

## Capítulo 6

# La Conversion de Energía Electromecánica

La conversión de energía electromecánica es el proceso de convertir energía de su forma eléctrica a su forma mecánica o viceversa. Del desarrollo anterior observamos que resulta muy sencillo convertir energía eléctrica en magnética y recíprocamente. Incluso apenas se medita se intuye como construir una máquina que transforme energía eléctrica en energía eléctrica a fin de disponer de fuentes de tensión alterna de valores diferentes<sup>1</sup>. Pero lo que se quiere es además transformar energía eléctrica en mecánica y recíprocamente. Si podemos transformar fácilmente energía eléctrica a magnética y logramos transformar también fácilmente energía magnética a mecánica y recíprocamente entonces tendremos la solución. La intención de este item es desarrollar los conceptos básicos de la conversión y como pensar en que se pueda sintetizar con materiales y configuraciones posibles de realizar, no aporta, no es la intención, herramientas de cálculo esto se realizará luego cuando se estudien las máquinas comerciales ya realizadas en operación estacionaria, para lo cual se emplearán, exclusivamente, modelos de parámetros eléctricos y mecánicos.

### 6.1. El Modelo Básico

#### 6.1.1. Sistema con Excitación Simple

Consideremos el dispositivo elemental de la figura compuesto por un circuito magnético fijo ( $L1$ ), un trozo de material ferromagnético el cual puede moverse en la dimensión  $x$  arrastrando una cierta masa  $M$ . Supondremos que no existen pérdidas de ningún tipo ni fricción.

---

<sup>1</sup>Se estaría inventando el TRANSFORMADOR, lo “desmotivante” es que ya alguien lo hizo hace más de 100 años

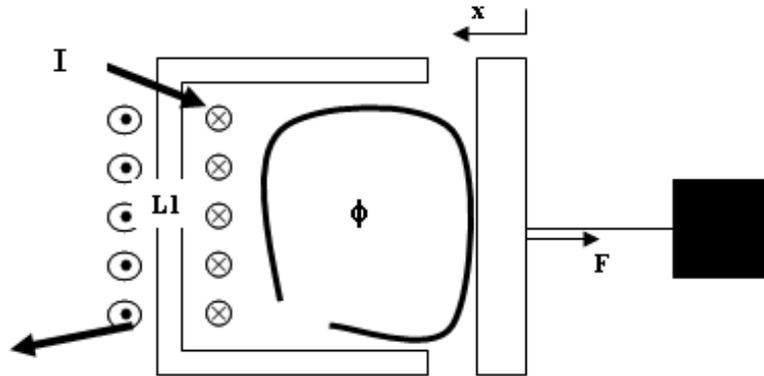


Figura 6.1: Esquema Electromecánico con excitación simple

¿Que sucede si en un cierto intervalo de tiempo elemental incrementamos la corriente  $i$ ? La masa  $M$  se mueve hacia la izquierda, desarrollando entonces un trabajo mecánico. Pero entonces hemos logrado transferir (convertir) energía eléctrica en mecánica. ¿Por qué? Conocemos una concepción elemental, el circuito magnético configura un electroimán, que al excitarlo con la corriente  $i$  “atrae” al trozo de material ferromagnético el cual arrastra la masa  $M$  realizando un trabajo. Pero miremos ahora esta situación con el enfoque de las energías que cambian. Debe operar el principio de conservación de la energía. Sabemos de antes que la energía eléctrica en un circuito magnético cambia la energía magnética almacenada, y ahora además vemos que hay cambios en la energía mecánica del sistema (la masa se mueve), entonces como el sistema no tiene pérdidas y el intervalo de tiempo puede ser tan pequeño como se quiera se debe cumplir que:

$$dE_e = dE_{Ma} + dE_{me} \tag{6.1}$$

Pero nuestros conocimientos ya adquiridos nos permiten escribir, llamado  $F$  a la fuerza sobre la masa  $M$  que:

$$dE_{me} = Fdx \tag{6.2}$$

$$dE_e = Nid\phi \tag{6.3}$$

¿Pero que sucede en este sistema con la relación entre el flujo y la corriente? Vimos que en un circuito magnético la relación entre estas variables la daba la curva de magnetización. Pero tengamos en cuenta que ahora el circuito magnético es el compuesto por el circuito magnético fijo y el trozo de material ferromagnético, el cual al moverse este último va cambiando el espacio de entrehierro por lo que la reluctancia varía lo cual haría que el flujo cambiara a igual corriente. Por tanto en un circuito magnético donde

una de las partes del mismo pueda moverse (en nuestro caso en la dimensión  $x$ ) tendremos una relación de la forma:  $\phi = \phi(x, i)$ . En consecuencia:

$$d\phi = \frac{\partial\phi}{\partial i} di + \frac{\partial\phi}{\partial x} dx \quad (6.4)$$

