

1 – INTRODUCCIÓN.

Actualmente existen estudios sobre la viabilidad de impulsar fluidos conductores de la electricidad mediante campos magnéticos [2], [3], [13], [14] y también existen algunas construcciones de máquinas eléctricas para impulsar fluidos mediante campos magnéticos [11], [12], [16] todas ellas tienen una característica en común, en que tienen una topología de tipo lineal. Algunas de estas máquinas eléctricas se basan en la corriente continua para impulsar fluidos y otras la corriente alterna.

La interacción entre el electromagnetismo y la hidrodinámica se le llama magnetohidrodinámica (ver anexos).

Este trabajo se centrará en las máquinas eléctricas lineales basadas en la corriente alterna para impulsar fluidos o lo que es lo mismo, en motores de inducción magnetohidrodinámica.

1.1 – Topologías de maquinas eléctricas lineales.

Los motores lineales de inducción, las bombas y generadores lineales de inducción pueden adoptar geometrías y dimensiones muy variadas. Con relación a los inductores, estos pueden ser simples o de doble cara, anulares o planos. El inducido puede tener una velocidad de sincronismo no uniforme, ser muy delgado, o tener una conductividad variable a lo largo de la dirección del movimiento. Pueden tener muchos más parámetros variables que en un motor rotativo: entrehierro, diámetro, generatriz, f.m.m.

1.1.1 - Transformación topológica de un motor rotativo en un motor lineal.

Se considera el caso de un motor rotativo asíncrono de jaula de ardilla (fig.1), al que cortamos por un semiplano axial las coronas magnéticas del estator y del rotor, y desarrollamos sobre un plano. En el motor desarrollado los paquetes magnéticos del estator y del rotor se convierten en paralelepípedos rectangulares separados por un entrehierro plano con sus ranuras enfrentadas.



Fig. 1: Transformación topológica de un motor de inducción rotativo en un motor lineal plano.

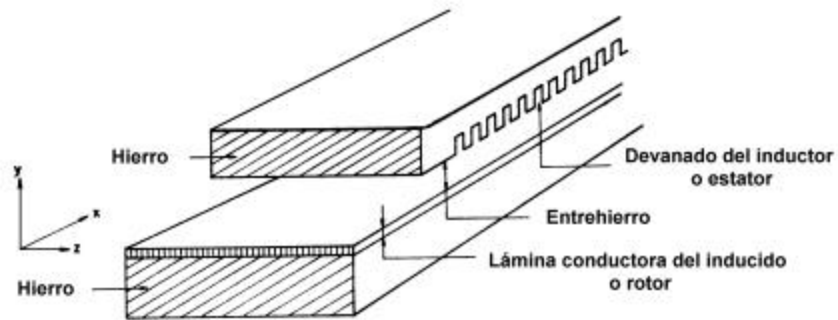


Fig. 2: Motor lineal de inducción plano de simple inductor con una lámina conductora sólida como inducido con material ferromagnético para disminuir la reluctancia magnética.

Para doblar la f.m.m. se puede disponer de un segundo inductor al otro lado del rotor (fig.3). Si el inducido tiene hierro como en la figura 2, es necesaria menos f.m.m. para obtener fuerzas importantes, pero aparecen unos esfuerzos significativos de reluctancia en el sentido transversal al avance del inducido. Esto complica mucho el guiado mecánico de éste. Una buena solución para evitar estos esfuerzos es utilizar un inducido en forma de lámina conductora y sin hierro, para que sólo aparezcan esfuerzos de repulsión.

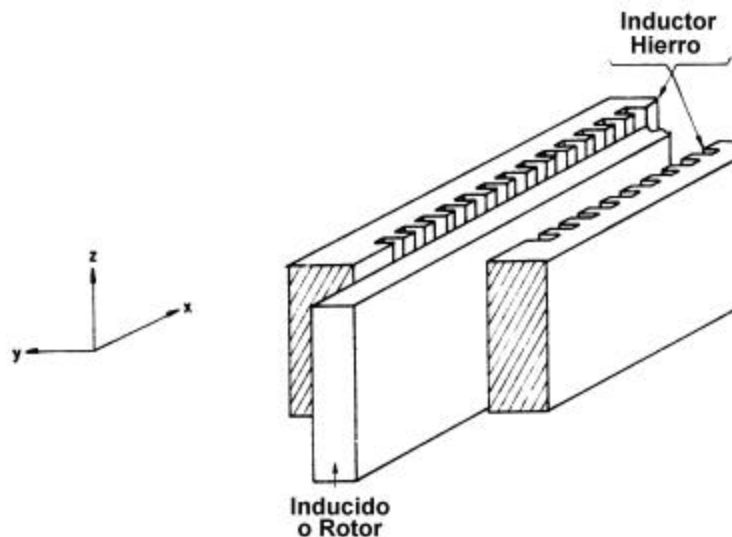


Fig. 3: Motor lineal de inducción plano, de doble inductor, y una lámina conductora sólida como inducido.

