

# El Tiristor en la Propulsión Eléctrica de Buques

Por

Alberto CASAL Ibaceta  
Capitán de Corbeta (I.E.)  
Armada de Chile

Artículo tomado del folleto SIEMENS  
(Schiff und Hafen por S. Stiglitz, Erlangen)  
facilitado por GILDEMEISTER S. A. C. Val-  
paraíso (Depto. Siemens).

**E**l tiristor es un elemento de la electrónica de potencia con ayuda del cual se puede controlar la energía eléctrica. Actualmente, se dispone de tiristores de hasta 700 A, con los cuales se pueden alcanzar potencias de varios miles KW. Por tratarse de semiconductores, es decir, de elementos estáticos, los tiristores no están sometidos a desgaste. Generalmente son de silicio, lo que garantiza una gran resistencia al calor; como además son insensibles a las vibraciones y sacudidas, puede decirse que los tiristores son muy apropiados para ser empleados en buques.

En el empleo de tiristores para el accionamiento eléctrico de buques se pueden considerar los siguientes puntos:

## POSIBILIDAD DE REGULAR LA VELOCIDAD

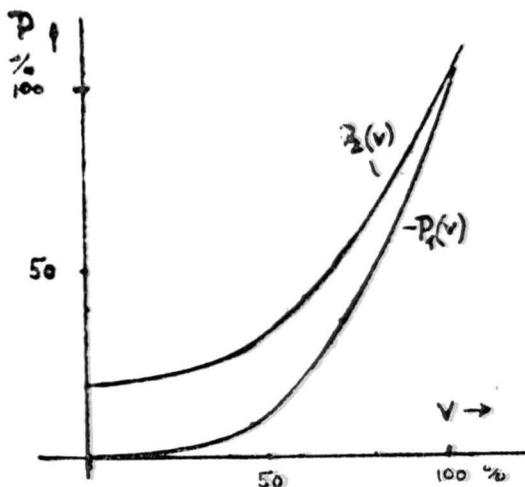
Se ha demostrado que la solución óptima para el accionamiento eléctrico de buques es la basada en el empleo de rectificadores regulables de tiristores. Con

su ayuda se transforma una tensión constante trifásica en una continua variable.

De esta forma es posible regular la velocidad del motor de corriente continua de accionamiento de la hélice entre cero y la velocidad nominal, pudiéndose cambiar el sentido de rotación.

Tal accionamiento permite el empleo de una hélice fija con todas sus conocidas ventajas.

Con hélice fija la potencia de accionamiento necesaria aumenta con el cubo del número de revoluciones. Por otra parte, la velocidad del buque es aproximadamente proporcional a la velocidad de la hélice, por lo cual la dependencia entre la potencia de accionamiento y la velocidad del buque  $P_1(v)$  es la que se representa en la figura 1. La curva  $P_2(v)$  representa aproximadamente el caso de que la hélice sea de paso graduable. Es evidente que, con hélice fija, la potencia necesaria, sobre todo en el intervalo de menor velocidad, es mucho menor que con hélice graduable. En el caso anteriormente expuesto se ha supuesto que el rendimiento de la hélice regu-



lable es 60% y el de la hélice fija 63% aproximadamente. En algunas circunstancias es todavía mayor la diferencia entre los dos rendimientos.

El comportamiento que se deduce de la consideración de estas dos curvas desempeña un papel muy importante al calcular el gasto de combustible de un buque, debiendo considerarse también este hecho, y no solamente el precio de las instalaciones al hacer una comparación entre los sistemas con hélice fija y hélice graduable.

### MANIOBRABILIDAD

Con la posibilidad de regulación de la velocidad, a que antes nos hemos referido, se consigue al mismo tiempo una maniobrabilidad del buque muy buena. La variación de la velocidad de la hélice y el cambio de sentido de giro, se pueden realizar en un tiempo muy corto, que depende del dimensionado de la red de a bordo, y es aproximadamente igual a la mitad del empleado con hélice graduable.

