

Producción Magneto Hidrodinámica de Energía Eléctrica

Luis Milla Lostaunau

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú

RESUMEN : El principio en que se basa la generación magnetohidrodinámica consiste en hacer fluir un gas ionizado en alta temperatura, a través de las líneas de fuerza de un campo magnético intenso, y reunir así electrones libres en un electrodo. Esto convierte al otro electrodo en relativamente positivo. Al conectar los electrodos a través de un circuito cerrado se origina la transmisión de energía eléctrica, generada por la energía interna del gas ionizado caliente.

I. INTRODUCCIÓN

Existen diversos métodos no convencionales de generar energía eléctrica, cada uno posee características propias e importantes, de acuerdo a su capacidad y rendimiento; los que en el futuro permitirán planificar sistemas de producción más óptimos.

Ahora que el costo de producción de electricidad por medio del uso del petróleo resulta caro, podría ser una alternativa práctica la selección de la magneto hidrodinámica (MHD) como el método más atractivo.

Los procesos de producción de energía térmica son complejos y antiguos y no rinden más del 40% de la energía térmica aplicada, rendimiento relativamente bajo, incompatible con el de las máquinas de tipo moderno. Es preciso estudiar, la forma de producir energía eléctrica, sin una degradación tan considerable.

Desde hace muchos años se conoce diferentes métodos de convertir directamente, el calor en electricidad, con rendimiento elevado, pero son métodos de laboratorio y aplicables para obtener corrientes eléctricas de baja potencia. El principio en que se funda tales métodos es el de la inducción electromagnética [1] enunciado por Faraday en 1840.

El principio dice: cuando un conductor eléctrico se desplaza en un campo magnético, se crea en aquel una fuerza electromotriz capaz de hacer circular una corriente eléctrica a lo largo de un conductor: la energía

mecánica se transforma en energía eléctrica. Este principio fundamental se aplica en todas las máquinas giratorias de los laboratorios; pero el mismo Faraday demostró, que en lugar de utilizar conductores metálicos rígidos se puede emplear un metal líquido: el mercurio. Esta idea ha sido recogida por un grupo de investigadores actuales, los que generalizaron la cuestión; "si todo fluido conductor que se desplaza en un campo magnético, puede producir electricidad, se podrá también obtener esta, haciendo pasar a través de un campo magnético potente un chorro de un gas ionizado, es decir que contenga un cierto número de electrones libres, negativos unos y otros en forma de iones positivos.

II. METODOLOGÍA DE LA OBTENCIÓN DE ELECTRICIDAD POR MEDIO DE UN GAS

Se ioniza un gas sometándolo a temperaturas elevadas. En un principio se pensó en el aire, pero su ionización exige elevadísimas temperaturas y costosas de obtener.

Sin embargo, a un técnico se le ocurrió adicionarle vapor de un metal alcalino, sodio, potasio o cesio, cuyos potenciales de ionización son débiles y observó que el aire se ionizaba a temperaturas comprendidas entre 2000° y 3000° con este artificio logró que se hagan conductores. En lugar de emplear metales pulverizados se puedan utilizar algunas de sus sales.

Haciendo pasar rápidamente el gas calentado y ionizado, entre los polos de un imán potente, cuyo flujo magnético este dispuesto normalmente en el sentido en el que el gas se desplaza, los electrones libres son desviados de su trayectoria por el campo magnético y se dirigen, chocan y caen sobre el ánodo o polo positivo, atraviesan y recorren el circuito exterior (línea de utilización de la corriente), y vuelven a caer sobre el chorro de gas para comenzar de nuevo el ciclo; la corriente eléctrica engendrada circula por el circuito

exterior. Los iones positivos se desplazan en sentido contrario al de los iones negativos, pero como son mucho más pesados que éstos, los electrones, su velocidad es más débil y no intervienen prácticamente en el proceso.

En la cámara de combustión de este generador penetra el gas o mezcla gaseosa que debe ionizarse, se eleva su temperatura al interior del mismo horno, se hace llegar una sal de uno de los metales alcalinos, el cual se volatiliza rápidamente, debido a la elevada temperatura que se disipa en el interior del horno.

El gas o mezcla gaseosa ionizada es impulsada a gran velocidad a lo largo de tuberías convergente divergente y de velocidad a lo largo de tuberías convergente a las líneas de fuerza, de un fuerte campo magnético producido por un electroimán.

