Campus Virtual FCEFyN
Universidad Nacional de Córdoba

MOTOR DE INDUCIÓN TRIFÁSICO PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

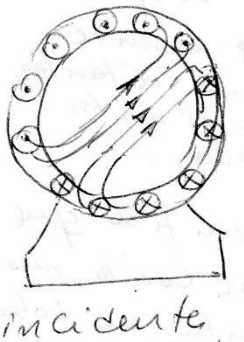
ELECTROTECNIA(IE)

Motor Asincronico Trifasico

El motor asincrono trifasico a inducción es un mecanismo al cual ingresa energía electrica en forma de un conjunto de corrientes trifasicas y se convierte en energía mecánica bajo la forma de un movimiento giratorio de velocidad ligeramente variable con la carga aplicada a su eje.

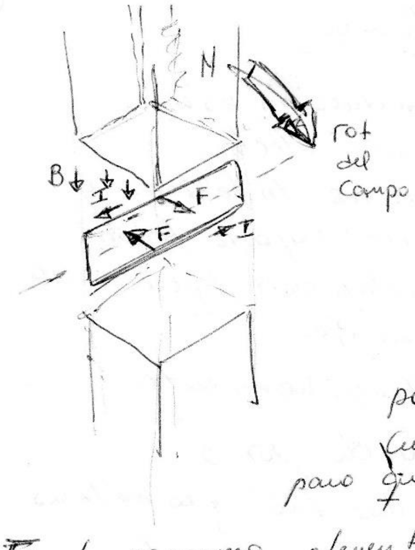
Para explicar su principio de funcionamiento acudimos a un estator constituido por 3 devanados individuales separados 120° geométricos alrededor de la superficie de la máquina, al cual lo alimentamos con un sistema trifásico de corrientes, se producirá entonces un campo magnetico rotante, al cual lo idealizamos por medio de un polo norte y un polo sur y que gira con una velocidad constante N_s denominada velocidad sincrónica,

$$N_s = \frac{60 f}{p} \ [RPM] \qquad f = \text{frecuencia}, \quad p = \text{nº de pares de polos}$$



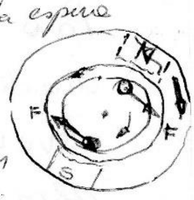
Supongamos que en el espacio afectado por el campo magnetico rotante colocamos un conductor rectangular cerrado electricamente (en corto circuito) y vinculado mecánicamente a un eje coincidente con el eje del estator. y que presenta el grado de libertad de poder girar alrededor de ese eje que es normal al campo rotante.

El campo magnetico rotante lo hemos representado por medio de dos polos exteriores que giran produciendo el flujo magnetico φ



Por el movimiento relativo de la espira con respecto al Campo se induce una fem. en la espira que hace circular una corriente por la misma, cuyo sentido (se determina con la regla de la mano derecha "Mov, Ind, Corrte") tendiendo hacer girar la espira en la misma dirección del Campo.

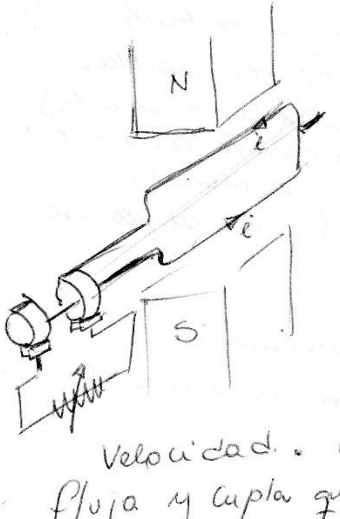
Debido a la interacción de la corriente con el Campo aparece una acción pondero motriz que determina una cupla que tiende a hacer girar la espira para que acompañe al Campo.



Este esquema elemental sirve para para comprender el principio de funcionamiento del motor con rotor en Corto circuito, que da origen al M.A con rotor en Jaula de Ardilla.

Si en lugar de dejar la espira en corto circuito, abrimos la misma de la espira, y conectamos sus terminales a dos anillos rosantes, que mediante escobillas, se conectan con una resistencia variable exterior, mediante el ajuste de esta se podrá variar la corriente I que circula por la espira y por consiguiente las características de marcha del motor.