Hay que hacer notar que con hélice fija a velocidad  $v = 0$ , el número de revoluciones de la hélice es también  $n = 0$ ; una hélice graduable, por el contrario, giraría con la velocidad de régimen inmediatamente después de haber conectado los motores de propulsión. La hélice graduable ejerce un par motriz, incluso con paso cero, lo que debe tenerse en cuenta, cuando el buque está en el muelle o fondeado.

### CARACTERÍSTICAS DEL FUNCIONAMIENTO

En una instalación de tiristores se puede limitar la intensidad de la corriente sin perjuicio alguno para el funcionamiento de la instalación, con lo que se eliminan totalmente las puntas de corriente, que se producen al conectar los motores de propulsión. La hélice se puede acelerar con un momento prácticamente constante, sin que se produzcan apenas caídas de tensión (de varios segundos de duración). En este aspecto resulta también ventajoso el empleo de tiristores. Debe observarse que el funcionamiento con un sólo motor o un solo generador no ofrece la menor dificultad. Como se puede ver en la curva anterior, ya con el 10% de la potencia normal se consigue casi el 45% de la velocidad.

Con la instalación de tiristores también se puede gobernar el buque desde distintos puestos.

El empleo de rectificadores regulables de tiristores en la transformación de energía eléctrica para el accionamiento de buques representa la solución más moderna de este problema y permite el empleo a bordo de una sola red sin necesidad de tener que emplear una hélice de paso graduable.

### DETALLES TECNICOS

La electrónica de potencia va adquiriendo cada vez más importancia en la solución de problemas técnicos, especialmente en la rama de la técnica motriz. Por electrónica de potencia se entiende el mando y la transformación de energía eléctrica con ayuda de medios electrónicos. El tiristor se considera hoy en día indudablemente como el elemento más importante de esta técnica.

El llamado tiristor de cuatro capas, empleado actualmente, es un semiconductor regulable. Su capacidad de regulación consiste en permitir, o bien impedir, la circulación de la corriente en un sentido; el tiristor actúa por lo tanto como si fuera un interruptor electrónico. Una característica especial del tiristor es que en estado "abierto" no vuelve a perder su conductibilidad hasta que la corriente que pasa por él se anule. Esta pro-

riedad debe tenerse en cuenta al emplear tiristores en circuitos de corriente continua.

Los tiristores pasan del estado "abierto" al "cerrado" en un tiempo extraordinariamente corto, es decir, su resistencia interna puede variar en un factor de potencias de diez, en el plazo de pocos microsegundos. Por este motivo son muy apropiados, entre otras cosas, como rectificadores y convertidores de corrientes, es decir, en conexiones para pasar de un tipo de corriente a otro, y para modificar tensiones y frecuencias. Así por ejemplo, de una red de corriente trifásica de tensión y frecuencia constantes, se puede producir una corriente continua de tensión variable o bien una corriente trifásica de frecuencia variable.

Tales transformaciones son condición esencial para un mando sensible y con pocas pérdidas, de la velocidad de rotación de motores eléctricos.

Al elevarse el valor de la intensidad de corriente que pueden conducir los tiristores, se ha ampliado su campo de aplicación a potencias mayores, como son las requeridas para los accionamientos eléctricos de hélices de buques.

Hoy en día se dispone de tiristores por los que pueden circular intensidades de hasta 700 A. La figura 1 (a) representa un tiristor de 700 A ejecutado en forma de célula de platillo. El diámetro del platillo es de unos 83 mm. y el espesor de 15 mm. La estructura de este tiristor se puede ver en la figura que representa la sección. Las superficies de contacto están dispuestas en los dos lados frontales de la célula y sirven al mismo tiempo para la evacuación del calor de ambos electrodos. El electrodo de mando está provisto de un conductor de conexión flexible.

