

ESTUDIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES

SAMUEL ANDRÉS MENDOZA MEJÍA

*Ingeniero Electricista
Universidad Industrial de Santander
Sammelec@hotmail.com*

JESÚS EULIDES ARENAS MEJÍA

*Ingeniero Electricista
Universidad Industrial de Santander
Anjelusjeam@msn.com*

JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO

*Profesor asociado, Escuela de Ing Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
cchacon@uis.edu.co*

*Fecha de Recibido: 19/02/2009
Fecha de Aprobación: 15/07/2009*

RESUMEN

Como alternativa en el aprovechamiento energético de energía de naturaleza periódica, se hace un estudio de generadores que aprovechen directamente los movimientos traslacionales, sin necesidad de hacer conversiones a energía rotacional. El funcionamiento de dicho generador se fundamenta en la ley de inducción de Faraday, de igual forma que lo hacen todas las máquinas eléctricas comunes. Este documento está enfocado hacia el aprovechamiento de las olas como parte de la energía mareomotriz, por lo tanto se hace necesario la aplicación de algunos conceptos de la hidrostática, y datos estadísticos de las olas para un supuesto lugar de montaje de la máquina. Con la anterior información se desarrolló un programa en Matlab® que proporcione los datos necesarios para el posterior diseño de la máquina.

PALABRAS CLAVE: Ley de Faraday; Energía Mareomotriz, Olas, Ley de Pascal, Generador traslacional.

ABSTRACT

As an alternative in the energetic utilization of energy of periodical nature, it becomes a study of generators to use directly the movements translational, without the need to make conversions to rotational energy. The operation of the generator is based on the law of induction of Faraday, in the same way that makes all the electrical machines. This document is focused on the use of the waves as part of the tidal power, it is therefore requires the implementation of some concepts of the hydrostatic and statistical data of the waves for a supposed place of mounting the machine. With the previous information is developed a program in Matlab® to provide the necessary data for the subsequent design of the machine.

KEY WORDS: Faraday's Law, Energy Tidal, Waves, Law of Pascal, Generator translational.

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda y estudio de dispositivos de generación eléctrica limpia, seguros y eficientes es una de las principales preocupaciones en el mundo actual, por ello es necesario observar y muchas veces reformular las tecnologías y desarrollos que se han hecho hasta la época, que aunque en su momento pudieron no ser

viabiles por sus dificultades técnicas, en el presente con los desarrollos hechos pueden llegar a ser sistemas o desarrollos eficientes que tienen la respuesta a la crisis energética y ambiental de la actualidad.

Las máquinas eléctricas traslacionales por sus características de movimiento, es decir, su capacidad de transformación de energía mecánica de movimiento

traslacional a energía eléctrica y viceversa, son dispositivos valiosos para el aprovechamiento energético de recursos ambientales difíciles de obtener como es el movimiento de las olas de grandes masas de agua.

En la actualidad se desarrollan proyectos pilotos de aprovechamiento energético de las olas [1], en los que se aplican los principios de la hidrostática de Arquímedes y Pascal para aprovechar las diferencias de presión sobre dispositivos en el fondo del mar y transformarlas en movimientos de traslación utilizables en generadores eléctricos traslacionales o generadores eléctricos lineales¹.

2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES O LINEALES Y ALGUNAS DE SUS APLICACIONES.

2.1 Leyes electromagnéticas fundamentales.

Las leyes y/o principios que se deben estudiar son similares en las máquinas eléctricas comunes, es decir, la ley de inducción de Faraday, las leyes de Gauss y de Ampère, entre otras. Las cuales se unifican en las ecuaciones de MAXWELL

El principal elemento teórico del funcionamiento de las máquinas eléctricas lo determina la ley de la inducción de Faraday la cual establece que “La fuerza electromotriz inducida en un circuito es proporcional a la rapidez con la que varía el flujo magnético que lo atraviesa, y directamente proporcional al número de espiras del inducido”. Matemáticamente se expresa como:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \quad (1)$$

Se trabajará y analizará el funcionamiento de la máquina traslacional a partir del desarrollo de las ecuaciones de Maxwell en forma puntual,[3].

Ley de Faraday

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

Ley Ampère

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3)$$

1. (así son llamados en la bibliografía internacional, notación que crea cierta ambigüedad en el concepto de funcionamiento de este tipo de máquinas [2])

Ley de Gauss para campos eléctricos

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (4)$$

Ley de Gauss para campos magnéticos

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

2.2 Usos de máquinas eléctricas traslacionales (lineales).

Las máquinas traslacionales pueden adaptarse para aprovechar gran variedad de perturbaciones naturales y mecánicas. Las perturbaciones naturales aprovechables son todas aquellas que presenten movimientos de vaivén, tales como el movimiento de las olas, el flujo de aire o los movimientos que pueda producir en estructuras planas, y demás. Los movimientos mecánicos aprovechables se dan en pistones de motores de combustión interna tipo Otto o similares, en sistemas de suspensión, entre otros mecanismos.

2.2.1 Aprovechamiento en perturbaciones naturales

Uno de los mejores ejemplos de las perturbaciones naturales en las que sería aprovechable este tipo de máquinas es en el movimiento ondulatorio de las olas, mostrado en Figura 1.