Los electrones libres, bajo la acción del campo magnético se dirigen a los electrodos, dispuestos frente a frente y enlazados con la línea exterior de utilización, la cual es recorrida por la corriente inducida (ver figura 1).

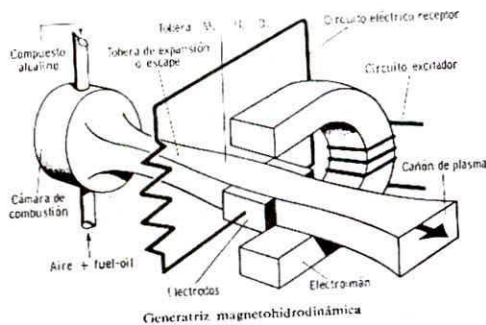


Fig. 1. Generador magnetohidrodinámico

El gas empleado se obtiene por la combustión del carbón pulverizado o de un hidrocarburo líquido como el fuel, o por combustión del gas de alumbrado o gas combustible natural.

Los gases calientes a unos 2000°C son impulsados a gran velocidad por un aparato soplador que lo envía a la cámara de transformación. La mezcla gaseosa que sale de este tubo, cede parte de su calor propio en un cambiador de calor, en el cual se calienta el aire empleado para mantener combustión, en la cámara. El sobrante de calor del gas ionizado, se hace pasar a un segundo cambiador, donde cede todo su calor, para obtener vapor de agua recalentado, que se utiliza y aprovecha en una máquina de vapor clásica o bien en una turbina de vapor, las cuales hacen funcionar una dinamo o un alternador.

Los técnicos de la conocida empresa Westinghouse utilizaron como gas ionizable el helio, al que le adicionaron vapor de cesio, se calienta a la temperatura de 2300°C haciéndolo pasar a través de un reactor nuclear. El aparato funciona en circuito abierto o

cerrado. En ambos casos, se han obtenido rendimientos elevados, pudiendo producir potencias eléctricas del orden de los 380 megavatios.

El proceso industrial exige resolver aun muchos y difíciles problemas, la obtención del plasma (gas ionizado) esta resuelto, pero falta encontrar todavía materiales que resistan las elevadas temperaturas que se desarrollan en el proceso y la acción química de los metales alcalinos que se mezclan al gas. Otro problema es la producción de campos magnéticos, tan intensos, como se necesitan en el proceso.

III. ASPECTOS TÉCNICOS

A. Conductividad de los Gases

El generador MHD utiliza un gas ionizado, es decir un gas eléctricamente conductor. Por ello son de importancia los valores de conductividad que pueden alcanzarse y la condiciones necesarias para lograrlas.

Existen dos mecanismos de ionización disponibles; el térmico ó de equilibrio que se logra calentando el gas y el extratérmico o sin equilibrio, tal como se logra en la descarga de gases a bajas presiones, tal como, porque ocurre en los rectificadores de gas y lámparas fluorescentes.

La ionización térmica, resulta más práctica hasta hoy, la ionización sigue una ley de acción de masas como sucede en la disociación molecular. Lo que resulta en un aumento exponencial de la ionización con la temperatura y el aumento exponencial de la conductividad.

La conductividad se puede calcular en la fórmula aproximada.

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{c^2}{mc} \cdot \frac{ne}{noQ_0 - niQ_i}$$

donde: e, m, c = carga, masa y velocidad térmica del electrón

ne, no, ni = densidad del número de electrones, átomos neutros y iones,

Q_0, Q_i = secciones de colisiones efectivas de los átomos neutros y iones con los electrones.

Debido a la mayor movilidad de los electrones, llevarán la mayor parte de la corriente y se encontrará que $ne = ni$. Sin embargo Q_i es algunas miles de veces mayor que Q_0 , El resultado es que cuando un gas se aproxima a 0.1% de ionización, la conductividad tiende a nivelarse y a crecer menos empinada cuando se aumenta la temperatura y el grado de ionización, a este porcentaje de ionización, es tan buen conductor como si estuviese ionizado.