A la pregunta sobre las ventajas que ofrece el empleo de tiristores en la propulsión eléctrica de hélices, da respuesta la figura 2. A la izquierda y en el centro se han representado dos esquemas de conexiones clásicas. En las dos disposiciones se puede reconocer que "la red de propulsión" está separada de la "red de a bordo". Ambas redes pueden unirse sólo indirecta o temporalmente.

Por el contrario, empleando rectificadores de corriente por tiristores para la alimentación de los motores de propulsión, no hay necesidad de "una red de

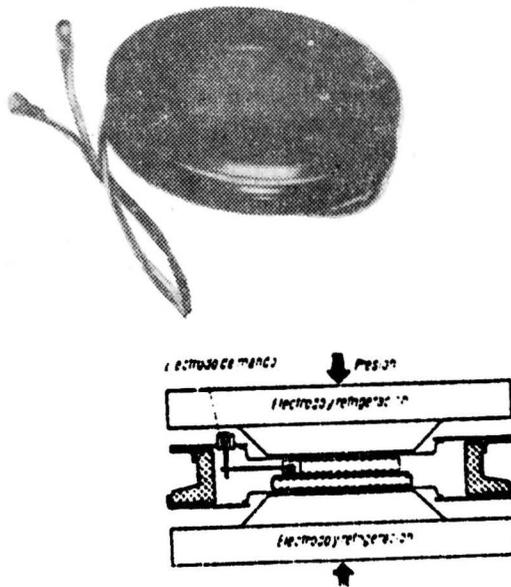
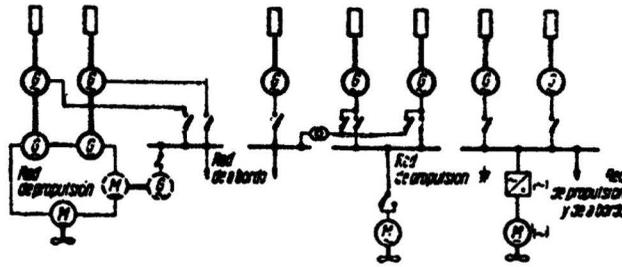


Fig. 1 (a): Tiristor para una tensión de bloqueo nominal de 600 V y una intensidad nominal de 700 A.



Propulsión por hélice, de corriente continua con red de a bordo trifásica separada (en los sistemas de corriente constante es posible alimentar la red de a bordo desde la red de propulsión a través del convertidor).

Propulsión por hélice, de corriente trifásica con mando de la frecuencia, red de a bordo separada

da (los generadores de propulsión se pueden conectar a las barras de la red de a bordo).

Accionamiento de hélices con tiristores red de propulsión y de a bordo comunes

Figura 2: Comparación entre las conexiones con sistemas de propulsión convencionales y las de rectificadores de tiristores.

propulsión propia". Todos los servicios de a bordo pueden alimentarse de una red de corriente trifásica común.

Una disposición, como la que está representada a la derecha de la figura 2, puede simplificar la estructura de la instalación de máquinas y de maniobra.

Tal es el caso en dragas de succión, buques pesqueros, buques para el transporte de cemento, etc.

### CONEXION DE PUENTE DE CORRIENTE TRIFASICA

De las numerosas conexiones de rectificadores conocidas, son principalmente interesantes para la propulsión eléctrica por hélice los convertidores y los rectificadores regulables. El rectificador por tiristores suministra una corriente continua de tensión variable. De este modo se puede variar la velocidad de rotación de un motor de corriente continua con

excitación independiente. Dicha velocidad es aproximadamente proporcional a la tensión del inducido ( $E = K \phi S$ ).

Teniendo en cuenta las tensiones de 380 V ó 440 V normales en la red de a bordo, y las tensiones de bloqueo admisibles en los tiristores, se emplea principalmente la conexión de puente de corriente trifásica. La conexión básica, representada en la figura 3, tiene 6 tiristores, o, en caso de conexiones en serie y en paralelo, un múltiplo de seis, conectados a la barra colectorora a través de reactancias de conmutación. En el circuito de corriente continua se encuentran el motor de propulsión y una reactancia de alisamiento.

