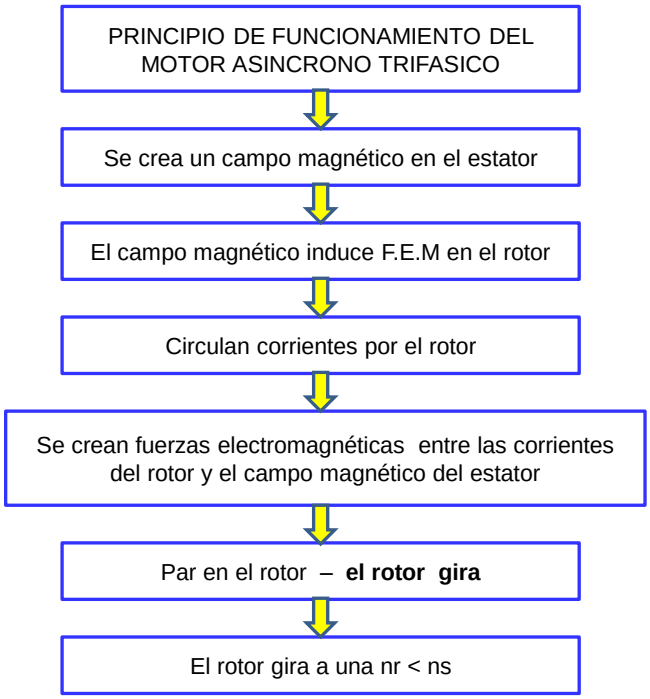
COMO FUNCIONA UN MOTOR?



TEORIA DE LA MODULACION EN DEVANADOS PARA LOGRAR MOTOR ASINCRONO TRIFASICO DE DOS VELOCIDADES

La teoría de la modulación consiste en la modificación del número de polos del bobinado estatorico, según cierta ley física previamente determinada. Comenzaremos con el estudio de la f.m.m en motores asíncronos trifásico convencionales, para luego analizar, aplicamos los métodos analíticos y gráficos de f.m.m en motores asíncronos trifásicos de dos velocidades usando un solo devanado PAM. Seguidamente estudiaremos la modulación cuasi sinusoidal en sus diferentes formas.

MODULACION DE LA AMPLITUD DE LA ONDA DE F.M.M EN DEVANADOS TRIFASICOS.

Para realizar el estudio de la teoría de modulación tenemos los métodos analíticos y gráficos, los que veremos a continuación,

METODO ANALITICO.

En los motores asíncronos trifásicos las fuerzas magnetomotrices (F.M.M) están desfasados 120 grados magnéticos en el espacio y en el tiempo.

Distribución espacial de F.M.M.

En las máquinas eléctricas pueden crearse distribuciones de F.M.M de diferentes tipos dependiendo del tipo de corriente en el bobinado.

Sabemos que en un bobinado en “P grupos” por fase la F.M.M viene dado por:

$$F_\delta(\psi) = \frac{4}{\pi}\frac{N_{fase}}{P} I_a \sum_{\delta=1}^{\infty} \frac{1}{\delta}(\sin\delta\frac{\pi}{2})^2\, Kb\delta cos\delta\psi^I \quad \dots\dots\dots\dots 1.1$$

Por motivo de análisis consideramos solo la fundamental, entonces la F.M.M será:

$$F_1(\psi) = \frac{4}{\pi}\frac{N_{fase}}{P} I_a\, Kbl\ \ cos\psi^I \dots\dots\dots..1.2$$

Sea:

$$ia = i_{max} coswt \dots\dots\dots..1.3$$

$$i_{max} = \sqrt{2} I_{ef}$$

$$i_{max} = \sqrt{2} I_{ef} coswt$$

$$\psi^I = \frac{P}{2}\psi \quad \dots\dots\dots 1.4$$

Reemplazando.

$$F_1(\psi) = \frac{4}{\pi}\frac{N_{fase}}{P} Kbl\sqrt{2}\, I_{ef}\ coswt \quad cos\ \frac{P}{2}\psi$$

$$F_1(\psi) = F_{1\ max}.coswt \quad cos\ \frac{P}{2}\psi \quad \dots\dots.1.5$$

$$\psi^I = grados\ electricos$$

$$\psi = grados\ magneticos$$

La ecuación 1.5 corresponde a una onda que pulsa en el tiempo según la ley cosenoidal y que está distribuida en el espacio según la misma ley.
Sean 3 ondas de F.M.M pulsantes de igual amplitud cuyos ejes desfasados 120^0 eléctricos en el espacio y que las corrientes alternas que le dieron origen estén desfasados en el tiempo 120 grados siendo.

