convertidor de frecuencia para toda la potencia del generador, que desacopla totalmente el generador de la red eléctrica de corriente alterna.

A la salida del generador en alterna de frecuencia variable, se acopla un convertidor electrónico formado por un rectificador y un inversor unidos por un enlace de CC.

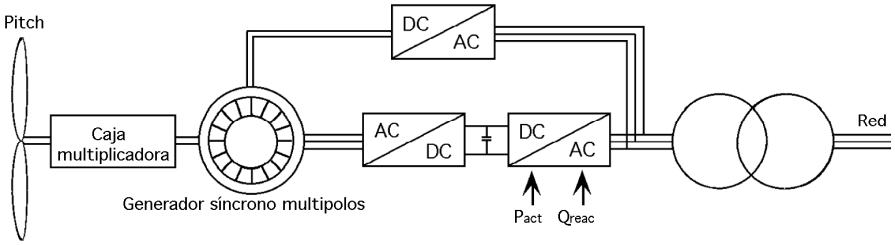
La salida del inversor se hace a la frecuencia de la red. Toda la potencia de la turbina pasa por el convertidor el cual se diseña para soportar la potencia nominal de la turbina, a diferencia del caso V

El generador puede ser asíncrono con caja multiplicadora, Fig VI.7, tipo VI, o síncrono de rotor bobinado, por lo que es necesario un convertidor para la corriente de excitación en tipos VI, VII y VIII, ó con rotor de imanes permanentes en el tipo IX.



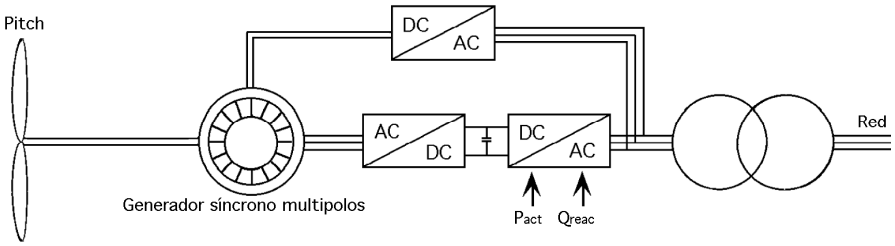
Amplia gama de velocidades ; No escobillas en el generador; Tecnología comprobada
Necesita caja de engranajes ; Control completo de energía activa P_{act} y de reactiva Q_{react}

Fig VI.7.- Aerogenerador tipo VI, con generador asíncrono, caja multiplicadora y convertidor para toda la potencia

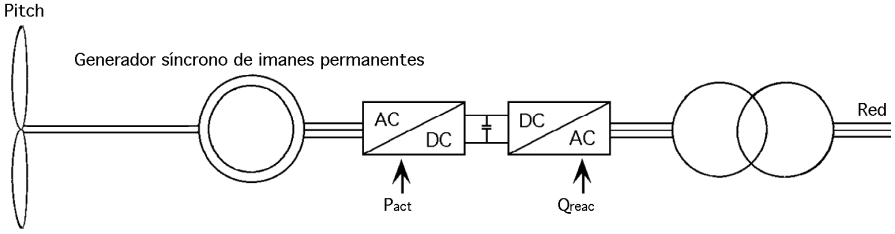


Amplia gama de velocidades ; Posibilidad de eliminar la caja de engranajes (generador síncrono multipolos)
Control completo de energía activa P_{act} y de reactiva Q_{react}
Necesita colector de anillos ; Generador multipolo grande y pesado ; Convertidor de energía a gran escala

Fig VI.8.-Aerogenerador tipo VII, con generador síncrono excitado mediante un pequeño convertidor, caja multiplicadora y otro convertidor para toda la potencia del generador



Tipo VI.9.- Aerogenerador tipo VIII, con generador síncrono multipolos, excitado mediante un convertidor de potencia parcial, con caja multiplicadora y otro convertidor para toda la potencia del generador



Amplia gama de velocidades ; Elimina la caja de engranajes
Sin escobillas (mantenimiento reducido) ; Control completo de energía activa P_{act} y reactiva Q_{react}
Generador multipolo grande y pesado ; Convertidor de energía a gran escala ; Necesita imanes permanentes

Fig VI.10.- Aerogenerador tipo IX, con generador síncrono multipolos de imanes permanentes, sin caja multiplicadora y con convertidor para toda la potencia del generador

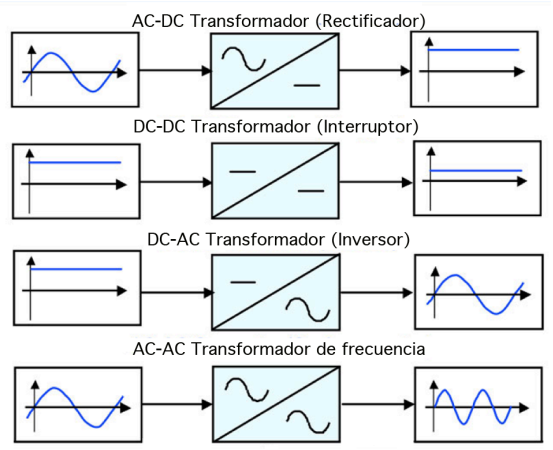
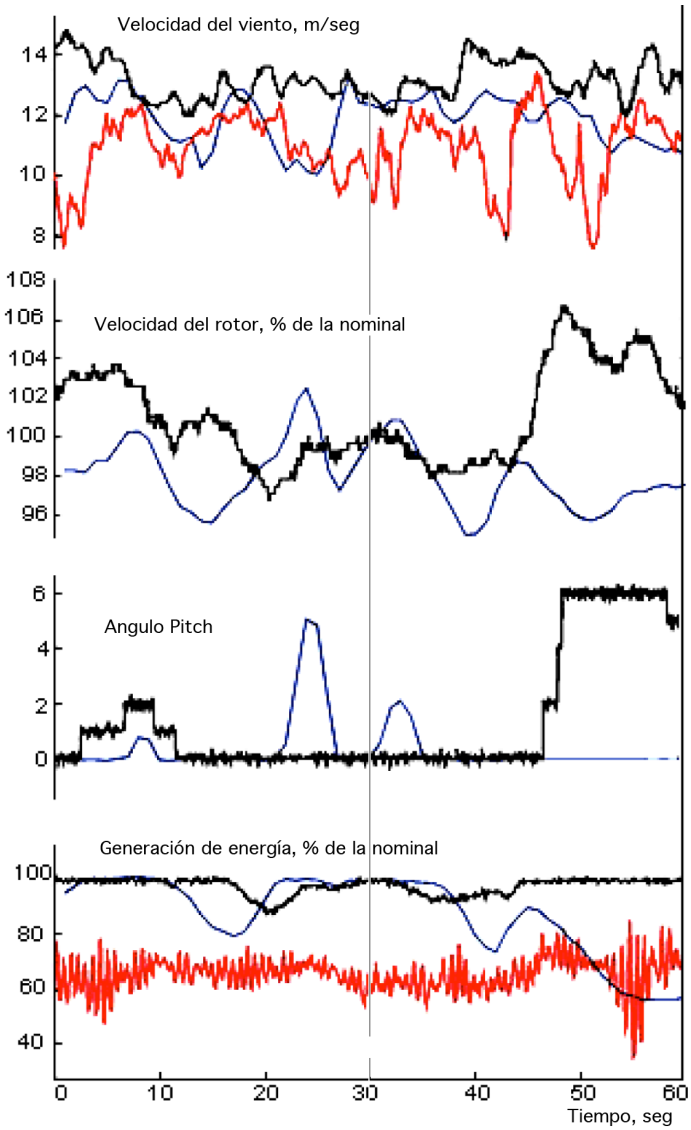


Fig VI.11.- Transformadores electrónicos de potencia básica



Las líneas rojas corresponden a una aeroturbina de velocidad fija; la velocidad del rotor y el ángulo pitch son constantes
Las azules son representativas de una turbina de velocidad variable con generador de inducción con doble alimentación
Las negras son representativas de una turbina de velocidad variable y conexión directa al generador

Fig VI.12.- Medidas de la velocidad del viento, velocidad del rotor, ángulo de las palas y energía generada, para tres diseños de aeroturbina

Comportamiento respecto a la red.- El generador puede ser síncrono o asíncrono. Estas máquinas pueden regular la frecuencia con menos problemas actuando sobre la parte del convertidor del lado de la turbina.

Sin embargo, para aumentar la frecuencia, el generador tiene que estar funcionando a una potencia inferior a la nominal o tener un parque con una potencia instalada superior a la nominal; en ambas situaciones el parque no produce a la máxima potencia.

La *regulación de tensión* es posible actuando sobre la parte del inversor; si se necesita un amplio campo de regulación de tensión, se debe sobredimensionar el inversor.

Respecto a la regulación de potencia y tensión (control de reactiva), el generador síncrono con convertidor al 100% de la potencia nominal, ofrece un mejor comportamiento frente a transitorios y una mayor flexibilidad que los dos grupos anteriores I a V.

En cuanto a la posibilidad de soportar huecos producidos por faltas, el generador síncrono los soporta actuando sobre los IGBT de la parte de red, reduciendo el incremento de corriente que se produce tras el hueco.

El suministro de corriente de alimentación cuando la falta ésta todavía sin despejar, es muy problemático dado que toda la corriente debe pasar a través del convertidor por lo que éste se puede sobredimensionar ó también desconectar para volverlo a reconectar una vez despejada la falta.