La conexión en puente hace posible la utilización de 6 impulsos por períodos; de este modo se aprovechan las 12 semiondas de la tensión de la corriente alterna en cada fase. Los tiristores, mandados de forma que pase la corriente máxima, se comportan como rectificadores normales.

En la propulsión eléctrica de buques hay que tener en cuenta que la hélice puede transmitir en los dos sentidos de giro pares propulsores o de frenado. La solución más económica es una disposición en la que la dirección de la corriente del inducido del motor propulsor permanezca constante, independientemente del sentido de giro de éste, cambiando la polaridad de la corriente de excitación cuando se requiera invertir el par. Este sistema se denomina "Conexión con inver-

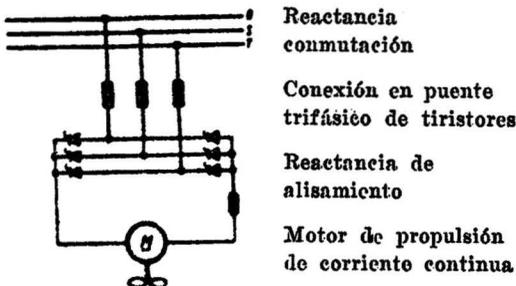


Figura 3: Disposición básica en la conexión en puente de corriente trifásica.

sión del campo" y tiene la ventaja de que no hay necesidad de emplear tiristores de inversión en el circuito del inducido.

De modo análogo al conocido sistema Ward-Leonard, la velocidad de rotación del motor de propulsión se regula variando la tensión del inducido. Para que al invertir el mando la velocidad de rotación de la hélice pueda ser reducida a un valor inferior al de la velocidad de arrastre de la hélice, en un tiempo relativamente corto, habrá que frenar la hélice. Esto se consigue regulando el rectificador de tiristores de forma que pase a funcionar como convertidor, devolviendo la potencia de frenado a la red de a bordo.

Para el mando de la velocidad de rotación de estos accionamientos, en los cuales la velocidad de rotación y el par pueden adoptar valores tanto positivos como negativos, se conocen conexiones de regulación apropiadas que hacen posible un transcurso óptimo de los diversos procesos y aseguran, de este modo, una excelente capacidad de maniobra del buque.

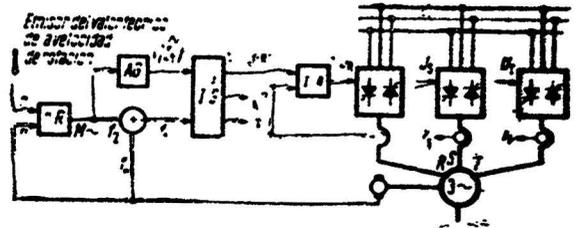
## PROPULSION TRIFASICA CON CONVERTIDORES DE TIRISTORES

Con ayuda del convertidor de tiristores se puede mandar continuamente y con pocas pérdidas, la velocidad de rotación de un motor de corriente trifásica. La tensión de corriente alterna trifásica con frecuencia variable, necesaria para ella, se puede obtener de dos maneras muy diferentes.

En la figura 5 se presenta una conexión para el así llamado convertidor directo. Como en dicha figura se indica, en cada una de las tres líneas de alimentación del motor asíncrono se encuentra un rectificador de inversión. La tarea de un dispositivo de mando electrónico consiste en encender los diversos tiristores de modo que de las tres tensiones sinusoidales de diferentes fases y con la frecuencia de la red, sólo "tomen" en cada momento pequeñas superficies tensión-tiempo. Al componer esta superficie se origina una nueva tensión alterna de la frecuencia deseada. La regulación tendrá que conseguir que la frecuencia y la ten-

sión esté en relación constante, que el campo giratorio originado sea lo más simétrico posible y que la intensidad del estator tenga una forma sinusoidal.