$$ia = \sqrt{2}\, I\ coswt \qquad ib = \sqrt{2}\, I \cos(wt - 120^0) \qquad ic = \sqrt{2}\, I \cos(wt + 120^0)$$

En cada fase a, b, c habrá una F.M.M pulsantes, pues es un bobinado alimentado con corrientes alterna, los cuales se pueden expresar:

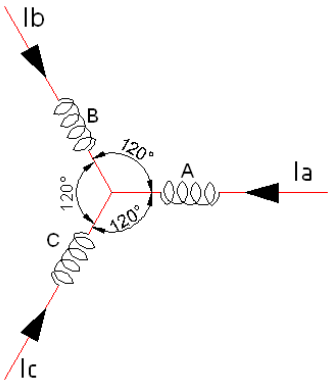


Fig.1.1 Bobinas estatóricas desfasadas 120 grados

$$F_a(\psi,t) = F_{MAX}.\ cos\ \psi\ coswt$$

$$F_b(\psi,t) = F_{MAX}.\ cos\ (\psi - 120^0)\cos(wt - 120^0)$$

$$F_c(\psi,t) = F_{MAX}.\ cos\ (\psi + 120^0)\cos(wt + 120^0)$$

$$\psi\ \ \pm\ 120^0 = desfasaje\ en\ el\ espacio$$

$$wt\ \pm\ 120^0 = desfasaje\ en\ el\ espacio$$

Descomponiendo cada F.M.M pulsante en dos campos giratorios tendremos:

$$F(\psi,t) = F_{MAX}.cos\ \psi.coswt$$

$$coswtcos\ \psi = \frac{1}{2}\ COS(\psi + wt) + \frac{1}{2}\ COS(\psi - wt)$$

$$F(\psi,t) = F(\psi,t)^{(-)} + F(\psi,t)^{(+)}$$

$$F(\psi,t) = \frac{F_{MAX}}{2}(COS(\psi + wt) + COS(\psi - wt))$$

$F^{(+)}(\psi,t)$ Es una onda que se desplaza en sentido positivo del eje de referencia.

$F^{(-)}(\psi,t)$ Es una onda que se desplaza en sentido negativo del eje de referencia.

Por lo tanto una f.m.m pulsante puede descomponerse en dos ondas que giran en sentido opuestos con amplitudes iguales cuyo valor es igual a la mitad de amplitud de la F.M.M pulsante. Aplicando esta teoría tenemos que:

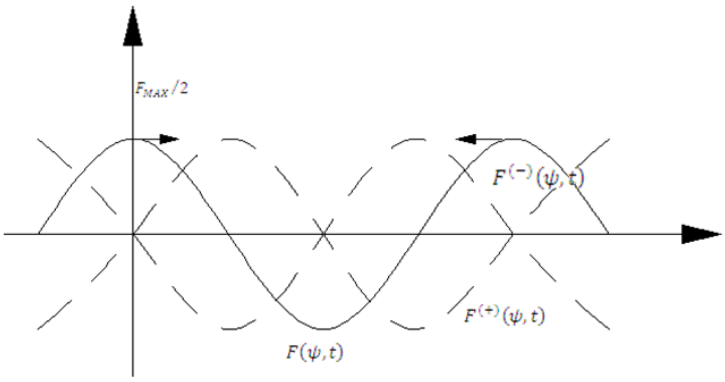


Fig. 1.2 descomposición de una onda pulsante en dos ondas giratorias

$$(\psi \pm 120^0) - (wt \pm 120^0) = \psi - wt$$
$$(\psi \pm 120^0) + (wt \pm 120^0) = \psi + wt \pm 120^0$$

$$F_a(\psi,t) = \frac{F_{MAX}}{2}.\ cos\ (\psi - wt) + \frac{F_{MAX}}{2}\cos(\psi + wt) \ldots (1.9)$$

$$F_b(\psi,t) = \frac{F_{MAX}}{2}.\ cos\ (\psi - wt) + \frac{F_{MAX}}{2}\cos(\psi - 240) \ldots (1.10)$$

$$F_b(\psi,t) = \frac{F_{MAX}}{2}.\ cos\ (\psi - wt) + \frac{F_{MAX}}{2}\cos(\psi + 240) \ldots (1.10)$$

