

Teoría de los motores paso a paso

Capítulo 1

Construcción

- Reluctancia Variable
- Magneto permanente
- Híbrido

Capítulo 2

Resolución de motor por pasos y ángulo de paso .

- Vectores de flujo

Capítulo 3

Operación

- Secuencias de conmutación de fase

Capítulo 4

Características de los motores por pasos

- Torque estático o de mantenimiento - características de desplazamiento .
- Angulo de carga estático .
- Torque de fricción
- Tolerancia sistemática de ángulo
- Resonancia

Definición de frecuencia de arranque/parada .

Construcción

Los motores por pasos son dispositivos electromagnéticos , rotativos , incrementales que convierten pulsos digitales en rotación mecánica .

La cantidad de rotación es directamente proporcional al número de pulsos y la velocidad de rotación es relativa a la frecuencia de dichos pulsos .Los motores por pasos son simples de operar en una configuración de lazo cerrado y debido a su tamaño proporcionan un excelente torque a baja velocidad .

Los beneficios ofrecidos por estos motores incluyen :

- un diseño efectivo y un bajo costo .
- alta confiabilidad
- libres de mantenimiento (no disponen de escobillas)
- lazo abierto (no requieren dispositivos de realimentación)
- límite conocido al "error de posición dinámica "

A pesar de que varios tipos de motores por pasos han sido desarrollados , todos los mismos caen dentro de tres categorías básicas .

1. de reluctancia variable (V.R.)
2. de magneto permanente (armazón metálica)
3. híbridos

El tipo de motor de reluctancia variable o V.R. (fig. 1) consiste en un rotor y un estator cada uno con un número diferente de dientes . Ya que el rotor no dispone de un magneto permanente el mismo gira libremente , o sea que no tiene torque de detención . A pesar de que la relación del torque a la inercia es buena , el torque dado para un tamaño de armazón dado es restringido , por lo tanto tamaños pequeños tamaños de armazones son generalmente usados y los mismos raramente varían para aplicaciones industriales .

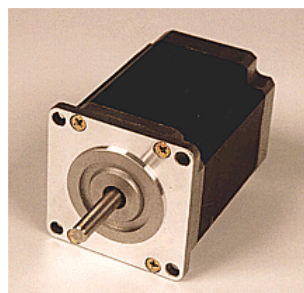
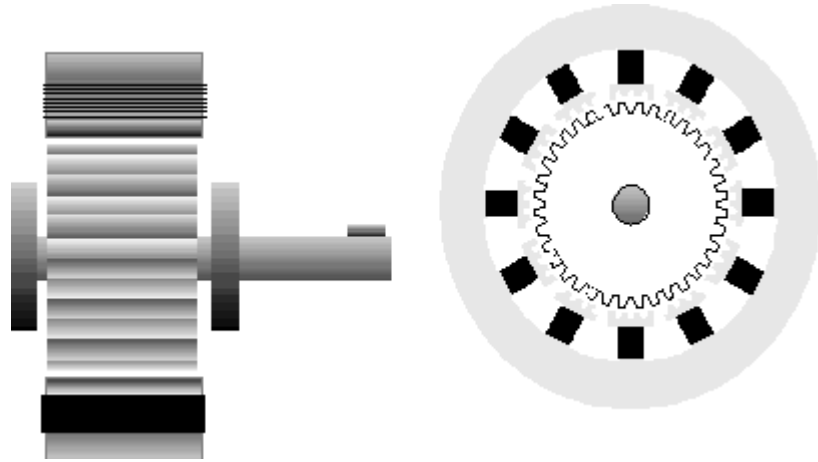


Figura 1. Vista de sección de un motor por pasos de reluctancia variable



El motor de magneto permanente (PM) o tipo enlatado (fig. 2) es quizá el motor por pasos mas ampliamente usado para aplicaciones no industriales . En su forma mas simple , el motor consiste en un rotor magneto permanentemente magnetizado radial y en un estator similar al motor V.R. . Debido a las técnicas de manufactura usadas en la construcción del estator , los mismos se conocen a veces como motores de "polo de uñas " o "claw pole" en Inglés .

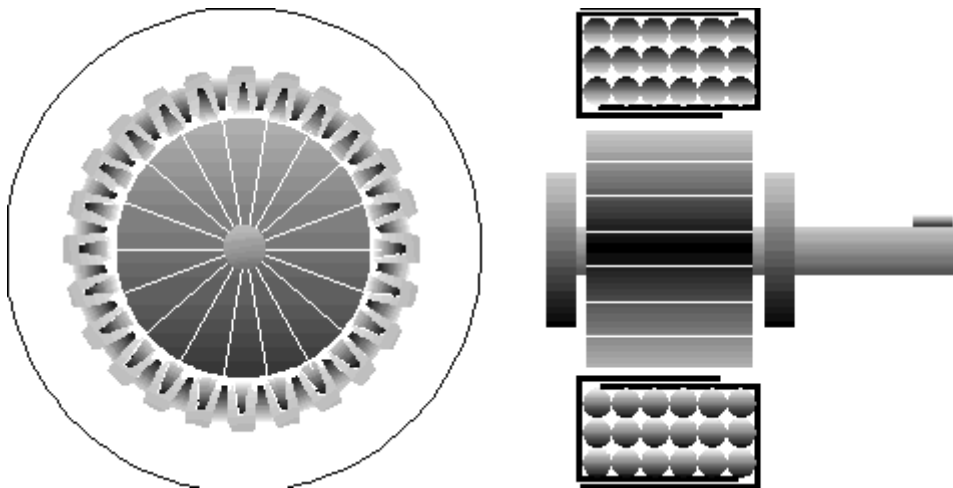


Figura 2 . Vista en sección de un magneto permanente .

El tipo Híbrido es probablemente el mas usado de todos los motores por pasos . Originalmente desarrollado como un motor PM sincrónico de baja velocidad su construcción es una combinación de los diseños V.R. y P.M. . El motor Híbrido consiste en un estator dentado y un rotor de tres partes (apilado simple) . El rotor de apilado simple contiene dos piezas de polos separados por un magneto permanente magnetizado , con los dientes opuestos desplazados en una mitad de un salto de diente (fig. 3) para permitir una alta resolución de pasos .

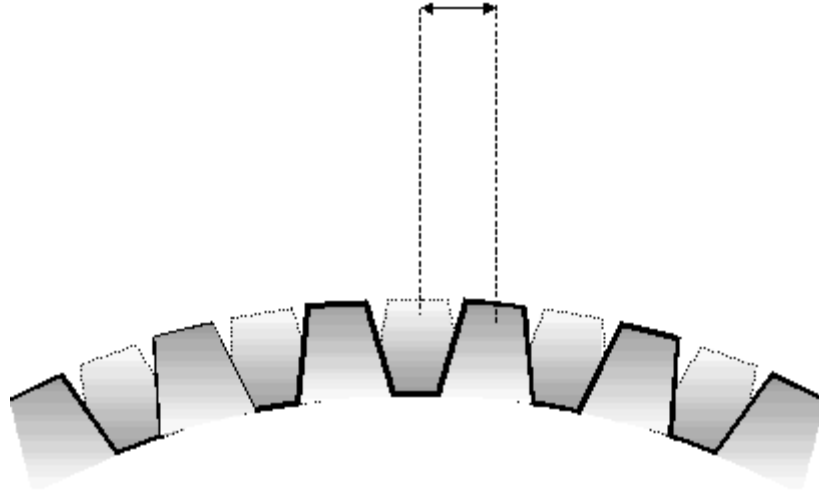


Figura 3. Vista expandida ilustrativa del desplazamiento de dientes .

El incremento de demanda de los sistemas de motor por pasos de reducido ruido acústico , con una mejora en el desempeño al mismo tiempo con reducción de costos fueron satisfechos en el pasado con los dos tipos principales de motores por pasos Híbridos . El tipo 2(4) fases que ha sido generalmente implementado en aplicaciones simples y el de 5 fases ha probado ser ideal para las tareas mas exigentes . Las ventajas ofrecidas por los motores de 5 fases incluían :

- Mayor resolución
- Menor ruido acústico
- Menor resonancia operacional
- Menor torque de frenado .