Potenciales de ionización

Cesio	3.87	Electrón voltios	-	400
Rubidio	4.16	Electrón voltios	-	-
Potasio	4.32	Electrón voltios	-	400
Sodio	5.12	Electrón voltios	-	300
Bario	5.19	Electrón voltios	-	-
Hidrogeno	12.53	Electrón voltios	-	7
Helio	24.16	Electrón voltios	-	4.3

Si a los gases comunes se le añade una pequeña cantidad (de 0.1%) de su material fácilmente ionizable como el vapor metálico de un alcali, puede obtenerse un grado suficiente de ionización a temperaturas respectivamente bajas para que puedan soportar algunos materiales sólidos, puedan producirse en hogares, hornos, también para que puedan producirse en reactores de fisión nuclear.

B. Continuidad

Las formas de continuidad:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{d\Delta}{\Delta} + \frac{d\nu}{\nu} = 0 \quad (1)$$

$\rho = \text{densidad}$

donde $\nu = \text{velocidad}$

$\Delta = \text{área}$

Momento o cantidad de movimientos:

Para un volumen central, las ecuaciones de momentos pueden escribirse:

$$pA - (p - dp)(A + dA) - pdA + FAdx = \frac{P}{go} (A + dA) \quad (2)$$

$$(U + dU)^2 \frac{P}{go} AU^2$$

donde $p = \text{presión}$

$$\text{ó } \frac{dp}{dx} = F - \frac{pU}{go} \cdot \frac{dU}{dx}$$

C. Energía

La energía añadida a una unidad de volumen del fluido al pasar por un incremento de distancia dx es

$$\frac{dh}{dx} + \frac{UdU}{go} \cdot dx$$

El pequeño elemento de fluido viaja la distancia dx la fuente de calor interna disipa una cantidad de energía

$$qdt = q \frac{dx}{U} \text{ por unidad de volumen}$$

También la fuerza del cuerpo aplicada externamente hace el trabajo sobre el elemento de fluido en una cantidad.

Fdx por unidad de volumen

El balance de energía es

$$p \frac{dh}{dx} + \frac{UdU}{go} = \frac{q}{U} + F$$

Para flujos unidimensionales MHD en los cuales el vector del campo magnético es perpendicular a la velocidad de flujo ya los vectores de corriente

$$F = jB$$

En cualquier caso:

$$q = j^2 / \delta$$

D. Momentos

$$\frac{dp}{dx} = jB - \frac{pU}{go} \cdot \frac{dU}{dx}$$

E. Gases perfectos

$$p = p^{Rt}; \quad h = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p}{\rho}$$

donde:

R= ete del gas

T= temperatura del gas

K= relación de calores específicos

Campo magnético aplicado B y densidad de corriente j
La densidad de corriente depende de la conductividad, del campo electrostático aplicado y del campo electrostático inducido por el movimiento de las cargas en un campo magnético.

Desde que el gas conductor se mueve con la velocidad U, el campo eléctrico inducido es

$$\bar{U} \times \bar{B}$$

El voltaje neto en cualquier punto es entonces:

$$\bar{E} - \bar{U} \times \bar{B}$$

donde: \bar{E} = campo electrostático aplicado

F. Relación de Temperatura de Estancamiento

$$\frac{T_t}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} M^2$$

donde:

T_t = temperatura de estancamiento del gas

$M = N^\circ$ de Mach del flujo en cualquier punto

G. Rendimiento de la Turbina Equivalente

$$N_T = \frac{1 - \frac{pf}{pi} \frac{(k-1)n_e}{k}}{1 - \frac{pf}{pi} \frac{k-1}{k}}$$

H. Longitud del Canal

$$L = \frac{\pi}{(1-n)_c \rho U B^2} \left[1 - \left(\frac{hf}{hi} \right)^{\frac{k}{k-1} n_e} \right]$$

I. Pérdidas

Las pérdidas que se producen para disminuir el rendimiento de una turbina equivalente de un generador MHD son las siguientes:

- 1) Pérdidas de transmisión de calor y del campo magnético
- 2) Pérdidas por corrientes parásitas
- 3) Pérdidas aerodinámicas
- 4) Pérdidas en los electrodos
- 5) Efecto Hall

1) Pérdidas de Transmisión de calor y del campo magnético

La pérdida de transmisión de calor por las paredes y es una de las más grandes fuentes de pérdida de un generador MHD. Para una configuración lineal, en forma gruesa se puede decir que se deben evitar las relaciones de longitud - diámetro del canal mayores de 20 y altas relaciones ancho alto de la sección.