VI.5.- CONEXIÓN ROTOR-ALTERNADOR

Si se dispone de un generador ordinario conectado directamente a una red trifásica de CA a 50 Hz, con dos, cuatro o seis polos, deberíamos tener una turbina de velocidad extremadamente alta, de entre 1000÷3000 r.p.m. Con un rotor de 43 m de diámetro, esto implicaría una velocidad en el extremo del rotor supersónica, por lo que hay que abandonar esta opción.

La conexión rotor-alternador está formada por todos los elementos que se encargan de transmitir la energía del eje de baja velocidad, hasta el de alta velocidad. El acoplamiento entre el eje de baja velocidad, que transmite el par de la aeroturbina, al eje de alta velocidad del alternador, se realiza a través del eje principal, la caja multiplicadora, un acoplamiento flexible entre ésta y el alternador para proteger a la caja multiplicadora de las puntas de par, y el eje de alta velocidad.

Otra posibilidad es construir un generador de CA lento con muchos polos; pero si se conecta el generador directamente a la red para conseguir una velocidad de rotación razonable de 30 r.p.m. tendría 200 polos (300 imanes).

Otro problema es que la masa del rotor del generador tiene que ser aproximadamente proporcional al par de torsión que tiene que manejar, por lo que un generador accionado directamente será

muy pesado y caro; *por lo tanto se precisa menos par motor y más velocidad de rotación,* por lo que la solución práctica es utilizar un multiplicador, que permite la conversión entre la potencia de alto par motor, que se obtiene del rotor de la turbina eólica girando lentamente, y la potencia de bajo par de torsión, a alta velocidad, que se utiliza en el generador.

$$\textit{Relación de transmisión} = \frac{n_{generador}}{n_{turbina}} = \left| \begin{array}{l} n_{turbina} = \dfrac{30\ v\ TSR}{\pi\ R} \\ n_{generador} = \dfrac{60\ f}{z} \end{array} \right| = \frac{\dfrac{60\ f}{z}}{\dfrac{30\ v\ TSR}{\pi\ R}} = \frac{2\ \pi\ R\ f}{z\ v\ TSR}$$

en la que z es el nº de pares de polos del alternador y f la frecuencia de la corriente eléctrica

La caja multiplicadora de la turbina eólica tiene, normalmente, una única relación de multiplicación entre la rotación del rotor y el generador; para una máquina de 600÷750 kW, la relación de multiplicación suele ser de 50/1.

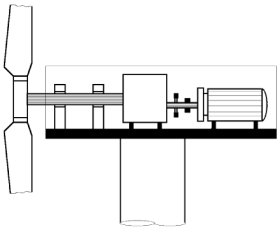


Fig VI.13.- Eje largo y cojinetes separados. Caja de engranajes apoyada por el eje como viga empotrada a la torsión

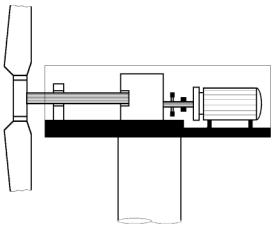


Fig VI.14.- El cojinete posterior integrado en la caja de engranajes, montada en el bastidor

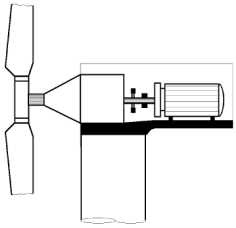


Fig VI.15.- Los cojinetes del rotor totalmente integrados en la caja de engranajes

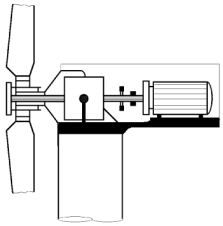


Fig VI.16.- Cojinetes del rotor sobre un árbol hueco inmóvil Transmisión de energía por un eje sometido a torsión

VI.6.- SISTEMAS DE CONEXIÓN A LA RED

Conexión indirecta de aerogeneradores a la red.- Con la conexión indirecta a la red es posible que la turbina gire dentro de una amplia gama de velocidades del viento. En el mercado se ofertan turbinas con un deslizamiento de hasta un ±35%.

Si el generador funciona a velocidad variable, la frecuencia variará ampliamente.

La corriente alterna necesita, por lo tanto, ser transformada para emparejar su frecuencia a la de la red eléctrica pública.

Hay tres partes importantes en estos sistemas: generador, corriente directa DC-rectificador y corriente alterna AC-inversor.

- El primer paso es convertir la corriente fluctuante en DC.

- A continuación la DC se invierte a la AC con exactamente la misma frecuencia que la red pública.

- El inversor produce clases diferentes de armónicos que se tienen que filtrar antes de alcanzar la red pública



Fig VI.17.- Tipos de señal eléctrica

Generación de corriente alterna AC a frecuencia variable.- La mayoría de los aerogeneradores funcionan a una velocidad casi constante con conexión directa a la red.

Sin embargo, con conexión indirecta a red, el generador de la aeroturbina funciona en su propia minired de corriente alterna que está controlada electrónicamente (utilizando un inversor), por lo que se puede variar la frecuencia de la corriente alterna en el estator del generador. De esta forma se puede hacer funcionar a la turbina a una velocidad de giro variable y se generará corriente alterna exactamente a la frecuencia variable aplicada al estator. El generador puede ser síncrono o asíncrono, y si tiene muchos polos la turbina puede tener una caja multiplicadora, o no.

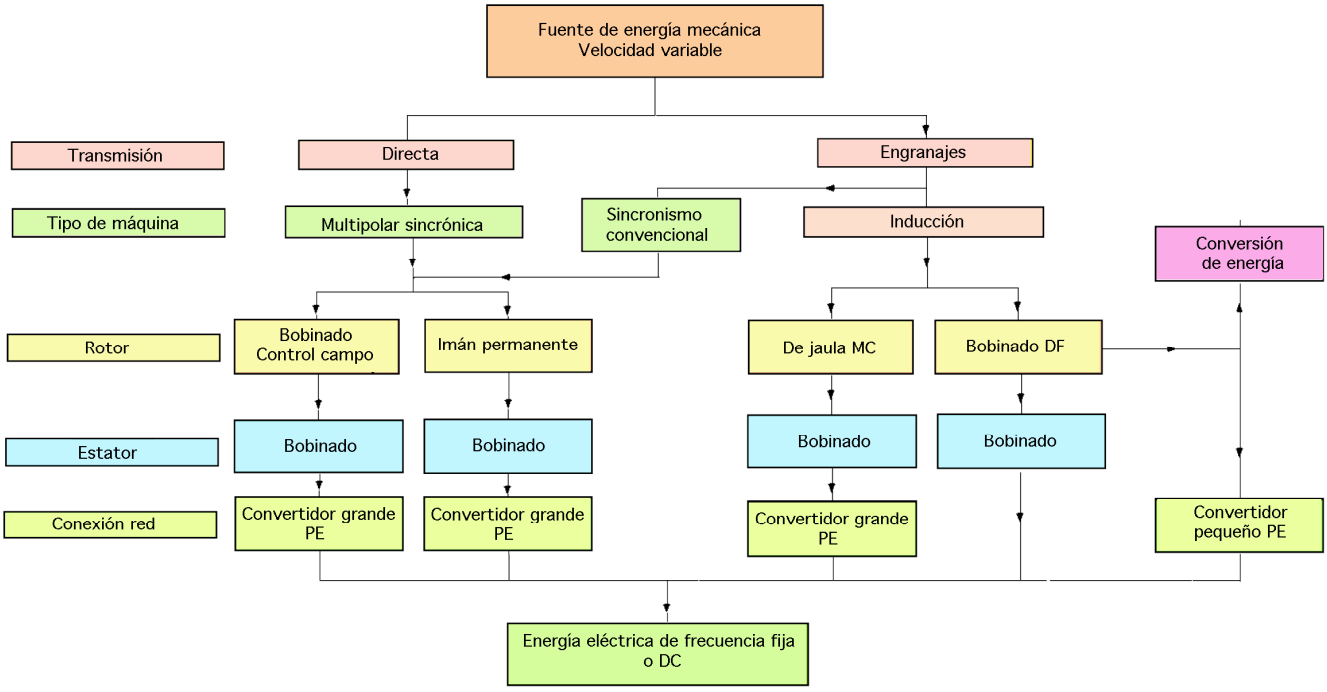


Fig VI.18.- Esquema de sistemas de conversión de energía eólica en eléctrica

Conversión a corriente continua CC.- La corriente alterna de frecuencia variable no se puede tratar en la red, por lo que previamente habrá que rectificarla, convirtiéndola en corriente continua CC; la conversión de corriente alterna de frecuencia variable a corriente continua se puede hacer utilizando tiristores o grandes transistores de potencia.

Conversión a corriente alterna de frecuencia fija.- La corriente continua (fluctuante) se convierte en corriente alterna (utilizando un inversor) de exactamente la misma frecuencia que la de la red eléctrica pública. Esta conversión de corriente alterna en el inversor también se puede hacer utilizando tiristores o transistores de potencia, que son grandes interruptores de material semiconductor que funcionan sin partes mecánicas. A primera vista, la clase de corriente alterna que se obtiene de un inversor no tiene nada que ver con la suave curva sinusoidal de la corriente alterna, sino una serie de saltos bruscos en la tensión y en la corriente, Fig VI.17.

Filtrado de la corriente alterna.- Las formas de onda rectangulares se pueden suavizar mediante filtros utilizando inductancias y condensadores apropiados; sin embargo, la apariencia más o menos dentada de la tensión no desaparece completamente.