Por otra parte vimos que todo lo que haga cambiar al flujo de un circuito magnético, necesariamente cambia la densidad magnética  $B$ , por lo cual cambia la energía magnética del circuito de acuerdo a la relación trascendente que encontramos en la sección 5.2 por lo que también podemos escribir que:

$$dE_M = \frac{\partial E_M}{\partial i} di + \frac{\partial E_M}{\partial x} dx \quad (6.5)$$

Sustituyamos ahora estas últimas relaciones en la ecuación de conservación de la energía, obtenemos:

$$dE_e = Ni \left( \frac{\partial\phi}{\partial i} di + \frac{\partial\phi}{\partial x} dx \right) = F dx + \frac{\partial E_M}{\partial i} di + \frac{\partial E_M}{\partial x} dx \quad (6.6)$$

Que operando convenientemente y teniendo en cuenta que hemos establecido arbitrariamente que  $i$  y  $x$  son independientes por lo que  $di/dx = 0$  resulta que:

$$F = Ni \frac{\partial\phi(i, x)}{\partial x} - \frac{\partial E_M(i, x)}{\partial x} \quad (6.7)$$

Obtenemos entonces la relación entre variables mecánicas, magnéticas y eléctricas. Una expresión más sintética que la anterior se puede obtener si observamos que si en lugar de elegir  $x$  e  $i$  como variables independientes elegimos a  $x$  y  $\phi$  (dado que sabemos que la curva de magnetización relaciona al flujo con la corriente) entonces se cumplirá en un circuito magnético donde una de sus partes pueda moverse que:

$$F = - \frac{\partial E_M(\phi, x)}{\partial x} \quad (6.8)$$

Segunda y última relación trascendente que vincula la variación en la energía magnética con la variación dimensión del movimiento para darnos la Fuerza (variable mecánica) del sistema.

En consecuencia concebimos que si en un circuito magnético variamos su energía magnética a través de la fuente eléctrica, y si a su vez ese circuito magnético tiene partes móviles variará también su energía mecánica.

Observe de la lectura de las relaciones encontradas que si hacemos “subir la corriente” (entregamos energía eléctrica al sistema) la energía magnética “sube”, “x” crece y por tanto el sistema realiza un trabajo mecánico (sacamos un trabajo del sistema) por tanto la energía eléctrica se transformó en mecánica. (se le denomina ACCIÓN MOTORA DEL SISTEMA) Por el

contrario si realizamos un trabajo sobre el sistema (entregamos trabajo) separando la parte móvil del circuito fijo ( $F$  positiva), la energía magnética disminuye, la corriente cambia de sentido y se aporta energía eléctrica a la fuente (sacamos energía eléctrica del sistema) por tanto la energía mecánica se transformó en eléctrica ( se le denomina ACCIÓN GENERADORA DEL SISTEMA).

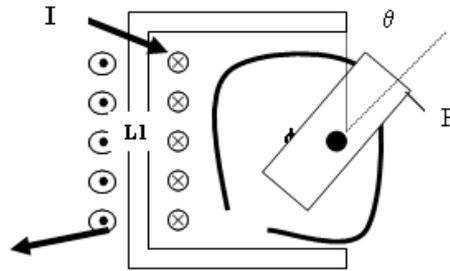


Figura 6.2: Esquema Electromecánico

Si en lugar de un sistema traslacional (dimensión  $x$ ) hubiéramos considerado una configuración rotacional (dimensión  $\theta$ ) (por ejemplo que el trozo de material ferromagnético pudiera girar libremente entorno a un punto fijo como indica la figura) y recordando que  $F \cdot d = C$  (par mecánico) se obtiene que:

$$C = -\frac{\partial E_M(\phi, \theta)}{\partial \theta} \tag{6.9}$$

Pero este sistema permite solo una acción de transformación por pulsos de energías puesto que cuando el trozo móvil de material ferromagnético se “pega” al circuito magnético fijo se deja de transformar energía eléctrica en mecánica y para reiniciar el proceso debería realizar un trabajo para “despegarlo” y así sucesivamente. Por tanto tendría ciclos de acción motora, seguida de una acción generadora para obtener una nueva acción motora y así sucesivamente. Este sistema resulta idóneo para configurar los llamados “actuadores” pero no para configurar una máquina típica en la cual quiero que todo el tiempo o sea generador o sea motor. ¿Que podríamos concebir?