En definitiva este sistema es igual al anterior con la diferencia que permite regular la marcha del órgano rotante, y nos permite comprender el motor asíncrono con rotor bobinado.



Para ambos ejemplos se verifica que si el rotor llegase a girar con la misma velocidad del campo rotante no habría variación de flujo en la espira, no habría fem, no habría corriente, no habría cupla y el motor trataría de disminuir su velocidad. Pero al hacerlo se produciría variación de flujo y cupla que lo hará girar. Por lo tanto la base de la existencia de una cupla motora es la diferencia de velocidad entre el Campo y la velocidad del rotor.

a esa diferencia de velocidades se le llama velocidad de deslizamiento.

Si a esta velocidad la referimos a la velocidad sincrónica obtenemos el resbalamiento $S\% = \frac{N_s - N}{N_s} 100$

siendo N = Velocidad del Rotor y N_s = la velocidad sincrónica

La esencia de la cupla es que se cumpla la condición $\boxed{N_s > N}$

Hallaremos la expresión de la Cupla.

El flujo máximo que alcanza a concatenar la espira corresponde a instantes en que el campo magnético es normal al plano de la espira. Su valor está dado por $\varnothing_m = \mu H. a. b.$

Siempre suponiendo a la espira fija, el flujo concatenado por la espira va a variar en el tiempo con ley cosinusoidal

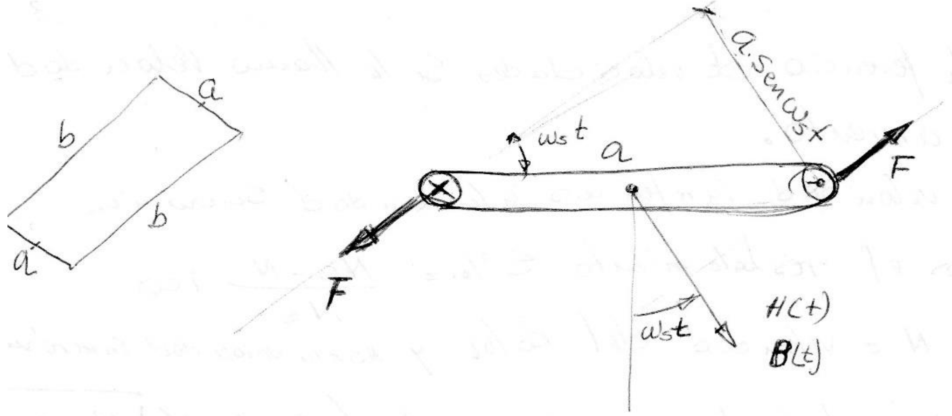
$$\varnothing(t) = \varnothing_m \cos \omega_s t.$$

Esa variación de flujo origina por la ley de Faraday una f.e.m. inducida en la espira que es proporcional a la velocidad de variación del flujo y con el signo dado por la ley de Lenz

$$e(t) = -\frac{d\,\varnothing(t)}{d\,t} = \omega_s \varnothing_m \operatorname{Sen} \omega_s t$$

La fem. hace circular por la espira cerrada que como carga eléctrica presenta una R y una autoinducción L, la corriente $i(t)$.

$$i(t) = \frac{e(t)}{Z.\angle\varphi} = \frac{\omega_s \varnothing_m \operatorname{Sen}(\omega_s t - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \omega_s^2 L^2}} \qquad \varphi = tg^{-1}\frac{\omega_s L}{R}$$



Debido a la acción del Campo magnético rotante aparecen fuerzas sobre los conductores. Dado que las fuerzas que actuan sobre los conductores a son absorvidos por el vínculo, solo se tendran en cuenta las fuerzas que actúan sobre los lados activos b.

