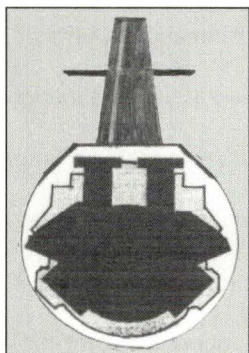


MOTOR DE IMANES PERMANENTES COMO PROPULSOR NAVAL

Felipe Calvo Alvarez *



Introducción.

Con la incorporación de los próximos submarinos de la clase *Scorpena*, la Armada de Chile dará el paso tecnológico más notable de los últimos 30 años, poniéndose al mismo nivel de las marinas de países desa-

rollados. Lo anterior, se debe a la tecnología de punta empleada en el diseño del submarino, pero sin duda alguna, lo medular está constituido por el motor eléctrico propulsor de imanes permanentes.

El motor eléctrico de imanes permanentes (PM), ha venido en el tiempo a ser una alternativa real y posible para dar solución a los problemas específicos donde el resto de los motores eléctricos tienen desventajas importantes, especialmente en lo que se refiere al peso por potencia instalada, densidad de energía y volumen limitado. Por otro lado, es de esperar que la tecnología y las investigaciones tiendan a desarrollar soluciones que preserven el medio ambiente, lo cual es altamente beneficioso para los motores eléctricos y generación de nuevas fuentes de energía eléctrica como las celdas de combustibles.

El propósito de este artículo es la presentación de esta nueva alternativa

como motor propulsor de buques de superficie y submarinos, mostrar sus potencialidades, ventajas, limitaciones e introducir algunos de los aspectos más notables del comportamiento de los imanes dentro del ámbito de las máquinas eléctricas.

¿Qué son los motores de imanes permanentes?

Los motores PM son motores eléctricos que utilizan la combinación de campos magnéticos de naturaleza permanente (Imanes) y campos magnéticos inducidos producidos por la corriente de excitación externa que fluye a través de los devanados del estator. Los motores PM pueden ser excitados tanto con señales eléctricas continua o alterna, sin embargo es importante notar que las aplicaciones de motores de excitación alterna son los más empleados y eficientes en términos de conversión de energía disponibilidad, y mantenimiento. A su vez dentro de los motores de excitación alterna se puede hacer una nueva división donde se encuentra a los motores *Síncrónicos de imanes permanentes* y los motores llamados *Brushless dc* o motores de excitación alterna "sin escobillas" debido a su equivalencia con los motores de corriente continua.

Los motores sincrónicos PM tienen, como muy bien lo dice su nombre, una velocidad constante, sincrónica de acuerdo a la frecuencia de las corrientes de armadura. Actualmente, con el uso de dispositivos de electrónica de potencia es

* Teniente 2º Ingeniero Naval Electricista.

posible variar la frecuencia de la armadura, pudiendo de esta forma cambiar la velocidad de giro del rotor. La mayor ventaja de este tipo de motor, con respecto a los motores de inducción y sincrónicos convencionales, es la ausencia de pérdidas de deslizamiento y la natural habilidad de suministrar corriente reactiva, dependiendo de las condiciones de excitación tanto del imán como de la armadura, además de un aumento general de la eficiencia de conversión de energía como también de la disminución de los costos de mantenimiento, y pérdidas asociadas a la refrigeración del motor.

Imanes Permanentes.

Los imanes permanentes son materiales que poseen una gran capacidad de almacenamiento de energía magnética, que perdura en el tiempo y que su degradación no es significativa. Un aspecto importante es la curva característica de magnetización o curva de histéresis, curva que es particular para cada tipo de material magnético.

Los imanes permanentes no son algo nuevo. Es en el presente siglo que su estudio y conocimiento fue avanzando hasta llegar hoy en día a la conformación de *tierras raras*, las que en conjunto con el Samario, Neodimio y otros materiales han constituido imanes de alto rendimiento.

Una forma rápida y adecuada para determinar la capacidad del material empleado como imán permanente es la observación de su curva característica de magnetización, tal como se muestra en la figura 1. De esta curva se puede observar claramente los puntos más relevantes, es decir el punto de remanencia, B_r y de coercitividad, H_c .