Ventajas de la conexión indirecta a red; velocidad variable.- La ventaja de la conexión indirecta a la red es que permite hacer funcionar la turbina eólica a velocidad variable. Permite que el rotor gire más rápido durante las ráfagas de viento, almacenando parte del exceso de energía en forma de energía rotacional hasta que la ráfaga haya terminado. Esto requiere de una estrategia de control muy inteligente, ya que tiene que ser capaz de distinguir entre ráfaga y alta velocidad del viento. De está forma es posible reducir el par torsor máximo (reduciendo el deterioro del multiplicador y del generador), así como las cargas de fatiga en la torre y en las palas del rotor.

Otra ventaja es que con la electrónica de potencia se puede controlar la potencia reactiva (es decir, el desfase de la corriente respecto a la tensión en la red de corriente alterna), y así mejorar la calidad de potencia de la red eléctrica. Esto es particularmente útil en aerogeneradores funcionando en un red eléctrica débil. Teóricamente, la velocidad variable supone también una ligera ventaja en términos de producción anual, puesto que permite hacer funcionar una máquina a la velocidad óptima de giro, dependiendo de la velocidad del viento. Sin embargo, desde el punto de vista económico la ventaja es tan pequeña que no merece la pena.

Desventajas de la conexión indirecta a red.- La desventaja principal de la conexión indirecta a la red es el coste. Como la turbina necesita un rectificador y dos inversores, uno para controlar la corriente del estator, y el otro para generar la corriente de salida, parece ser que el coste actual de la electrónica de potencia excede a los beneficios que reporta el hecho de construir aeroturbinas más ligeras, aunque es posible esto pueda cambiar cuando el coste de la electrónica de potencia disminuya. Las tasas de disponibilidad de estas máquinas están por debajo de las de las máquinas convencionales, debido a fallos en la electrónica de potencia.

Otras desventajas son la pérdida de energía en el proceso de conversión CA-CC-CA, y el hecho de que la electrónica de potencia puede introducir distorsión armónica de la corriente alterna en la red eléctrica y, por tanto, reducir la calidad de potencia.

VI.7.- COMPORTAMIENTO ANTE LOS HUECOS DE TENSIÓN

Hay tres tipos de aerogeneradores instalados en España que se comportan de forma diferente ante los huecos de tensión:

Generador asíncrono de jaula de ardilla con velocidad fija de palas
Generador asíncrono doblemente alimentado con convertidor entre el rotor del generador y la red
Generador síncrono de velocidad de palas variable y convertidor entre la salida del estator y la red

Generador jaula de ardilla.- Al producirse una falta en la red y bajar la tensión en los terminales de la misma, se produce una aceleración del rotor, que produce una elevación de la velocidad de la máquina, lo que provoca la actuación de las protecciones que desconectan el generador del sistema eléctrico. Una vez despejada la falta, al recuperarse la tensión de la red, la máquina absorbe una gran cantidad de reactiva, que dificulta la recuperación de la tensión de la red en el punto de conexión.

Este tipo de aerogenerador no cumple con el Procedimiento Operativo que especifica que el consumo de reactiva no debe ser superior al 60% de la potencia nominal del aerogenerador.

La solución consiste en instalar un SVC *(Static Voltage Compensator)* para el generador o para el parque eólico, que suministre la energía reactiva y mantenga la tensión del mismo.

Generador asíncrono doblemente alimentado.- Estos aerogeneradores tienen acoplado a la salida del rotor un doble convertidor, (rectificador-inversor) con una capacidad del 30% de la potencia nominal del generador, para rectificar primero y ondular posteriormente las corrientes del rotor e inyectarlas en la red. Cuando se produce una falta se eleva la corriente del estator, aumentando bruscamente la corriente del rotor por efecto transformador. La sobreintensidad tiene que pasar por el convertidor del lado de la red en su camino hacia la misma, por lo que si no se reduce su valor puede resultar dañado el convertidor.

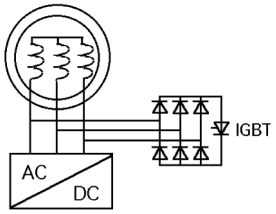


Fig VI.19.- Crowbar activo, formado por diodos y un IGBT

Existen varias soluciones técnicas para conseguir que ésto no ocurra:

a) Una consiste en utilizar el crowbar activo, Fig VI.19, (formado por diodos y un IGBT) que consiste en provocar un cortocircuito a la salida del rotor cuando se detecta el incremento de corriente, convirtiendo el generador en uno de jaula de ardilla. Una vez desaparecida la falta se vuelve a la condición inicial

b) Otra consiste en insertar, al inicio de la falta, unas resistencias en el bus de continua entre los convertidores del lado del rotor y del lado de la red

Para conseguir que la tensión de continua no sobrepase sus límites nominales, se puede utilizar en lugar de las resistencias un elemento de almacenamiento de energía tipo batería, o superconductores, devolviendo la energía almacenada a la red una vez eliminada la falta; en este caso, es necesario aumentar la capacidad del convertidor

El convertidor, con el control adecuado en el inversor, puede producir energía reactiva que ayude en la recuperación de la tensión después de despejada la falta.

Tabla VI.1.- Resumen de algunos modelos de aerogeneradores modernos

Modelo	*Aeroturbina Potencia (MW)*	*Control Velocidad*	*Concepto*	*Voltaje*	*Rango velocidad generador(rpm)*	*Rango velocidad rotor (rpm)*
VESTAS Dinamarca	*V 80- Tipo C1 2 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/DFIG*	*Generador 690 V*	*905-1915*	*9-19*
VESTAS Dinamarca	*V 80- Tipo C1 1,8 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/OPTI-SLIP*	*Generador 690 V*	*1800-1980*	*11,5-16,8*
ENERCON Alemania	*E112- Tipo D1 4,5 MW*	*Pitch Variable completa*	*WRSG Caja engranajes*	*Generador 440 V*	*8-13*	*8-13*
ENERCON Alemania	*E66- Tipo D1 2 MW*	*Pitch Variable completa*	*WRSG Caja engranajes*		*10-22*	*10-22*
NEG MICON Dinamarca	*NM 80- Tipo C1 2,75 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/DFIG*	*Estator/rotor 960 V/690 V*	*756-1103*	*12-17,5*
NEG MICON Dinamarca	*NM 72- Tipo A2 2 MW*	*Parada activa Fija*	*SCIG*	*Generador 960 V*	*2 velocidades 1002,4/1503,6*	*2 velocidades 12/18*
GAMESA España	*G 83- Tipo C1 2 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/DFIG*	*690 V*	*900-1900*	*9-19*
GAMESA España	*G 80- Tipo B1 1,8 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/OPTI-SLIP*	*690 V*	*1818-1944*	*15,1-16,1*
GE WIND USA	*Tipo C1 2,2 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/DFIG*			*8,5-13,5*
GE WIND USA	*Tipo C1 1,5 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/DFIG*			*12-20*
BONUS Dinamarca	*Tipo A2 2,3 MW*	*Parada activa Fija*	*SCIG*	*690 V*	*2 velocidades 1000/1500*	*2 velocidades 11/17*
BONUS Dinamarca	*Tipo A2 2 MW*	*Parada activa Fija*	*SCIG*	*690 V*	*2 velocidades 1000/1500*	*2 velocidades 11/17*
NORDEX Alemania	*N 80- Tipo C1 5 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/DFIG*	*660 V*	*1000-1800*	*10,9-19,9*
NORDEX Alemania	*S 77- Tipo C1 5 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/DFIG*	*690 V*	*1000-1800*	*9,9-17,3*
MADE España	*MADE AE-90 Tipo D1-2 MW*	*Pitch Variable completa*	*WRSG*	*1000 V*	*747-1945*	*7,4/14,8*
MADE España	*MADE AE-81 Tipo A0-1,3MW*	*Parada Fija*	*SCIG*	*690 V*	*2 velocidades 1010/1519*	*2 velocidades 12,5/18,8*
REPOWER Alemania	*MM 82- Tipo C1 2 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/DFIG*	*690 V*	*900-1800*	*10-20*
REPOWER Alemania	*MD 77- Tipo C1 1,5 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/DFIG*	*690 V*	*1000-1800*	*9,6-17,3*
ECOTECNIA España	*Ecotecnia 74 Tipo C1-1,67 MW*	*Pitch Variable limitada*	*WRIG/DFIG*	*690 V*	*1000-1950*	*10-19*
ECOTECNIA España	*Ecotecnia 62 Tipo A0-1,25 MW*	*Parada activa Fija*	*SCIG*	*690 V*	*2 velocidades 1012/1518*	*2 velocidades 12,4/18,6*

Generador síncrono de velocidad variable.- Estos generadores tienen instalado un doble convertidor por el que pasa toda la anergía absorbida de la fuerza del viento a la red. El generador está desacoplado de la red eléctrica, por lo que las perturbaciones transitorias de la tensión de corta duración de la red no le afectan grandemente y soporta los huecos de tensión sin mayores problemas

VI.8.- OTROS COMPONENTES

Controlador electrónico de la turbina eólica.- Consta de varios ordenadores que continuamente supervisan las condiciones de la turbina eólica, y recogen estadísticas de su funcionamiento. Como su propio nombre indica, controla un gran número de interruptores, bombas hidráulicas, válvulas y motores dentro de la turbina. Cuando el tamaño de una turbina eólica crece con los MW, se hace necesario que su tasa de disponibilidad sea alta, es decir, que funcionen de forma segura todo el tiempo.

Comunicación con el exterior.- El controlador se comunica con el operador de la turbina eólica mediante un enlace de comunicación, por ejemplo, enviando alarmas o solicitudes de servicio a través del teléfono o de un enlace radiofónico. También es posible llamar a la aeroturbina para que recoja estadísticas, y revise su estado actual. En parques eólicos, normalmente una de las turbinas estará equipada con un PC, conectado a una línea telefónica o a un enlace radiofónico, desde el que es posible controlar y recoger datos del resto de los aerogeneradores del parque.