La dirección de las fuerza son las indicados en la figura ya que por la ley de Laplace

$\overline{F} = b(\bar{i} \wedge \bar{B})$ es decir la fuerza es proporcional a la intensidad de la corriente, a la inducción B y a la longitud del conductor b, con un sentido dado por la palma de la mano derecha.

$$F(t) = i(t).b.B = \frac{b.B.\omega_s \phi_m}{\sqrt{R^2+\omega_s^2 L^2}} \text{sen}(\omega_s t - \varphi)$$

Las dos fuerzas constituyen una cupla que producen un momento torsor con respecto al centro de la espira que actua en el sentido de giro del campo. Para hallar el módulo de la cupla tendremos que encontrar la expresión de la cupla motora instantánea, que será igual al producto de una de las fuerzas F por el brazo de palanca correspondiente.

$$C_m(t) = F(t)\, a.\text{sen}\,\omega_s t = \frac{\omega_s \phi_m\, a.b.B}{\sqrt{R^2+\omega_s^2 L^2}} \text{sen}(\omega_s t-\varphi)\,\text{sen}\,\omega_s t$$

como $a.b$ = Area de la espira y $\phi_m = B.a.b$

$$C_m(t) = \frac{\omega_s \phi_m^2}{\sqrt{R^2+\omega_s^2 L^2}} . \text{sen}(\omega_s t-\varphi) . \text{sen}\,\omega_s t$$

El hecho de que exista esta cupla motora instantánea no asegura que el sistema gire, por eso debemos ver si hay algún valor promedio en el tiempo que actúe siempre en el mismo sentido

Como

$$\operatorname{sen} \omega_s t \cdot \operatorname{sen}(\omega_s t - \varphi) = \frac{1}{2}\left[\cos(\omega_s t - \omega_s t + \varphi) - \cos(\omega_s t + \omega_s t - \varphi)\right]$$

$$= \frac{1}{2}\left[\cos\varphi - \cos(2\omega_s t - \varphi)\right]$$

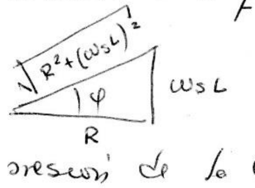
reemplazando en la expresión de la cupla instantánea se tiene

$$C_m(t) = \frac{1}{2}\frac{\omega_s \varnothing_m^2}{\sqrt{R^2+(\omega_s L)^2}}\cos\varphi - \frac{1}{2}\frac{\omega_s \varnothing_m^2}{\sqrt{R^2+(\omega_s L)^2}}\cos(2\omega_s t - \varphi)$$

Esta expresión está compuesta por dos términos, uno independiente del tiempo y otro que varía en el tiempo con ley cosinusoidal y una frecuencia doble del valor de red.
Esa fluctuación no se traduce en movimiento porque es absorbida por el momento de inercia que tiene la parte móvil.
De manera que lo que corresponde a la cupla motora es el valor de la cupla media que determinamos

$$\overline{C_m} = \frac{1}{T}\int_0^T C_m(t)\,dt = \frac{1}{2}\frac{\omega_s \varnothing_m^2}{\sqrt{R^2+\omega_s^2 L^2}}\cdot\cos\varphi$$

donde el ángulo φ es el argumento de la impedancia del circuito R-L que constituye la espira cortocircuitada



$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2+(\omega_s L)^2}}$$

reemplazando en la expresión de la cupla motora media

$$\overline{C_m} = \frac{1}{2}\frac{\omega_s \varnothing_m^2}{\sqrt{R^2+(\omega_s L)^2}}\cdot\frac{R}{\sqrt{R^2+(\omega_s L)^2}} = \frac{1}{2}\frac{\omega_s \varnothing_m^2 R}{(R^2+(\omega_s L)^2)}$$

Se observa que la cupla promedio actua en un sentido determinado y que si es mayor que la cupla resistente dará origen al movimiento.

El razonamiento que se ha hecho es para una espira detenida frente al campo rotante; pero en realidad esta no permanece detenida, sino que rota con el campo.

Apenas empieza a rotar la espira, como el campo rotante gira a una velocidad ω_s constante, la posición relativa del campo con respecto a la espira no vendra dada por $\omega_s t$, sino que habra que tener en cuenta ese movimiento relativo del campo con respecto a la espira.