El punto de remanencia, B_r , indica la máxima densidad de flujo magnético que el imán puede producir por sí mismo, y el punto de coercitividad, H_c , es la cantidad

de fuerza magnetomotriz necesaria para desmagnetizar el imán. Un valor razonable de coercitividad para imanes permanentes de alto rendimiento es del orden de los kA/m. La característica de imán permanente es a lo largo de todo el sector del segundo cuadrante. Cualquier perturbación perjudicial que haga salir al punto de operación del segundo cuadrante tendrá como consecuencia la pérdida de la condición magnética permanentes del material.

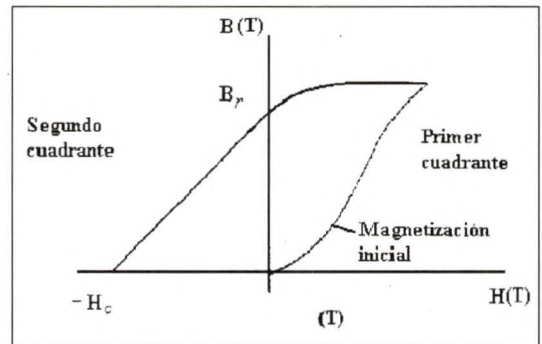


Figura 1. Curva B-H imán permanente.

Otro aspecto muy importante de señalar es la fuerte dependencia de los imanes respecto de la temperatura de servicio y de las vibraciones mecánicas a las cuales se ven sometidos en algunas aplicaciones. Lo anterior es importante ya que en ambos casos se produce una desmagnetización irreversible que se manifiesta con mayor fuerza con el aumento de la temperatura. Por este motivo, es necesario conocer todas las limitaciones y así mantener una temperatura adecuada para la correcta operación del imán. La desmagnetización de los imanes permanentes debido a la temperatura, vibraciones, o fuerzas magnetomotrizes inversas, son siempre de naturaleza irreversible, es decir, una vez ocurrido el fenómeno perjudicial y debido a la característica de memoria de la curva de histéresis del material, el punto de operación no volverá a ser el

mismo, sino que se reposicionará en un punto situado fuera del segundo cuadrante de la curva de magnetización del material, perdiendo sus características magnéticas permanentes.

Los motores de imanes permanentes de excitación alterna pueden tener varias configuraciones en cuanto a la distribución de los imanes y así lograr la conversión de energía. La forma comúnmente usada es alojar los imanes en el rotor de manera superficial.

El reemplazo del devanado de campo alojado en el rotor por imanes tiene un efecto inmediato que es la disminución de peso y volumen. Por otro lado en el aspecto eléctrico es necesario comprender que la velocidad del motor sólo podrá ser modificada de manera proporcional a la frecuencia de la señal de excitación. Esto último trae como consecuencia la fuerte dependencia del motor con los dispositivos de electrónica de potencia capaces de modificar la señal y así variar la frecuencia y por lo tanto la velocidad de rotación. Los dispositivos de electrónica de potencia asociados a los inversores estáticos introducen un alto contenido de armónicas a la señal de entrada a los devanados del estator lo que se traducirá en una fuente de ruidos eléctricos, distorsión de la forma de onda de la fuerza magnetomotriz en el entrehierro, obteniendo en consecuencia la generación de ruidos mecánicos proporcionales a las armónicas producidas por la acción de los inversores. Los ruidos mecánicos y la generación de torques eléctricos pulsatorios son los mayores problemas que actualmente se están estudiando, de manera de solucionar satisfactoriamente y cumplir con los requerimientos de ruido, los que evidentemente tendrán mayor o menor importancia dependiendo del tipo de aplicación. Sin embargo, se debe recordar que el conjunto rotor y carga acoplada funciona como un filtro pasa bajo, lo que de alguna manera ayuda a disminuir los ruidos generados

en un rango de frecuencias.

Los motores PM también tienen una fuerte dependencia constructiva para generar torques suaves, es decir, la geometría debe ser tal, que no se produzcan armónicas espaciales que distorsionen la señal de flujo en el entrehierro. En aplicaciones exigentes es importante buscar técnicas de minimización de estos efectos pulsatorios como también un adecuado control de la velocidad y torque.

Motor PM como motor propulsor naval.

Actualmente la propulsión eléctrica está tomando importancia tanto en buques de guerra como en buques mercantes. Esta alternativa de propulsión no debe ser descartada frente a otras alternativas puesto que representa ventajas comparativas importantes frente al vapor, gas o el mismo motor diesel.