A pesar de que las características de los motores de 5 fases ofrecían muchos beneficios , especialmente en micro pasos , el creciente número de conmutaciones de alimentación y el cableado adicional requerido tenían un efecto adverso en el costo del sistema . Con el avance de la electrónica permitiendo circuitos de cada vez mayor grado de integración y mayores características , la fábrica SIG Positec vio una oportunidad y tomó la iniciativa en el terreno desarrollando tecnología de punta en motores por pasos .

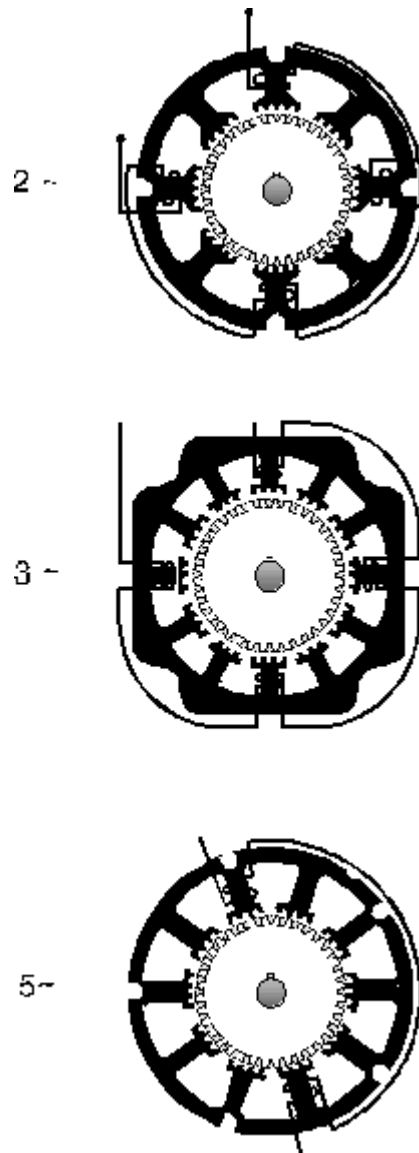


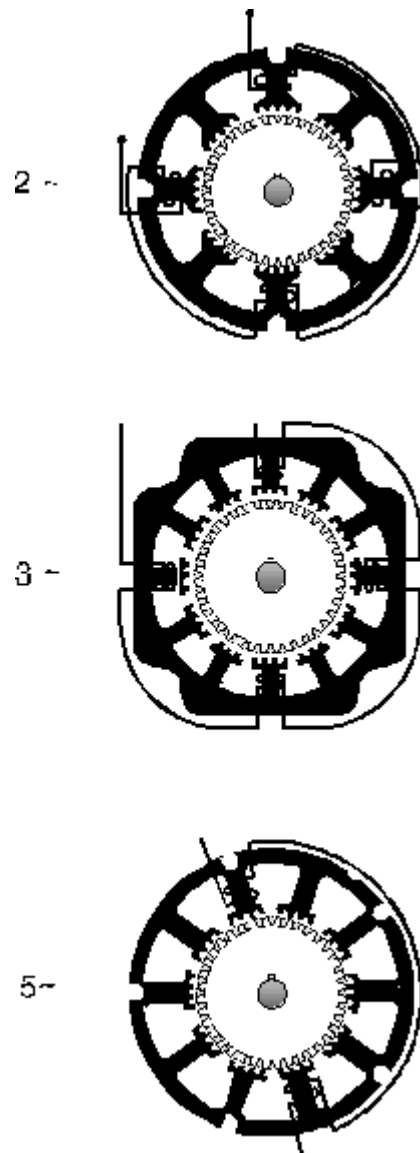
Figura 3. Vista expandida ilustrativa del desplazamiento de dientes .

El incremento de demanda de los sistemas de motor por pasos de reducido ruido acústico , con una mejora en el desempeño al mismo tiempo con reducción de costos fueron satisfechos en el pasado con los dos tipos principales de motores por pasos Híbridos . El tipo 2(4) fases que ha sido generalmente implementado en aplicaciones simples y el de 5 fases ha probado ser ideal para las tareas mas exigentes . Las ventajas ofrecidas por los motores de 5 fases incluían :

- Mayor resolución
- Menor ruido acústico
- Menor resonancia operacional
- Menor torque de frenado .

A pesar de que las características de los motores de 5 fases ofrecían muchos beneficios , especialmente en micro pasos , el creciente número de conmutaciones de alimentación y el cableado adicional requerido tenían un efecto adverso en el costo del sistema . Con el avance de la electrónica permitiendo circuitos de cada vez mayor grado de integración y mayores características , la fábrica SIG Positec

vio una oportunidad y tomó la iniciativa en el terreno desarrollando tecnología de punta en motores por pasos .



El motor Híbrido de 3 fases .

A pesar de ser similar en construcción a otros motores por pasos (ver figura 4) , la implementación de la tecnología de 3 fases hizo posible que el número de fases del motor sean reducida dejando al número de pares de polos del rotor y a la electrónica determinar la resolución (pasos por revolución) .

Figura 4 . Secciones ilustrativas de las laminaciones y rotores para motores de 2 , 3 y 5 fases .

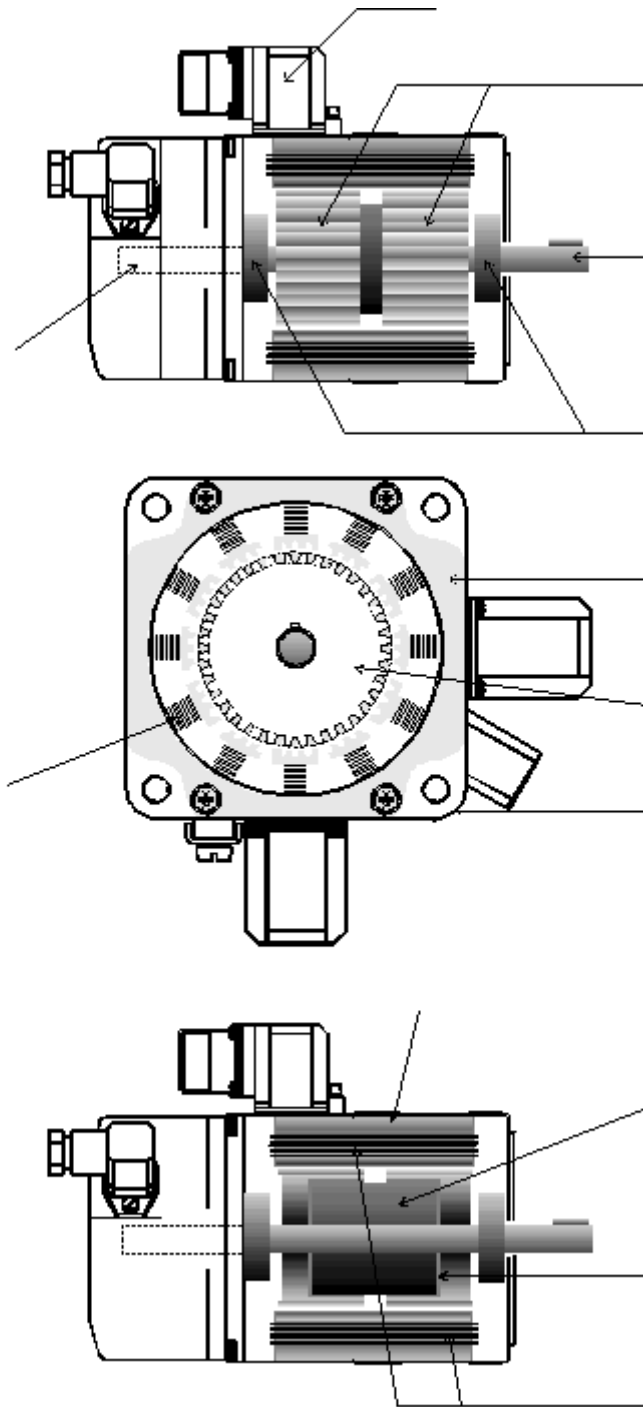


Figura 5 . Corte de sección de un motor por pasos Híbrido (3 fases) .