Desde que un generador MHD, opera a temperaturas altas, el problema de los materiales puede ser muy importante, problema que se alivia por las presiones modestas, de 2 a 10 atm. que se usan en los ciclos abiertos y menores para el ciclo cerrado.

2) Pérdidas por corrientes Parásitas

En un dispositivo MHD, el conductor móvil es un continuo tridimensional, en vez de un haz de alambres esencialmente unidimensionales. Las corrientes parásitas pueden ocurrir cada vez que hay una rápida variación especial en el campo eléctrico o magnético, o en la velocidad del gas. La presencia del ánodo a alto potencial, y del cátodo a bajo potencial causara corrientes inversas, en la región externa al campo magnético.

3) Pérdidas aerodinámicas

Igual que en una turbina convencional, en un generador MHD ocurrirá pérdidas por resistencia viscosa y pérdida por difusión. En una turbina las pérdidas asociadas, con capas límites viscosas, separación de flujo y efectos tridimensionales. En el generador MHD, el número de Reynolds, será más grande, debido a la dimensión de referencia y velocidad del flujo

son mayores. De aquí que comparativamente estas pérdidas serán menores.

4) Pérdidas en los Electrodos

Los electrodos poseen un forro especial de cargas y una caída de potencia asociada con ellos, como en una descarga de gases del tipo arco convencional.

5) Efecto Hall

Surge cuando las corrientes eléctricas fluyen en un conductor, sometido a un campo magnético, reduce el flujo de corriente en la dirección del campo eléctrico. El campo eléctrico acelera los electrones en la dirección opuesta. Al adquirir velocidad los electrones, el campo magnético hace que aceleren en la dirección normal a su trayectoria, las que se vuelven curvas.

Las conductividad eléctrica se convierte en un tensor en vez de una cantidad escalar y la corriente fluye formando un ángulo con fuerza electromotriz.

Este efecto se encuentra en todo tipo de conductores, sólidos, líquidos o gaseosos. Los gases bajo intensidad, muestran este efecto mas marcadamente que los sólidos. [2].

IV. CICLOS MDH PARA LAS CENTRALES ELECTRICAS

La búsqueda de altos rendimientos presenta dificultades. El dispositivo térmico potencia esta relacionado a la diferencia de temperaturas alta y baja del medio de trabajo.

Los estudios de ciclos térmicos han demostrado que si un generador MHD se opera a temperaturas superiores a 2500°k pueden obtenerse rendimientos muy atractivos.

Los ciclos de potencia que pueden usar generadores MHD, caen en dos categorías: ciclo abierto en el cual el medio de trabajo consiste en productos de combustión y ciclo cerrado (ver figura 2) donde un gas inerte, como argón o helio, se recircula continuamente.

El ciclo de Brayton usado, en turbinas de gas, parece más apropiado para la operación en un ciclo abierto que use cualquier forma de llama, producida por la combustión de petróleo o carbón pulverizado. Podría usarse también, en la operación de ciclo cerrado, usando intercambiadores de calor, como en un reactor nuclear.

Esta última no es práctico debido a los grandes requisitos de potencia del compresor operado a alta temperatura, los que afectan las ventajas que ofrece el principio MHD.

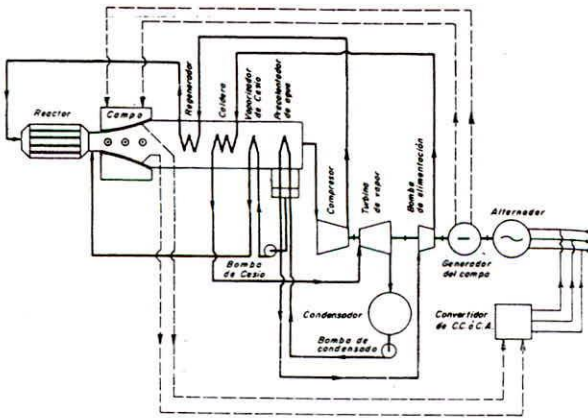


Fig. 2. Diseño típico de Generador M.H.D. de Ciclo Cerrado

El ciclo Rankine, usando en turbinas de vapor, combinado con un medio de trabajo con presión de vapor de baja, es útil para la operación en ciclo cerrado, el compresor se reemplaza por una bomba para líquidos que solo absorbe una pequeña cantidad de potencia.