Ejemplos recientes de la aplicación de motores PM en la propulsión de buques son:

- Submarino *Scorpena*, Francia-España.
- Submarino "U-212", Alemania.
- Destructor "DD-21", (En estudio, perteneciente a la marina de los Estados Unidos).

En general se puede decir que los motores eléctricos son de mayor tamaño, más pesados y más caros que un sistema mecánico, como los motores diesel o las turbinas a gas, sin embargo, con el advenimiento de los motores de PM ha sido posible disminuir estas condiciones desfavorables lo que hace pensar que su aplicación sea mayor en el futuro.

La selección y diseño de una planta eléctrica de propulsión naval debe satisfacer ciertos requerimientos específicos con respecto a las demandas propias del proyecto. En general los proyectos exitosos han redundado en el desarrollo de conceptos tales como:

- Bajo nivel de ruido mecánico producto de la conversión electromecánica de energía.

- Alta eficiencia general del sistema.
- Alta resistencia al shock mecánico.
- Alta versatilidad y redundancia.
- Equipamiento de bajo peso y volumen.
- Buena capacidad de refrigeración y dispositivos asociados.
- Alta capacidad para controlar los niveles permitidos de temperatura y humedad.

Requerimientos Planta Propulsión Eléctrica.

Algunas de las ventajas del motor eléctrico frente a otras alternativas son las siguientes:

1. Flexibilidad.

El sistema eléctrico es mucho más flexible ya que permite instalar al conjunto motor-generador en un lugar distinto al sistema propulsor. Esto quiere decir, que se puede optimizar en todos aquellos conceptos estructurales como lo son el eje, descansos, diámetro del casco presión para submarinos, etc. Es notable destacar que una disminución de la cantidad de componentes de los anteriormente señalados hacen disminuir las posibilidades de falla. La flexibilidad se traduce en un ahorro substancial y comprobado de combustible, lo que permite considerar al sistema en su globalidad.

2. Menor ruido.

Este aspecto es muy importante sobre todo para los buques de guerra que deben mantener una tasa de discreción bastante alta y que aumenta en el caso de los submarinos. En este sentido la mayoría de los motores eléctricos poseen excelentes niveles de ruido frente a otras alternativas como la propulsión con turbinas a vapor, gas o diesel. Prueba de lo anterior, ha sido el desarrollo de fragatas antisubmarinas como es el caso de la fragata tipo 23 de la Real Armada Británica. Sin embargo, los motores de excitación alterna son aún más silenciosos que los motores de corriente continua, hasta ahora los más populares.

3. Altas cargas auxiliares.

Este concepto va a depender de la naturaleza del buque, es decir, de su propósito. Las cargas pueden ser como: winches, grúas, hélices de empuje lateral, etc. La carga auxiliar del buque en determinadas situaciones es posible que alcance la misma potencia que la requerida por la propulsión. De aquí que sea necesario explotar el hecho de que cuando la máxima carga auxiliar se produce, el sistema de control distribuya eficientemente el poder eléctrico. Lo último se logra al tener integrado el sistema eléctrico de servicio con el de propulsión del buque.

4. Control.

Los sistemas de control en el ámbito eléctrico tienen un mayor desarrollo tecnológico que el resto de los sistemas asociados a la propulsión y además permite actualizar el sistema de control a un menor costo. Las máquinas eléctricas proveen control rápido de velocidad y/o torque sobre todo en el rango de velocidad/potencia de diseño. Queda por lo dicho, que los motores eléctricos presentan excelentes condiciones para aquellas aplicaciones donde se requiere un gran control posicional. Por esta razón los accionamientos eléctricos son elegidos para buques oceanográficos de investigación, cazaminas, de rescate, antárticos y remolcadores.

Aplicación Naval de los Motores PM.

Quizás dentro de las aplicaciones actuales y posibles de un motor PM es su utilización como motor de propulsión de unidades submarinas con potencias instaladas que bordean como límite superior los 5MW. En la aplicación submarina, los sistemas de propulsión deben cumplir con dos importantes funciones, estas son:

- Proveer la propulsión.
- Proveer la fuente de potencia para el resto del submarino.