Comunicaciones internas.- Normalmente, suele haber un controlador en la parte inferior de la torre y otro en la góndola. En los modelos recientes de aerogeneradores, la comunicación entre controladores se suele hacer utilizando fibra óptica. En algunos modelos recientes, hay un tercer controlador situado en el cubo del rotor. Esta unidad se suele comunicar con la góndola utilizando comunicaciones en serie, a través de un cable conectado con anillos rozantes y escobillas al eje principal.

Mecanismos de autoprotección.- Los ordenadores y sensores suelen estar por duplicado (son redundantes) en todas las áreas de precisión, de seguridad o de servicio, de las máquinas grandes más nuevas. El controlador compara continuamente las lecturas de las medidas en toda la turbina eólica, para asegurar que tanto los sensores como los propios ordenadores funcionan correctamente. Es posible monitorizar o fijar alrededor de entre 100 y 500 valores de parámetros en una turbina eólica moderna. Por ejemplo, el controlador puede contrastar la velocidad de rotación del rotor, el generador, su voltaje y corriente.

También se pueden realizar medidas de:

- La temperatura del aire exterior, del aceite en el multiplicador, de los devanados del generador, de los cojinetes del multiplicador, etc

- La presión hidráulica

- El ángulo de paso de cada pala del rotor (en máquinas de regulación por cambio del ángulo de paso (pitch controlled), o de regulación activa por pérdida aerodinámica (active stall controlled)

- El ángulo de orientación (contando el número de dientes en la corona de orientación)

- El número de vueltas en los cables de alimentación

- La dirección y velocidad del viento

- El tamaño y frecuencia de las vibraciones en la góndola y en las palas del rotor

- El espesor de las zapatas del freno

- Si la puerta de la torre está abierta o cerrada (sistema de alarma), etc

Estrategias de control.- Muchos de los secretos de empresa de los fabricantes de aerogeneradores se encuentran en la forma en que el controlador interacciona con los componentes de la turbina eólica. Las mejores estrategias de control son responsables de una parte importante del crecimiento de la productividad de los aerogeneradores en los últimos años. Una estrategia interesante seguida por algunos fabricantes es la de adaptar la estrategia operacional al clima eólico local. De esta forma es posible, por ejemplo, minimizar el desgaste y la rotura de la máquina durante los periodos de clima tormentoso.

Control de la calidad de la potencia en aerogeneradores.- El controlador no es sólo una unidad que hace funcionar el aerogenerador; por ejemplo, que orienta la turbina en contra del viento, que vigila que los sistemas de seguridad funcionen correctamente y que conecta la turbina. sino que también vigila la calidad de potencia de la corriente generada por la turbina eólica.

Por lo que respecta a la calidad de la potencia las compañías exigen que la conexión a red de los aerogeneradores se realice suavemente, y qué requerimientos tienen respecto a que la corriente alterna y la tensión se muevan de forma sincronizada la una respecto a la otra.

Control de la potencia reactiva.- Normalmente, la tensión y la corriente se miden 128 veces por ciclo de corriente alterna (es decir, 50 x 128 = 6400 veces por segundo (Europa) ó 60 x 128 = 7680 veces por segundo (USA), dependiendo de la frecuencia de la red eléctrica). Partiendo de ésto, un procesador DSP calcula la estabilidad de la frecuencia de la red, así como la potencia activa y reactiva de la turbina (la componente reactiva de la potencia es básicamente una cuestión de si la tensión y la corriente están o no en fase). Para asegurar que la calidad de potencia sea la adecuada, el controlador debe conectar y desconectar un gran número de condensadores eléctricos, que ajustarán la potencia reactiva.

ANEXOS

a) GENERADORES SÍNCRONOS

Principios de un generador trifásico (o motor).- Todos los generadores trifásicos utilizan un campo magnético giratorio. En la Fig VI.a1 se han instalado tres electroimanes alrededor de un círculo. Cada uno de los tres imanes está conectado a su propia fase en la red eléctrica trifásica. Como se puede ver, cada electroimán produce alternativamente un polo norte y un polo sur hacia el centro. Las letras están en negro cuando el magnetismo es fuerte, y en gris claro cuando es débil. La fluctuación en el magnetismo corresponde exactamente a la fluctuación en la tensión de cada fase. Cuando una de las fases alcanza su máximo, la corriente en las otras dos circula en sentido opuesto y a la mitad de tensión.

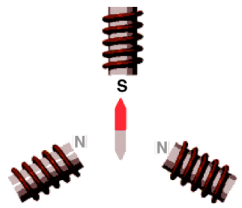


Fig VI.a1.- Tres electroimanes alrededor de un círculo
Motor síncrono bipolar de imán permanente

Dado que la duración de la corriente en cada imán es un tercio de la de un ciclo aislado, el campo magnético da una vuelta completa por ciclo.

Operación de un motor síncrono.- El rotor es la aguja de la brújula (con el polo norte de rojo) que sigue exactamente el campo magnético, y completa una revolución por ciclo. En una red de 50 Hz, la aguja completa 50 revoluciones por segundo, lo que equivale a 50 x 60 = 3000 r.p.m.

La razón por la que se le llama motor síncrono es que el imán del centro gira a una velocidad constante síncrona, (girando exactamente como el ciclo), con la rotación del campo magnético.

Se le llama bipolar porque tiene un polo norte y un polo sur. Puede parecer tripolar, pero de hecho la aguja de la brújula experimenta la tracción de la suma de los campos magnéticos que están alrededor de su propio campo magnético, por lo que si el imán de la parte superior es un polo sur fuerte, los dos imanes de la parte inferior equivalen a un polo norte fuerte.

Se le llama motor de imán permanente debido a que la aguja de la brújula del centro es un imán permanente, y no un electroimán (se podría fabricar un motor real sustituyendo la aguja de la brújula por un potente imán permanente, o un electroimán que mantenga su magnetismo gracias a una bobina, arrollada alrededor de un núcleo de hierro, alimentada con corriente continua).

El montaje de los tres electroimanes es el estator del motor.

Si se empieza a forzar el imán para que gire (en lugar de dejar que la corriente de la red lo mueva), trabaja como generador, devolviendo corriente alterna a la red. Cuanto más par se le aplique,

más electricidad producirá, aunque el generador seguirá girando a la misma velocidad, impuesta por la frecuencia de la red eléctrica.

Aeroturbinas con generadores síncronos.- Los devanados del estator, desde un punto de vista constructivo, son iguales que los de una máquina asíncrona. El inductor, en el generador síncrono, es el rotor que alberga los polos generadores del campo magnético que induce la circulación de corriente en los devanados del estator.

El rotor puede ser devanado o de imanes permanentes.

Si el rotor es devanado, la corriente de excitación se suministra mediante anillos rozantes y escobillas o mediante una excitatriz. La ventaja es la posibilidad de regular potencia reactiva y la desventaja es la necesidad de adecuar la velocidad de giro del eje de alta velocidad a la velocidad de sincronismo. El proceso de sincronización para la conexión de estos generadores requiere el ajuste de la velocidad de giro del rotor y del ángulo de par (ángulo que forma la tensión de la red en el punto de conexión con la fuerza electromotriz inducida en el estator), ambos valores deberán ser cercanos y conseguirlo es difícil debido a que el par de la turbina cambia constantemente con las ráfagas de viento. Una vez conectado el aerogenerador a la red, la velocidad de rotación de la máquina puede ser constante o variable si la conexión a red se realiza mediante un convertidor variando las frecuencias de las corrientes sobre el inducido. Para aerogeneradores a velocidad constante, sólo existirá un punto de funcionamiento para el cual la máquina está operando con el máximo rendimiento.

Si el rotor es de electroimanes alimentados por continua de la red eléctrica, dado que la red suministra corriente alterna, hay que convertir la corriente alterna en corriente continua antes de enviarla a las bobinas de los electroimanes del rotor, conectados a la corriente mediante escobillas y anillos rozantes en el eje del generador.

Sistema de acoplamiento directo aeroturbina-generador síncrono.- La velocidad de giro de un generador estándar es del orden de 1500 rpm mientras que una velocidad típica de la aeroturbina está entre 15 y 60 rpm, por lo que se precisa de una caja de engranajes entre el generador y el rotor.

Utilizando un generador de baja velocidad, la turbina se puede acoplar directamente al mismo; la ventaja de este tipo de acoplamiento directo está en un costo más bajo que en los sistemas con caja de engranajes, menor longitud de la barquilla, mejora de la eficiencia, etc.

Como la velocidad del generador es del orden de 15 a 60 rpm para que la caja de engranajes sea innecesaria, se requiere que el número de polos sea suficientemente grande para generar una señal de frecuencia apropiada a la salida; respecto a un generador normal, el generador de acoplamiento directo es más grande.

Cambio de la velocidad de rotación del generador.- La velocidad de un generador que está directamente conectado a una red trifásica es constante y está impuesta por la frecuencia de la red.

Sin embargo, si se dobla el número de imanes que hay en el estator, se puede asegurar que el campo magnético girará a la mitad de la velocidad; el campo magnético se mueve en el sentido de las agujas del reloj durante media revolución antes de alcanzar de nuevo el mismo polo magnético; simplemente se han conectado los seis imanes a las tres fases en el sentido de las agujas del reloj.

Este generador tiene en todo momento cuatro polos (dos pares), dos polos sur y dos polos norte. Dado que un generador sólo completa media revolución por ciclo, obviamente dará 25 revoluciones por segundo en una red de 50 Hz, o 1500 r.p.m. Al doblar el número de polos en el estator de un generador síncrono, hay que doblar el número de imanes en el rotor.