Dado que la tecnología de 3 fases ha sido usada por décadas como un método efectivo de generación de campos rotativos , las ventajas de éste sistema son evidentes en sí . El motor por pasos de 3 fases fue por lo tanto una progresión natural que incorporó todas las mejores características de un sistema de 5 fases a una significativa reducción de costo .

Resolución de un motor por pasos y ángulo de paso .

Como lo ya mencionado , la resolución (número de pasos) y el ángulo de paso de un motor por pasos depende de :

- El número de pares de polos del rotor ,
- El número de fases del motor ,
- El modo de impulsión (completa o medio paso)

La resolución puede ser calculada usando la fórmula :

$$z = p * m * k$$

El ángulo de paso puede ser calculado dividiendo la rotación (360) por el número de pasos ,

$$z = p * m * k$$

Ejercicio :

Calcule lo siguiente :

Un motor por pasos de dos fases impulsado en modo de medio paso completa un ángulo de 63.75° luego de moverse 17 pasos . ¿ Cuantos pares de polos tiene ?

Vectores de flujo :

Los vectores de flujo son usados para ilustrar los ángulos de paso naturales de los motores por pasos .

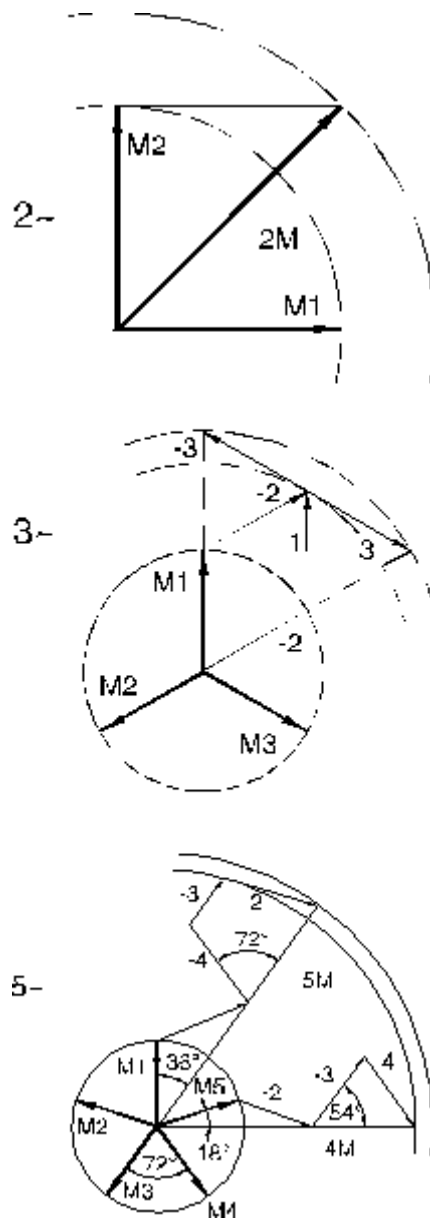


Figura 6 . Diagramas de vectores de flujo para motores de pasos de 2 , 3 y 5 fases

. Si las corrientes de fases son conmutadas en pequeños incrementos , estos vectores de campo puede apuntar virtualmente en cualquier dirección .

Operación

Secuencia de conmutación de fases .

Para permitir la rotación ,el campo magnético generado por las bobinas del estator debe moverse . Esto se lleva a cabo conmutando la dirección del flujo corriente a través de cada bobinado

Paso completo : usando un motor simple de dos fases con un par de polos como ejemplo , la secuencia de conmutación de fases al ser impulsado en modo completo es como sigue :

(fig. 7a) Arranque = Paso ángulo 0 - Bobinados W1 y W2 son energizados produciendo un polo norte y sur que atrae los respectivos polos del rotor y mantienen en rotor en posición .

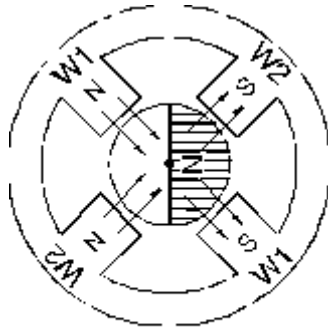


Figura 7a

(fig. 7b) Paso 1 = ángulo de paso de 90° - El bobinado W1 permanece igual pero el flujo de corriente en el bobinado W2 es conmutado (invertido) . Esto resulta en un movimiento del campo magnético del estator que el rotor sigue hasta que éste se ubique en la nueva posición .

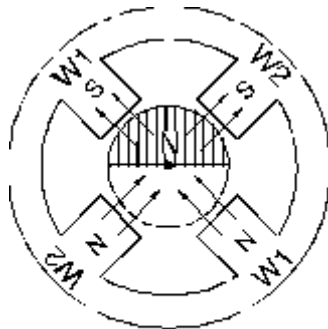


Figura 7b



Figura 7c

(fig. 7c) Paso 2 = ángulo de paso de 180° - Esta vez el flujo corriente en el bobinado W1 es conmutado (invertido) y W2 se mantiene igual . Nuevamente , el campo magnético del estator se mueve , el rotor gira y se ubica en la nueva posición .

(fig. 7d) Paso 3 = ángulo de paso de 270° - El bobinado W1 se mantiene como antes , el flujo de corriente en W2 es conmutado (invertido) y el rotor , el rotor gira y se ubica en la nueva posición .

posición .



Figura 7d

Las fases de conmutación pueden luego retornar el rotor a la posición inicial o la secuencia de conmutación puede ser revertida . Los diagramas de corriente pueden además ser usados para ilustrar las secuencias de conmutación como sigue :

Figura 8 : Diagrama de corriente para un motor por pasos de 2 fases impulsado en modo de paso completo .

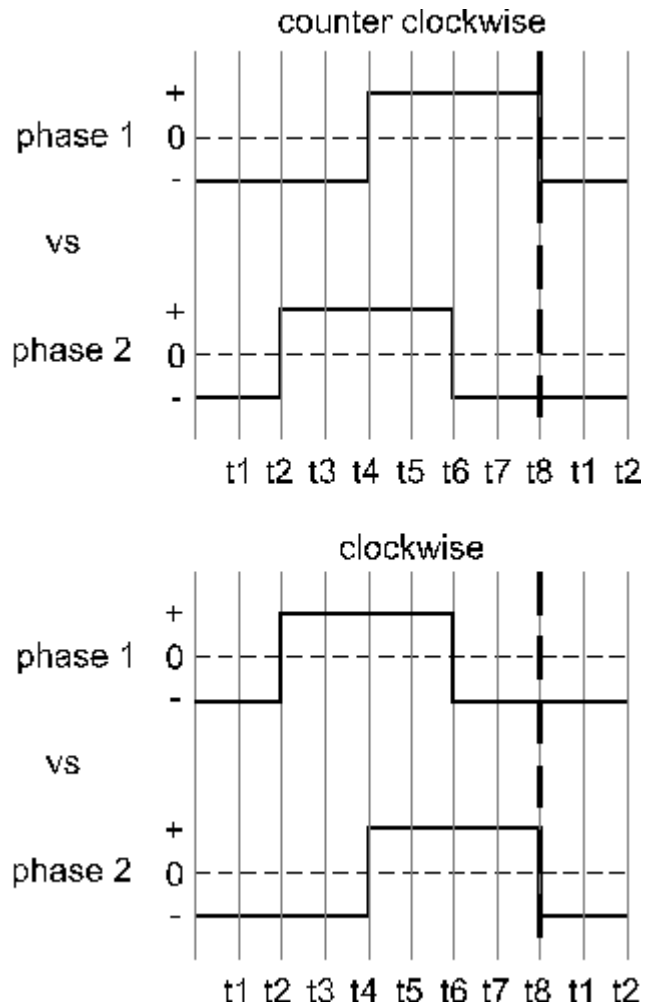


Fig. 8-1 : Diagrama de corriente para un motor por pasos de 2 fases impulsado en modo de pasos completos .