Estudiando las características actuales de los submarinos convencionales, se debe observar los siguientes aspectos al momento de elegir un determinado sistema propulsor:

- Hélice única acoplada directamente al sistema propulsor.
- Motores eléctricos de propulsión con sistemas auxiliares.
- Sistemas diesel para la generación y recarga de los bancos de baterías principales, ocupando aire mediante el snorkel.
- Sistemas de transmisión de potencia eléctrica.
- Control y monitoreo.
- Posibilidad de implementación de sistemas modernos AIP (Air Independence Propulsion).

Las ventajas comparativas de los motores PM serán en definitiva la mejor defensa frente a otros sistemas de propulsión. Actualmente es posible desarrollar motores PM de potencias eléctricas que satisfacen plenamente los requerimientos de potencia para submarinos convencionales, tal es el caso del submarino francés *Scorpene*. Otras aplicaciones del ámbito naval pueden ser generadores de energía eléctrica, que a iguales potencias reducen notablemente el volumen de los generadores actuales.

Sistemas de Propulsión Submarinos Convencionales.

Las dimensiones y características técnicas del sistema de propulsión de un submarino dependen principalmente de la capacidad de éste para almacenar la energía, de las condiciones tecnológicas, estratégicas y tácticas de su empleo. Los sistemas de propulsión de un submarino también deben considerar requerimientos técnicos, entre otros, rendimiento motor propulsor, velocidad de la hélice, revoluciones, maniobrabilidad, autonomía, rangos de inmersión, huella acústica, generación eléctrica y capacidad de

almacenamiento de energía en bancos de baterías para períodos de navegación submarina, etc.

Con el advenimiento de la electrónica de potencia y de la utilización de nuevos materiales y costos razonables, ha sido posible la implementación de nuevos motores de plantas propulsoras de los submarinos. Este es el caso de los Motores Sincrónicos de Imanes Permanentes.

Motores PM como Motor Propulsor.

a. Ventajas de su empleo.

- No son necesarios los devanados del rotor, puesto que el flujo es creado por imanes.
- La eficiencia del motor es mayor que en un motor sincrónico, de inducción o de corriente continua a igual potencia, puesto que las pérdidas del rotor vienen a ser muy bajas al no contar con devanado de campo.
- La refrigeración del motor se simplifica, puesto que no se requiere de enfriamiento del rotor. El rango de operación del estator puede ser aumentado debido a la reducción de las pérdidas totales y al aumento de la eficiencia del agua de refrigeración.
- Es posible construir motores con diámetros mayores que permitan desarrollar torques altos a bajas RPM sin considerar un aumento de peso, situación inversa a lo que sucedería en una máquina sincrónica convencional con devanado de campo. La obtención de bajas RPM es especialmente importante para aquellas donde se quiera disminuir los efectos de la cavitación de la hélice.

b. Desventajas.

- El motor alimentado de una fuente DC, requiere imperiosamente de un dispositivo inversor, ya que su operación sincrónica requiere de excitación alterna. Esto hace que se dependa de una gran cantidad de componentes de electrónica de potencia, los que deben cumplir con

los requerimientos de potencia exigidos. Un alto número de elementos aumenta significativamente la tasa de fallas.

- La inversión de corriente continua a alterna implica necesariamente la introducción de un alto contenido armónico en la señal eléctrica de excitación, las que por su naturaleza no son deseables y altamente perjudiciales en la conversión de energía, eficiencia y calidad de servicio. Las armónicas generan torques parásitos y ruidos perfectamente detectables y audibles. Por lo anterior se debe establecer las técnicas de control, objeto minimizar los efectos perjudiciales.
- La pérdida del flujo de los imanes es algo factible. Se debe guardar especial atención con las temperaturas de servicio del motor, como también determinar los puntos de operación en las características B-H para los imanes para evitar la desmagnetización que de ocurrir sería irreversible.
- Debe contar con dispositivos sensores de realimentación y de protección tanto para la operación normal como para las eventuales fallas a las que podría enfrentar, especialmente la falla de cortocircuito de una fase.

Criterios Básicos Motor PM.

Los criterios a usar en el diseño de un motor PM se pueden resumir en:

a. Simetría Electromagnética.

Con el objeto de no proporcionar modulaciones en las inductancias de los devanados del estator debido a la posición angular del rotor, de tal manera de minimizar las posibles pulsaciones del torque de salida. En otras palabras se debe construir un rotor lo más cercano al diseño teórico perfecto.

b. Gran Número de Polos.