En este sistema se visualiza el uso de un reactor atómico para calentar el helio, "inoculado" con 2% de cesio, a la temperatura requerida. Los gases pasan por el generador MHD. Por escape del generador es muy caliente y contiene entalpía apreciable, es necesario el uso de un regenerador o intercambiador de calor para lograr un rendimiento alto. El intercambiador de calor precalienta el Helio que alimenta al reactor.

Los gases preceden a la caldera donde, se genera vapor para accionar una turbina de 38MW. La turbina mueve el compresor de helio cesio, el que lleva el gas al intercambiador y al reactor.

Como la potencia de la turbina no es suficiente para accionar el compresor se requiere un motor auxiliar.

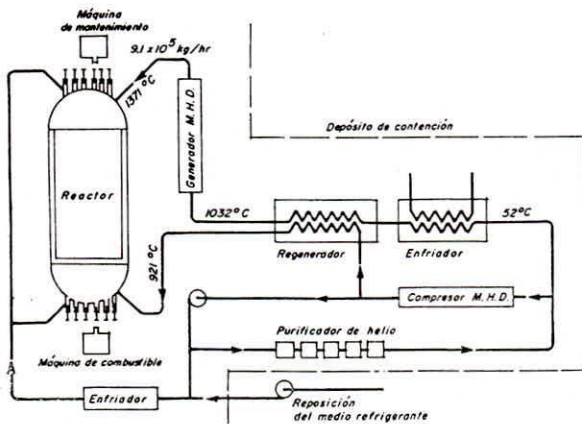


Fig. 3. Diagrama de Flujo de un Reactor enfriado con Gas y Central de fuerza M.H.D.

A. Ionización Térmica

Se han utilizado muchos métodos para ionizar un gas no térmicamente, como son: ionización por descargas de radiofrecuencia, usado por Karlovitz en sus experimentos; arco de alta corriente continua; utilización de alto nivel de radiación de neutrones y radiación γ en el núcleo de un reactor nuclear, ionizado por haces electrónicos e ionizado por rayos β , emitidos por los productos de fisión, dispersados en el gas de enfriamiento de un reactor nuclear (ver figura3).

De los métodos investigados sólo los dos últimos, son técnicamente apropiados para dispositivos MHD que operan en gamas de megavatios.

El método que puede dar resultado es el uso de haces electrónicos creados externamente y disparados al gas.

Las ventajas son las siguientes:

- 1) Los haces electrónicos pueden generarse e introducirse en el gas con rendimientos de 80 0 90%
- 2) La energía de los electrones se calibra de modo que asegura una absorción completa dentro del MHS de gases.
- 3) Los gases electrónicos no representan peligro de radiación severa
- 4) No introducen ninguna contaminación en el gas que pueda empeorar la conductividad eléctrica

La desventaja es la complejidad adicional que representan los cañones electrónicos y el hecho que constituyen una fuente de problemas de mantenimiento. El rendimiento del ciclo, entre la potencia producida por el generador y el consumida por el compresor es:

$$\eta = \frac{(T_0 - T_1) - (T_4 - T_3)}{(T_0 - T_5)}$$

V. CONCLUSIONES

Hay varios países dedicados al desarrollo de la potencia MHD comercial. Entre ellos están Inglaterra, Suiza, Francia, Rusia y Japón. En una oportunidad se construyó una planta piloto de 2000KW, se tenía previsto ampliarla a 20,000 KW, pero aún es difícil la construcción de una planta de tamaño normal (200,000Kw ó mas), quizás se logre pronto.

Es indudable que la generación de potencia MHD tiene grandes posibilidades y es probable que algún día acapare, el campo de la generación de potencia del futuro. Sin embargo a pesar de ser tan promisoría,

presenta problemas de investigación y desafíos tecnológicos fascinantes de este nuevo siglo.

REFERENCIAS

- [1] I Congreso de Ingeniería Eléctrica, 22-27 Abril 1963 Lima, Perú.
- [2] *Luis Postigo*, El Mundo de la Energía, Biblioteca Hispania, Barcelona
- [3] *Manuel Polo Encinas*, Energéticos y Desarrollo Tecnológico, Editorial Limusa, México, 1979