Suponiendo que la espira gire a una velocidad tambien constante que designamos con ω, todo el razonamiento que hemos realizado podría repetirse y tomarse como válido si se sustituye en la expresión de la cupla media a la velocidad absoluta del campo rotante ω_s por la velocidad de rotación relativa del campo respecto a la espira es decir $\omega_R = \omega_s - \omega$, porque sería exactamente el razonamiento que haría un observador que acompaña a la espira en su movimiento.

A esta velocidad relativa se la llama velocidad angular de deslizamiento del campo respecto a la espira.

Como ω_s y ω son constantes ω_R tambien lo sera y por lo tanto la cupla media sera

$$\bar{C}m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_R \, \phi_m^2 \, R}{R^2 + (\omega_R L)^2}$$

Analicemos la expresión de $\bar{C}_m$ ya que en todo motor interesa determinar las características externas de la máquina que son la cupla y la velocidad de giro.
El gráfico a analizar nos vincula la variación de la cupla motora media en función de la velocidad de giro del motor. El producto de estos dos factores nos da la potencia mecánica de salida del motor.
La vinculación de $\bar{C}_m$ con ω la obtenemos si sustituimos ω_R por $\omega_S - \omega_0$ en la expresión.
Primero representaremos $\bar{C}_m$ en función de ω_R y después mediante un cambio en la orientación del eje de abcisa pasamos al gráfico definitivo.
Supongamos un crecimiento de ω_R positivo hacia la izquierda a partir de cero, con el propósito de que cuando cambiemos ω por ω_R el crecimiento de ω sea en forma convencional.
Observemos cual es el campo de variación de las variables ω y ω_R con significado físico.
Analíticamente ω podría variar de $-\infty$ a $+\infty$ pero para que haya cupla $\omega < \omega_S$ como límite podría ser igual. Como la espira es arrastrado por el campo es evidente que no va a girar con velocidad mayor que este.

Si $\omega > \omega_S$, ω_R sería negativo y la cupla también, por lo que se produce un efecto de frenado.

Este no es una condición normal de funcionamiento.

Vemos tambien que $\omega > 0$ porque el rotor es arrastrado por el Campo. Imaginar situaciones en que $\omega < 0$ implica que la espira gire en sentido contrario al Campo, pero esta Condición no es una Condición normal de funcionamiento, por lo tanto

$$\boxed{0 \leq \omega \leq \omega_s}$$

De esto se deduce que los límites establecidos para ω_R correspon den $0 \leq \omega_R \leq \omega_s$.
Observando la expresión de la $\overline{C}m$

$$\overline{C}m = \frac{1}{2}\,\frac{\omega_R\, \varnothing_m^2\, R}{R^2 + \omega_R^2 L^2} \quad \text{Vemos} \begin{cases} \omega_R = 0 \Rightarrow \overline{C}m = 0 \\ \omega_R = \infty \Rightarrow \overline{C}m = 0 \end{cases}$$

La función $\overline{C}m$ pasa por dos valores nulos para dos valores de la Variable Independiente, por lo tanto de acuerdo con el teorema de Rolle en algún punto intermedio, la función pasa por un máximo o mínimo. En nuestro Caso será un máximo y para ubicarlo