Medio paso : Usando el mismo motor por pasos impulsado en modo de medio paso dobla la resolución (pasos por rotación) . A pesar de que la secuencia de conmutación es similar , en vez de simplemente invertir el flujo de corriente a través de una fase , una fase es desconectada , permitiendo al rotor que siga y toma aún mas posiciones . La secuencia para una rotación es como sigue :

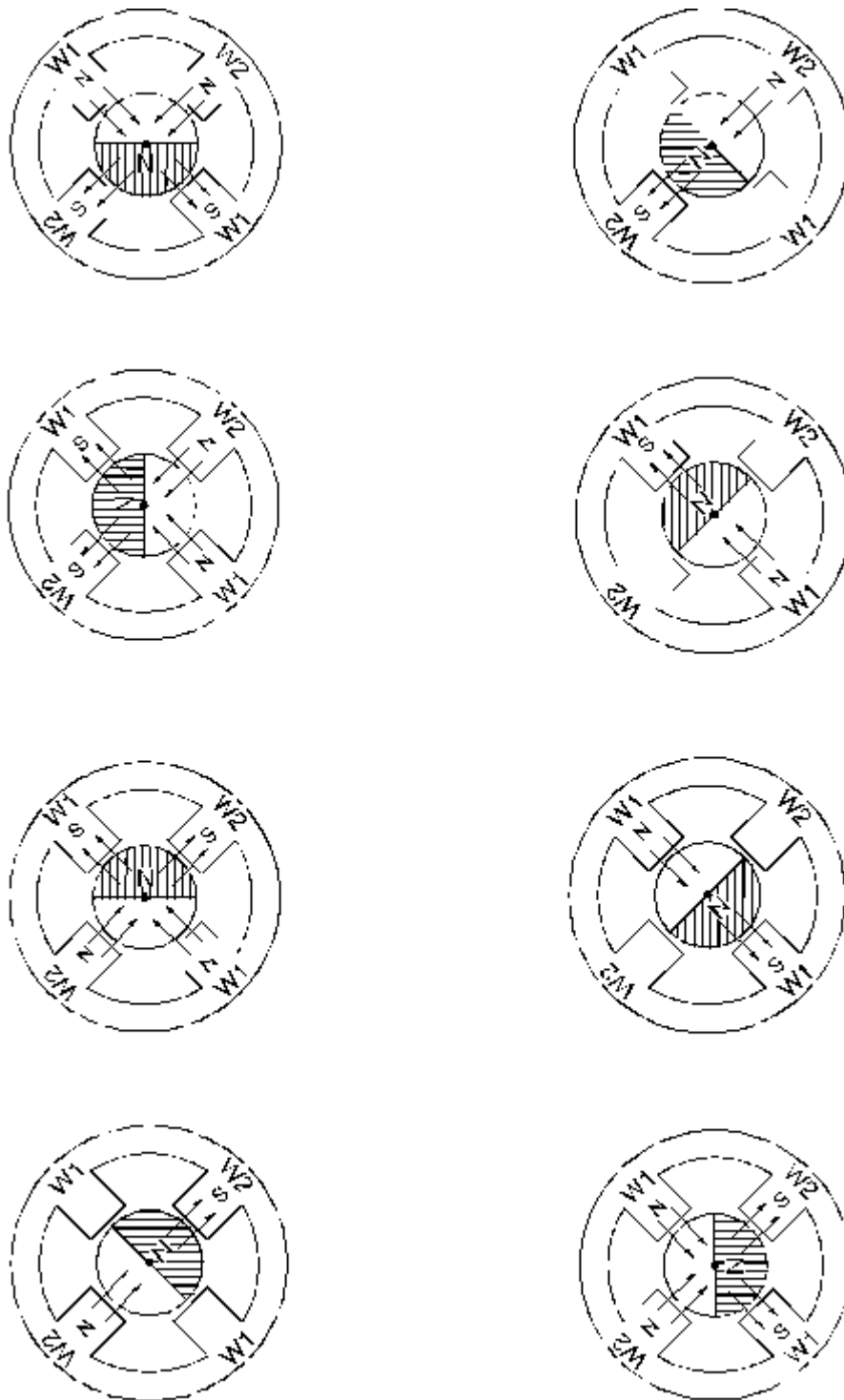


Figura 9 : Secuencia de rotación para un motor por pasos de 2 fases en medio paso .

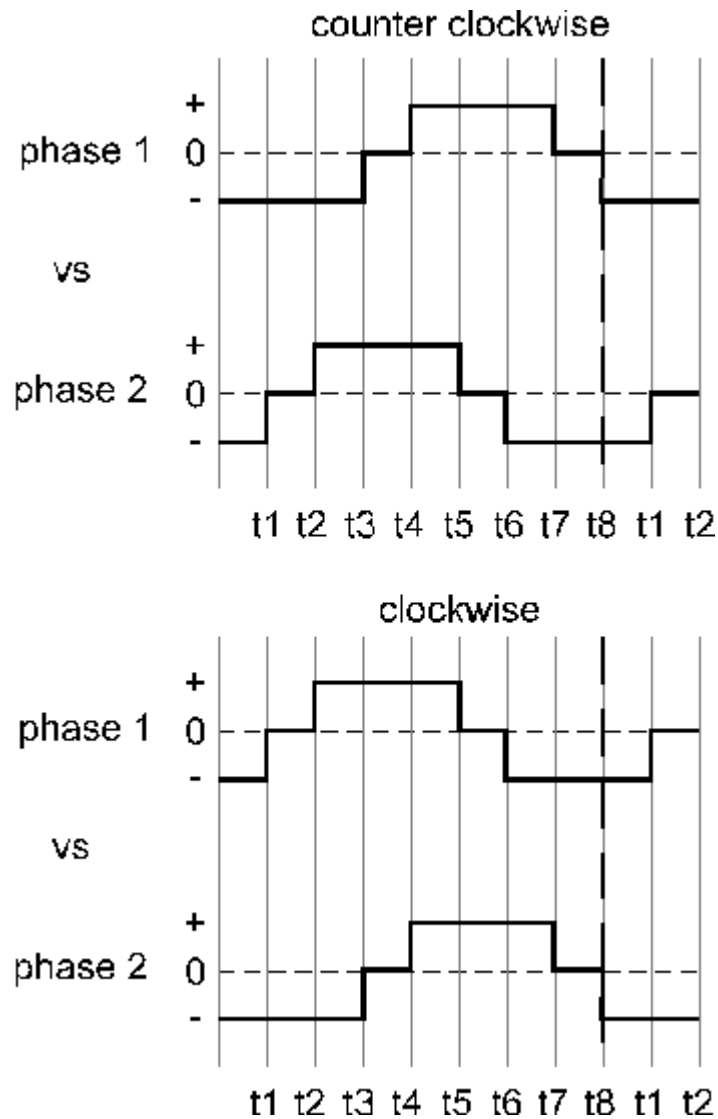


Figura 10 Diagrama de corriente para un motor por pasos de 2 fases impulsado en medio paso .

Al usar estos modelos simplificados , hemos demostrado el principio operacional de los motores por pasos de 2 fases . Esta conmutación paso a paso de corriente resulta en un campo rotativo " virtual" que el rotor de magneto permanente luego sigue .

La Figura 11 ilustra esta conmutación paso a paso de corriente para un motor de 3 fases en medio paso y su correspondiente diagrama de corriente . La operación de paso completo ocurre cuando sólo los números pares (t) son usados en la secuencia de pasos .