Tiene relación con la reducción de peso y tamaño del motor.

c. Alto Número de Fases.

Interesa tener un gran número de fases por dos razones, estas son:

- Fuerte reducción de las armónicas espaciales debido a las formas de ondas y la conversión de potencia, y su correspondiente consecuencia en las vibraciones del motor.
- Reducción de la potencia de cada fase, optimizando el funcionamiento de los inversores, utilización de una alta frecuencia de conmutación reduciendo el contenido armónico, ruido y vibraciones.

4. Ventajas motor PM versus motor DC.

Las ventajas comparativas entre un motor PM versus un motor DC pueden ser resumidas en los siguientes aspectos:

- Gran ajustabilidad sobre el 100% de la velocidad nominal, tanto avante como dando atrás.
- No existe ningún cambio en la configuración de los bancos de baterías como es en el caso de los motores DC, evitando el ruido de los contactores que esto implica.
- Mayor eficiencia.
- Menor peso y tamaño para una misma potencia instalada (alrededor de un 50%).
- Alta redundancia interna.
- Sistemas de control de conmutación que pueden ser alojados en áreas pequeñas.
- Mejoramiento de la maniobrabilidad.
- Menor mantenimiento.
- Reducción de peaks de torque.
- Sistemas simplificados de operación.
- Facilidad para remover el calor generado por las pérdidas debido a las corrientes del estator.

El punto más notable en cuanto a la eficiencia del motor PM son las pérdidas debido a la excitación de campo y el enfriamiento, que en comparación con el resto de los motores actualmente usados en la propulsión de buques. Además debe observarse que el peso y tamaño de los

motores PM es sustancialmente menor por lo que las ventajas de este tipo de motor en estos aspectos es algo relevante y categórico. De resultados empíricos, se ha obtenido la eficiencia, lo cual es mostrado en la figura 2. Ahí se compara el motor PM con el motor CC mostrando claramente las ventajas de un motor PM sobre un motor de CC.

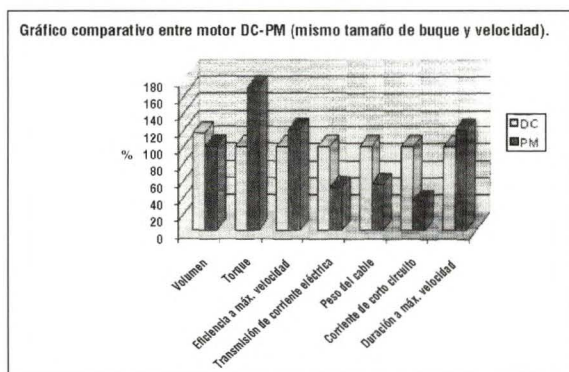


Figura 2. Gráfico resumen en porcentajes de variables más importantes de motor PM vs. DC.

Experiencias navales actuales de Motor PM como Motor Propulsor.

Son tres las aplicaciones navales más recientes de motores PM como motores utilizados en la propulsión principal de buques, tanto de superficie como submarinos. Los países que llevan la delantera son principalmente Francia, Alemania y también Estados Unidos. Quizás esta sea una de las mejores evidencias de que el motor PM si tendrá en el futuro mayor aplicación.

1. Buque armada alemana *Schwedeneck*.

Actualmente se encuentra en servicio un motor sincrónico de imanes permanentes a bordo del buque multipropósito de la Armada alemana *Schwedeneck*. El sistema de propulsión del *Schwedeneck* está constituido por el motor "Permasyn" de la empresa Siemens, el cual está alimentado por un sistema de potencia a bordo de 1.1 MW a

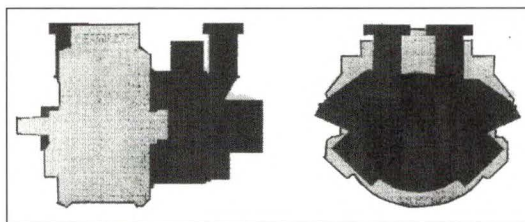


Figura 3. Comparación de volumen de motor PM versus a motor DC a igual potencia.

230 RPM desde 660 V, 60 Hz. Son dos los convertidores independientes de 6 pulsos que alimentan a dos circuitos independientes de corriente continua. El devanado del estator consiste en 6 fases las cuales son alimentadas independientemente por un inversor modulador de ancho de pulso (PWM).