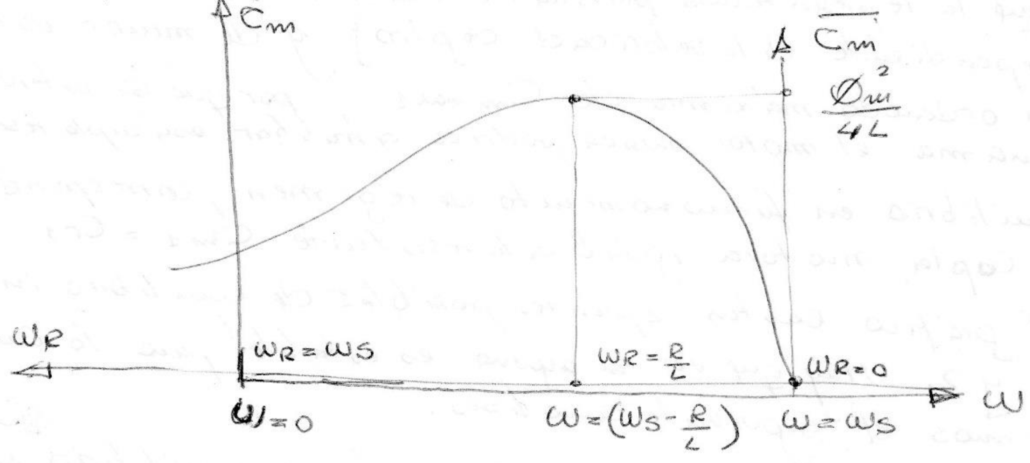
$$\frac{d\,\overline{C}m}{d\,\omega_R} = \frac{2(R^2+\omega_R^2L^2)\,\varnothing_m^2\,R - \varnothing_m^2\,R.\omega_R.2\omega_R.L^2}{4(R^2+\omega_R^2L^2)^2} = 0 \quad \text{de donde}$$

$$R^2 + \omega_R^2 L^2 - 2\,\omega_R^2 L^2 = 0 \Rightarrow \boxed{\omega_{R\,max} = \frac{R}{L}}$$

esta es la obcisa del máximo. Reemplazando este valor en la expresión de $\overline{C}m$ tendremos la ordenada del máximo.

$$\overline{C}_{m.max} = \frac{1}{2}\,\frac{\frac{R}{L}\varnothing_m^2 \cdot R}{R^2 + \frac{R^2}{L^2}\cdot L^2} = \frac{1}{4}\,\frac{\varnothing_m^2}{L} \Rightarrow \boxed{\overline{C}_{m\,max} = \frac{1}{4}\,\frac{\varnothing_m^2}{L}}$$

Graficomos la $\overline{C_m}$ en funcion de ω_R



El campo de Variación de ω_R $0 \leq \omega_R \leq \omega_S$

A cada Valor de ω_R, como ω_S es constante le corresponde un valor de ω.

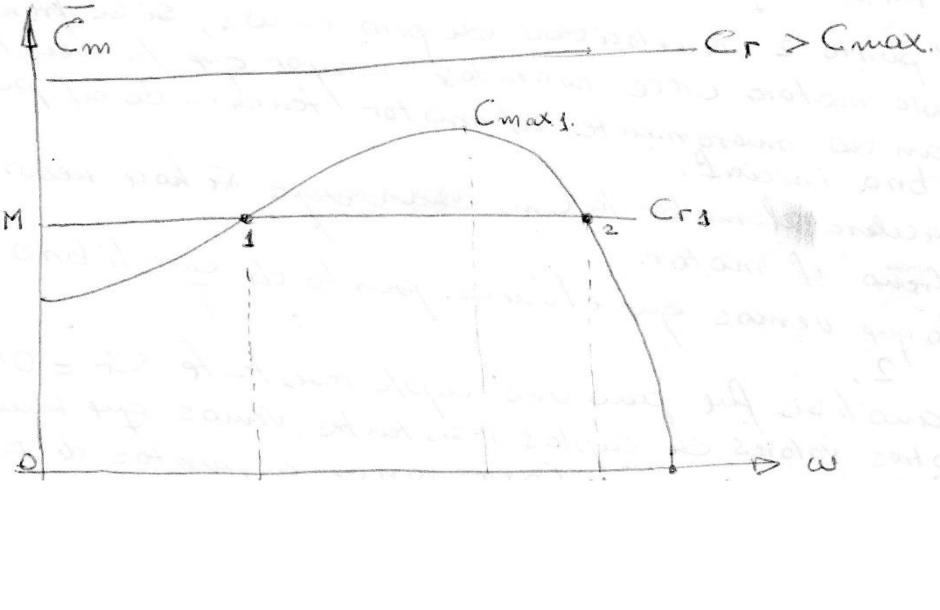
$\omega_R = \omega_S \rightarrow \omega = 0$ rotor detenido

$\omega_R = 0 \rightarrow \omega = \omega_S$ sincronismo

$\omega = 0$ representa las condiciones de arranque, es di cuando el valor esta detenido.

