

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



Estudio de un devanado Rawcliffe-Bristol no
congruente en un motor asíncrono para 8/10
polos [jaula de ardilla] 36 ranuras

T E S I S

Para Optar el Título Profesional, de
INGENIERO ELECTRICISTA

Manuel Lau Pacheco

Promoción 1978 - 2

Lima • Perú

1985

I N D I C E

INTRODUCCION

CAPITULO I

1.0	Avances sobre la teoría de modulación de amplitud polar para el control de la velocidad.	3
1.1	Control por variación del número de polos	5
1.2	Motores de bobinado único y dos velocidades.	9
1.3	Características de los motores de dos velocidades.	14
	Motores reversibles de simple bobinado y dos velocidades.	18

CAPITULO II

2.0	Tecnología de devanados eléctricos.	23
2.1	Tipos de conexión para variar el número de polos.	27
	Avance matemático de la teoría P.A.M.	40
2.3	Diagramas de f.m.f. en Wl devanado polifásico.	42
2.3.1	Distribución circular de los conductores.	4c
	Clases de devanados trifásicos.	52

CAPITULO III

3.0	Desarrollo de la teoría PAM para un devana.	
-----	---	--

	do en 36 ranuras para 8/10 polos.	57
3.1	Características técnicas del motor.	66
3.2	Factor de capa y factor de paso.	68
3.3	Técnica utilizada para el cálculo de capa y factor de paso en ambas velocidades.	72
3.4	Diagrama reloj.	75
3.5	Estrella de ranuras	76
3.5.1	Determinación del factor de arrollamiento a partir de la estrella de ranura para 8 polos.	85
3.5.2	Determinación del factor de arrollamiento a partir de la estrella de ranuras para 10 polos.	86
3.6	Diagramas de f.m.m. para ambas velocidades	88
3.7	Cálculo de los $\frac{p}{A} \frac{N}{A}$ de la f.m.m.-Eliminación de armónicas.	90
3.7.1	Contenido de armónicas en J_a f.e.m. inducida en un devanado trifásico.	92
3.7.2	Eliminación de armónicas.	94
3.8	Características a potencia constante.	97
CAPITULO rv		
4.0	Relación entre densidades de flujo resultantes de las combinaciones polares.	101
4.1	Las alternativas desarrolladas para la conexión.	103
4.2	Conexión y agrupación de conductores para 8 y 10 polos.	107

CAPITULO V

5.0	Características de la máquina.	109
5.1	Circuito equivalente.	109
5.1.1	Circuito equivalente en ambas velocidades.	113
5.1.2	Circuito equivalente para la conexión d en 10 polos.	113
5.1.3	Circuito equivalente en conexión yy (8 polos).	114
5.2	Corriente en ei arranque	114
5.3	Potencia y par según el teorema de Thevenin	115

CAPITULO VI

6.0	Cálculo del comportamiento.	121
6.1	Pérdidas.	121
6.1.2	Pérdidas por fricción y ventilación	122
6.1.3	Pérdidas adicionales.	123
6.2	Comportamiento en vacío	124
6.3	Circuito equivalente. Cálculo de g_d^{\wedge} y b_m en ambas velocidades.	125
6.3.1	Cálculo del circuito equivalente en 10 polos.	126
6.3.2	Cálculo del circuito equivalente en 8 polos	126
6.4	Comportamiento en condiciones nominales en ambas velocidades.	127
6.4.1	Potencia nominal	127
6.4.2	Torque nominal.	127
6.4.3	Corriente nominal	127
6.5	Comportamiento en el arranque en ambas velocidades.	128

6.5.1	Corriente en el arranque.	128
6.5.2	Torque en el arranque.	130
6.6	Comportamiento en máximas condiciones	130
6.6.1	Torque electromagnético máximo.	130
6.6.2	Potencia electromagnética máxima y des- lizamiento máximo para potencia máxima.	131
6.7	Cálculo de la eficiencia.	133
6.8	Influencia de las armónicas superiores, en el momento del arranque	135
APENDICE A.		
	Diseño del motor de inducción.	del 138 al 176
APENDICE B.		
	Tallas, gráficos y curvas, etc,etc.	del 177 al 184
APENDICE C.		
	Indice de símbolos.	del 185 al 192
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		del 193 al 194
BIBLIOGRAFIA.		195
RESUMEN		196

INTRODUCCION

En el presente trabajo se desarrolla la teoría de la modulación en amplitud de polos, utilizando un núcleo de 8 polos de un motor trifásico de inducción de rotor de jaula de ardilla, para 24 HP.