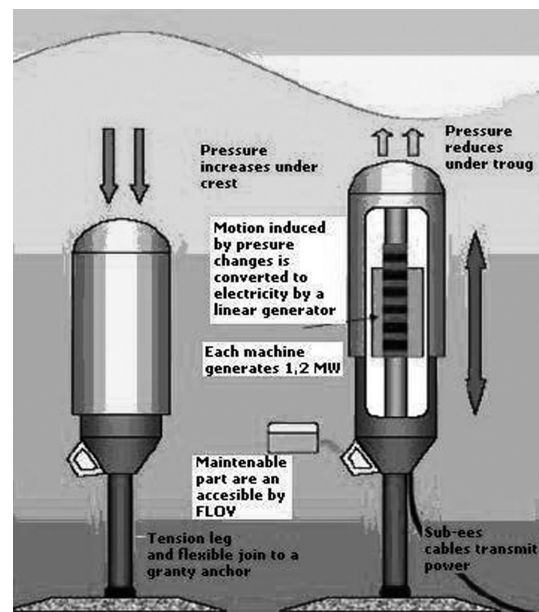


Figura 1. Aprovechamiento de perturbaciones naturales
Fuente: AWS Ocean energy Ltd, Luc Hamilton, 25 October 2006.

Como se observa en la figura, antes del rompimiento de la ola, existe un movimiento ondulatorio utilizable con este sistema, ya que la variación de altura en las boyas o flotadores (bobinas o magnetos), produciría una variación de campo magnético para generación mediante inducción electromagnética.

2.2.2 Usos en los motores de combustión.

Al igual que en las perturbaciones naturales en los sistemas mecánicos se puede aprovechar el movimiento traslacional (lineal), como en los pistones de los motores tipo Otto

Se puede colocar un magneto especial o transformar el pistón en un magneto, bobinar las camisas del bloque y de esta forma obtener el generador traslacional. La variación de campo magnético producido por el movimiento del pistón genera una *fem* en la bobina mencionada.

2.2.3 Robótica

En la robótica, como en sistemas que funcionan con partes que requieran la variación en el tamaño longitudinal, se puede implementar el uso de máquinas lineales como reemplazo o complemento de sistemas hidráulicos o neumáticos que se utilicen, esto debido al montaje relativamente simple de los mismos y a su semejanza funcional (expansión y contracción) a los músculos, brindando además rigidez en las partes de los mismos.

2.3 Energía mareomotriz

Los océanos, con una superficie de 361 millones de km² y un volumen de 1370 km³, cubren más del 70% de la superficie terrestre, convirtiéndose de esta forma en el más grande sistema colector y de almacenamiento de la energía solar; la cual incide anualmente sobre la tierra en un orden de 6×10^{14} MWh. Esta energía almacenada por los océanos se manifiesta de diversas formas, y se puede dividir en dos grupos: 1) térmica: gradientes salinos y los gradientes térmicos, y 2) mecánica: mareas, las olas y las corrientes marinas, ver figura 2. De las anteriores manifestaciones de energía Mareomotriz, las más estudiadas y por tanto desarrolladas son: las mareas, las olas y los gradientes térmicos [4].

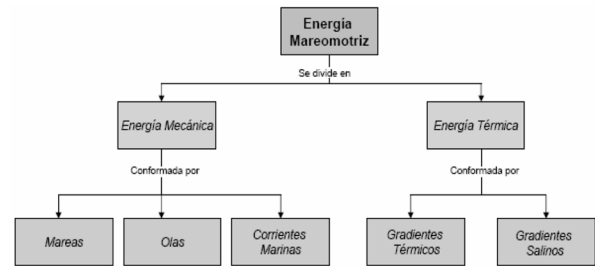


Figura 2. Clasificación de energía mareomotriz

Fuente: Hurtado Parra, Holmer Samir y Mejía Perez, Jassir Enrique; "Localización Técnica de una Pequeña Central Mareomotriz en la Costa Colombiana", UIS, Bucaramanga, 2006.

Para obtener movimientos de vaivén periódicos se usa la energía mecánica de las olas.



Figura 3. Formación y clasificación de las olas

Fuente: Hurtado Parra, Holmer Samir y Mejía Perez, Jassir Enrique; "Localización Técnica de una Pequeña Central Mareomotriz en la Costa Colombiana", UIS, Bucaramanga, 2006.

Los vientos y vibraciones terrestres imprimen a las capas superficiales del mar movimientos ondulatorios de dos clases: las ondas y las olas.

Las olas que se producen en la superficie del mar son provocadas por los vientos, de los que recogen y almacenan energía. Al no ser constantes los vientos ni en velocidad ni en dirección, las olas producidas no son regulares y, por tanto, es bastante complicado determinar la energía que transportan.

Aunque se han realizado muchas evaluaciones de la potencia media o de la energía total disipada por las olas, los valores obtenidos en cada caso son muy diferentes,

aunque se considera que, en zonas favorables, la disipación de potencia es de unos 45 kW/m.[5]

Las olas también se pueden clasificar atendiendo algunos parámetros como son la fuerza perturbadora que las genera y su periodo de duración. La figura 3 ilustra como se forman y clasifican las olas, y en la figura 4 se representan los tipos de olas, con la respectiva fuerza que las produce y restaura.

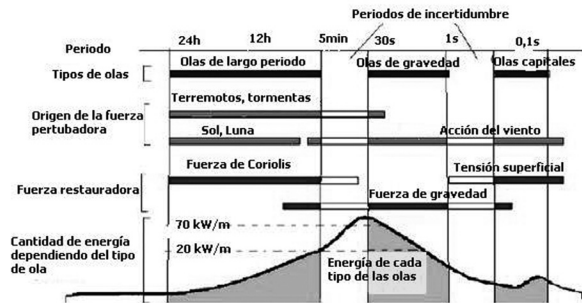


Figura 4. Representación esquemática de los tipos de olas que existen en la superficie del océano y de una curva de energía dependiendo cada tipo de olas

Fuente: Fernández Díez Pedro. *Energía de las Olas*. Universidad de Cantabria. España. 2002.