Sumando (1.9), (1.10), (1.11) tenemos:

$$F_a(\psi,t) + F_b(\psi,t) + F_c(\psi,t) = F_R(\psi,t)$$
$$F_R(\psi,t) = \frac{F_{MAX}}{2}(3\ cos\ (\psi - wt) + \cos(\psi + wt) + \cos(\psi - 240) \ldots \ldots \ldots \ldots (1.12)$$

$$cos\ (\psi - wt) + cos\ (\psi + wt - 240) + cos\ (\psi + wt + 240) = 0 \ldots \ldots \ldots (1.13)$$

Reemplazando (1.13) en (1.12) obtendremos:

$$F_R(\psi,t) = \frac{3}{2}F_{MAX}.cos\ (\psi - wt) \ldots \ldots \ldots (1.14)$$

Por lo tanto de un campo magnético giratorio se puede obtener tres campos pulsantes sinusoidales que están desfasados entre si y en el tiempo 120^0 grados.

F.M.M en un bobinado trifásico

En un bobinado 3∅ puede crearse una F.M.M giratoria si se cumple las siguientes condiciones.

- Las 3 fases estén desfasados en el espacio 120^0 grados eléctricos.
- Las corrientes que circulen por las fases estén desfasados 120 grados en el tiempo.

La primera condición puede cumplir si al colocar las fases en las ranuras, estas se colocan desfasados 120 grados eléctricos.

Por ejemplo: teniendo un motor asíncrono trifásico de 4 polos y 36 ranuras.

Cada ranura tiene un Angulo de:

$$\gamma_r^I = \frac{360}{36} = 10$$
$$\gamma_r^I = \frac{P}{2}\gamma_r = \frac{4}{2}10 = 20^0$$

$$\gamma_r^I = angulo\ de\ ranura\ en\ grados\ \ electricos$$

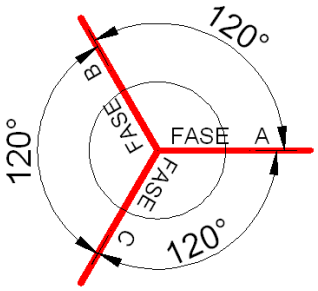


Fig. 1.3 devanados desfasados 120^0 eléctricos.

Si la fase A empieza en la ranura 1, la fase B tendrá que comenzar en la ranura 7 pues porque entre 1 y 7 hay 120 grados eléctricos: la fase C comenzara en la ranura 13.

La segunda condición se logra excitando el bobinado con la tensión trifásica balanceada y como el bobinado es simétrico dará lugar a corriente trifásica que tiene la forma:

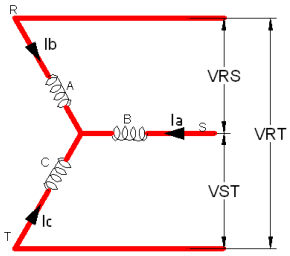


Fig. 1.4 desfasaje de las corrientes estatoricos.

Las corrientes trifásicas están desfasados 120 grados eléctricos en el tiempo.

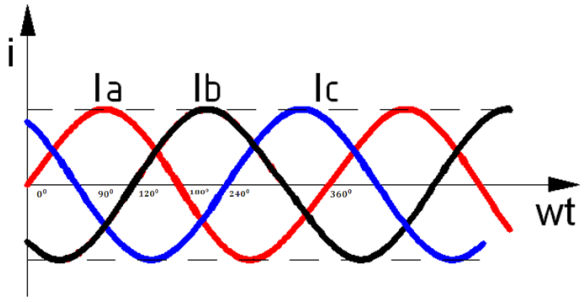


Fig. 1.5 corrientes desfasadas en el tiempo.