Si sustituimos el inducido de tipo macizo, o lámina conductora, por un inducido que sea fluido y a la vez conductor de la electricidad con una conductividad σ , deberemos introducir este fluido dentro de un recipiente para conseguir una conducción controlada (fig.4). Las paredes del recipiente no deberán ser conductoras de la electricidad ni de material ferromagnético (con una μ_p y una μ muy baja). En algunas aplicaciones puede ser interesante que estas paredes resistan elevadas presiones o temperaturas.

El inducido ha de sobresalir del paquete inductor para permitir el retorno de las corrientes inducidas a modo de “cabeza de bobina del inducido”. Estas protuberancias, que dependen del entrehierro y del paso polar, deben diseñarse con el criterio de densidad de corriente rotórica uniforme en toda la lámina rotórica.

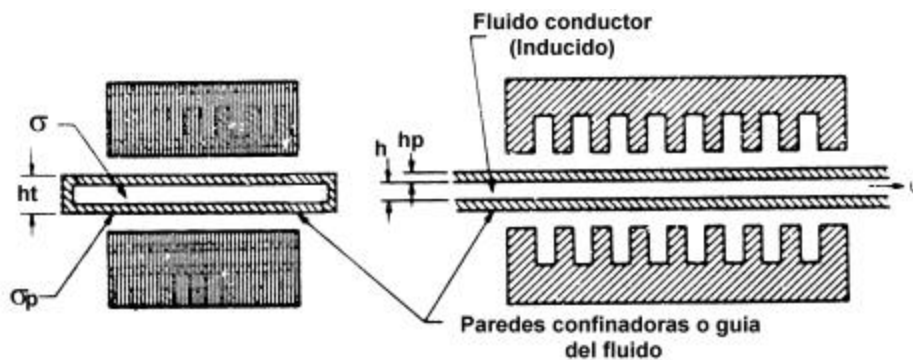


Fig. 4: Motor lineal de inducción plano de doble inductor con fluido conductor como inducido.

Otra ejecución del motor lineal consiste en arrollar de nuevo la versión plana anterior alrededor de un eje paralelo a la dirección del movimiento rectilíneo según pone de manifiesto la figura 5 (motor lineal tubular).

Esta forma soluciona de raíz la problemática de las cabezas de bobina en el inducido, ya que las corrientes se cierran sobre sí mismas.

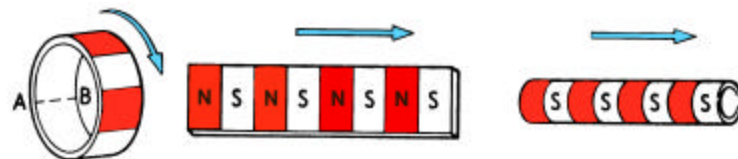


Fig. 5: Transformación topológica de un motor de inducción rotativo en un motor lineal tubular.

La flecha significa el sentido del campo magnético.

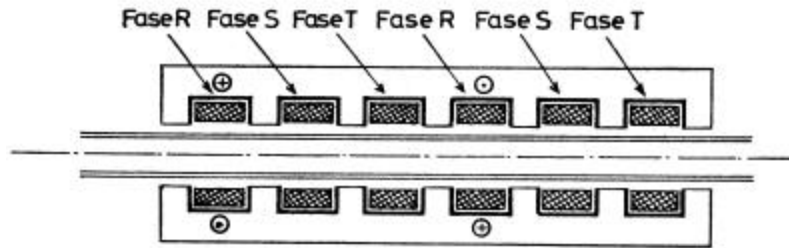


Fig. 6: Motor lineal tubular trifásico.

En el caso de un motor lineal trifásico el devanado está formado por bobinas toroidales alojadas en ranuras radiales, una por bobina, practicadas en el interior de un tubo de material magnético. Conectando las bobinas a un sistema trifásico de forma que sean recorridas sucesivamente por corrientes de sentido inverso, tal como se muestra en la figura 6, en el interior del tubo se tendrá un campo alternativo deslizante a lo largo del eje del tubo. Si en el interior de este tubo colocamos un anillo conductor, las corrientes inducidas bajo la acción del campo magnético darán origen a fuerzas electromagnéticas que tenderán a desplazarlo axialmente

Como podemos comprobar hay diferentes topologías de máquinas lineales tubulares (figs. 7 – 12).