Con estas condiciones podemos pasar al gráfico.

$\overline{C_m} = f(\omega)$



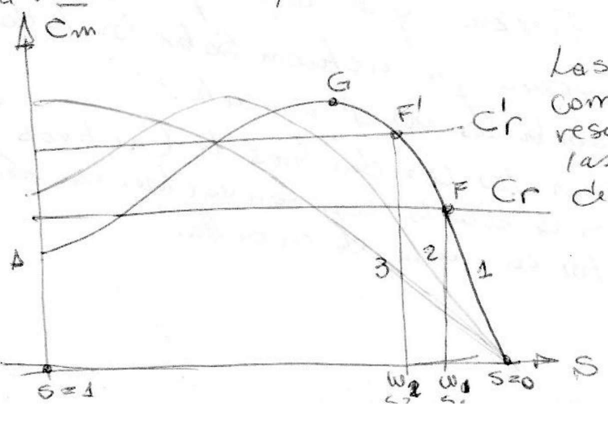
Comparemos la Cupla motora C_{m1} con una cupla resistente C_{r1} que la representamos por una recta de ordenada constante (e independiente de la velocidad de giro) y de menor valor que la ordenada máxima de $C_{m\,max1}$, porque si estuviese por encima el motor nunca podría arrastrar esa cupla resistente.
El equilibrio en funcionamiento de régimen, corresponderá a una Cupla motora igual a la resistente $C_{m1} = C_{r1}$
En el gráfico existen 2 puntos posibles de equilibrio indicado por 1 y 2. Hay que ver si alguno es estable para lo cual seguimos el siguiente análisis.
Separamos al sistema de la condición de equilibrio y observamos como reacciona.

a) Si la reacción representa una vuelta a la condición inicial el equilibrio es estable

b) Si la reacción del sistema es tal que tiende a alejar aún mas de las condiciones iniciales el equilibrio es inestable.

En el punto 1 tenemos que la velocidad de giro es ω_1
Si se frena al motor la Cupla motora C_{m1} disminuye frenandose aún mas alejandose de la posición de equilibrio
Si se aumenta la velocidad de giro vemos que C_m se hace mas grande aumentando mas la velocidad de giro.
Lo que indica que el punto 1 es de equilibrio inestable.
En el punto 2 la velocidad de giro es ω_2, si se frena al motor la cupla motora crece haciendose mayor que la resistente acelerando nuevamente al motor tendiendo al punto de equilibrio inicial.
Si se acelera el motor la C_m se hace menor que C_r y se frena el motor.
Por lo que vemos que el único punto de equilibrio estable es el 2.
Este análisis fue para una cupla resistente $C_r = OM$, analizando para otros valores de cuplas resistentes vemos que hacia la derecha de $C_{m1\,max}$ -s corresponde a puntos de funcionamiento estable.

Observando el diagrama vemos que Cm es menor que Cr en el arranque, lo que impediría que el motor desamarre.
Si observamos las características del maximo vemos que la abcisa $\omega = (\omega s - R/L)$ depende de la resistencia del circuito electrico del rotor, en tanto que el valor de la ordenada de la cupla media maxima $\bar{C}m\,max = \frac{1}{4}\frac{\Phi m}{L}$ es independiente de esa resistencia. Ello nos indica la posibilidad de desplazar la abcisa sin variar la ordenada.
Es decir modificando la resistencia electrica el circuito del rotor podemos variar la velocidad a la cual se produce el maximo.
Incrementando R podemos llevar el punto S al origen haciendo que la cupla en el arranque sea máxima
Para variar la resistencia del rotor mediante un control exterior, abrimos la espira y a travez de anillos de contacto sobre los cuales apoyan dos escobillas intercolamos una resistencia variable Ra.
Entonces la abcisa del maximo es $\omega = \left[\omega s - \frac{(R + Ra)}{L}\right]$.
Si modificamos Ra podemos llevar la abcisa del maximo al valor que deseamos.
Otra variante es representar la Cm en funcion del resbalamiento $S = \frac{\omega R}{\omega s}$