La F.M.M de cada fase puede expresarse en forma general como:

$$F_a(\psi^I, t) = sen^2\delta.90^0.F\delta_{\ MAX}.cos\delta\psi^I coswt \ldots\ldots\ldots..(1.15)$$

$$F_b(\psi^I,t) = sen^2\delta.90^0.F\delta_{\ MAX}.cos\delta(\psi^I - 120^0)cos\delta(wt - 120^0) \ldots..(1.16)$$

$$F_c(\psi^I,t) = sen^2\delta.90^0.F\delta_{\ MAX}.cos\delta(\psi^I + 120^0)cos\delta(wt + 120^0) \ldots..(1.17)$$

Sumando las tres ondas de F.M.M tenemos:

$$F_R\delta(\psi^I,t) = sen^2\delta.90^0.F\delta_{\ MAX}(\ cos\delta\psi^I cos\delta wt + cos\delta(\psi^I - 120^0)cos\delta(wt - 120^0) + cos\delta(\psi^I - 120^0)cos\delta(wt - 120^0) \ldots\ldots\ldots..(1.18)$$

Desarrollando:

$$\cos(\delta\psi^I)\,coswt = \frac{1}{2}\cos(\delta\psi^I + wt) + \frac{1}{2}\cos(\delta\psi^I - wt) \ldots\ldots\ldots(1.19)$$

$$\cos\delta(\psi^I - 120^0)\cos(wt - 120^0) = \frac{1}{2}(\cos\big(\delta\psi^I + wt - 120^0(\delta - 1)\big) + \frac{1}{2}(\cos\big(\delta\psi^I - wt - 120^0(\delta - 1)\big) \quad \ldots\ldots\ldots..(1.20)$$

$$\cos\delta(\psi^I + 120^0)\cos(wt + 120^0) = \frac{1}{2}(\cos\big(\delta\psi^I + wt + 120^0(\delta + 1)\big) + \frac{1}{2}(\cos\big(\delta\psi^I - wt + 120^0(\delta - 1)\big) \quad \ldots\ldots\ldots..(1.21)$$

$$\cos\big(\delta\psi^I - wt - 120^0(\delta - 1)\big) = \cos(\delta\psi^I - wt)\,cos120(\delta - 1) + \mathrm{sen}(\delta\psi^I - wt)\,sen120(\delta - 1)$$

$$\cos\big(\delta\psi^I - wt + 120^0(\delta - 1)\big) = \cos(\delta\psi^I - wt)\,cos120(\delta - 1) - \mathrm{sen}(\delta\psi^I - wt)\,sen120(\delta - 1)$$

Sumando estas dos igualdades:

$$\cos\big(\delta\psi^I - wt - 120^0(\delta - 1)\big) + \cos\big(\delta\psi^I - wt + 120^0(\delta - 1)\big) = 2\cos(\delta\psi^I - wt)\,cos120(\delta - 1) \ldots..(1.22)$$

En forma análoga:

$$\cos\big(\delta\psi^I + wt - 120^0(\delta + 1)\big) + \cos\big(\delta\psi^I + wt + 120^0(\delta + 1)\big) = 2\cos(\delta\psi^I + wt)\,cos120(\delta + 1) \ldots..(1.23)$$

Reemplazando (1.22) y (1.23) en (1.18):

$$F_R\delta(\psi^I,t) = \frac{1}{2}F\delta_{\ MAX}.sen^2\delta.90^0.\big(\cos(\delta\psi^I + wt) + \cos(\delta\psi^I + wt) + 2cos(\delta\psi^I - wt)cos120^0(\delta - 1) + 2cos(\delta\psi^I + wt)cos120^0(\delta + 1)\big) \ldots..(1.18)$$

$$F_R\delta(\psi^I,t) = \frac{1}{2}F\delta_{\ MAX}.sen^2\delta.90^0.(\cos(\delta\psi^I + wt)\ (1 + 2cos120^0(\delta + 1)) + \cos(\delta\psi^I - wt)(1 + 2cos120^0(\delta - 1)\ )) \ldots.\ldots\ldots.(1.24)$$

En la ecuación (1.24) el termino $\cos(\delta\psi^I + wt)$ indica el campo que gira, hacia atrás o sentido contrario.

El término $\cos(\delta\psi^I - wt)$ indica el campo que gira hacia adelante.