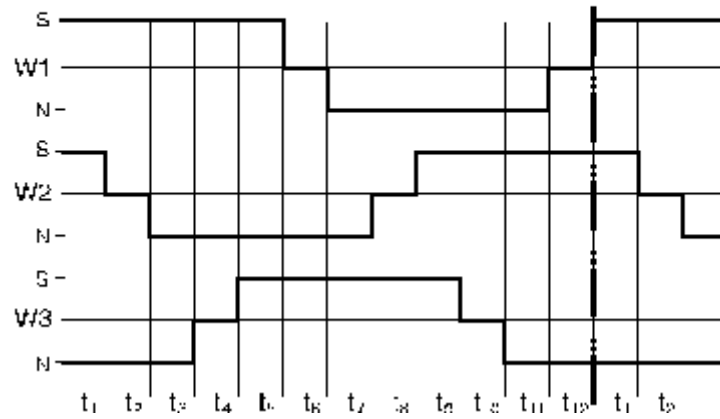
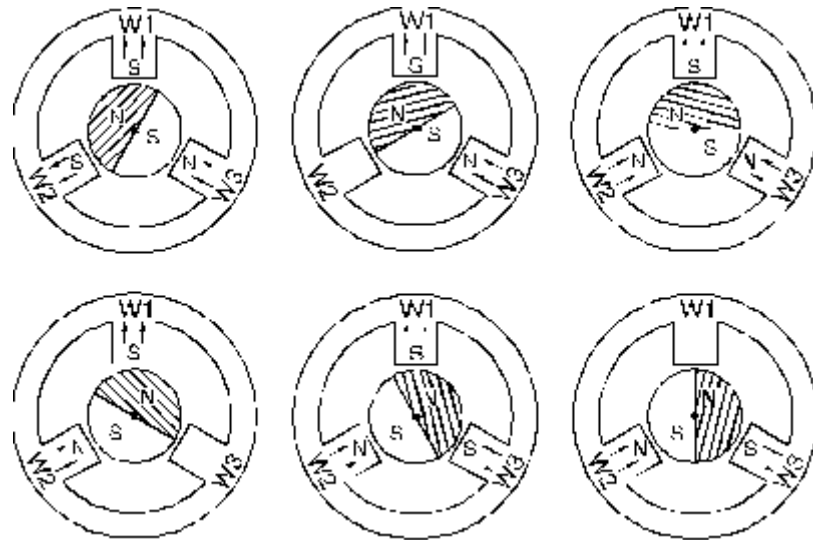


Figura 11 . Secuencia a pasos y diagrama de corriente de un motor por pasos de 3 fases .

Características de los motores por pasos

Torque estático o de mantenimiento – características de desplazamiento .

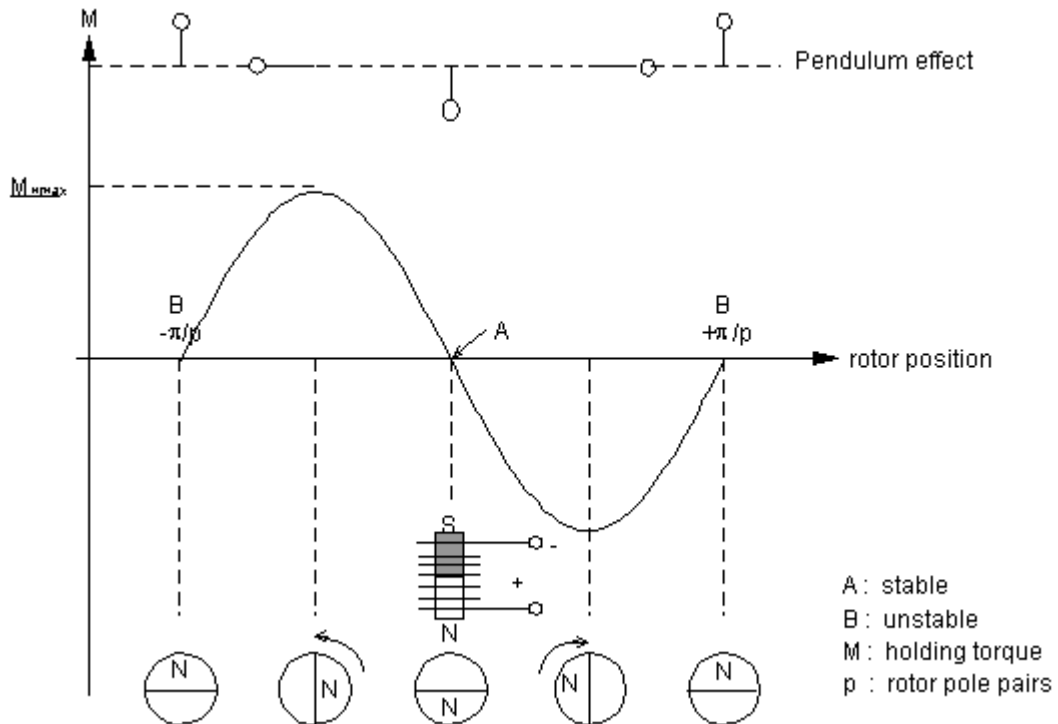


Figura 12 . Curva ilustrativa del torque estático versus la posición del rotor

La característica del torque estático (de mantenimiento) – desplazamiento es mejor explicada usando un electro-magneto y un rotor de un único polo (Fig. 12) . En el ejemplo el electro-magneto es representado por el estator del motor y es energizado con su polo norte enfrentado al rotor .

Asumiendo de que no existen cargas estáticas o friccionales sobre el rotor . la fig. 11 ilustra cómo el torque de restauración varía con la posición del rotor a medida que es alejado de su posición estable . A medida que el rotor se mueve de su posición estable , el torque firmemente se incrementa hasta alcanzar un máximo . Este valor máximo es llamado el torque de mantenimiento y representa la carga máxima que puede ser aplicada al eje sin causar una rotación continua . Si el eje es alejado mas allá de este punto , el torque caerá hasta que sea nuevamente cero . Sin embargo , este punto cero es inestable y el torque se revierte inmediatamente mas allá de su punto previo hasta el punto estable . Un péndulo (Fig. 13) puede además ser usado para demostrar los efectos que observamos .

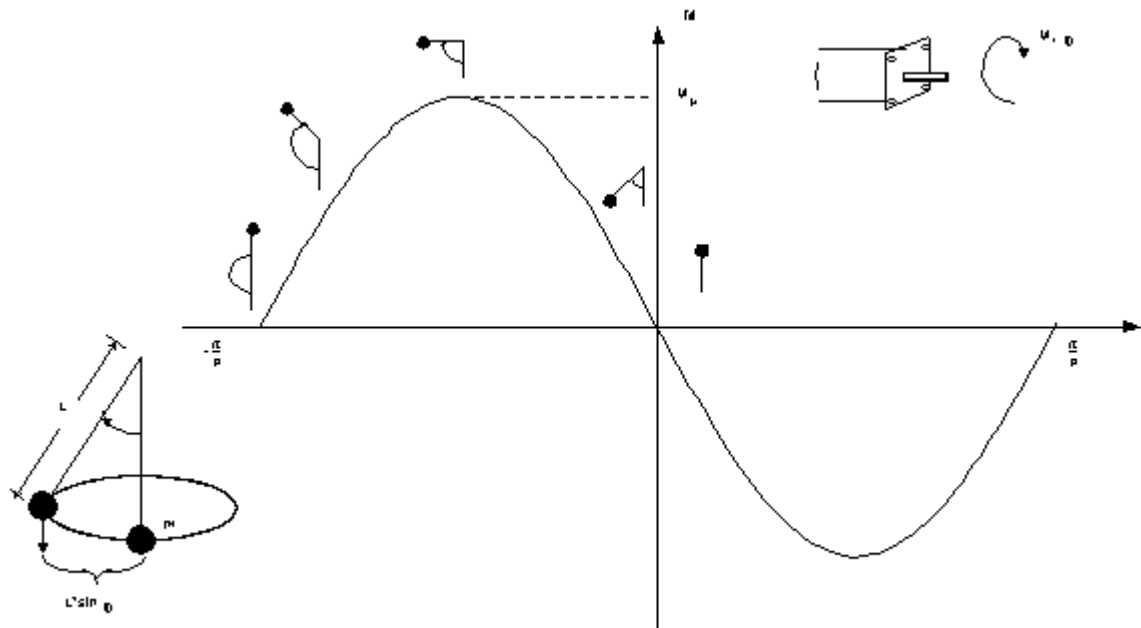


Figura 13 . Efecto de péndulo o torque estático versus la posición del rotor .

Dependiendo del número de fases , el ciclo en las figures 11 y 12 sería equivalente al siguiente número de pasos completos .