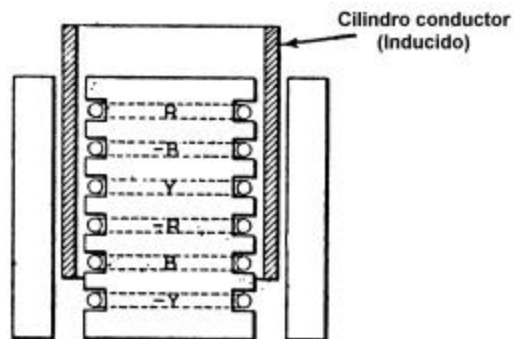


Fig. 7: Motor lineal tubular, de simple inductor con cilindro conductor sólido como inducido y con un cilindro externo de material ferromagnético para disminuir la reluctancia magnética.

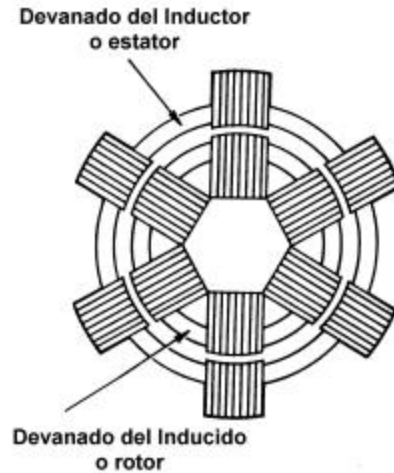


Fig. 8: Motor lineal tubular de simple inductor construido con chapas magnéticas usando paquetes de chapas en paralelo para disminuir la reluctancia magnética. Aparece fuerza de reluctancia lateral que ha de ser compensada por el sistema de guiado.

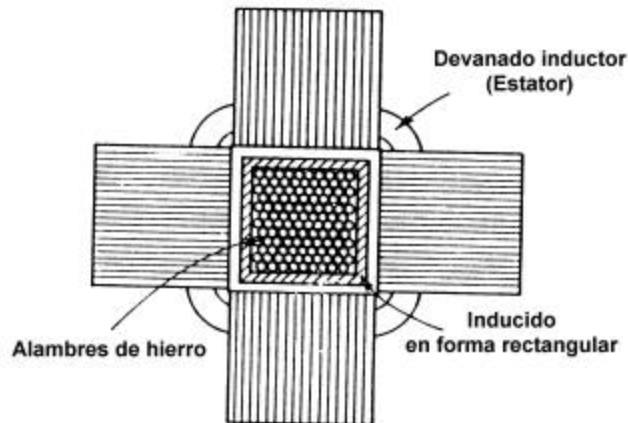


Fig. 9: Motor lineal tubular de construcción en cruz de planchas paralelas con inductor unilateral externo construido con chapas magnéticas y un inducido en forma rectangular sólido, relleno de alambres de hierro, para disminuir la reluctancia magnética

En estas otras topologías se ha sustituido el inducido de tipo macizo, o lámina conductora, por un inducido que sea fluido conductor de la electricidad, introducido dentro de un recipiente para realizar una conducción controlada.

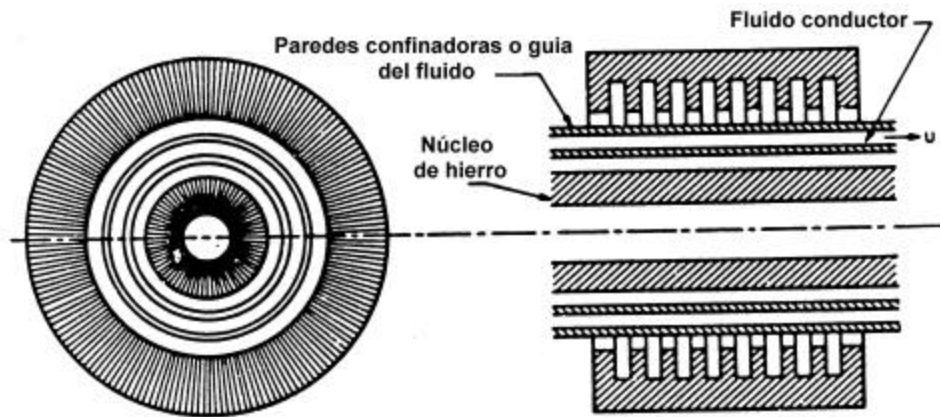


Fig. 10: Motor lineal tubular con un fluido conductor como inducido.