El termino δ es el orden del armonico de la F.M.M en un bobinado trifásico dando valores a δ en la expresión (1.24).

Generalizando podemos decir:

-los armónicos pares no existen (q constante)
-los armónicos 3 y sus múltiplos tampoco existen.

δ	$F_R\delta(\psi^I, t)$
1	$(3/2)\, F_{1\,max}\cos(\psi^I - wt)$
2,4 …	0
3,6…	0
5	$(3/2)\, F_{5\,max}\cos(5\psi^I + wt)$
7	$(3/2)\, F_{7\,max}\cos(7\psi^I - wt)$
11	$(3/2)\, F_{11\,max}\cos(11\psi^I + wt)$
13	$(3/2)\, F_{13\,max}\cos(13\psi^I - wt)$
17	$(3/2)\, F_{17\,max}\cos(17\psi^I + wt)$

F.M.M de un devanado trifásico

-los armónicos 1, 7, 13,19 giran en sentido inverso al de la onda fundamental.
-los armónicos 5, 11, 17,23 giran en sentido inverso al de la onda fundamental.

$$F_R\delta(\psi^I, t) = \frac{3}{2} F_{\ \delta MAX}\cos(\delta\psi^I \pm wt) \ \ldots\ldots..(1.25)$$

$donde$

Siendo k=0, 1, 2,3……n

F.M.M en devanados PAM.
Se sabe que las fuerzas magneto motrices están desfasados 120 grados magnéticos (grado .geométricos)
En el espacio y que la componente fundamental de estas ondas periódicas pueden expresarse como ondas sinusoidales
Así se tiene que las ondas de f.m.m de las tres fases son:

$$f.m.m(a) = Fia\ \ senP\psi S \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1.26)$$

$$f.m.m(b) = Fib\ \ sen(P\psi S - 120) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1.26)$$

$$f.m.m(c) = Fic\ \ sen(P\psi S - 240) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1.26)$$

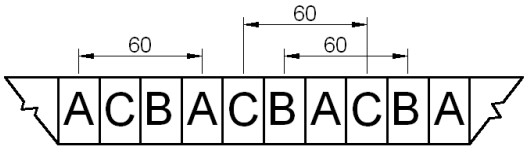
Donde

$$F = q\frac{N_C}{K_b} \ldots\ldots\ldots.(1.29)$$

q=bobinas por grupo

N_C=numero de espiras / bobina.
K_b=factor de bobinado
P=numero de pares de polos
ψ_S=angulo geometrico

LA DISTRIBUCION DEL arrollamiento se supone es una secuencia ABC en la dirección del crecimiento de ψ_S los grupos formados tienen una distribución de 60^0magneticos con una secuencia de grupos A,-C, B,-A, C,-B siempre en la dirección del decrecimiento de ψ_S



Si la amplitud F la F.M.M que normalmente es constante una ley de formación sinusoidal respecto siguiera una ley de formación sinusoidal respecto a ψ_S, entonces se podría decir que la amplitud estaría siendo modulada .estas leyes de formación podrían ser las siguientes:

$$F = F_1 senK\psi_S \qquad fase\ A \qquad (1.30)$$
$$F = F_1 sen(K\psi_S - \alpha) \qquad fase\ B \qquad (1.31)$$
$$F = F_1 sen(K\psi_S - \beta) \qquad fase\ C \qquad (1.32)$$

$$\beta = 2\alpha \qquad (1.33)$$
$$k = numero\ de\ ciclos\ moduladores\ para \quad 0 < \psi_S < 2\pi$$
$$\alpha = angulo\ de\ desfasaje\ entre\ la\ sondas\ moduladoras\ de\ las\ fases.$$

Si estas ondas que modulan la amplitud de las ondas

De f.m.m (1.30), (1.31), (1.32) son reemplazados en (1.26), (1.27), (1.28) respectivamente se obtiene:

$$f.m.m(a) = i_a F_1\ senk\psi SsenP\psi S \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1.26)$$

$$f.m.m(b) = i_b F_1\ sen(k\psi - \alpha)Ssen(P\psi S - 120) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1.26)$$

$$f.m.m(c) = i_c F_1\ sen(k\psi - \beta)Ssen(P\psi S - 240) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1.26)$$