Las diversas curvas corresponden a distintas resistencias rotoricas y son las representaciones graficas de $C = f(S)$

...supo nemos que el motor debe proporcionar una Cupla resistente Constante C_r

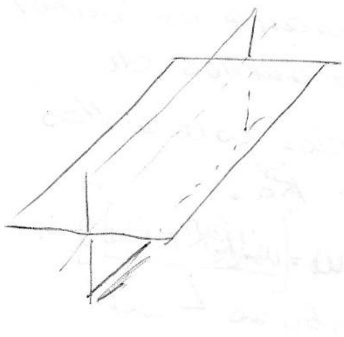
En la intersección F se localizará el funcionamiento a la velocidad ω_1 adoptando una resistencia Rotórica que corresponde a la Curva 1 $R_2 = R + R_a$

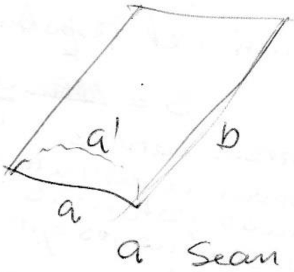
Si el mecanismo exige mas cupla por ej C'_r el funcionamiento se localizará en F' a la velocidad algo menor.

A aumentos de Cupla la máquina responde de igual forma hasta G valor máximo de Cupla.

de G a A el funcionameto es inestable.

La Cupla que hemos Calculado Corresponde a una Sola espira para aumentar la potencia mecánica se multiplica el número de espiras, considerando espiras en planos verticales, a 45°C etc.





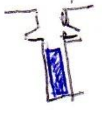
Se observa que el lado a cumple la función de unir los lados b, entonces no es necesario que los los lados a esten en el mismo plano que los b y podrían tomar la forma de a', que deben Cumplir Con la Condición de estar en planos normales a los b para que no haya Fuerzas y se cumpla que las Fuerzas que actuan sobre los lados a Sean absorbidos por el Vínculo.

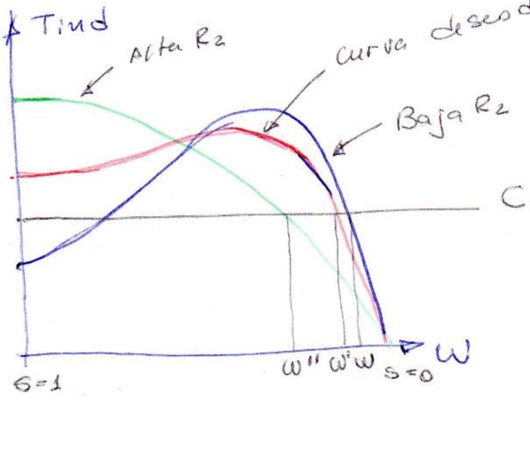
Esto nos lleva a unir los Conductores b (activos) con un anillo en lugar de hacerlo Con conductores diametrales constituyendo un motor en jaula de ardilla.

das estas maniobras son posibles en los motores
rotor bobinado.. Pero como controlar la cupla en
motores con rotor a jaula de ardilla. Se
construyen motores a doble Jaula ó ranura profunda
mbien denominados de alta cupla de arranque, que
atan de lograr las cualidades funcionales de los
os a rotor bobinado

La jaula exterior es de alta resistencia y baja reactancia y la interior de baja resistencia y alta reactancia

mo en el arranque $S = 1 \Rightarrow f_2 = f_1$, la corriente I_{2S}
establece preferentemente por la jaula exterior.
ando el motor toma velocidad baja la frecuencia f_2 del rotor
la reactancia interior disminuye y actua preferentemente esta
n su resistencia menor.
motores con ranura profunda son mas económicos y
túan bajo el mismo principio. donde la parte profunda
comporta como la jaula interior.





$$\boxed{P_{CONV} = (1-S) P_{AG}}$$