Las olas debidas al viento son las que contienen más energía y son las que se aprovechan para obtener electricidad; la energía de las olas debidas al viento, procede en última instancia, de la energía solar.

3. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE UN GENERADOR ELÉCTRICO TRASLACIONAL A PARTIR DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ

3.1 Leyes fundamentales de la hidrostática

De las observaciones de Pascal, junto con las realizadas por Arquímedes se puede llegar a la formulación del principio fundamental de la hidrostática que establece que:

“La presión ejercida por un fluido de densidad ρ_f en un punto situado a una profundidad x_t de la superficie es numéricamente igual a la presión ejercida por una columna de fluido de altura x_t ”, es decir:

$$P_f = \rho_f g x_t \quad (6)$$

De estos principios hidrostáticos se puede definir para el generador traslacional sumergido, como el mostrado en la figura 5, que la presión de empuje ejercida sobre

la boya (contenedor de la máquina cuya densidad total es menor a la densidad del agua que rodea la máquina) en el punto medio de su recorrido es:

$$P_{avs} = \rho_{avs} g h \quad (7)$$

En donde ρ_{avs} es la densidad del conjunto de la máquina y h es su altura.

Al igualar dichas ecuaciones se tiene que: $\rho_{avs} g h = \rho_f g x_{pmi}$, de donde se obtiene:

$$x_{pmi} = \frac{\rho_{avs} h}{\rho_f} \quad (8)$$

Donde x_{pmi} es la profundidad de instalación con la máquina en la mitad de su recorrido y con la superficie del mar en calma.

Ahora, teniendo en cuenta la perturbación del mar (olas) se define x_t la altura total de la columna de agua sobre la máquina.

$$x_t = x_{pmi} + \Delta x_{ao} = x_{pmi} + A_o \text{sen}(\omega t) \quad (9)$$

$$\Delta x_{ao} = A_o \text{sen}(\omega t)$$

En donde Δx_{ao} es el incremento de la columna de agua dada la variación de la ola y con A_o como la amplitud máxima de la ola.

De la ecuación 8, se puede encontrar la profundidad de instalación para que la máquina se mantenga en equilibrio, teniendo en cuenta que el doble de la amplitud de la ola sea menor a la profundidad mínima de instalación ($2A_o < x_{pmi}$) y la densidad del sólido (densidad del trasladador de la máquina ρ_{avs}) debe ser menor o igual a la densidad del fluido (densidad del agua de mar ρ_f) ($\rho_{avs} \leq \rho_f$).

Aún así, es conveniente tener en cuenta que existe variación en la profundidad media del mar por fenómenos tales como maremotos, mareas y constante aumento de su nivel, lo que obliga la instalación de sistemas de control que corrijan la densidad de la máquina por medio de compresores o dispositivos similares.

En la figura 5, se aprecia el movimiento del generador traslacional provocado por la variación en la altura de las olas y las diferencias de presión que estas provoquen sobre la superficie de la máquina, explicado anteriormente por las leyes de la hidrostática.

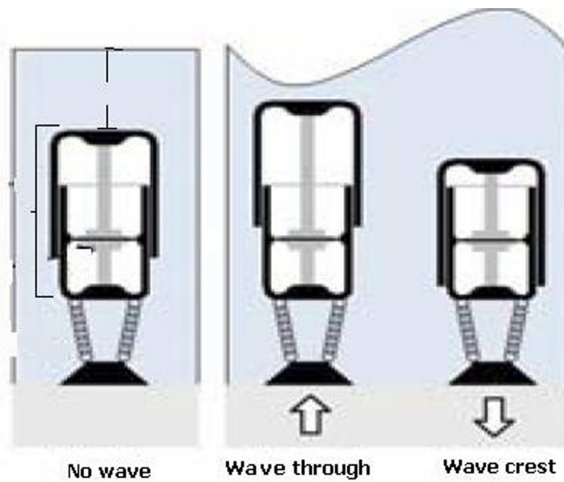


Figura 5. *Generador mareomotriz con generador traslacional sumergido*
 Fuente: <http://vnatura.wordpress.com/2007/02/10/energia-das-ondas-sua-importancia-e-metodos-de-extracao>

3.2 Potencia de las olas

Para poder ubicar las máquinas en un lugar con las condiciones energéticas óptimas, es necesario conocer la potencia de las olas en dicha área.

La potencia real del oleaje depende de factores tales como su frecuencia, su dirección y la profundidad del mar. Esta potencia se puede calcular por medio de la ecuación 10, la cual representa la potencia del frente de ola de anchura igual a la unidad para olas no regulares. Y esta definida para aguas profundas tales que $h_m > \lambda / 2$ [4]

En donde:

- h_m es la profundidad del mar
- λ es la longitud de onda de la ola.

$$P_{ola} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{64 \pi} [kW / m] \quad (10)$$

En donde:

- ρ es la densidad del agua.
- g es la gravedad.
- H es la altura de la ola.
- T es el periodo de la ola.

4. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO TRASLACIONAL

4.1 Operación de una máquina eléctrica traslacional.

Por lo general las máquinas eléctricas traslacionales describen un movimiento oscilatorio armónico [6], en este caso provocado por la energía de las olas, el cual puede representarse por la ecuación 11.

$$x = x_m \text{sen}(\omega_r t) \quad (11)$$

En donde x_m es la amplitud de la ola y ω_r su velocidad angular.