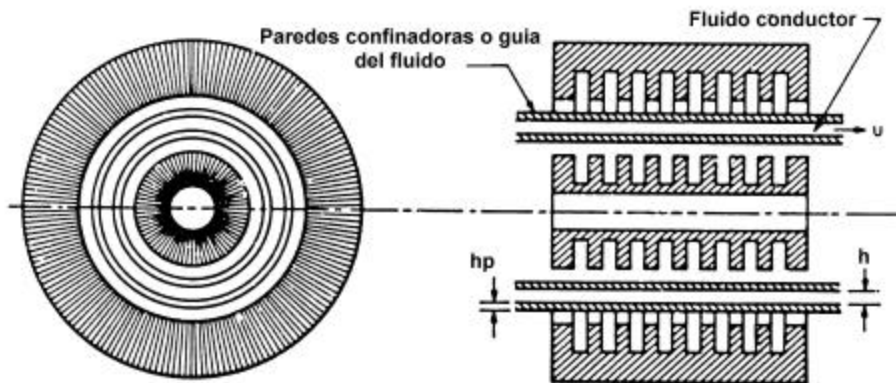
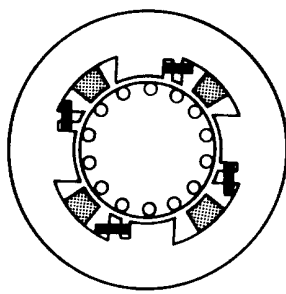
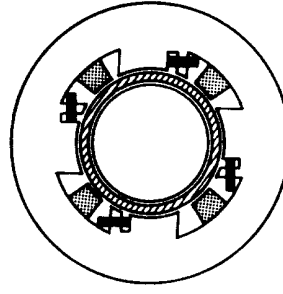


Fig. 11: Motor lineal tubular de doble inductor con un fluido conductor como inducido.

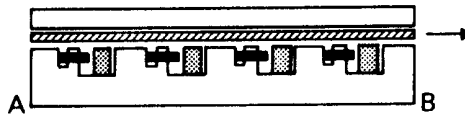
Todas estas topologías de motores lineales pueden tener diferentes prestaciones modificando los tipos de devanados eléctricos utilizados, pasos polares, número de fases, etc.



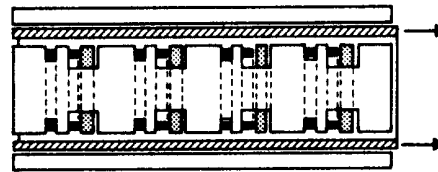
(a)



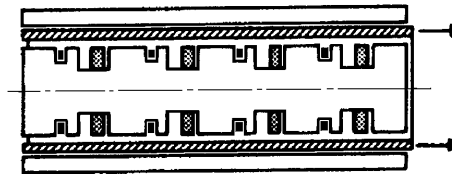
(b)



(c)



(d)



(e)

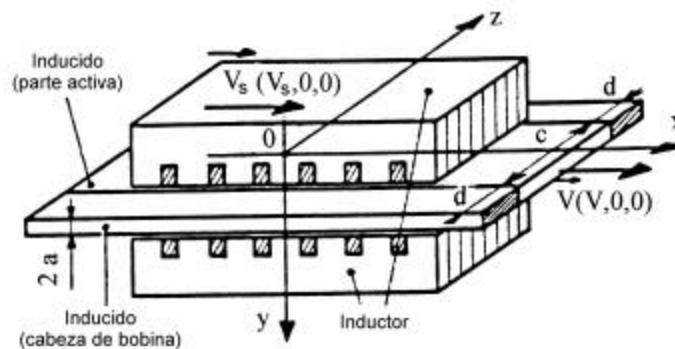
- a - motor monofásico de jaula de ardilla.
- b - motor monofásico con rotor de copa.
- c - motor lineal monofásico con inducido plano.
- d - motor lineal tubular monofásico.
- e - motor lineal tubular monofásico con espira de sombra.

Fig. 12: Evolución de un motor de inducción monofásico rotativo en un motor lineal plano y en un motor lineal tubular

Poder conseguir el motor lineal tubular monofásico con espira de sombra es una simplificación constructiva muy importante. Esto no se encuentra en la literatura especializada sobre este tema, pero parece lógico que pueda conseguirse como se ha indicado. Así se simplificaría notablemente la alimentación eléctrica, especialmente en el caso de querer aumentar la frecuencia.

1.2 - Principio de funcionamiento del motor lineal plano.