Según normas ITINTEC este núcleo de 8 polos es el 370*009 (NV - 200 L).

Á partir de este núcleo de 8 polos utilizaremos para que funcione a 10 polos, utilizando un solo arrollamiento, con conexión Ravcliffe - No Congruente, con 6 terminales en el estator y a potencia constante.

En la teoría de la modulación en amplitud de polos, para 8/10 - polos, la técnica utilizada será lá'unodulación suma-diferencia mediante el diagrama reloj, y estrella de ranuras.

Este devanado no congruente, la agrupación de ranuras por fase es irregular ; tal como s1.2.2.1-1.2.2.i en lugar de la agrupación clásica de 1.2.1.2 -1.2.1.2.

Esta agrupación 1.2.2.1 - 1.2.2.1 permite obtener una onda de f, m.m. que corresponde a la agrupación de los conductores, es decir mayor forma senoidal.

Este efecto es logrado en forma indirecta haciendo que la concentración de ampere-conductores sea mayor en ciertas porciones - del entrehierro, es decir que la cantidad de bobinas por grupo varien en el entrehierro siguiendo una ley de formación senoidal.

Como cada fabricante emplea sus propias fórmulas analíticas, sus propios criterios de acuerdo a su experiencia, en este trabajo se ha preferido tomar en cuenta las formulaciones de un solo autor (Kuhlmann).

Los cálculos del diseño del motor de inducción se hace en el apéndice A.1; la aplicación de estos motores PAK se da en el accionamiento de máquinas herramientas.

- El método utilizado para los cálculos de los parámetros es el de síntesis. El método de prueba y error, también se utiliza, especialmente para el ajuste de los parámetros.

El presente trabajo pretende aplicar la teoría de modulación de 8 a 10 polos, Delcrosa fabrica solamente hasta 8 polos, y se quiere estudiar como es su comportamiento en 10 polos.

Las limitaciones para probarlo experimentalmente, es que se utiliza un motor asincrono universal, comercialmente producido para laboratorios de enseñanza por Kawdsley's Ltd. de Dursley, que permite cambiar el paso de las bobinas de acuerdo con la investigación, pertinente.

1.0 FUNDAMENTOS SOBRE LA TEORIA DE MODULACION DE AMPLITUD POLAR
PARA EL CONTROL DE LA VELOCIDAD.

El descubrimiento y aplicación de esta técnica, se debe al profesor G.H. Rawcliffe y sus colaboradores del Departamento de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Bristol, Gran Bretaña.

Las varias patentes registradas por ellos han permitido a la industria la producción de motores que, con un mismo devanado estático, pueden funcionar a diversas velocidades con características perfectamente satisfactorias. Las múltiples combinaciones de diseño permiten el cambio de velocidad en pasos relativamente cortos, por ejemplo velocidades correspondientes a 8/10 polos o en proporciones mayores, como por ejemplo las de 8/2 polos. i

En PAM estos devanados estáticos se consideran como "apenas de sigualmente agrupados" o "casi igualmente agrupados".

En la práctica, la diferencia entre el número de bobinas por grupo rara vez es mas de uno.

— En los últimos años, en la Universidad de Bristol, se ha comprobado que un alto grado de irregularidad en el agrupamiento de las bobinas produce grandes ventajas con relación a la construcción de máquinas de 2 y 3 velocidades obtenidas con un solo devanado, por tanto, la agrupación en la forma mas uniforme posible, que hasta ahora se consideraba como una condición necesaria ha resultado ser un requisito bastante aleatorio

El arreglo de Rawcliffe y Fong, tiene un solo pequeño 000111310 de velocidad, y en ambas velocidades, el contenido armónico es bajo, y los factores de paso y distribución son de magnitudes normales, por ello sus arrollamientos deberían tener buenas performances en ambas velocidades.