La fuerza electromotriz puede expresarse de la siguiente manera multiplicando y dividiendo por dx .

$$\mathcal{E}(t) = - \frac{\partial \phi_{pm}}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (12)$$

En donde ϕ_{pm} es el flujo magnético provocado por los imanes permanentes. Teniendo en cuenta las anteriores ecuaciones la fuerza electromotriz adquiere la siguiente forma.

$$\mathcal{E}(t) = - \frac{\partial \phi_{pm}}{\partial x} x_m \omega_r \cos(\omega_r t) \quad (13)$$

El flujo varía de forma aproximadamente lineal con respecto a la posición, como se muestra en la figura 6,

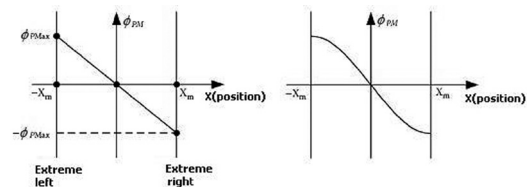


Figura 6. *Variación del flujo en las bobinas con respecto a la posición*

Fuente: Boldea, *VARIABLE SPEED GENERATORS*, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

Teniendo en cuenta la ecuación 13, la variación del flujo con respecto a la posición se expresa como una constante [9].

$$\frac{\partial \phi_{pm}}{\partial x} \approx C_e \quad (14)$$

La ecuación 14 expresa de manera ideal que las líneas de flujo en las fases de las bobinas varían linealmente con la posición, pero realmente el flujo tiende a aplanarse en los extremos del movimiento.

El efecto en los extremos provoca la presencia del tercer, quinto y séptimo armónicos en la fem $\mathcal{E}(t)$. También, debido principalmente a la saturación magnética, a las corrientes instantáneas y a la posición del trasladador² se pueden presentar el segundo y cuarto armónicos en la fem .

De las ecuaciones 13 y 14 se obtiene la siguiente expresión.

$$\mathcal{E}(t) = -C_e x_m \omega_r \cos(\omega_r t) \tag{15}$$

La fuerza electromagnética de la máquina se expresa utilizando los conceptos de energía, $W = Fx$, y de potencia, $P = W/t$, que para este caso es potencia eléctrica.

$$F_e = \frac{\mathcal{E}(t) i(t)}{\frac{dx}{dt}} = -\frac{\partial \varphi_{pm}}{\partial x} i(t) \tag{16}$$

Dado que la variación del flujo en las bobinas con respecto a la posición se aproxima a una constante, la fuerza electromagnética esta en contra fase con la corriente.

A partir de la ecuación 16 de fuerza electromagnética se pueden deducir factores esenciales en el diseño de la máquina.

La fem y la velocidad de la máquina deben estar en fase para que la variación del flujo con respecto a la posición se aproxime a una constante.

Analizando la ecuación 16 se observa que para que ese cociente sea negativo la velocidad debe estar desfasada 180° con respecto a la fem , es decir están en contra fase.

En la Figura 7 se aprecian las formas de onda para un caso ideal.

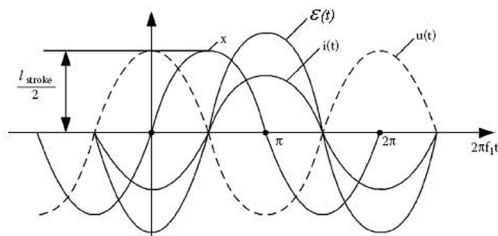


Figura 7. Posición, velocidad, y corriente en una máquina eléctrica traslacional ideal.
Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

2. Parte de la máquina que realiza el movimiento de traslación.

También se observa que para poder obtener una mayor fuerza electromagnética la fem y la corriente deben estar en fase cuando la inductancia de fase no varía con la posición del trasladador lo cual ocurre cuando la reluctancia que produce la fuerza de reluctancia es igual a cero [6].

La fuerza debida a la interacción entre los imanes permanentes del trasladador con las ranuras del estator, aparece cuando la corriente es cero [6], y se define como la fuerza cogging F_{cog} .

Esta fuerza debe ser cero en la mitad del movimiento y máxima en los puntos finales, comportándose de forma similar a la variación del flujo magnético con respecto a la posición y de esta manera ser útil en la conversión de energía, $F_{cog} \approx -Kx$.

De acuerdo al análisis anterior en una máquina eléctrica traslacional ideal la inductancia de fase es constante, $L_s = Cte$, y la fuerza electromotriz tiene la forma, $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_m \cos(\omega_r t)$ en donde $\mathcal{E}_m = -C_e x_m \omega_r$, lo que proporciona el movimiento armónico ideal dado por su forma sinusoidal. Se debe anotar que la F_{cog} debe ser completamente lineal.

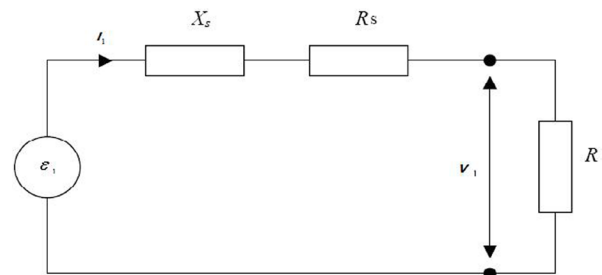


Figura 8. Circuito equivalente
Fuente: autores

De acuerdo al circuito equivalente mostrado en la figura 8 que representa el modelo eléctrico del generador, la ecuación de voltaje en estado estable está dada por la ecuación 17:

$$V_1 = -(R_s + j \omega_r L_s) I_1 + \mathcal{E}_1 \tag{17}$$

En donde la fuerza electromotriz está dada por:

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_m e^{j \omega_r t} \quad \text{y} \quad V_1 = V_1 \sqrt{2} e^{j(\omega_r t - \delta_v)}$$

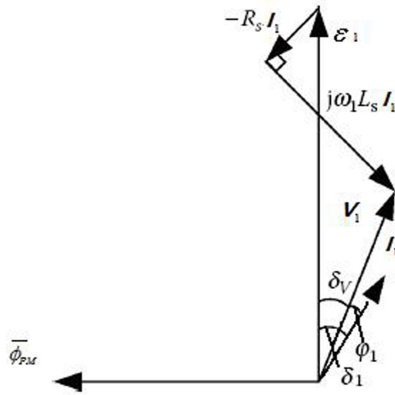


Figura 9. Diagrama fasorial

Fuente: Boldea, *VARIABLE SPEED GENERATORS*, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

De las ecuaciones anteriores, y del circuito y diagrama fasorial del modelo de generador mostrado en la figura 9 se observa que el circuito equivalente es semejante al de un generador síncrono de rotación.

La potencia entregada por la máquina esta dada por:

$$S = V_1 I_1 = P_1 + jQ_1 \quad (18)$$

$$S = \mathcal{E}_m I_1 \cos(\delta_1) - R_s I_1^2 + j(\omega_r L_s I_1^2 + \mathcal{E}_1 I_1 \sin(\delta_1))$$

En donde la potencia activa promedio es:

$$P_1 = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}} I_1 \cos(\delta_1) - R_s I_1^2 \quad (19)$$

Para poder entregar una considerable potencia el valor RMS de la fuerza electromotriz debe ser mucho mayor al voltaje en los bornes de la máquina, es decir $\frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}} > V_r$.

4.2 Parámetros de la máquina.

A continuación se indican los parámetros de diseño de una máquina eléctrica traslacional, tales como la densidad de flujo, la *fem*, la fuerza electromagnética, la resistencia y la inductancia.

Aplicando la ley de Ampère y la ley Gauss para campos magnéticos se halla un modelo analítico aproximado de la densidad de flujo en el entrehierro.

4.2.1 Generador traslacional multipolar con bobinas en el trasladador

En la figura 10 se muestran los detalles geométricos de un generador traslacional multipolar con bobinas en el trasladador, constructivamente se destacan de esta máquina los siguientes elementos:

l_{stroke} es la longitud del recorrido.

l_{pm} es la longitud de los imanes permanentes.

h_{pm} es la altura de los imanes permanentes.

g es la separación del entrehierro.

h_{coil} es la altura de la bobina.

D_{cr} es diámetro de los imanes.

D_{cs} es el diámetro del trasladador.

h_{cs} es el espesor del núcleo del estator.

h_{cm} es el espesor del núcleo del trasladador.

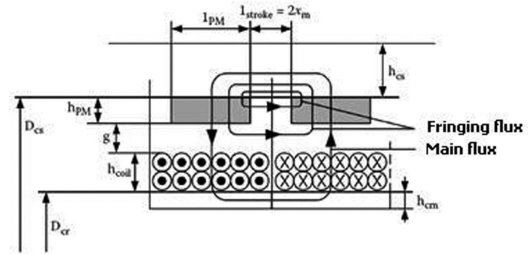


Figura 10. Generador traslacional multipolar con bobinas en el trasladador

Fuente: Boldea, *VARIABLE SPEED GENERATORS*, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

Para el generador traslacional multipolar con bobinas en el trasladador la densidad de flujo en el entrehierro B_{gpm} se encuentra de acuerdo con la ecuación 20:

$$B_{gpm} = \frac{B_r h_{pm}}{h_{pm} + (g + h_{coil}) \mu_r} \frac{1}{(1 + K_{fringe})(1 + K_s)} \quad (20)$$

En donde,

h_{pm} es la altura de los imanes permanentes.

μ_r es la permeabilidad relativa del imán.

B_r es la densidad de flujo remanente de los imanes.

g es la separación del entrehierro.

h_{coil} es la altura de la bobina.

La constante K_{fringe} (efecto borde), representa las líneas de flujo de dispersión que se pierden entre el entrehierro y los imanes cercanos. Este factor depende de $(1 + (g + h_{coil})/h_{pm})$, de la relación l_{stroke}/h_{pm} , en donde $l_{stroke} = l_{recorrido}$, y de la saturación magnética del trasladador y el estator. Por lo general se recomienda para un buen diseño que esta constante se encuentre entre 0,3 y 0,5.

El factor K_s hace referencia a la saturación magnética y generalmente su valor esta entre 0,05 y 0,15[6].

Teniendo en cuenta la ecuación 1 para la fem y el número efectivo de vueltas n'_c de esta máquina se tiene que:

$$\mathcal{E}(t) = -\frac{dx}{dt} n'_c l_{av} B_{PM_{av}} \quad (21)$$

$$n_c = n'_c \frac{(l_{recorrido} + l_{pm})}{l_{pm}}$$

La fuerza electromotriz en una máquina con $2p$ bobinas, en donde p es el número de polos frente a una bobina en un recorrido es:

$$\mathcal{E}(t) = B_{gPM} U(t) \pi D_{av} 2 p n_c \left(\frac{l_{PM}}{l_{PM} + l_{recorrido}} \right) \quad (22)$$

En donde,

$u(t)$ es la velocidad de la máquina.

D_{av} es el diámetro promedio de las bobinas.

p es el número de polos

n_c es el número total de bobinas.