Número de polos	*50 Hz*	*60 Hz*
2	*3000*	*3600*
4	*1500*	*1800*
6	*1000*	*1200*
8	*750*	*900*
10	*600*	*720*

Otros números de polos.- Se introduce otro par de polos añadiendo 3 electroimanes más en el estator; con 9 imanes se consigue una máquina de 6 polos, girando a 1000 r.p.m. en una red de 50 Hz. El término *velocidad del generador síncrono* se refiere a la velocidad del generador cuando está girando de forma síncrona a la frecuencia de red, que se aplica a todo tipo de generadores; sin embargo, en el caso de generadores asíncronos (o de inducción) equivale a la velocidad en vacío del generador.

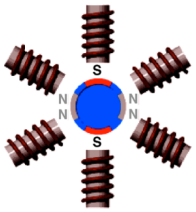


Fig VI.a.2

La mayoría de las aeroturbinas usan generadores de 4 ó 6 polos; la razón por la que se utilizan estos generadores de velocidad relativamente alta, es por ahorrar en tamaño y costo.

El par máximo que un generador puede manejar depende del volumen del rotor. Para una potencia de salida dada, se puede elegir entre un gran generador (caro) de baja velocidad, o un generador más pequeño (barato) de alta velocidad.

b) GENERADORES ASÍNCRONOS (O DE INDUCCIÓN)

Los generadores asíncronos o de inducción que se utilizan en la industria eólica pueden ser de rotor bobinado y de jaula.

La función principal del devanado trifásico del estator es magnetizar la máquina y suministrar la corriente generada. Por los devanados del rotor (o barras de cobre o de aluminio en el caso del rotor de jaula, conectadas eléctricamente por anillos de aluminio finales), sólo circula la corriente in-

ducida; cuando la excitación externa está presente, el campo magnético del estator gira a la velocidad síncrona, impuesta por la pulsación de las corrientes de excitación provenientes de la red, que atraviesan el devanado del estator.

El campo magnético del rotor se mueve a la misma velocidad que el del estator, (la de sincronismo), independientemente de que el rotor esté bloqueado o girando a cualquier velocidad. Si el rotor del generador gira a la velocidad de sincronismo, los devanados del estator no perciben variación del flujo magnético y, en consecuencia, tampoco habrá corrientes inducidas en el estator; el rotor desliza respecto al campo magnético del estator que gira a la velocidad de sincronismo, por lo que funcionando como generador, el rotor girará a una velocidad un poco superior a la de sincronismo.

A medida que aumenta la diferencia de velocidad de giro entre el rotor y el campo producido por el estator, se induce una tensión mayor en el rotor y, en consecuencia, crece la corriente que circula por él; a mayor corriente, el campo magnético debido al rotor crece, y el flujo de potencia activa hacia la red es mayor, como también lo es el consumo de potencia reactiva por la magnetización de la máquina (el factor de potencia del generador de inducción varía con la carga).

Esta tendencia se mantiene hasta llegar al par resistente máximo del generador. Dentro de un rango limitado la potencia y el par son proporcionales al deslizamiento; la potencia reactiva consumida en este tramo es capaz de mantener el flujo magnético necesario para que el generador presente un par resistente creciente, pero a partir de un determinado deslizamiento (entre 5÷ 10% según la máquina) el incremento de la corriente en el rotor hace que por las pérdidas por efecto Joule, disminuya el par resistente y, por lo tanto, se pueda producir el embalamiento de la máquina.

Son pocos los casos en los que una excesiva velocidad del viento haga que el par de la turbina pueda exceder al par máximo del generador; no obstante, el control estará programado para desconectarse de la red si la potencia máxima se supera durante cierto tiempo.

También se deberá desconectar con velocidades de viento bajas, si la velocidad de la turbina lleva a funcionar al generador a velocidades por debajo de la de sincronismo, invirtiendo el par generador y poniéndose a funcionar como motor.

La ventaja principal del funcionamiento asíncrono es su flexibilidad ante fluctuaciones en la velocidad del viento.

El inconveniente principal es la necesidad de una corriente de excitación para la magnetización, que se traduce en un consumo de potencia reactiva de la red.

El generador de inducción en operación normal y directamente conectado a la red es robusto y estable. El deslizamiento se incrementa cuando aumenta la carga. El mayor problema es que durante el consumo de la corriente que magnetizará los devanados del estator, el factor de potencia es relativamente bajo, por lo que se deben conectar bancos de condensadores en paralelo con el genera-

dor. Operando de este modo, el generador de inducción no es controlable y cualquier fluctuación se transmite a la red modificada sólo por la impedancia interna del generador. Los convertidores electrónicos de potencia mejoran esta situación, controlando la corriente del rotor (para generadores asíncronos de rotor bobinado) con la finalidad de controlar la potencia reactiva y el deslizamiento, para variar el punto operativo.

El rotor de jaula de ardilla.- La mayoría de las turbinas eólicas del mundo utilizan un generador asíncrono trifásico (de jaula bobinada), también llamado generador de inducción, para generar corriente alterna. Fuera de la industria eólica y de las pequeñas unidades hidroeléctricas, este tipo de generador no está muy extendido. Lo curioso es que inicialmente fué diseñado como motor eléctrico; de hecho, una tercera parte del consumo mundial de electricidad se utiliza para hacer funcionar motores de inducción que mueven maquinaría en fábricas, bombas, ventiladores, compresores, etc, y otras aplicaciones donde se necesita convertir energía eléctrica en energía mecánica. Una de las razones para la elección de este tipo de generador es que es muy fiable, y comparativamente no resulta caro, y tiene propiedades mecánicas que lo hace especialmente útil en turbinas eólicas (el deslizamiento del generador, y una cierta capacidad de sobrecarga).

El rotor, provisto de un núcleo de hierro, utiliza un apilamiento de finas láminas de acero aisladas, con agujeros para las barras conductoras de aluminio. El rotor se sitúa en el centro del estator tetrapolar, conectado directamente a las tres fases de la red eléctrica.

Funcionamiento como motor.- Cuando se conecta a la corriente, la máquina empieza a funcionar como motor, girando a una velocidad ligeramente inferior a la velocidad síncrona del campo magnético del estator. Si se observan las barras del rotor desde arriba se tiene un campo magnético moviéndose respecto al rotor, que induce una corriente muy elevada en las barras del rotor, que apenas ofrecen resistencia, pues están cortocircuitadas por los anillos finales. El rotor desarrolla entonces sus propios polos magnéticos, que se ven, por turnos, arrastrados por el campo magnético giratorio del estator.

Funcionamiento como generador.- Si se hace girar el rotor de forma manual a la velocidad síncrona del generador, p.ej. 1500 r.p.m. para el generador síncrono tetrapolar, no sucede nada, dado que el campo magnético gira exactamente a la misma velocidad que el rotor, por lo que no se produce ningún fenómeno de inducción en el rotor, y no interaccionará con el estator.

Si se aumenta la velocidad por encima de las 1500 r.p.m., el rotor se mueve más rápidamente que el campo magnético giratorio del estator, lo que significa que el estator inducirá una gran corriente en el rotor. Cuanto más rápidamente gire el rotor, mayor será la potencia transferida al estator en forma de fuerza electromagnética, y posteriormente convertida en electricidad suministrada a la red eléctrica.

Deslizamiento del generador.- La velocidad de un generador asíncrono varía con el par torsor que se le aplique. En la práctica, la diferencia entre la velocidad de rotación a potencia máxima y en vacío es muy pequeña, alrededor de un 1%. Esta diferencia en porcentaje de la velocidad síncrona es el llamado deslizamiento del generador.

Un generador tetrapolar gira en vacío a 1500 r.p.m. si se conecta a una red con una corriente de 50 Hz. Si el generador está funcionando a la máxima potencia, girará a 1515 r.p.m.

El hecho de que el generador aumente o disminuya ligeramente su velocidad cuando el par torsor varía, es una propiedad mecánica muy útil; ésto significa que habrá menos roturas y desgastes en la caja multiplicadora (menor par torsor máximo). Esta es una de las razones más importantes para la utilización de generadores asíncronos, en lugar de generadores síncronos, en aerogeneradores directamente conectados a la red eléctrica.

Ajuste automático de los polos del rotor.- Hasta ahora no se han especificado el número de polos del estator cuando se describe el rotor. Lo positivo del rotor de jaula de ardilla es que él mismo adapta el número de polos del estator de forma automática, por lo que un mismo rotor se puede utilizar con una gran variedad de números de polos.

Requerimientos de conexión a la red.- El generador síncrono de imán permanente puede funcionar como generador sin conexión a la red.

El generador asíncrono es diferente, pues precisa que el estator esté magnetizado por la red antes de funcionar, aunque se puede hacer funcionar un generador asíncrono de forma autónoma si se le provee de condensadores que le suministren la corriente magnetizante necesaria.

También es preciso que haya algo de magnetismo remanente en el hierro del rotor cuando se ponga en marcha la turbina (en caso contrario, necesitará una batería y electrónica de potencia, o un pequeño generador Diesel, para arrancar el sistema)

Cambio del número de polos del generador.- Los generadores (y motores) están fabricados con un gran número de imanes estatóricos, minimizando el entrehierro entre el rotor y el estator. Al mismo tiempo es necesario refrigerar los imanes. El hierro del estator consta de un gran número de delgadas láminas de acero aisladas de 0,5 mm de espesor, que se apilan para formar el hierro del estator. Esta disposición en capas se realiza para evitar que las corrientes parásitas en el hierro del estator disminuyan la eficiencia del generador.