El motor asincrono rotor de jaula de ardilla por su simplicidad y reducido mantenimiento, es preferido en los accionamientos industriales. Desafortunadamente, es una máquina de velocidad constante y actualmente los modernos procesos industriales requieren cada vez mas, accionamientos de velocidad variable. El motor asincrono de rotor bobinado, que puede variar su velocidad tiene mayores exigencias de mantenimiento, además de desperdiciar energía cuando funciona a velocidades inferiores a la síncrona.

El motor de jaula de ardilla de amplitud de campo magnético modulado (PAM), presenta una solución intermedia muy útil en muchas aplicaciones industriales.

1.1 Control por variación del número de polos.

Si la máquina estuviese provista de dos arrollamientos de estator con diferente número de polos, y si el rotor fuera preferentemente en jaula de ardilla, con el fin de no tener que realizar ningún cambio de conexiones en el secundario, podríamos obtener dos velocidades de sincronismo.

Con un solo arrollamiento provisto de conexiones especiales es posible obtener dos diferentes números de polos, o incluso 3 mediante una simple conexión. En la fig. 1, se ha representado, una de las fases de un arrollamiento tetrapolar con dos bobinas por fase, la inversión del sentido de la corriente en una de las bobinas modifica la distribución del flujo, originándose una f.m.m. bipolar, fig. 1b. Esto se logra con relativa sencillez en la forma indicada por los diagramas esquemáticos. Cada una de las fases está formada por dos secciones idénticas, que al ser conectadas en serie-triángulo absorben cada una la mitad de la tensión de línea.

Conectando las secciones en paralelo-estrella, la tensión crece ligeramente hasta el 0.577 del valor de línea, pero la distribución de la f.m.m. cambia totalmente. Esta modificación del número de polos no es sino un caso especial de modulación de amplitud polar, y para lograrla hemos tenido que multiplicar efectivamente la f.m.m. de la bobina superior por +1 y la de la bobina inferior por -1.

⇒ Esto a su vez, equivale a modular la onda primitiva de f.m.m. con una onda espacial rectangular, de amplitud unidad y con un período de longitud igual a la de la periferia del estator.

- Cuando el número de pares de polos es superior a dos, la inversión de la mitad del arrollamiento tiene como efecto el modificar

el número de pares de polos en +1 ti en -4, según se desee, (fig. 2). En la práctica, para mejorar el funcionamiento de la máquina en régimen de modulación, este sencillo método de inversión de bobinas requiere algunos refinamientos. Estos pueden consistir en la anulación de ciertas bobinas, con el fin de lograr una onda moduladora de forma escalonada, o si se deseara, por ejemplo, una variación de - 2 en el número de pares de polos, la onda moduladora habría de tener dos ciclos completos en la periferia del estator.

a) f.m.m. con 4 polos.

b) f.m.m. con 2 polos.