La fuerza electromagnética se encuentra utilizando la ecuación 23

$$F(t) = B_{gPM} \pi D_{av} 2 p n_c \left(\frac{l_{PM}}{l_{PM} + l_{recorrido}} \right) i(t) \quad (23)$$

La inductancia y resistencia de la máquina se determina con la ayuda de las expresiones 24 y 25

$$L_s = \frac{1}{4} p \mu_0 n_c^2 \pi D_{av} \frac{l_{PM} + l_{recorrido}}{(h_{PM} + g + h_{coil})} \quad (24)$$

$$R_s = \rho_{co} \pi D_{av} \frac{n_c^2 2p}{I_n n_c} \frac{j_{con}}{I_n} \quad (25)$$

En donde, I_n es el valor RMS de la variación de corriente.

j_{con} es la variación de la densidad de corriente del diseño.

ρ_{co} es la resistividad del conductor utilizado en la bobina.

D_{av} es el diámetro promedio de las bobinas.

4.2.2 Máquina tubular de imanes en el trasladador

Existe otro tipo de máquina cuyas pérdidas por corrientes de Eddy son menores, que corresponde a la máquina tubular de imanes en el trasladador y con bobinas interna y externa, figura 11 y 12.

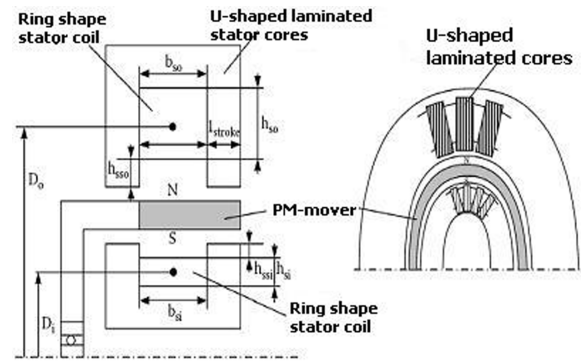


Figura 11. Máquina tubular unipolar con doble bobina
Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisoara, Romania; Taylor & Francis, 2006

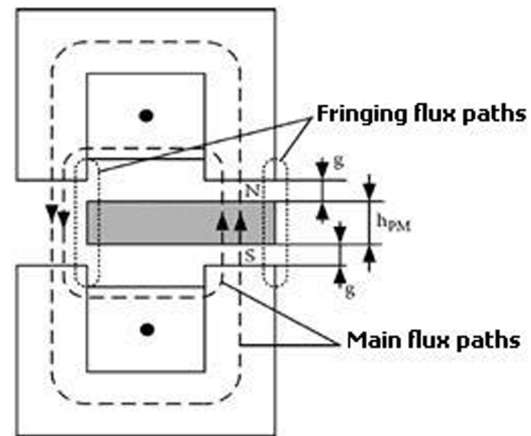


Figura 12. Distribución del flujo en la máquina.
Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisoara, Romania; Taylor & Francis, 2006

Constructivamente se destacan de esta máquina los siguientes elementos:

l_{stroke} es la longitud del recorrido.

h_{pm} es la altura de los imanes permanentes.

g es la separación del entrehierro.

h_{so} y h_{si} es la altura de la bobina externa e interna respectivamente.

D_o y D_i es diámetro de las bobinas externas e internas respectivamente.

b_{so} Longitud de la bobina externa.

b_{si} Longitud de la bobina interna.

h_{sso} y h_{ssi} Altura del diente externo e interno de los estatores respectivamente.

La densidad de flujo en el entrehierro de la máquina mostrado en la figura 12, se puede describir por la ecuación 26.

$$B_{gPM} \approx \left(\frac{B_r h_{PM}}{h_{PM} + (4g + h_{PM})\mu_r} \right) \left(\frac{1}{(1 + K_{fringe})(1 + K_s)} \right) \quad (26)$$

En esta máquina se requiere que $h_{PM} \gg 4g$ para que exista una razonable densidad de flujo en el entrehierro.

Donde:

h_{pm} es la altura de los imanes permanentes.

μ_r es la permeabilidad relativa del imán.

B_r es la densidad de flujo remanente de los imanes.

g es la separación del entrehierro.

h_{coil} es la altura de la bobina.

El factor K_s hace referencia a la saturación magnética y generalmente su valor esta entre 0,05 y 0,15[6].

La constante K_{fringe} (efecto borde), representa las líneas de flujo que se pierden entre el entrehierro y los imanes cercanos.

Bajo un movimiento armónico y una variación lineal de flujo magnético la fuerza electromotriz se calcula de acuerdo con la ecuación 27

$$\mathcal{E}(t) = -2\pi f B_{gPM} l_{recorrido} \pi D_{mave} 2p(N_0 + N_1) \text{Cos}(2\pi f t) \quad (27)$$

En donde D_{mave} es el diámetro promedio del trasladador, N_0 y N_1 son la cantidad de vueltas de las bobinas externas e internas respectivamente.

La inductancia de la máquina tiene dos componentes: la inductancia de flujo disperso L_l y la inductancia principal L_m .

La inductancia de flujo disperso L_l se calcula de acuerdo con la ecuación 4.21:

$$L_l = \mu_0 N_i^2 \left(\frac{h_{si}}{3b_{si}} + \frac{h_{si}}{b_{si}} \right) \pi D_i + \mu_0 N_o^2 \left(\frac{h_{so}}{3b_{so}} + \frac{h_{so}}{b_{so}} \right) \pi D_o \quad (28)$$

Donde:

b_{so} Longitud de la bobina externa.

b_{si} Longitud de la bobina interna.

h_{sso} y h_{ssi} son la altura del diente externo e interno de los estatores respectivamente.

N_i es el número de vueltas de la bobina interna.

N_o es el número de vueltas de la bobina externa.