El problema de proveer de más polos a un generador asíncrono de jaula bobinada se reduce a conectar de distinta forma los imanes vecinos; se puede coger un grupo de imanes al tiempo, conectándolos a la misma fase conforme nos vamos moviendo alrededor del estator, o bien se cambia a la siguiente fase cada vez que se tenga un nuevo imán.

Generador de número de polos variable, dos velocidades.- Algunos fabricantes equipan sus turbinas con dos generadores, uno pequeño para periodos de vientos suaves, y otro grande para periodos de vientos fuertes. Un diseño común en las máquinas modernas es un generador de número de polos variable que (dependiendo de cómo están conectados los imanes del estator) puede funcionar con diferente número de polos y, por tanto, a distinta velocidad de rotación.

Algunos generadores se fabrican por encargo como dos en uno, es decir, que son capaces de funcionar a dos velocidades diferentes (por ejemplo, un generador de 400 kW y otro de 2000 kW). Este diseño se está extendiendo cada vez más en toda la industria; si merece la pena o no utilizar un:

- *Generador doble*
- *Número mayor de polos para los vientos suaves*

dependerá de la distribución de velocidades del viento local, y los costes de los polos adicionales comparado con el precio que el propietario de la turbina obtiene por la electricidad.

Una buena razón para utilizar un sistema de generador doble es que puede hacer funcionar su turbina a más baja velocidad de rotación a bajas velocidades de viento, lo que supone una mayor eficiencia aerodinámica, y un menor ruido de las palas del rotor (que sólo suele suponer un problema a bajas velocidades del viento).

Generadores de deslizamiento variable.- Durante muchos años, los fabricantes de motores eléctricos se han enfrentado al problema de que sus motores sólo podían girar a velocidades casi fijas, determinadas por el número de polos del motor. El deslizamiento del generador en una máquina asíncrona (por cuestiones de eficiencia) suele ser muy pequeño, por lo que la velocidad de giro varía alrededor de un 1% entre el régimen en vacío y a plena carga.

Sin embargo, el deslizamiento es función de la resistencia de los devanados del rotor del generador; como a *mayor resistencia, mayor deslizamiento*, una de las formas de variar el deslizamiento es variar la resistencia del rotor, aumentando el deslizamiento del rotor hasta un 10% para hacer frente a las ráfagas violentas de vientos.

En motores, ésto se suele hacer mediante un rotor bobinado con cables de cobre arrollados, conectados en estrella, y conectados a resistencias variables externas, además de un sistema de control electrónico para operar las resistencias.

La conexión se suele hacer con escobillas y anillos rozantes, lo que supone un claro inconveniente respecto al diseño técnico, elegante y simple, de una máquina de rotor de jaula bobinada. También introducen partes que se desgastan en el generador, por lo que se requiere un mantenimiento adicional.

c) NOMENCLATURA Y ESQUEMAS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

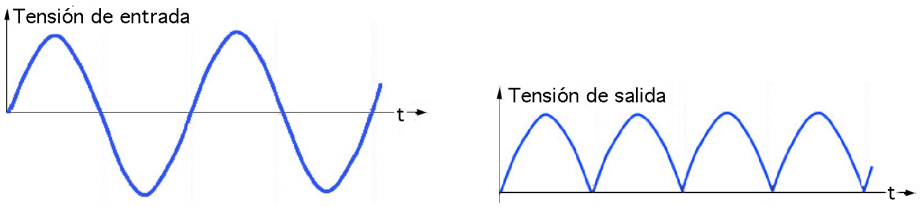


Fig VI.c 1.- Conversión AC a DC

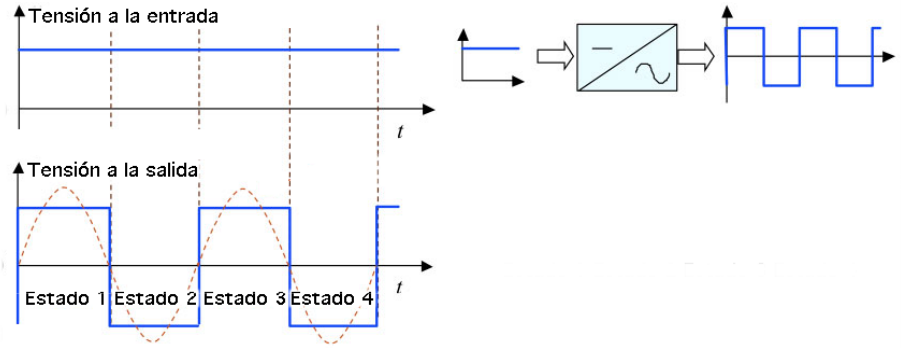


Fig VI.c 2.- Conversión DC a AC

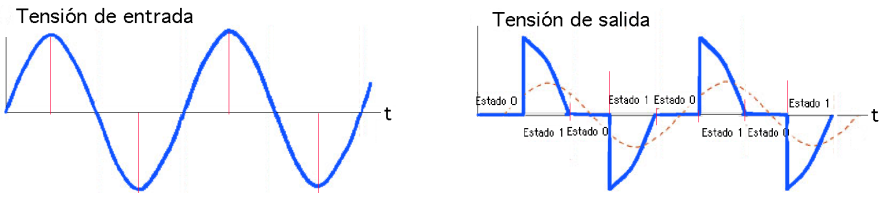


Fig VI.c 3.- Control de la fase de la tensión AC de salida

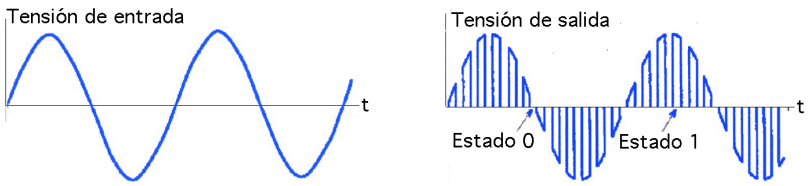


Fig VI.c 4.- Control PWM de la tensión CA de salida

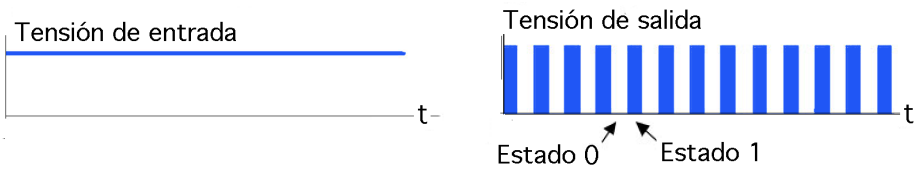
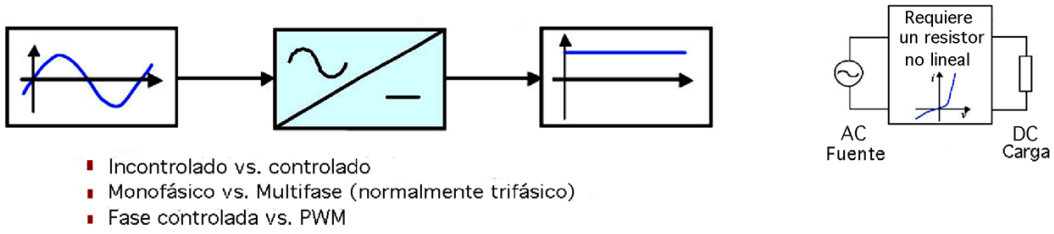
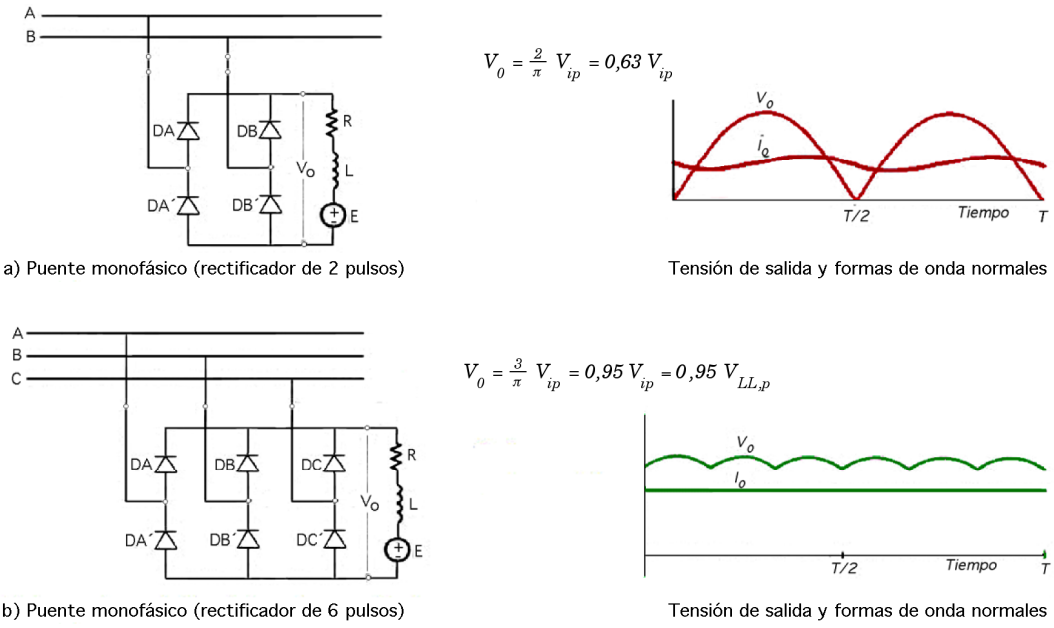


Fig VI.c 5.- Control PWM de la tensión DC a la salida



La corriente AC se puede convertir en corriente DC sólo con una resistencia asimétrica no lineal, p.e. un rectificador