La mayor ventaja de este concepto de propulsión y las positivas experiencias obtenidas a bordo del *Schwedeneck*, han tenido por consecuencia que la Marina alemana decida la incorporación de este tipo de motor como sistema de propulsión en los desarrollos de sus nuevas unidades submarinas.

2. Destructor "DD-21" Armada de Estados Unidos.

La Armada de Estados Unidos se encuentra en un período de reestructuración de la flota de superficie y submarina. Las alternativas tecnológicas han permitido la incorporación de nuevos dispositivos competitivos, como por ejemplo, la eléctrica.

En los últimos años se ha venido terminando la fase de diseño de un nuevo tipo de destructor de flota que se ha denominado como DD-21. Las características del nuevo destructor son las siguientes:

- Reducción de costos en combustible por aproximadamente 100 millones de dólares a lo largo de la vida de cada buque.
- Reducción en un 24% del volumen de la maquinaria.
- Gran aumento de los rangos de operación.

- Incorporación de tecnología *Stealth*.

La clave del éxito de este destructor consiste en la disminución de los costos de operación del buque, además de una avanzada tecnología, lográndose sistemas modulares.

Los motores PM ofrecen una alta densidad de potencia, peso más ligero, menor costo de mantenimiento y de operación. Los dispositivos de electrónica de potencia hacen posible el uso militar de los motores PM, lo que justifica plenamente su incorporación como alternativa real de solución para el problema de propulsión de las futuras unidades de superficie como también de las submarinas.

La eficiencia de los sistemas de propulsión eléctricos son comparables a los sistemas mecánicos, sin embargo la ventaja del primero radica en los bajos costos de mantención y en la versatilidad que presenta un sistema eléctrico frente a uno de propulsión mecánico.

3. Submarino Scorpene.

Tal vez la importancia de la incorporación a la Armada de Chile del submarino Scorpene aún no sea realmente dimensionada. La incorporación de tecnología de punta en lo que se refiere a propulsión naval, nos pone al mismo nivel de las grandes potencias, pero al

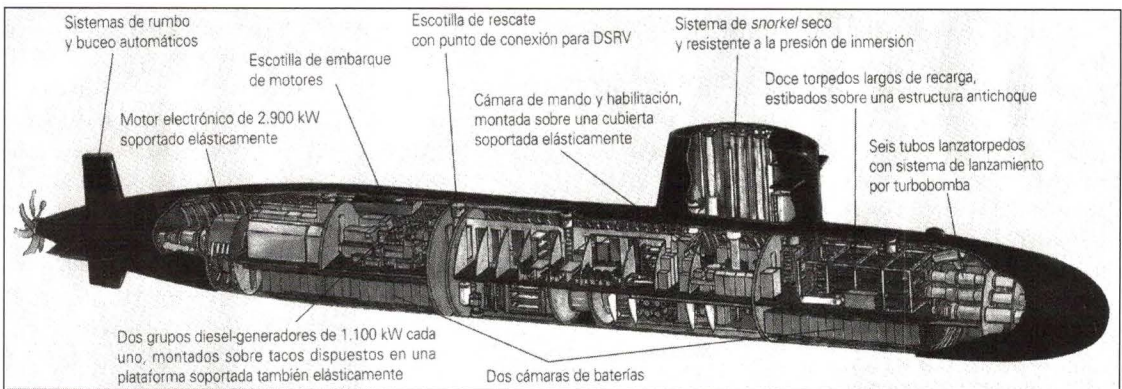
mismo tiempo nos exige esfuerzo. Sin duda alguna que este tipo de motores serán en el futuro una alternativa eficiente y razonable para la solución del problema de la propulsión tanto de buques de superficie como submarinos.

El motor del submarino Scorpene ha sido desarrollado por la empresa francesa Jeumont-Schneider, la que tiene una basta experiencia en fabricación y diseño de motores y dispositivos eléctricos. Si bien es cierto aún no se ha construido el motor definitivo para el submarino, se ha logrado desarrollar un prototipo de 1,8 KW, siendo catalogadas las pruebas iniciales como exitosas y muy alentadoras.

El motor del submarino Scorpene tiene un alto desarrollo tecnológico, aplicando todas las alternativas actuales de electrónica de potencia, cumpliendo cabalmente con los requerimientos de alto nivel de la Armada de Chile.

Conclusiones.