El esquema de la figura 13 representa un motor lineal, en el que el desplazamiento del inducido se efectúa según el eje longitudinal **OX** a la velocidad mecánica **V**.



- V_s : Velocidad del campo magnético.
- V : Velocidad mecánica del inducido.
- $2a$: grosor del inducido
- c : ancho de la parte activa del inducido
- d : ancho de la cabeza de bobina

Fig.13 :Esquema de un motor lineal.

La corriente de excitación del devanado inductor circula en la dirección **OZ**, creando un campo principal de inducción magnético, en la dirección del eje transversal **OY**. Si estos devanados están correctamente repartidos y son alimentados por una fuente polifásica a una frecuencia f_1 , el campo magnético principal y la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) se propaga, según el eje **OX**, con una forma de onda deslizante V_s a una velocidad lineal (sincrónica) :

$$V_s \approx \frac{L f_1}{p} \quad ?m/s? \quad (1.2.a)$$

El flujo magnético correspondiente al inductor atraviesa el entrehierro generando dentro del inducido las fuerzas electromotrices (f.e.m.), y a la vez unas corrientes. El flujo magnético derivado de estas corrientes, deslizante respecto al inductor y al inducido resta inmóvil respecto al flujo principal. La interacción entre las corrientes

inducidas y el flujo magnético en el entrehierro determina una fuerza motriz lineal sobre el inducido, cuyo sentido, será el mismo que tiene el campo magnético deslizante y que lleva el inducido a una velocidad V , que es inferior a la velocidad del campo magnético V_s .

Se define el deslizamiento s de un motor de inducción lineal por la siguiente relación:

$$s = \frac{V_s - V}{V_s} \quad (1.2.b)$$

V_s = velocidad de campo

V = velocidad del inducido

El principio elemental de funcionamiento es entonces como el de la máquina rotativa que tiene el acoplamiento magnético asíncrono. El concepto eléctrico de los bobinados inductores de los motores lineales y rotativos es el mismo, lo que generalmente no ocurre con los bobinados inducidos.

El inducido puede ser asimilado a una lámina conductora de ancho $c + 2d$ y de grueso $2a$. La anchura c se encuentra completamente dentro del campo magnético principal, que es la parte activa donde se inducen las corrientes inducidas. Se puede comparar esta parte c del motor lineal con los conductores de las ranuras del rotor de una máquina rotativa. Las dos bandas laterales d del motor lineal situadas una a cada lado de la parte activa c , y fuera del campo magnético principal, forman el circuito de cierre de las corrientes inducidas haciendo la misma función que las cabezas de bobina de los devanados típicos de las máquinas rotativas (fig.14).

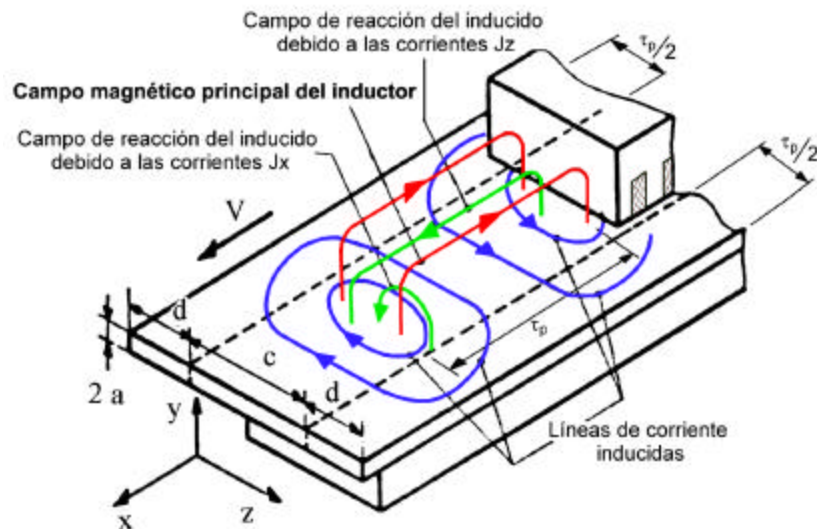


Fig. 14: Esquema de un motor lineal (estator superior parcialmente cortado)
1.3 - Diferencias principales entre los motores lineales y los rotativos.

El motor lineal se diferencia del motor rotativo por los siguientes puntos fundamentales:

✍ El inductor está abierto por los dos extremos.

✍ El inducido es generalmente macizo y sin hierro. Al no tener ranuras, permite los pasos y entrehierros progresivos, estatores alargados o acortados y otros efectos. Un inducido sin hierro nos permite un circuito magnético diferente, sin esfuerzos de reluctancia entre rotor y estator, una disminución del momento de inercia, pero también un aumento del entrehierro.