La inductancia principal L_m se encuentra con ayuda de la ecuación 29.

$$L_m \approx \frac{\mu_0 \pi D_{mav} (N_o + N_i)^2 l_{recorrido}}{(1 + K_s)(4g + h_{PM}(1 + \mu_r))} \quad (29)$$

Donde:

D_{mave} es el diámetro promedio del trasladador.

El movimiento de la máquina idealmente es un movimiento sinusoidal (al igual que el movimiento de las olas) y la longitud del recorrido es $l_{recorrido} = 2x_m$. Por lo tanto el movimiento armónico de la máquina esta dado por la ecuación 30.

$$x = \frac{l_{recorrido} \text{Sen}(\omega_r t)}{2} \quad (30)$$

La velocidad instantánea de la máquina es:

$$u(t) = \frac{dx}{dt} = l_{recorrido} \pi f \text{Cos}(\omega_r t) \quad (31)$$

Para una corriente sinusoidal la fuerza electromagnética se encuentra con la ayuda de la ecuación 32.

$$F_e(t) = \frac{\mathcal{E}(t) i(t)}{u(t)} = \frac{B_{gPM} l_{recorrido} \pi D_{mav} (N_o + N_i)}{\frac{l_{recorrido}}{2}} I \sqrt{2} \text{Cos}(\omega_r t) \quad (32)$$

Con estas ecuaciones es posible plantear un modelo matemático que puede representar el funcionamiento de una máquina traslacional simplificada, utilizada como generador traslacional mareomotriz. Además de estas ecuaciones se utilizan otras que son comunes para cualquier tipo de máquina eléctrica, como las necesarias para calcular la densidad de corriente y la fuerza magnetomotriz utilizada para la estimación de circuitos magnéticos en general.

Para hallar el diámetro del trasladador se hace uso de la ecuación 33.

$$D_{tra} = \frac{F_e}{F_t 2 p l_{pm} \pi} \quad (33)$$

Donde:

F_e es la fuerza electromagnética de la máquina.

F_t es la presión aplicada por la columna de agua de la ola sobre la máquina.

p es el número de polos de la máquina.
 l_{pm} es la longitud de cada uno de los imanes permanentes.

Para hallar la altura de cada una de las bobinas se usa la ecuación 34, en la cual se hace uso de la fuerza magneto motriz del circuito magnético de la máquina.

$$h_{coil} = \frac{n_c I_n}{J_{con} k_{fill} l_{coil}} \quad (34)$$

Donde:

- n_c es el número espiras en cada bobina.
- I_n es la corriente nominal o valor eficaz de corriente.
- J_{con} es la densidad de corriente en el circuito magnético
- K_{fill} es el factor de llenado de la bobina, para el cual es seleccionado un valor de 0,6.
- l_{coil} es la longitud de cada bobina.

5. PARÁMETROS RESULTANTES PARA GENERADOR TRASLACIONAL TUBULAR CON IMANES EN EL TRASLADADOR SIMPLIFICADO.

Como ejemplo de aplicación se toma una máquina traslacional tubular con imanes en el trasladador con una potencia eléctrica de 20 kW de salida, con una altura de la ola de 2,27 metros y 10 segundos de periodo, ver tabla 1. Los resultados se obtienen por medio del programa de máquinas con imanes en el trasladador (literal 3) y se muestran en tabla 2.

5.1 Algoritmo

En la figura 13 se presenta el algoritmo para realizar el programa que permite calcular los parámetros de un generador eléctrico traslacional.

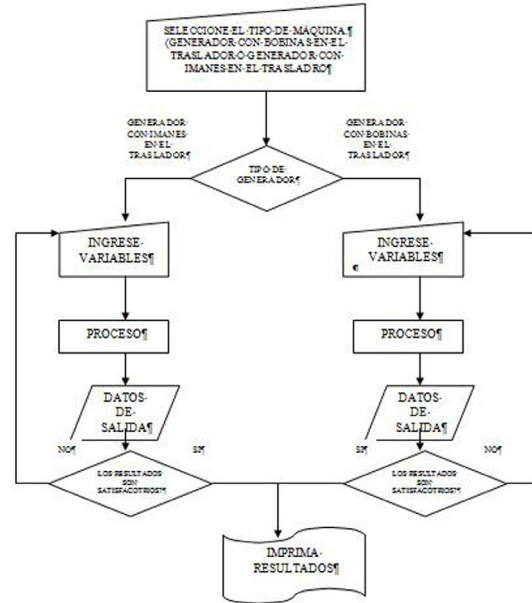


Figura 13. Algoritmo de programa de cálculo de parámetros de un generador traslacional

Entre las expresiones empíricas aplicadas en el programa para el diseño de estas máquinas esta la aproximación a una constante de una parte de la expresión de la densidad de flujo magnético en el entrehierro descritas en las ecuaciones 20 y 26 tanto para máquinas con bobinas en el trasladador, como para máquinas con imanes en el trasladador respectivamente.

Las aproximaciones consisten en reemplazar $\frac{h_{pm}}{h_{pm} + (g + h_{coil})\mu_r}$ por $1/2$ para las máquinas con bobinas en el trasladador en la ecuación 20. Y $\frac{h_{pm}}{h_{pm} + (4g + h_{coil})\mu_r}$ para máquinas con imanes en el trasladador en la ecuación 26.

Además se debe tener en cuenta para el diseño general de la máquina con imanes en el trasladador que el número de imanes de esta, es menor en una unidad a la cantidad de bobinas que posea.

Para el valor del espacio en el entrehierro g , Se toma un valor de 1,5 [mm] de espacio entre el trasladador y el estator, de modo que para los dos tipos de máquinas, g tiene un valor 3 [mm].