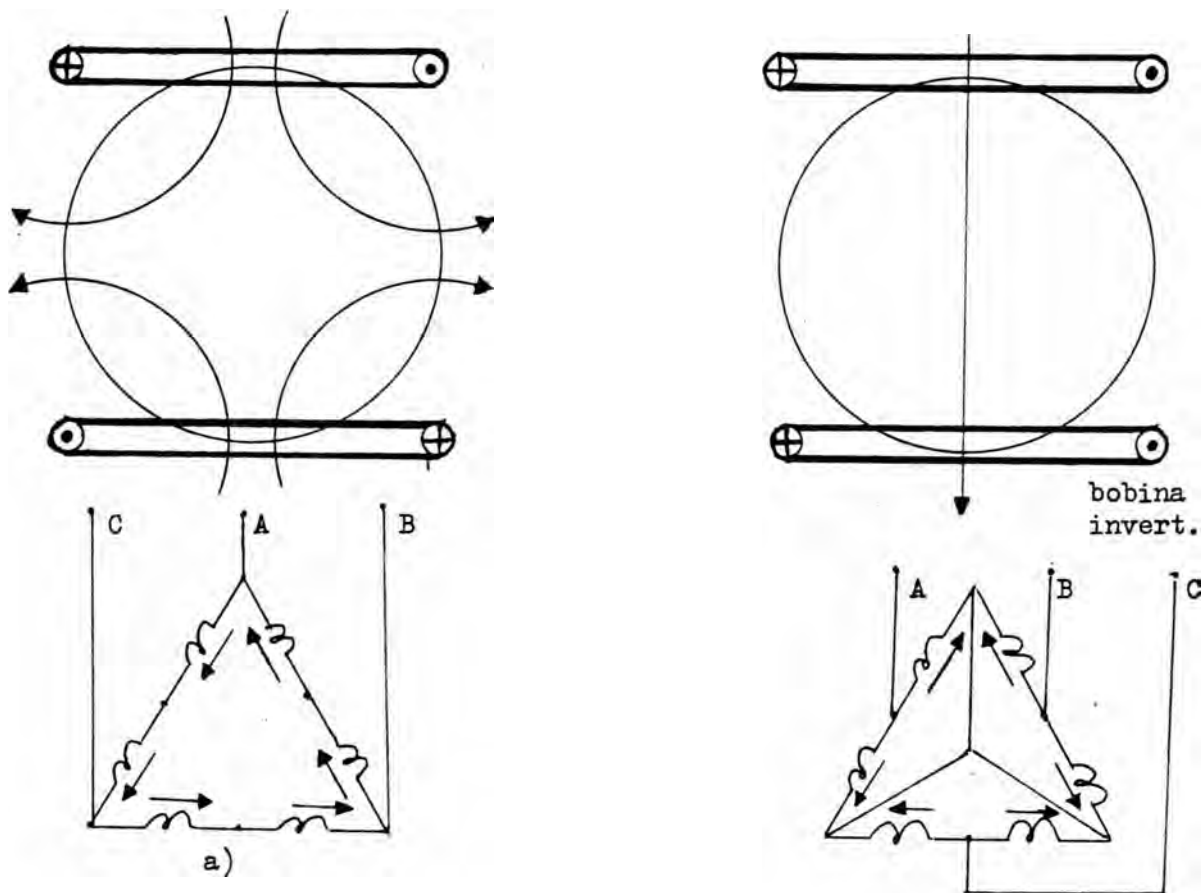


Fig.1.- Bobinado para cambio del número de polos.

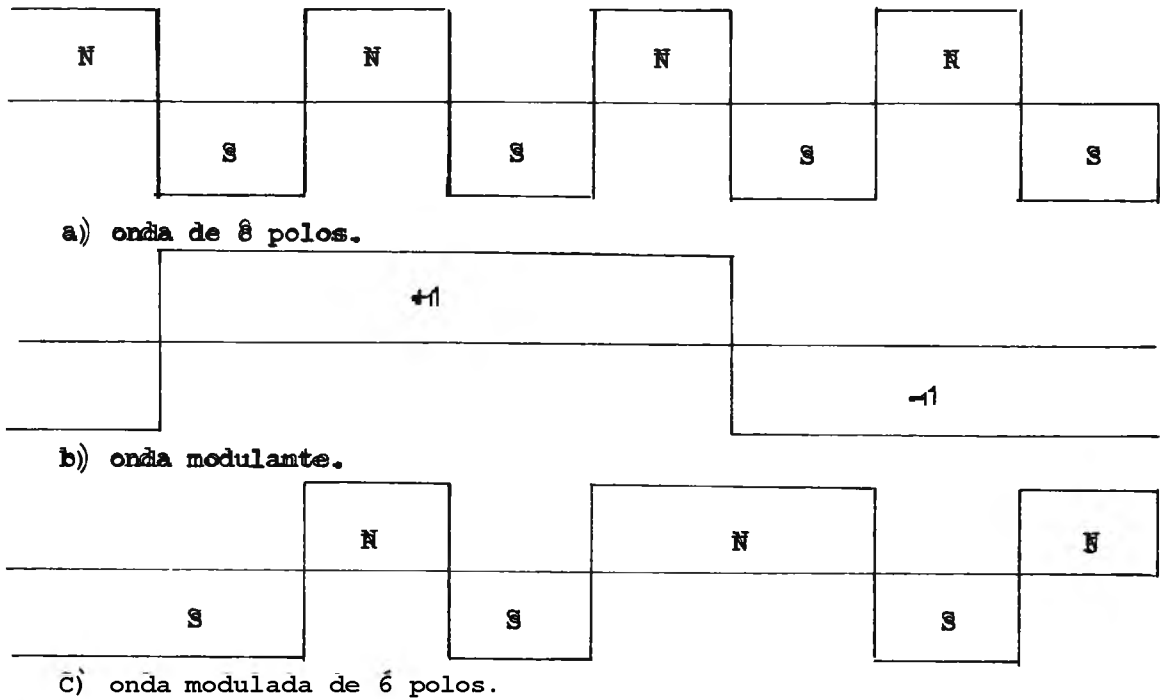


Fig.2.- Modulación de la amplitud polar.