✍ El entrehierro es importante y ocupado en gran parte por el inducido y las dos holguras mecánicas, pudiendo llegar a ser 10 veces mayor que en las máquinas rotativas. Tener un entrehierro muy grande obliga a aumentar el nº de espiras o la corriente para aumentar la f.m.m. y poder mantener una inducción de trabajo en el entrehierro. El aumento de espiras nos hace aumentar la X_1 , y un aumento de la corriente nos hace aumentar la temperatura de la máquina.

✍ El inductor puede ser bilateral, con la consecuencia del aumento de la relación Potencia/peso.

Todas estas particularidades, repercuten en el funcionamiento de las máquinas lineales y se introducen dentro de los efectos especiales, que posteriormente se comentan.

Por una parte, el campo giratorio de las máquinas rotativas corresponde en una primera aproximación al campo deslizante de las máquinas lineales, perturbado por las formas particulares de los circuitos magnético y eléctrico, debidas a los efectos de las extremidades.

Por otra parte, la componente principal del campo inductor no atraviesa obligatoriamente el entrehierro en la dirección normal, debido a los efectos de penetración.

1.4 - Efectos especiales

En un motor asíncrono rotativo la inducción se distribuye de acuerdo a la forma de una onda giratoria.

Pasa lo mismo con los motores lineales donde la inducción puede ser representada aproximadamente por una onda deslizante; la onda varía no sólo en fase y en módulo, sino que en muchos puntos del entrehierro es perturbada por los efectos de las extremidades, que podemos clasificar en dos categorías:

El efecto de longitud finita, debido principalmente a las discontinuidades magnéticas a la entrada y a la salida de la máquina;

El efecto de anchura finita o efecto propio, debido al cierre de las corrientes en el interior de la parte activa del inducido ??.

1.4.1 - Efecto de longitud finita

La figura 15 representa un corte longitudinal de un motor lineal con la representación de ciertas líneas de campo magnético del inductor.

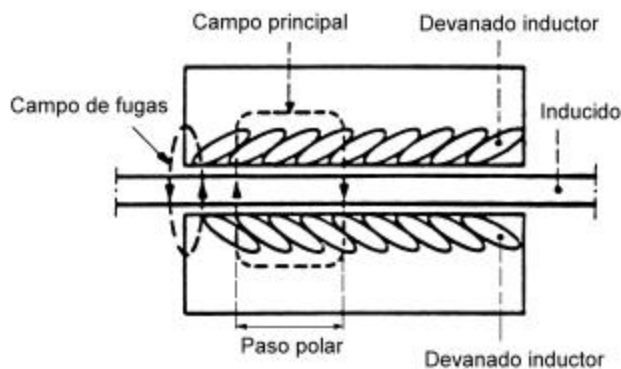


Fig. 15: Corte longitudinal de un motor lineal.

Si examinamos solamente, la distribución del campo magnético del inductor, sin tener en cuenta la influencia de las corrientes inducidas, las corrientes de excitación crean dentro del entrehierro una onda de inducción deslizante B que, por un circuito magnético infinitamente largo, será sensiblemente equivalente a la onda giratoria de las máquinas rotativas y tendrá la expresión:

$$\bar{B} = B_m \exp(j\omega t - \gamma x) \quad (1.4.1.a)$$

Sin embargo, el hecho de que el inductor tenga dimensiones finitas, implica una variación brusca de la permeabilidad magnética en las extremidades, esto se traduce no sólo en un campo de fugas o de dispersión, sino que da lugar a componentes pulsatorias parásitas, que se propagan por el interior de la máquina.

En carga la distorsión del campo se agrava por los fenómenos propios del inducido siendo los más importantes las corrientes salientes de las extremidades de la máquina. En efecto, el inducido del motor lineal se puede asimilar a una lámina conductora sin fin que se desplaza dentro del campo magnético y en la que

solamente una parte está localizada, en un instante dado, entre los inductores de longitud finita. Las corrientes pueden entonces circular por las extremidades, dentro de las partes del inducido situadas bajo el campo magnético principal. Así, en los elementos de la parte conductora que se presentan justo antes de la entrada y justo después de la salida de los inductores se inducen las f.e.m.s. parásitas. La perturbación correspondiente se entiende dentro de una distancia determinada que depende esencialmente de la velocidad del inducido y de si hay un número de polos inductores pares o impares.