A consecuencia del tiempo necesario para la regulación, la frecuencia que se puede obtener con el convertidor directo queda limitada al 40% aproximadamente de la frecuencia de la red. De una red de 50 Hz se pueden producir tensiones de corriente alterna de 0 hasta 20 Hz, con lo cual se fija al mismo tiempo la velocidad de rotación máxima del motor de propulsión.



- n-R — Regulador de la velocidad de rotación
- I-R — Regulador de la intensidad de corriente
- AG — Emisor de la amplitud

Fig. 5: Conexión básica de una propulsión trifásica con posibilidad de inversión de la corriente y dispositivo de regulación de la velocidad de rotación a la que está subordinada la graduación de la intensidad de corriente del estator.

## PROPULSION CON DISPOSITIVOS DE EXCITACION ELECTRONICOS

Se emplean los rectificadores de tiristores para alimentar directamente motores de propulsión, aplicándose también en las instalaciones eléctricas de corriente continua clásicas para el accionamiento de hélices. En este caso los tiristores reemplazan a los convertidores rotativos de excitación y acortan los tiempos de regulación.

Mediante las instalaciones de excitación por tiristores se pueden mejorar en gran medida las propiedades dinámicas de la instalación de propulsión.

La figura 7 muestra uno de estos "convertidores estáticos", que alimenta devanados de excitación de grandes máqui-

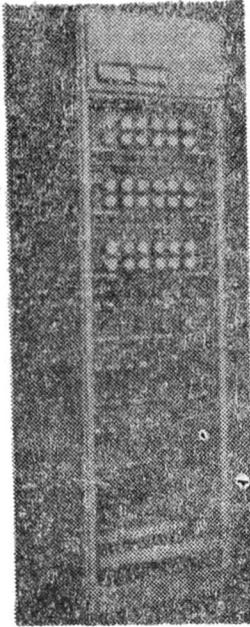


Figura 7:

Armario de maniobra con unidades tipo cajón de tiristores (arriba) y de reguladores (abajo); ejecución para el dispositivo de excitación de la instalación de accionamiento del rompehielos "Kiev".

nas de corriente continua. El armario contiene dos rectificadores en cruz que alimentan los devanados de excitación de dos generadores de un grupo Ward-Leonard, un rectificador de corriente para el devanado de excitación de un motor de propulsión y las unidades tipo cajón para los dispositivos electrónicos de mando, tales como dispositivos de encendido, reguladores y emisores funcionales.

#### OBSERVACION FINAL

Los tiristores son piezas constructivas fijas e insensibles a la posición que ocupen, motivo por los cuales no sufren desgaste alguno y están exentos de trabajos de mantenimiento. Se fabrican preferentemente de silicio, por lo cual queda garantizada su gran consistencia frente a altas temperaturas ambientales. Debido a estas propiedades, los tiristores son especialmente apropiados para su empleo en buques.

De las conexiones de rectificación mencionadas, la más empleada actualmente en la propulsión eléctrica de buques es la del rectificador de tiristores en unión de motores de corriente continua.

La conexión en puente de corriente trifásica es sencilla y clara, requiriendo además menor número de tiristores que las conexiones convertidoras. Otro tanto puede decirse también de las instalaciones de mando y regulación.

Con los tiristores quedan abiertas indudablemente nuevas e interesantes posibilidades en lo que respecta a la configuración de instalaciones eléctricas de propulsión de buques.

El empleo de tiristores en instalaciones como rectificadores, convertidores, excitación de generadores de C.A. (brushless) y reguladores automáticos de voltaje, está formado por elementos electrónicos estáticos, que no sufren ningún desgaste y no precisan prácticamente de mantenimiento.

El uso exclusivo de semiconductores de silicio, garantiza una mayor independencia de la temperatura y una mayor seguridad en la instalación, lo cual debe tomarse seriamente en cuenta, como instalación de avanzada, en la selección de equipos para futuras unidades de nuestra Armada.