- Recientemente, se han ensayado métodos muy ingeniosos para modificar de una manera casi continua el número de polos.
- Todos ellos se basan en la posibilidad de invertir las zonas de corriente sobre la periferie en puntos previamente determinados. En cada uno de los puntos en que tiene lugar la inversión de corrientes aparece un pico de f.m.m., véase como ejemplo el esquema de la fig.3, y en la siguiente inversión el pico tiene polaridad contraria.
- Regulando el defase de las corrientes de alimentación a las bobinas, modulación de fase, se puede controlar la posición espacial en que tienen lugar las inversiones. Para lograr una regulación fina de velocidad son necesarios ciertos dispositivos adicionales, lo cual representa un inconveniente desde el punto de vista económico, ya que estos han de estar diseñados para una capacidad de corte igual

a la de plena carga.

Realmente, todo método de control implica, en mayor o menor grado, una reducción del rendimiento de la máquina, un aumento de costo y una mayor complicación, por lo que es necesario comparar cuidadosamente estos inconvenientes frente a la ventaja que ofrece.

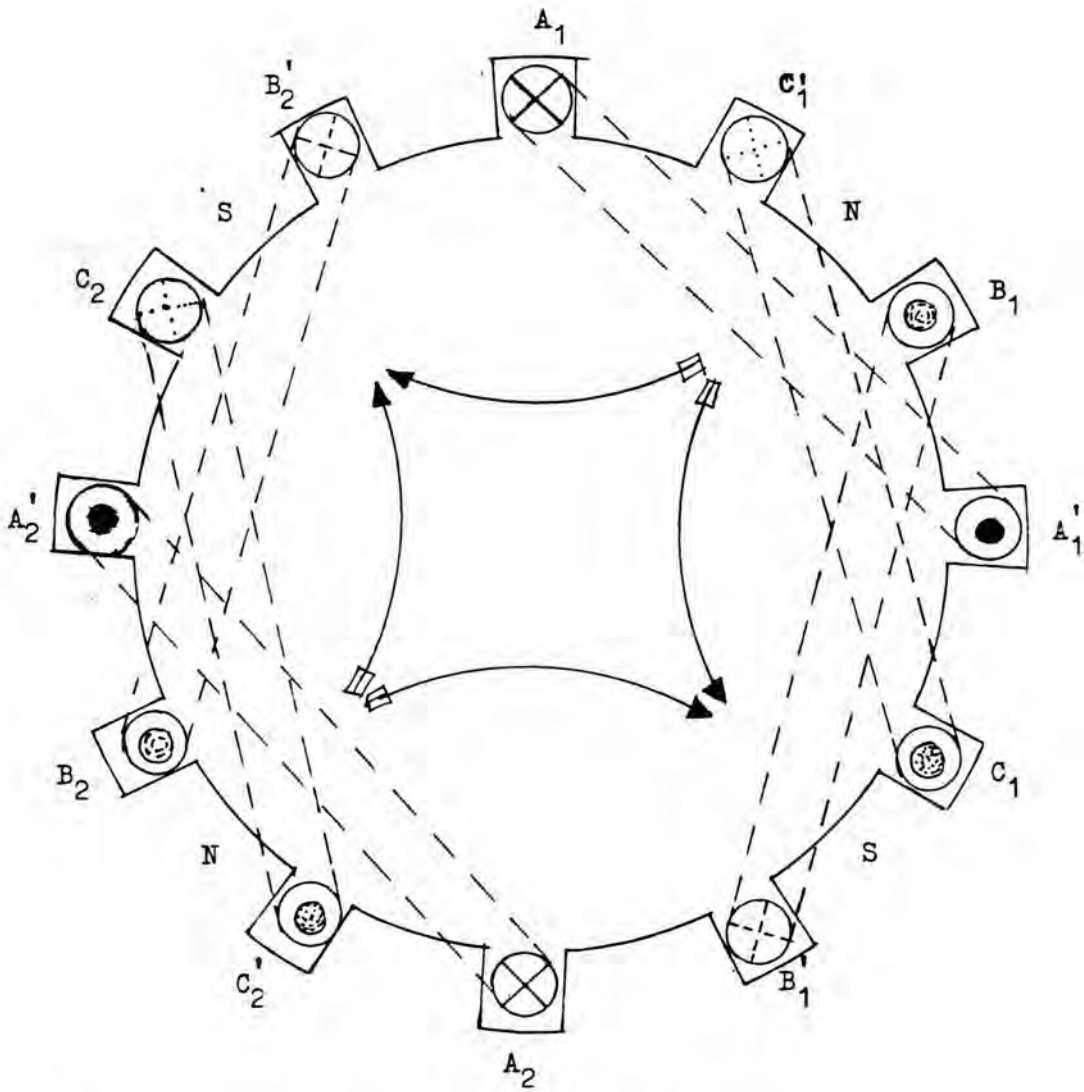
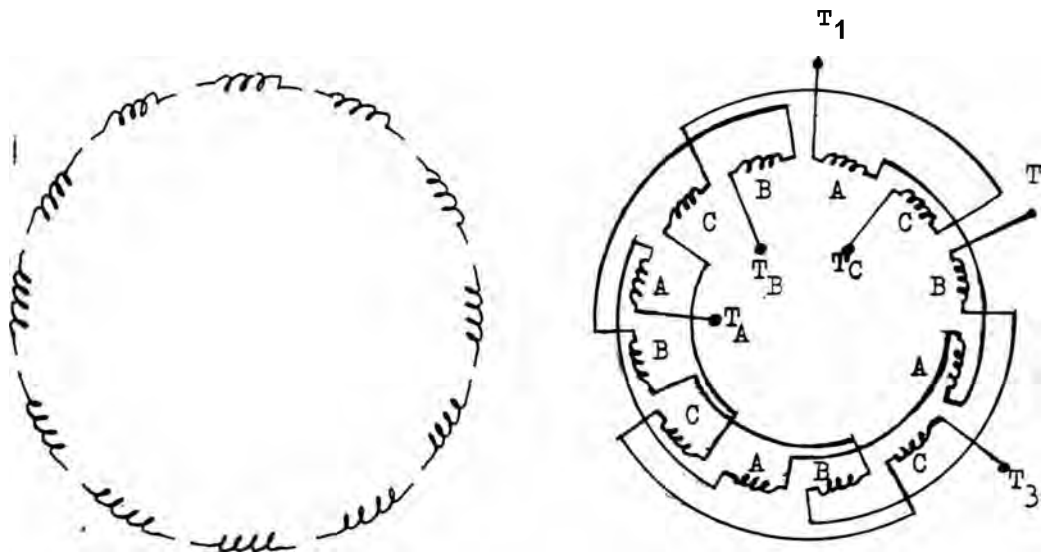


Fig.3.- Bobinado elemental trifásico 4 polos.

1.2 Motores de "bobinado único y dos velocidades.-

. Prácticamente todos los motores trifásicos de inducción tienen, bobinados de dos capas en el estator. Para un determinado núcleo con ranuras, el número de bobinas de arrollamiento es igual al de ranuras del estator, con un tercio de ellas asignado a cada fase. Del mismo modo, todos los intervalos polares normales de 180° deben contener una sucesión análoga de tres grupos de bobinas y el número de estas en cada grupo es igual al número total de bobinas dividido por $3P$. Además antes de interconectar las 3 fases para que formen una estrella a un triángulo, es necesario que las bobinas de cada grupo de bobinas estén unidas en serie. La fig.4a es un diagrama esquemático de una sucesión de 12 grupos polares, cada uno de los cuales contiene 3 bobinas conectadas en serie para un bobinado trifásico de 4 polos y 36 ranuras.



a) Disposición en grupos polares.

b) Conexiones por grupos polares.