- 2 fases 4 pasos
- 3 fases 6 pasos
- 5 fases 10 pasos

El torque requerido para girar el eje en un cierto ángulo puede ser calculado usando la fórmula

$$M(\varphi) = -M_H \cdot \sin(p \cdot \varphi)$$

A pesar de que esta característica de torque no es de gran utilidad por si sola , la misma sí explica algunos de los efectos que observamos . Por ejemplo , la misma dicta la rigidez del sistema , en otras palabras , cómo la posición del eje cambia cuando una carga es aplicada a un rotor estacionario . El eje debe desviarse hasta que el torque generado sea emparejado con la carga aplicada . Por lo tanto , la posición estática varía con la carga .

Angulo de carga estático .

El ángulo de carga estático es definido como el ángulo entre la posición actual del rotor y la posición final estable para una carga dada . La figura 14 ilustra (tanto para paso completo como para medio paso) que a medida que el torque se incrementa lo mismo ocurre con la desviación o giro desde la posición estable .

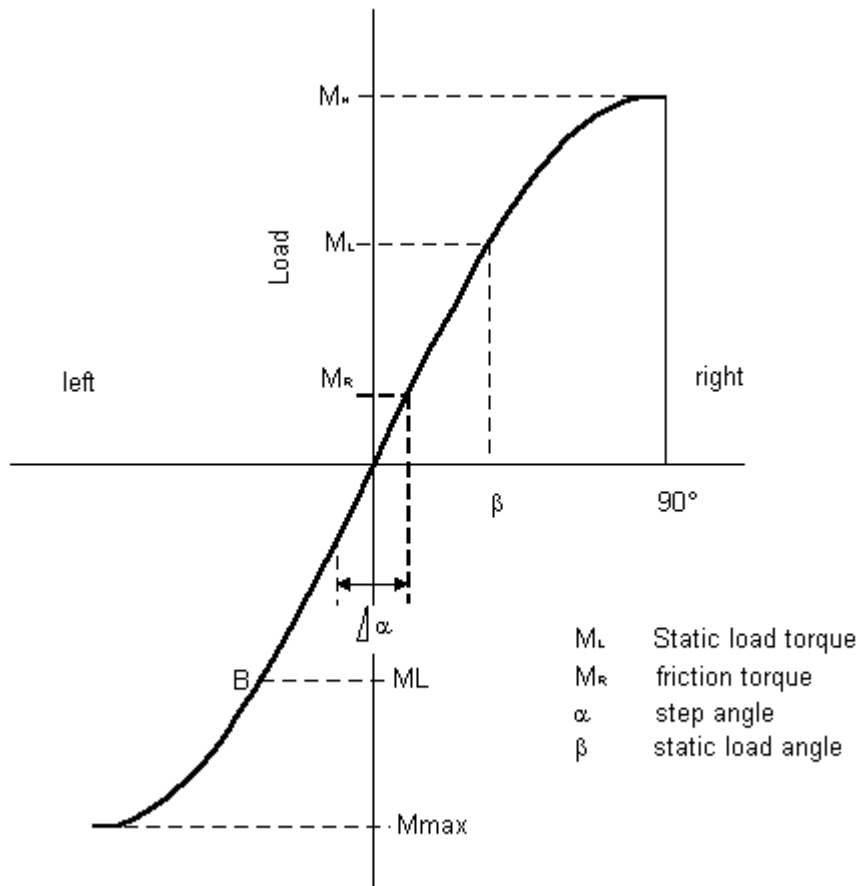


Figura 14

El ángulo de carga estático puede ser calculado usando la siguiente fórmula :

$$c(\varphi) = -\frac{dM}{d\varphi} = p * M_H * \cos(p * \varphi)$$

Torque de fricción

El torque de fricción es la carga implementada en el eje a través de tolerancias mecánicas en la aplicación .

La Figura 14 ilustra cómo para una carga dada (M_L) el torque de fricción (M_{fr}) necesita además ser considerado si se requiere un posicionamiento preciso .

Este fenómeno puede además ser explicado usando el modelo de montaña (Fig. 13) . A pesar de que la pelota trata de encontrar su lugar natural de descanso , la fricción sobre la superficie evita que esto ocurra .

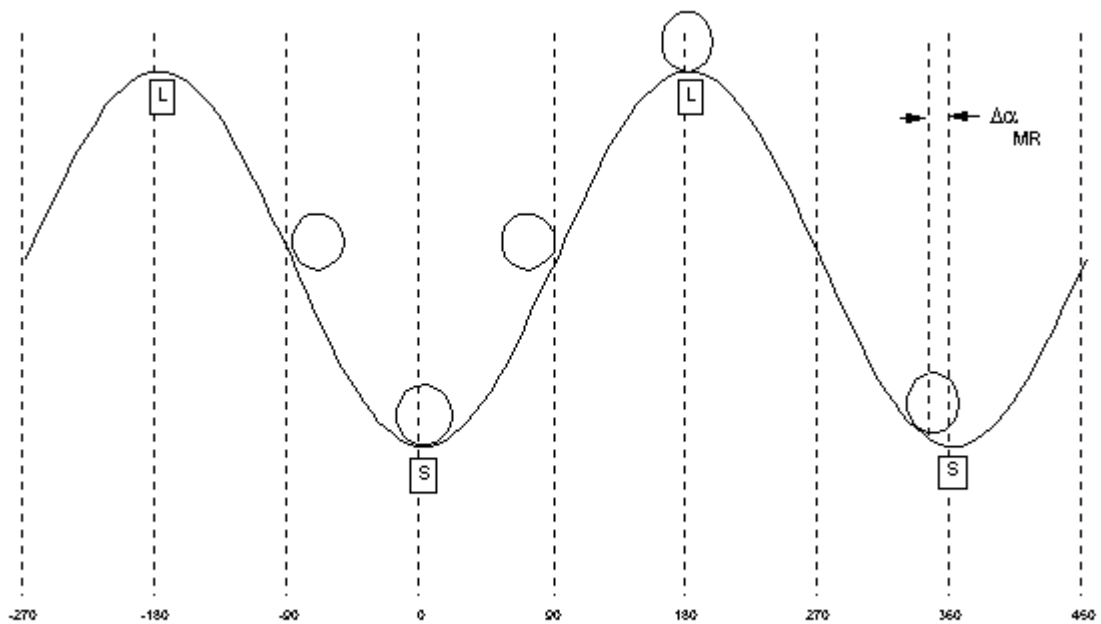


Figura 15 . El modelo de la montaña .

Tolerancia angular sistemática .

La " tolerancia angular sistemática " es la desviación desde la posición teóricamente correcta de cualquier paso angular . También conocida como " precisión absoluta" , la misma puede ser expresada tanto como porcentaje de un paso completo o como una medición angular . La misma es no acumulativa dado que se mantiene constante para cualquier paso angular .

La " tolerancia angular sistemática" es causada por tolerancias de manufactura en el motor (o sea diferentes resistencias de bobinados o vueltas , magnetos magnetizados en forma despereja , entrehierros , etc.) y en la electrónica de control del motor . A pesar de que las técnicas modernas de manufactura disminuyen estos valores , para una extrema seguridad pueden necesitar ser considerados .

Angulo de cargas estático y dinámico .

La "curva del ángulo de carga estático" (fig. 14) ilustra lo que pasa a un motor por pasos estacionario bajo carga . Por lo tanto , si el mismo está produciendo torque , el motor deberá estar retrasado con respecto al campo del estator bajo condiciones dinámicas , o sea con el motor en funcionamiento .

Similarmente habrá una situación de adelantamiento durante la desaceleración . A partir de la curva de torque estático , es claro que el atraso o adelanto no puede

exceder el máximo torque de mantenimiento si el motor debe mantener su sincronismo . Por lo tanto , para un motor por pasos híbrido (50 pares de polos) el máximo ángulo de atraso o adelantamiento es 3.6 o , dependiendo del número de fases 2, 3, o 5 pasos completos . La figura 16 ilustra el retraso máximo que ocurre bajo condiciones de carga dinámica .