Sin duda alguna que es necesario conocer las cualidades, ventajas, limitaciones, condiciones operativas de los motores de imanes permanentes, como también todos los aspectos novedosos concernientes al comportamiento de los imanes en el ámbito de las máquinas eléctricas como magnetización,



Submarino Scorpene.

vida útil y fallas. El conocimiento del motor se hace aún más imperioso dado que la Armada de Chile se encuentra en proceso de adquisición de dos unidades submarinas, las que cuentan con esta tecnología como motor propulsor.

Otro aspecto importante y que debe ser tomado en cuenta es que dado el alto número de componentes electrónicos existe la posibilidad de que al cabo de un tiempo de operación aumente la tasa de fallas debido a la mala operación. Se debiera hacer un análisis del tiempo de duración de la vida útil de los inversores estáticos, y otros elementos de alta razón de uso.

Los sistemas de control asociados al motor deben permitir una alta redundancia de operación ya que por el alto número de dispositivos es necesario contar con la posibilidad de cambiar configuraciones de operación. Otro aspecto importante es la utilización de un número elevado de fases, lo que además de tener incidencia en el costo de los elementos manejadores de potencia eléctrica, también incide en la disminución de torques parásitos, fenómeno que debe ser minimizado al máximo. También una alta redundancia de los sistemas de control debe incidir positivamente en la posibilidad de cambiar a voluntad la huella acústica, factor importante sobre todo en la guerra submarina.

Se debe actualizar permanentemente los programas de estudios, de manera que sean concordantes entre la tecnología adquirida con los conocimientos teóricos, de manera que no queden zonas oscuras donde sólo los países más desarrollados tienen acceso. Lo anterior va directamente relacionado con la dependencia a la cual se ve obligada la Institución al adquirir nuevas tecnologías sin tener el suficiente respaldo tecnológico. Además

el personal que opere el motor, como también el que lo mantenga, debe ser rigurosamente capacitado y entrenado de manera que las fallas por error humano tiendan a ser prácticamente nulas.

Quizás los aspectos más importantes del motor no lo constituyen los parámetros eléctricos de operación, sino más bien las ventajas constructivas, las que se adecuan a los requerimientos de las unidades navales del futuro, especialmente en aquellas aplicaciones donde se requiere una mayor concentración de energía por peso, como es el caso de los submarinos. Además es importante señalar las ventajas en cuanto a la versatilidad de operación, alta redundancia y posibilidad de cambio de huella acústica, factor muy importante para la guerra en el mar.

Aún quedan muchas interrogantes que deben ser resueltas, de manera de lograr la máxima eficiencia y de esta manera obtener una máquina eléctrica que presente condiciones favorables frente a otras alternativas que también están en alguna fase de desarrollo. Sin embargo debe recordarse que los sistemas de propulsión eléctricos son de fácil adaptabilidad a nuevas formas de obtención de energía limpia como lo son las celdas de combustible, las que actualmente se encuentran en una adelantada fase de desarrollo e implementación tanto en sistemas asociados a vehículos terrestres como también en unidades navales.

Finalmente se puede decir que el motor de imanes permanentes es una alternativa poderosa y que posee las condiciones de motor propulsor de buques tanto de superficie como submarino. Sin embargo, lo anterior impone necesariamente una fuerte condición de soporte logístico y tecnológico que respalden su operación.

BIBLIOGRAFIA

- E. Bartlett; "Electric Propulsion: Commonality Is the Only Way", Proceedings, Agosto de 1998.
- F. Calvo A.; "Análisis de Técnicas de Control de Velocidad y Torque para Motores Sincrónicos de Imanes Permanentes de Alta Potencia Aplicados en Propulsión Naval", Tesis de Grado, Academia Politécnica Naval, diciembre 1998.
- Kay Hameyer, Ronie J.M. Belmas; "Permanent Magnet Excited Brushed DC Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, N° 2, abril 1996.
- Duane Hanselman; "Brushless Permanent Magnet Motor Design", Primera edición, McGraw-Hill, 1994.
- Thomas M. Jhans y Wen L. Soong; "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, N° 2, abril 1996.
- M. Azizur Rahman y Ping Zhou; "Analysis of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, N° 2, abril 1996.
- Jaques Saint Michel; "Submarine Propulsion Systems with Permanent Magnet Motor", Jeumont Industries, France, 1997.