La longitud de cada una de las bobinas se toma como igual a la longitud de cada uno de los imanes $l_{pm} = l_{coil}$. Al factor de efecto borde k_{fringe} , se le asigna un valor de 0,2.

A la constante de saturación magnética k_s se le asigna un valor de 0,05.

A la altura h_{sso} o altura del diente, Se le asigna un valor igual al espacio en el entrehierro.

En la tabla 1 se muestran los datos de entrada para el cálculo de una máquina con imanes en el trasladador. En la tabla 2 se muestran los datos de salida para la máquina del ejemplo.

Tabla 1. Datos de entrada programa máquina con imanes en el trasladador.

DATOS DE ENTRADA	VALOR
Periodo de la ola: T_s ,s	10
Longitud del recorrido (altura de ola): l_{reco} , [m]	2,27
Potencia de salida P , kW	20
Eficiencia: η	0,9
Voltaje : V , V	220
Delta de presión: F_t , N/m ²	30 000
Número de bobinas n_b	5
Densidad de flujo magnético remanente del imán permanente (Neodimyun) B_r , T	1,32
Permeabilidad relativa del imán μ_r	1,03
Densidad de corriente J_{con} , A/m ²	4.10 ⁶
Relación total entre longitud del imán y el recorrido ves	0,05

Tabla 2. Parámetros de salida obtenidos del programa máquina con imanes en el trasladador.

PARÁMETROS DE SALIDA	VALOR
Diámetro del trasladador: D , m	0,9
Densidad de flujo magnético en el entrehierro: B_{gpm} , T	0,52
Inductancia: L , H	0,23
Corriente nominal: I , A	109
Sección del conductor: S , μ m ²	27
Resistencia del conductor: R , m Ω	60
Altura o grosor de la bobina: h_{coil} , mm	13,25
Constante de tiempo eléctrica: τ_e , s	4
Número de vueltas por bobina: n	33
Longitud de cada imán: l_{pm} , m	0,1
Pérdidas del cobre: P_{cc} , kW	3,5
Frecuencia: f , Hz	0,1
Velocidad promedio de la máquina: v_{ave} , m/s	0,45
Fuerza electromagnética: F_e , kN	48,947
Altura o grosor del imán: h_{pm} , mm	17
Factor de potencia: Fp	1
Rendimiento de la máquina	0,8

6. CONCLUSIONES

- Al igual que en máquinas eléctricas rotacionales, las máquinas eléctricas traslacionales permiten según su configuración ser utilizadas como motor o como generador eléctrico, permitiéndose así un amplio rango de aplicaciones industriales, tales como procesos de ensamble, transporte, generación eléctrica, entre otras.

- La energía que se puede obtener a partir del movimiento de las olas, en su cambio de alturas tiene un amplio rango de variación de frecuencias, que generalmente son bajas, por lo tanto la implementación de sistemas de rectificación AC/DC y viceversa es necesaria para su distribución con características acordes a los sistemas eléctricos locales.
- Las condiciones del lugar de montaje son las que determinan la eficiencia que tendrá la máquina, ya que esta tiene un mejor comportamiento a mayor altura y con menor periodo de las olas.
- La frecuencia con que se mueve la máquina, corresponde a la frecuencia de los parámetros de salida (los fasores de tensión, y corriente).
- Los mejores resultados en el diseño de la máquina, de acuerdo a los mejores valores de potencia de las olas colombianas, se obtienen de las olas de Cartagena con dirección noreste.
- La relación entre la longitud del imán y la del recorrido l_{pm} / l_{reco} es fundamental tanto en la selección de las dimensiones y la eficiencia de la máquina. A medida que l_{pm} / l_{reco} es menor, la eficiencia de la máquina y el diámetro del trasladador aumentan.
- Debido a que las ecuaciones utilizadas en el programa se basan en aproximaciones empíricas, los datos de entrada son parámetros iniciales para el cálculo y no necesariamente son los parámetros finales obtenidos para el diseño de la máquina.
- Para seleccionar el número adecuado de bobinas, es necesario comparar el factor de potencia, la eficiencia y las dimensiones, puesto que solo se tiene un punto en que estos valores son óptimos, y para los demás valores tanto superiores como inferiores la eficiencia disminuye.
- Además, teniendo en cuenta la carga del generador, se observa que aumentando la amplitud del movimiento se aumenta la potencia entregada.

7. REFERENCIAS

- [1] AWS Ocean energy. Available: <http://www.awsocan.com/PageProducer.aspx?Page=1&Site=1>. [Citado 20 de septiembre de 2008]
- [2] Belmar F. Y otros. “Laboratorio de física” Universidad Politécnica de Valencia Publicado por Ed. Univ. Politéc. Valencia. 2001
- [3] William H. Hayt, hijo., “Teoría electromagnética”, 5ª edición, McGraw Hill, México. 1991, p360
- [4] Hurtado Parra, Holmer Samir y Mejía Pérez, Jassir Enrique; “Localización Técnica de una Pequeña Central Mareomotriz en la Costa Colombiana”, UIS, Bucaramanga, 2006. Proyecto de grado dirigido por Dr. Gilberto Carrillo
- [5] <http://www.imasd-tecnologia.com/imasd/ene01/0101ma4.htm>
- [6] Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006
- [7] AWS Ocean energy Ltd, Luc Hamilton, 25 october 2006
- [8] Fernández Díez Pedro. Energía de las Olas. Universidad de Cantabria. España. 2002.
- [9] <http://vnatura.wordpress.com/2007/02/10/energias-ondas-sua-mportancia-e-metodos-de-extraccas>