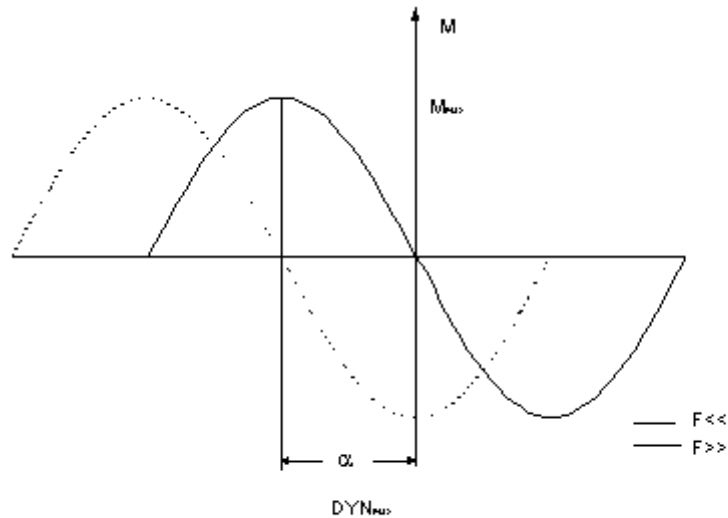


Figura 16 . Curva de carga dinámica .

Resonancia

El fenómeno de la “resonancia” es sufrido por todos los motores por pasos en algún grado u otro . Resonancia es el término usado para definir el efecto que ocurre cuando los motores por pasos son rotados en pasos a su frecuencia de oscilación natural . El salto a esta frecuencia natural puede resultar en una pérdida de sincronismo o aún que el motor se detenga .

Para motores por pasos híbridos bajo condiciones sin carga esta resonancia ocurre entre los 80 a 200 Hz. , o sea 80 a 200 pasos por segundo . La resonancia de un motor por pasos puede ser calculada usando la fórmula :

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{J_R}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p^* M_H}{J_R}}$$

La resonancia puede ser superada operando fuera del rango de resonancia , a través de medios pasos o micro-pasos , cambiando la frecuencia de resonancia a través de cambios en la inercia del sistema o en la fricción mecánica o eléctrica . Al incrementarse la inercia del sistema o la fricción generalmente conocida como “damping” en Inglés .

Ripple del torque .

Si un motor es impulsado en forma cercana a su torque de trabajo , el ripple del torque puede tener un efecto de resonancia . El torque del ripple es ilustrado en

“diagramas de torque dinámico” (Figs. 17 y 18) y las mejoras ganadas a través de una mayor resolución y micro-pasos son claramente visibles .

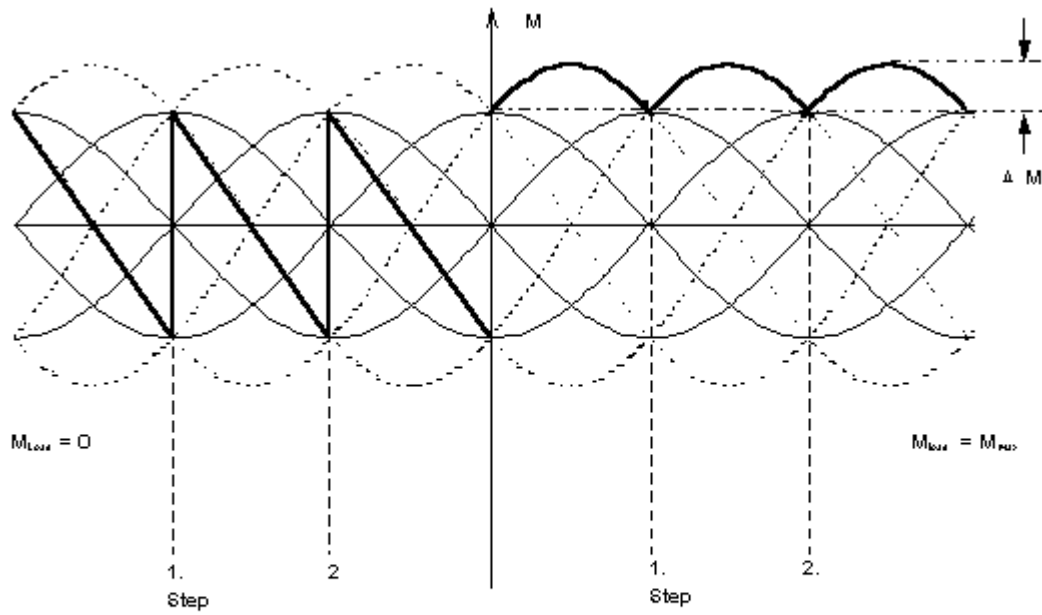


Figura 17 . Diagrama de torque dinámico para un motor por pasos de 2 fases .

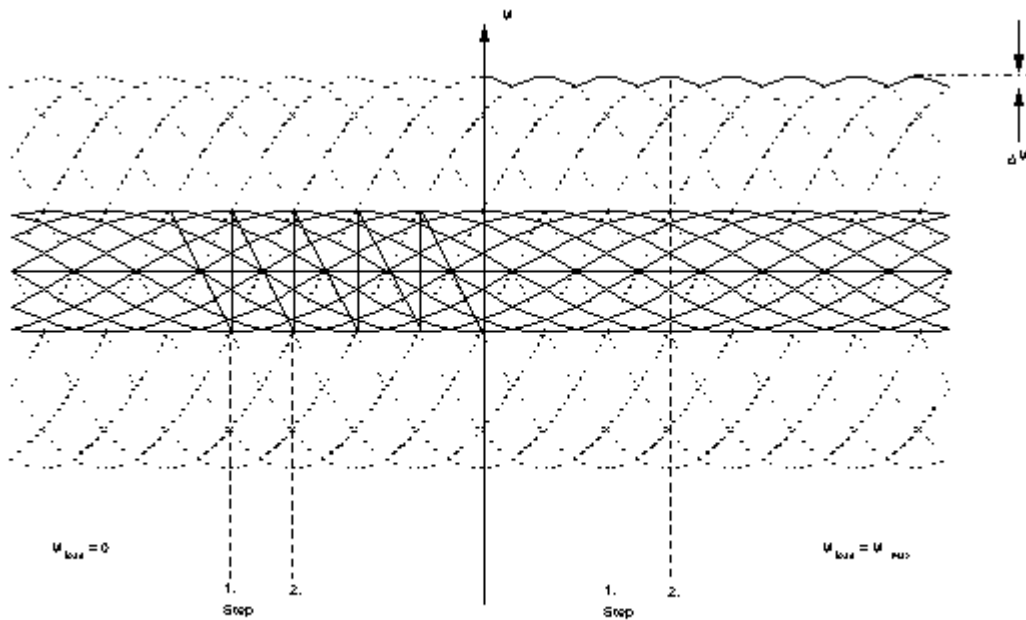


Figura 18 . Diagrama de torque dinámico para un motor por pasos de 5 fases .

Como se discutió previamente , las corrientes de fases de un motor de 3 fases son controladas con una onda sinusoidal . A pesar de que esta técnica de conmutación es mas exigente que la conmutación en bloque usada en los motores por paso de 2 y 5 fases , esta ofrece considerables beneficios en las características operativas .

Cuanto mayor sea la resolución , menor será el cambio de corriente por paso , o sea mayor la aproximación a la función sinusoidal . Esto asegura que el motor tenga un menor ripple de corriente y subsecuentemente un menor ripple de torque . Dado que sólo el componente fundamental de la onda sinusoidal genera el torque , cualquier ripple sólo tiene un efecto de calentamiento sobre el motor , el que es fácilmente disipado a través de cuerpo del motor .

Esta menor tendencia al ripple tiene además un efecto positivo en reducir el ruido acústico .