A cierta distancia las f.e.m.s. de los efectos de longitud finita se juntan con la f.e.m.s. inducidas por el campo principal. El campo de inducción resultante es la superposición del campo inductor y de reacción del inducido, que contiene la onda fundamental deslizante y los términos parásitos τ ?

Para tener un rendimiento satisfactorio será necesario un n^o mínimo de polos. Un motor lineal donde el estator sea más corto que el rotor (estator acortado), dependiendo de la frecuencia de trabajo y de la velocidad de sincronismo, el n^o mínimo de polos debería ser seis τ ?

1.4.2- Efecto de la anchura finita

La onda principal de inducción que nosotros venimos definiendo genera dentro del inducido una onda deslizante de f.e.m. que cambia de signo en cada paso polar, provocando así el cierre de las corrientes correspondientes. Si la banda conductora que representa el inducido corresponde a un desarrollo plano de un rotor de jaula de ardilla, donde cada barra está separada de las otras por un aislante, todas las corrientes inducidas se cerrarán como se indica en la figura 16, por las barras conductoras laterales (equivalentes a los anillos de cortocircuito de un rotor de jaula de ardilla).

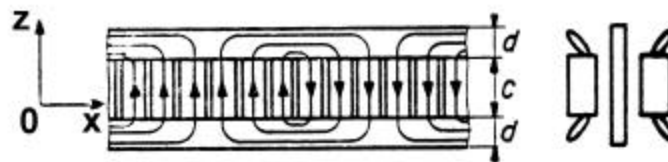


Fig. 16: Representación esquemática de las corrientes dentro del inducido de un motor lineal. (Inducido lineal equivalente a un rotor de jaula de ardilla).

El cambio de sentido de las corrientes entre las diferentes barras se hace entonces por las conexiones frontales como en una máquina rotativa. Sin embargo, dentro de un caso general, donde la parte útil del inducido está constituido por un conductor

único, la corriente se cierra en parte por las bandas laterales (**d**), y parcialmente por el interior de la zona activa (**c**) (fig. 17).

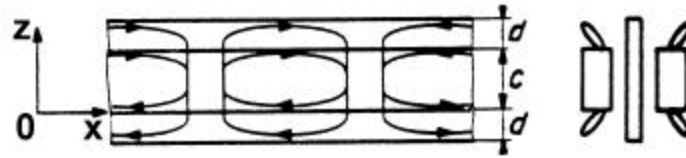


Fig. 17: Representación esquemática de las corrientes dentro del inducido de un motor lineal. (Inducido lineal macizo).

Estas corrientes traducen el efecto de la anchura disminuyendo la componente útil (según el eje **OZ**) de la corriente inducida, y a la vez la potencia del motor. Su importancia depende de la anchura relativa de las partes donde cambian y se anulan las f.e.m.s. útiles, así como de la resistividad de las bandas laterales de cierre ???

La cabeza de bobina rotórica **d** es de vital importancia, pues de ella depende principalmente la R_2 y la X_2 . Si la zona **d** (cabeza de bobina) es muy grande X_2 aumenta, y si es insuficiente, R_2 aumenta. Debe tener una dimensión equivalente al paso polar como mínimo para permitir la circulación de las corrientes rotóricas con densidad de corriente uniforme en rotores planos.

En el caso de utilizar rotores con extremos ensanchados, de forma parecida a la de las vigas con sección IPN, estos ensanchamientos deben tener la sección equivalente necesaria para la cabeza de bobina. Esta sección ha de ser la misma que la de cada circuito principal de corriente rotórica, es decir: $\frac{1}{2} \cdot \tau_p \cdot 2a$ (fig.18)

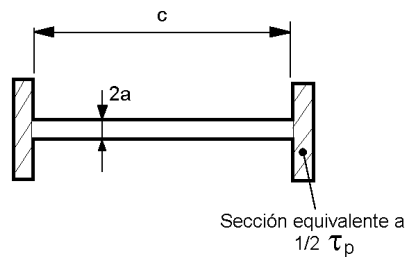


Fig.18: Inducido tipo IPN

Esta geometría del inducido tipo IPN minimiza la X_2 a igualdad de R_2 , al describir la $\frac{1}{2}$ una espira más cerrada.

1.4.3 - Efectos de penetración

Dentro de un motor lineal ideal, sin efectos de la extremidad, el campo de inducción resultante es de la forma:

$$\bar{B} = B_m \exp\left(-\frac{\gamma}{\tau_p} x\right) \cos(\gamma t - \frac{\omega}{\tau_p} x) \quad (1.4.1.a)$$

Cuando este campo pasa por dentro del inducido en movimiento, el campo sufre una deformación que se traduce en un aplanamiento de las líneas de fuerza, que a la vez corresponde a una reducción de B_y (Fig.19).