Fig VI.c 6.- Convertidor (rectificador AC-DC)



$V_0 = \frac{2}{\pi} V_{ip} = 0{,}63\, V_{ip}$

a) Puente monofásico (rectificador de 2 pulsos)

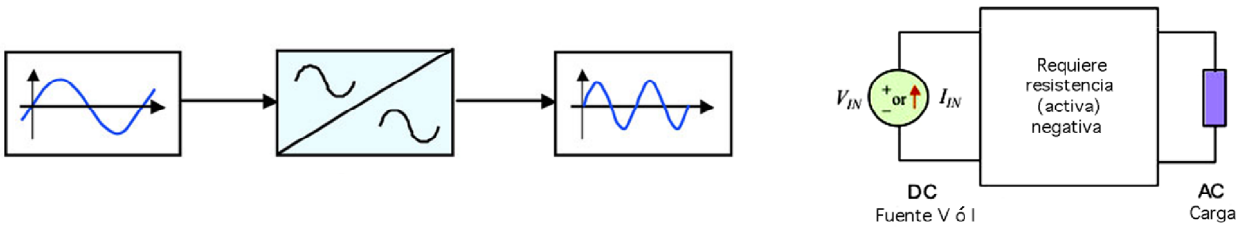
Tensión de salida y formas de onda normales

$V_0 = \frac{3}{\pi} V_{ip} = 0{,}95\, V_{ip} = 0{,}95\, V_{LL,p}$

b) Puente monofásico (rectificador de 6 pulsos)

Tensión de salida y formas de onda normales

Fig VI.c 7.- Convertidores electrónicos de potencia. Fuentes rectificadoras de diodo



Controlador de tensión AC: { *- La frecuencia de salida es la misma que la frecuencia de entrada*
- La tensión máxima a la salida es la misma que la tensión a la entrada

Convertidor de ciclo: { *- La frecuencia de salida es un orden más bajo que la frecuencia de entrada*
- La tensión máxima a la salida es la misma que la tensión a la entrada

Convertidor de la matriz: { *- Ningún límite de frecuencia a la salida*
- La tensión máxima a la salida es del orden del 85% de la de entrada

El flujo de la corriente AC se puede controlar y regular por un cambio en la impedancia resistiva, capacitiva, o inductiva dentro del convertidor

Fig VI.c 8.- Convertidor AC-AC

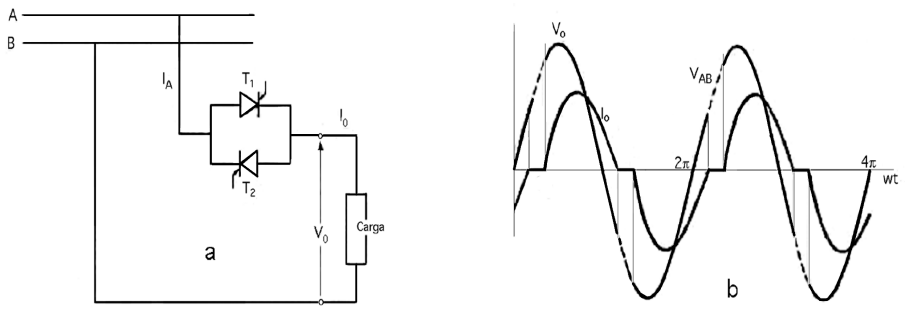
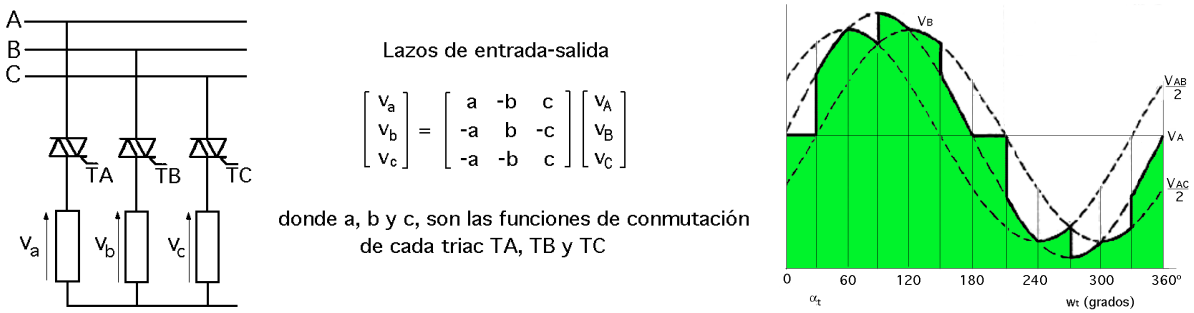


Fig VI.c 9.- Fase regulada por control del voltaje AC



Forma de la señal de la tensión a la salida en el regulador trifásico AC que controla el voltaje

Fig VI.c 10.- Regulador trifásico de voltaje AC

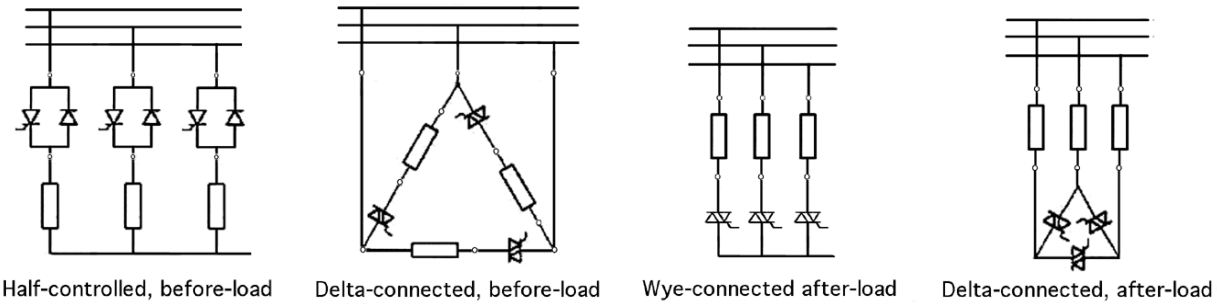


Fig VI.c 11.- Tipos de reguladores trifásicos de voltaje AC

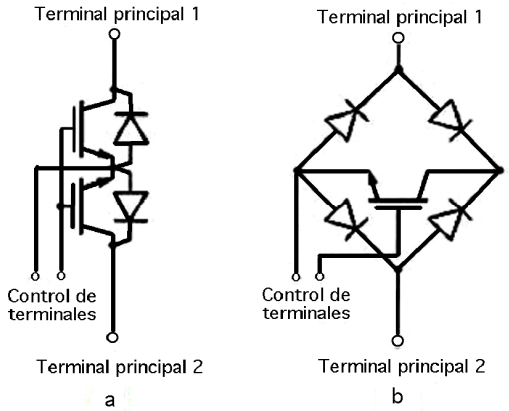


Fig VI.c12.- Ensamblajes bidireccionales controlados por interruptor: a) 2 transistores y 2 diodos ; b) Un transistor y 4 diodos

d) Regulador de voltaje AC, PWM.- Los reguladores de control de fase del voltaje AC trazan corrientes distorsionadas de la línea de fuente, siendo su factor de energía de entrada pobre; estas características se pueden mejorar significativamente usando PWM

Los reguladores PWM, de control del voltaje CA, comúnmente llamados AC CHOPPERS requieren interruptores completamente controlados capaces de conducir la corriente en ambas direcciones

El convertidor DC-DC (interruptor) es una red que tiene como fuente de energía un voltaje DC constante V_{IN} o una corriente DC constante I_{IN} y pueda proporcionar una potencia DC de salida tal que $V_{OUT} > V_{IN}$ *ó* $I_{OUT} > I_{IN}$.

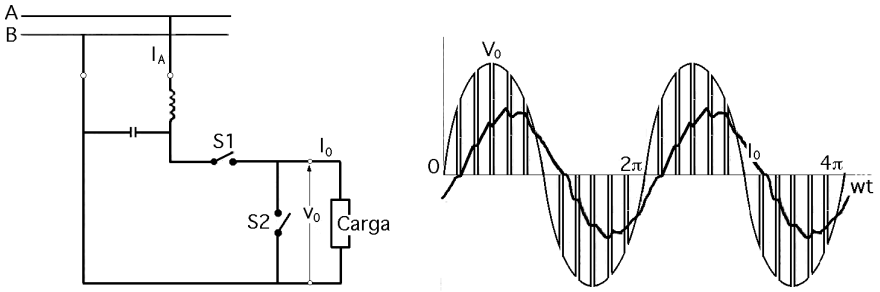


Fig VI.c14.- CHOPPER AC Monofásico

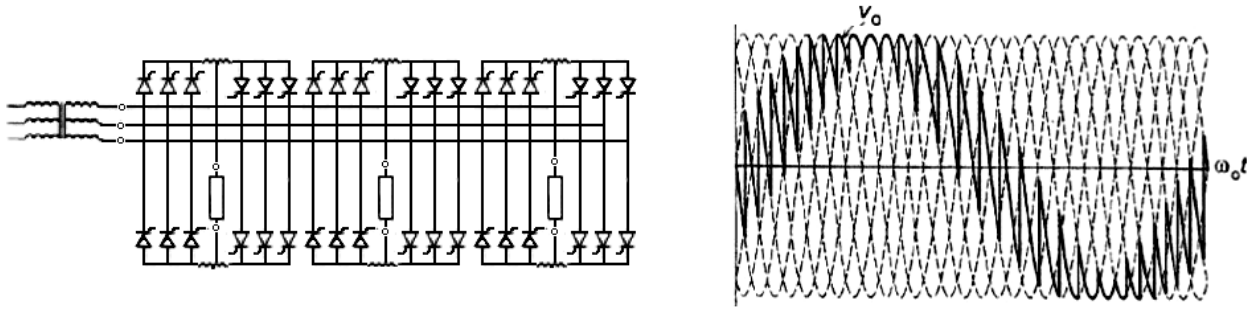


Fig VI.c15.- Cicloconvertidor trifásico de 6 pulsos, con carga en fase aislada (M = 1)