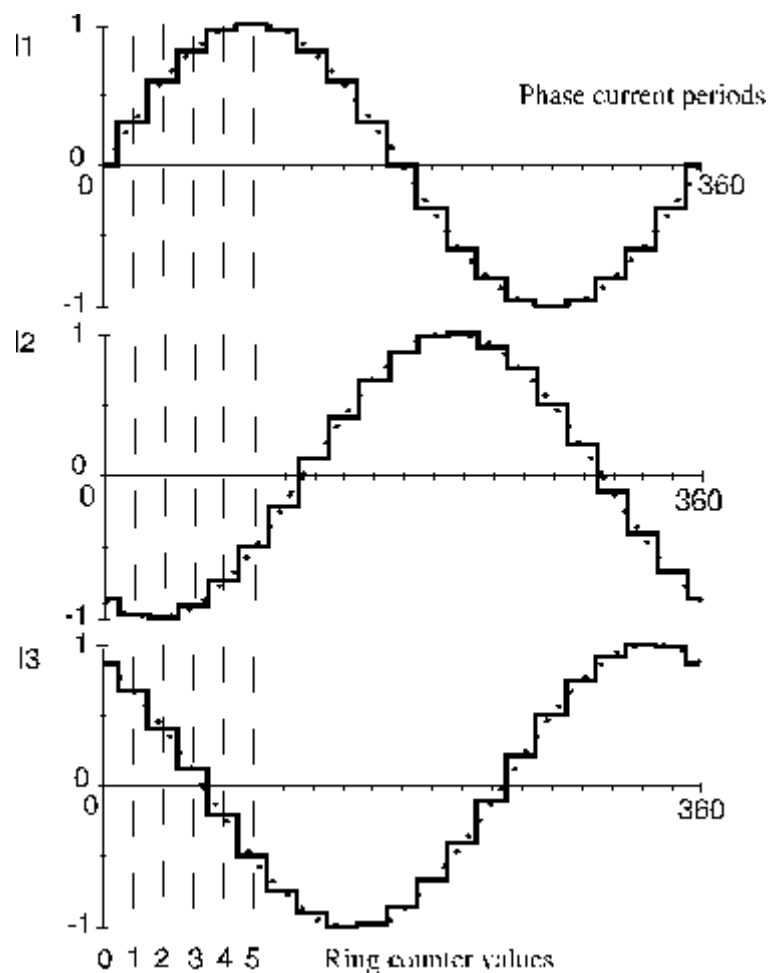


Figura 19 . Conmutación de onda sinusoidal de un motor por pasos de 3 fases .

Definiendo la frecuencia de arranque /parada .

Para el mas simple de los requerimientos , impulsar el motor en su modo de arranque/parada es el método que menos tiempo consume . La frecuencia de arranque sin carga máxima (f_{Aom}) es siempre dada por los fabricantes y la misma

será obviamente reducida cuando el motor es sujeto a una carga M_L y su subsiguiente inercia de carga J_L .

La dependencia de la frecuencia de arranque de la carga es además ilustrada en dos curvas logarítmicas . (fig. 20)

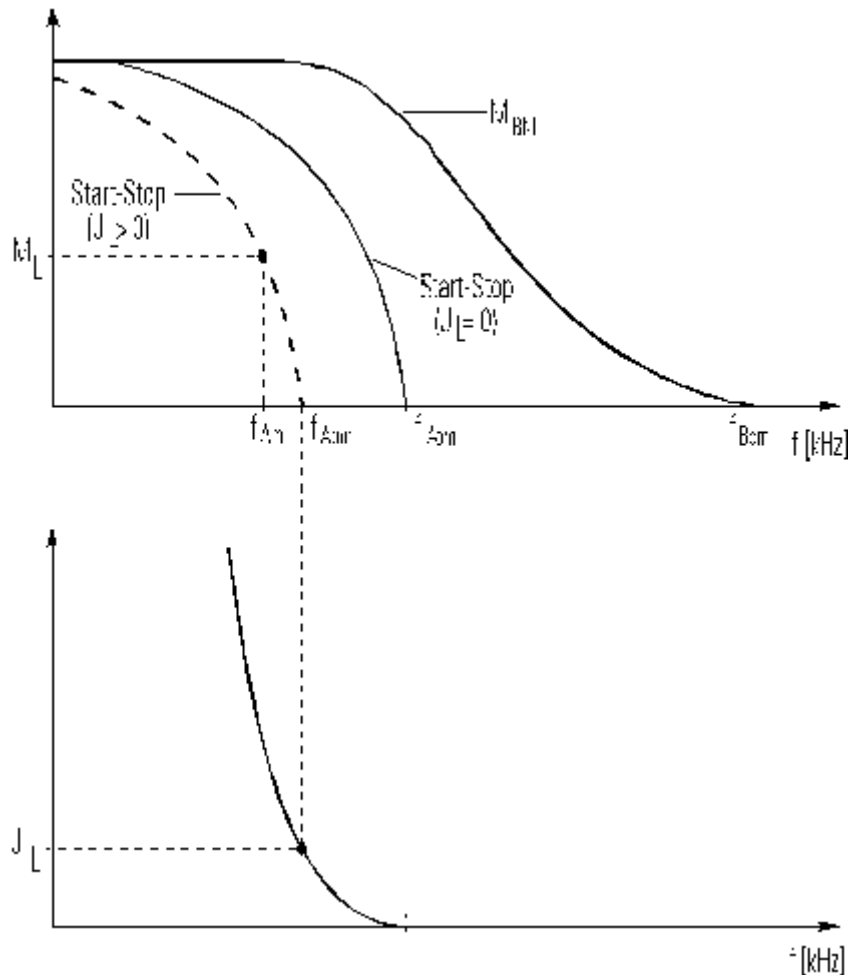


Figure 20

Estas curvas son usadas como sigue :

1. Arrancando con la curva de inercia , la carga de inercia (J_L) es trazada y transportada a la curva de torque .
2. A partir de éste punto de inicio , y en forma paralela a la máxima frecuencia de arranque sin carga (f_{Aom}) , una nueva curva de frecuencia de arranque que considere a la inercia de carga es dibujada .
3. Desde el torque conocido de carga y la nueva curva de frecuencia de arranque , la máxima frecuencia de arranque/parada puede ser encontrada .

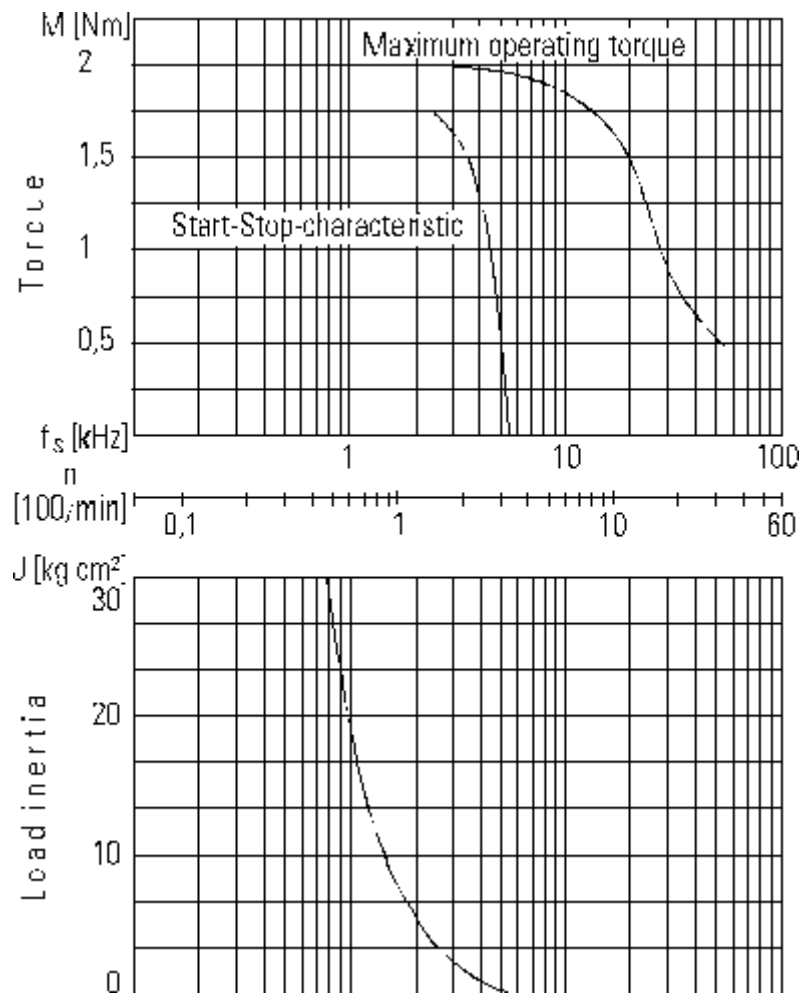


Figura 21

Written by Steve Jennings , Edited for the World Wide Web by Jim Huntley, alterations for the UK by Richard Massara