Aplicando la siguiente igualdad:

$$sen\alpha sen\beta = \frac{1}{2}(\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta))$$

En las ecuaciones: (1.34), (1.35), (1.36) tenemos que:

$$f.m.m(a) = \frac{1}{2} i_a F_1(\cos(P - K)\psi S - \cos(P + K)\psi S)$$

$$f.m.m(b) = \frac{1}{2} i_b F_1 \left(\cos\left((P - K)\psi S - (120 - \alpha)\right) - \cos((P + K)\psi S \quad - (120 - \alpha)\right))$$

$$f.m.m(b) = \frac{1}{2} i_b F_1 \left(\cos\left((P - K)\psi S - (120 - \alpha)\right) - \cos((P + K)\psi S \quad - (120 - \alpha))\right)$$

$$f.m.m(c) = \frac{1}{2} i_c F_1 \left(\cos\left((P-K)\psi S - (240-\beta)\right) - \cos((P+K)\psi S \quad - (240-\beta))\right)$$

Si ahora hacemos $\alpha = 120^0$ las ondas modulares se desfasan 120^0 y son aplicables en secuencia ABC en la dirección del crecimiento de ψ_S obtenemos:

$$f.m.m(a) = \frac{1}{2} i_a F_1 (\cos(P-K)\psi S - \cos(P+K)\psi S)$$

$$f.m.m(b) = \frac{1}{2} i_b F_1 \left(\cos\left((P-K)\psi S\right) - \cos((P+K)\psi S \quad - 240)\right)$$

$$f.m.m(b) = \frac{1}{2} i_b F_1 \left(\cos\left((P-K)\psi S\right) - \cos((P+K)\psi S \quad - 480)\right)$$

Sabemos que:
$i_a = \sqrt{2} ICOSwt$
$i_a = \sqrt{2} ICOS(wt - 120)$
$i_a = \sqrt{2} ICOS(wt - 240)$

Estos valores de corriente (1.40), (1.41) y (1.42) son reemplazados en (1.37), (1.38) y (1.39).

En estas condiciones, los tres primeros componentes se combinan para dar como resultado una f.m.m igual a cero quedando un campo giratorio en la dirección creciente de ψ_s por combinación de los otros componentes.

$$F_t = \frac{3}{2} F_{MAX} COS\left((P-K)\psi S - wt\right) \ldots\ldots\ldots.(1.43)$$

Si en cambio hacemos $\alpha = -120^0$las ondas modulares se desfasan también 120 grados en una secuencia 120 grados en una ACB en la dirección del crecimiento de ψ_S

Lo que resulta que:

$$f.m.m(a) = \frac{1}{2} i_a F_1 (\cos(P-K)\psi S - \cos(P+K)\psi S)$$

$$f.m.m(b) = \frac{1}{2} i_b F_1 \left(\cos\left((P-K)\psi S - 240\right) - \cos((P+K)\psi S \quad)\right)$$

$$f.m.m(b) = \frac{1}{2} i_b F_1 \left(\cos\left((P-K)\psi S - 480\right) - \cos((P+K)\psi S \quad)\right)$$

Ahora como la secuencia será ABC tonamos las corrientes (A.5), (A.6), (A.7) que reemplazadas y realizando la superaciones convenientes.

$$F_t = \frac{3}{2} F_{MAX} COS\left((P-K)\psi_S - wt\right) \ldots\ldots\ldots.(1.47)$$

La ecuación 1.47 es el resultado de sumar las f.m.m de las fases en un campo giratorio con giro en sentido decreciente de ψ_S

METODO GRAFICO.

Es el más sencillo de entender ya que a partir de la f.m.m de una velocidad se obtiene la f.m.m en la otra velocidad.

Para su mejor entendimiento analizamos este método en dos etapas:

cuando la relación de velocidades es de 2 a 1 se trata de los devanados de polos consecuentes, teniendo en cuenta que $n_1 = \frac{f_1}{p}$

Si f1 es dado, entonces variando P se variara las velocidad síncrona y por ende la velocidad del motor

Solamente nos referimos cuando utilizamos un único devanado estatórico para conseguir un motor de dos velocidades.se ha hecho esta mención pues se pueden lograr motores de dos velocidades con devanados estatórico.