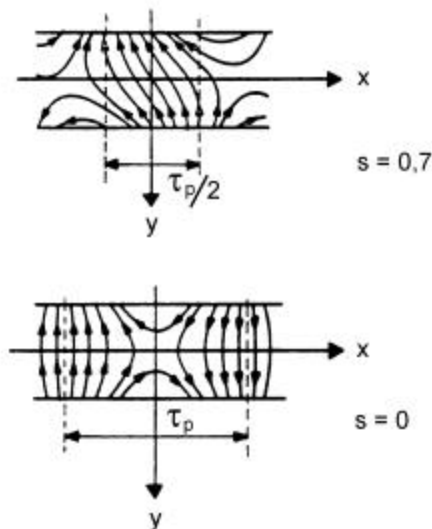


Fig. 19: Distribución de las líneas de fuerza del campo magnético dentro del entrehierro de un motor lineal, en función del deslizamiento.

Con deslizamientos elevados el efecto es más pronunciado. Se podría definir un grueso crítico a_0 del entrehierro correspondiente a una reducción de B_y ; esta profundidad de penetración es parecida al efecto pelicular, y viene dada por la relación:

$$a_0 = K_0 / s \cdot \tau_m \quad (1.4.3.a)$$

siendo: K_0 un parámetro independiente de s y τ_m .

donde:

$$\tau_m = \frac{V_s}{k} \quad (1.4.3.b)$$

s = deslizamiento

V_s = Velocidad del campo

μ_m = **número de Reynolds magnético**

μ = permeabilidad del medio

ρ = resistividad del medio

El significado del número de Reynolds magnético es simplemente:

$\mu_m = \text{Corrientes inducidas por movimiento} / \text{corrientes de conducción}$

Puede tenerse en cuenta los efectos de penetración en función del esquema monofásico equivalente del motor lineal ideal (fig.20).

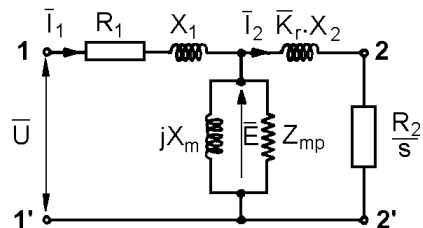


Fig. 20: Esquema eléctrico equivalente de un motor lineal

La figura 20 representa este esquema del motor lineal ideal que sólo se diferencia del motor asíncrono rotativo por la presencia de dos coeficientes Z_{mp} i K_r ???; en efecto:

☞ R_1 y X_1 representan la resistencia y la reactancia del inductor;

☞ R_2 y X_2 representan la resistencia y la reactancia del inducido;

☞ X_m es la reactancia de acoplamiento magnético entre el inductor y el inducido;

☞ Z_{mp} es una componente de la impedancia de magnetización propia del motor lineal. La parte real representa las pérdidas electromagnéticas habituales y las que provoca el aplanamiento de las líneas de fuerza dentro del entrehierro; la parte imaginaria representa la disminución del acoplamiento magnético resultante de los efectos de penetración.

☞ K_r es un coeficiente corrector de X_2 , introducido por la parte real (pérdidas por efecto Joule) y por la parte imaginaria (aumento debido al efecto de la penetración, de las pérdidas magnéticas).

La influencia de los coeficientes Z_{mp} y K_r , y por tanto del efecto de penetración, es prácticamente despreciable cuando:

$$\frac{a}{s} \gg 1 \quad (1.4.3.c)$$

donde, a es la mitad del grosor del inducido.

Para reducir el efecto de penetración es evidente que deberíamos reducir el deslizamiento.

1.5 – Propuestas de construcción

Vistas las diversas topologías de motores lineales se procederá a la construcción de tres motores lineales para impulsar un líquido conductor.

La construcción del primer prototipo de motor lineal será plano, de doble inductor por ser éste relativamente fácil de construir y de ensayar, al que se le llamará M-1. Con este prototipo se pretende profundizar en el conocimiento de los motores lineales y conseguir cierta experiencia en su construcción y ensayo.

El segundo prototipo será un motor lineal tubular bifásico al que se le llamará M-2. Con este prototipo se pretende ensayar la viabilidad de la implantación de superconductores en estos motores.

Con el tercer prototipo se quiere estudiar la viabilidad de la alta frecuencia en el funcionamiento de estos motores. A este prototipo se le llamará M-3.