### 6.1.2. Sistemas con Doble Exitacion

Supongamos que en el sistema de movimiento rotacional bobinamos otra bobina de  $N_2$  vueltas alimentada por una fuente independiente  $v_2$  por la que circulará  $i_2$  como trata de indicar la figura 6.3.

En estas condiciones la energía magnética del circuito magnético será del tipo  $E_M = E_M(i_1, i_2, \theta)$ . Si mantenemos a  $\theta$  fija, entonces las variaciones de energía eléctrica deberá ser igual a la de la energía magnética. Por tanto:  $\partial E_{Ma} = dE_e = (v_1 i_1 + v_2 i_2) dt$ .

Recordemos las expresiones encontradas para circuitos magnéticos con dos bobinados:

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \tag{6.10}$$

$$v_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \tag{6.11}$$

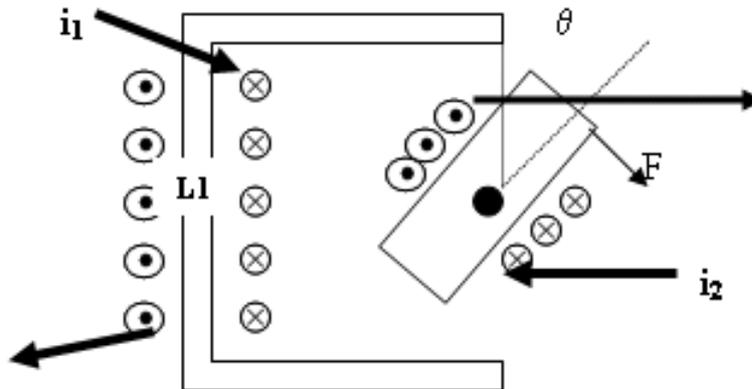


Figura 6.3: Esquema Electromecánico con excitación doble

Donde en este caso tanto  $L_1$ ,  $L_2$  y  $M$  dependen de  $\theta$  puesto que las reluctancias varían (a corriente constante) si el ángulo varía. Si sustituimos y operamos convenientemente resulta:

$$dE_e = L_1 i_1 di_1 + M d(i_1 i_2) + L_2 i_2 di_2 \quad (6.12)$$

Por tanto si integramos en las corrientes:

$$E_{Ma} = \int dE_e = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + M i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 \quad (6.13)$$

Luego como sabemos que la fuerza es la variación de la energía magnética con el ángulo resulta que:

$$-F = \frac{\partial E_{Ma}}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i_2 \frac{dL_1}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dM}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2 \frac{dL_2}{d\theta} \quad (6.14)$$

¿Que nos indica esta ecuación? Que cambiando “convenientemente” el sentido de una de las corrientes puedo cambiar el sentido de la fuerza, por tanto puedo concebir, a modo de ejemplo que cuando la parte móvil está por adquirir su posición vertical cambio el sentido de la corriente por su bobinado de tal manera que el sentido de la fuerza se mantenga y continúe con su movimiento giratorio.

En consecuencia la configuración de un circuito magnético el cual tiene dos fuentes de excitación y una de sus partes es móvil es capaz de transformar en forma permanente energía eléctrica en mecánica y recíprocamente. Esta configuración es conceptualmente la máquina eléctrica. En el resto del curso se verá como se sintetiza industrialmente este sistema estudiando en particular su modelo eléctrico que permita evaluar su comportamiento en estado estacionario estable.



## Capítulo 7

# Imanes Permanentes

Este tema no será exigido en el curso, son muy baja las densidades magnéticas ( $B$ ) que en forma natural se alcanzan en diversos materiales, en general absolutamente insuficientes para las aplicaciones de potencia exigidas en la actualidad. Sin embargo se recomienda la lectura particular de este tema en cualquiera de las bibliografías señaladas, en particular en la bibliografía de referencia (páginas 83 a 90 ) hay un tratamiento del tema suficiente que puede ser entendido por el estudiante con sus herramientas disponibles. Se agrega además que están creciendo las aplicaciones de imanes permanentes sintéticos en sistemas de pequeña potencia o autónomos.