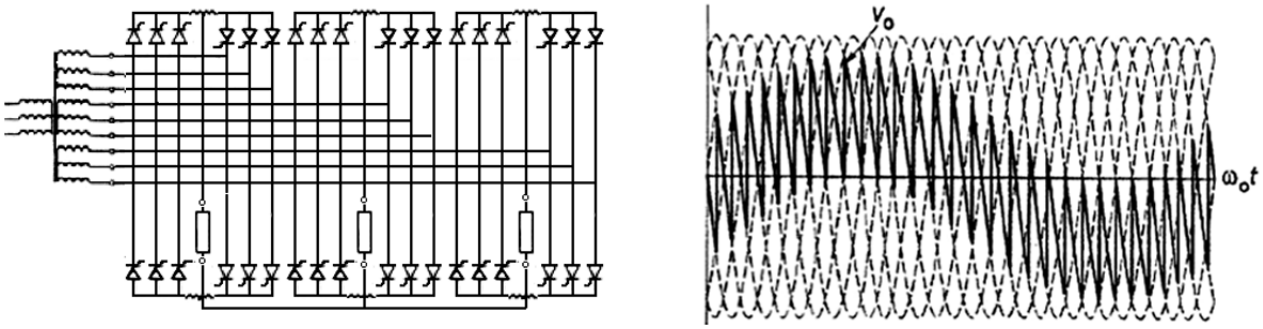


Fig VI.c16.- Cicloconvertidor trifásico de 6 pulsos, con carga en fase interconectada (M = 0,5, w_o/w = 0,2)

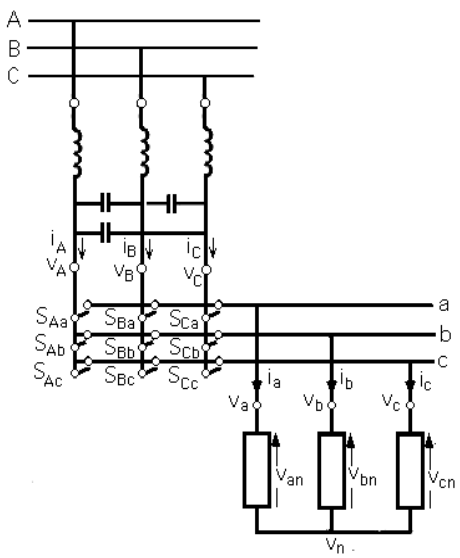


Fig VI.c17.- Convertidor matricial trifásico-trifásico

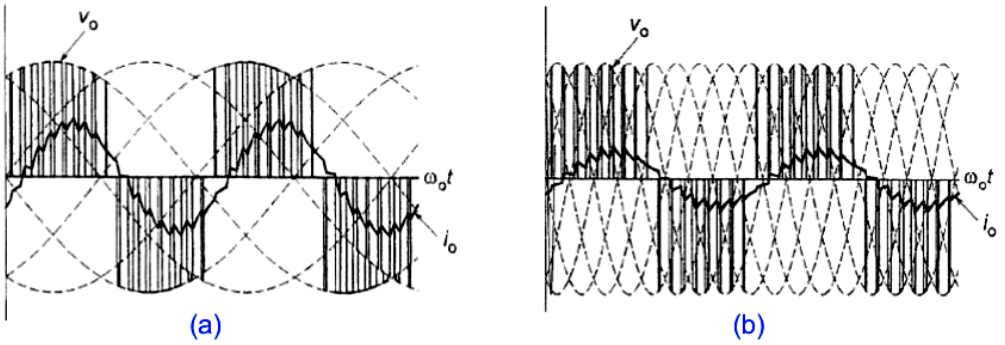


Fig VI.c18.- Tensión a la salida y forma de la onda de corriente en un convertidor matricial: $\begin{cases} a)\ w_0 / w = 2{,}8\ ;\ M = 0{,}8 \\ b)\ w_0 / w = 0{,}7\ ;\ M = 0{,}4 \end{cases}$

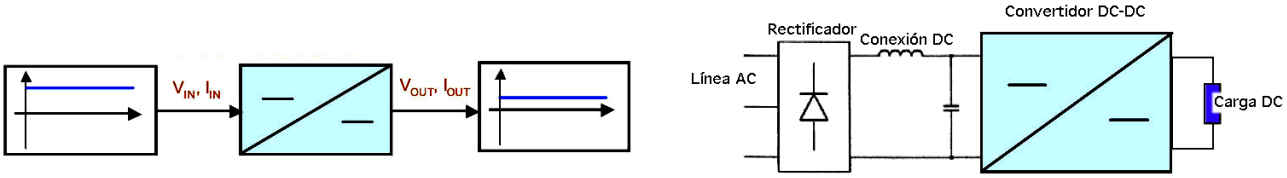


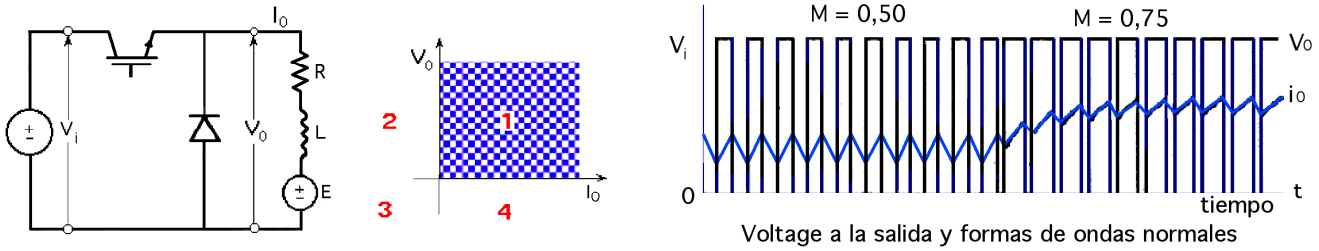
Fig VI.c 19.- Convertidor DC-DC

Los convertidores DC-DC, están constituidos por una fuente de tensión AC, un rectificador de diodo y una conexión DC.

La conexión DC consiste en un gran condensador conectado a los terminales de entrada de información del interruptor y, a veces, a series de inductancias

El condensador afina el voltaje DC producido por el rectificador y sirve como fuente de la corriente de alta frecuencia de la ondulación trazada por el interruptor. El inductor proporciona al sistema de potencia de la fuente, de una una pantalla adicional contra las corrientes de alta frecuencia

Todos los interruptores son PWM controlados por convertidores DC-DC



$$\textit{Relaciones entrada-salida} \begin{cases} V_0 = D\,V_i \\ I_{0,ac} = \dfrac{M\,(1-M)}{2\sqrt{3}\,L\,f_{sw}}\,V_i \end{cases}$$

Fig VI.c 20.- Chopper simple primer cuadrante

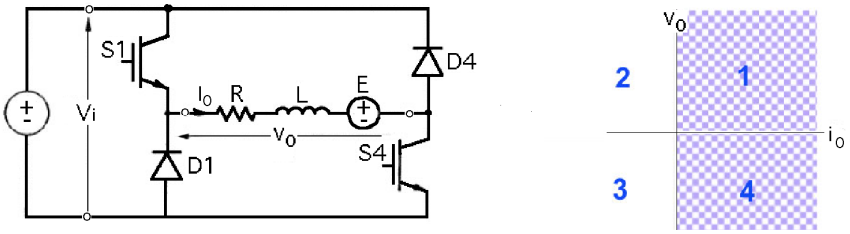


Fig VI.c 21.- Chopper simple dos cuadrantes

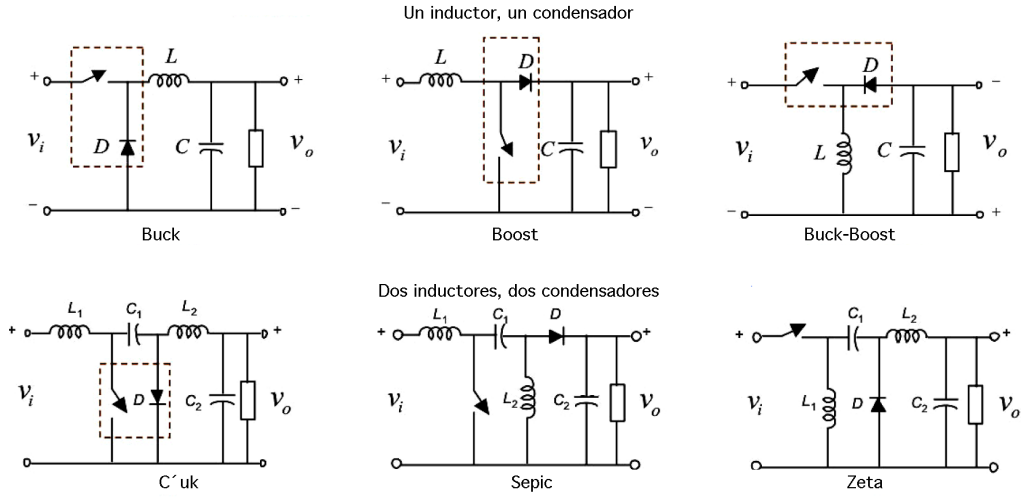


Fig VI.c 22.- Tipos básicos de convertidores DC-DC