Fig. 4. Arrollamiento de estator con 4 polos y 36 bobinas para una sola velocidad.

En el motor convencional de un solo bobinado y una sola velocidad, los sucesivos grupos de polos van conectadas para producir, en un momento dado, polos de polaridad opuesto, lo cual se hace con frecuencia uniéndolos en serie los grupos polares. Además para mantener debidamente separadas, las tres fases del bobinado es necesario sacar los terminales de los conductores semejantes por puntos del bobinado cuya separación sea de 120° eléctricos.

Fig. 4b. En la operación final se conectan entre sí las tres fases, en forma de estrella o de triángulo. La conexión en estrella se obtiene uniéndolos T_i, T_g y T_q , y utilizando $T-pT2$ y como conductores de alimentación, mientras que la conexión en triángulo se forma utilizando como conductores de alimentación las uniones de T_j, T_b y T_3 , T_C y T_i .

Un método muy usado para obtener dos velocidades operativas una de ellas doble de la otra con un solo bobinado, consiste en conectar éste de la forma corriente para la velocidad mayor, y en forma de polos consecuentes para la (menor). Esta técnica es aplicable sólo a los motores trifásicos, los bifásicos con dos velocidades emplean siempre dos bobinados.

El cambio de P polos a $2P$ polos se efectúa con uno cualquiera de dos sistemas de conmutación.

En el método serie-paralelo, el bobinado produce P polos (fig.5C) Cuando los mismos grupos de polos se conectan en dos filas paralelas. En el método de paralelo-serie ocurre todo lo contrario.

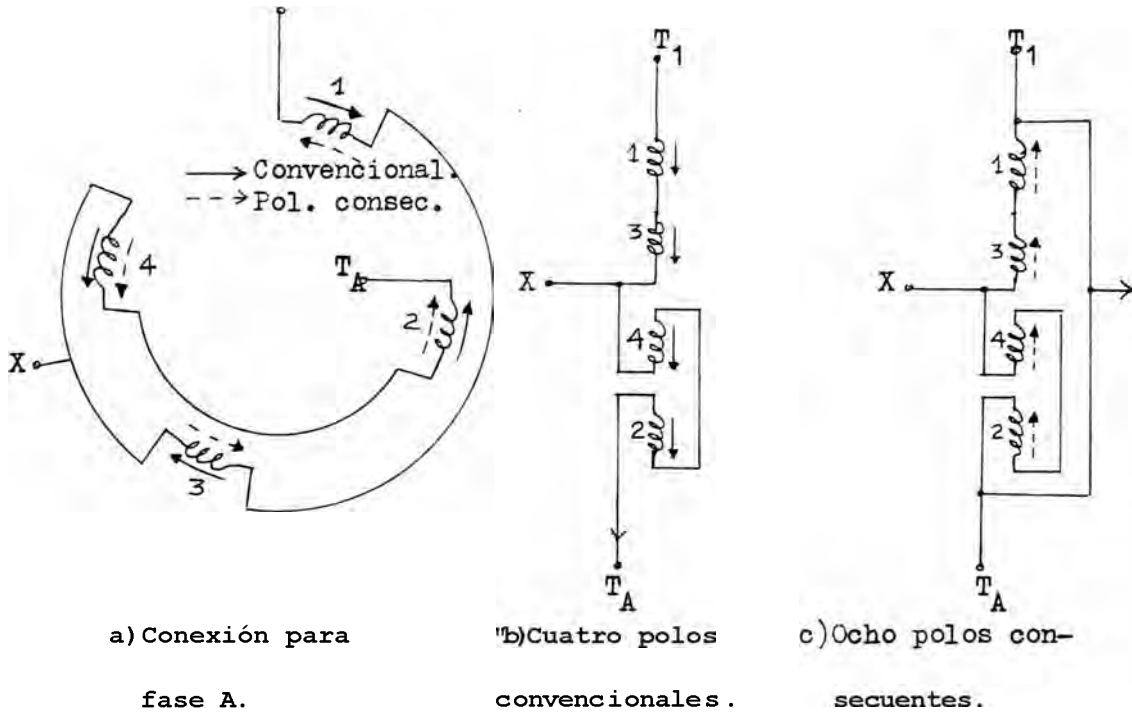


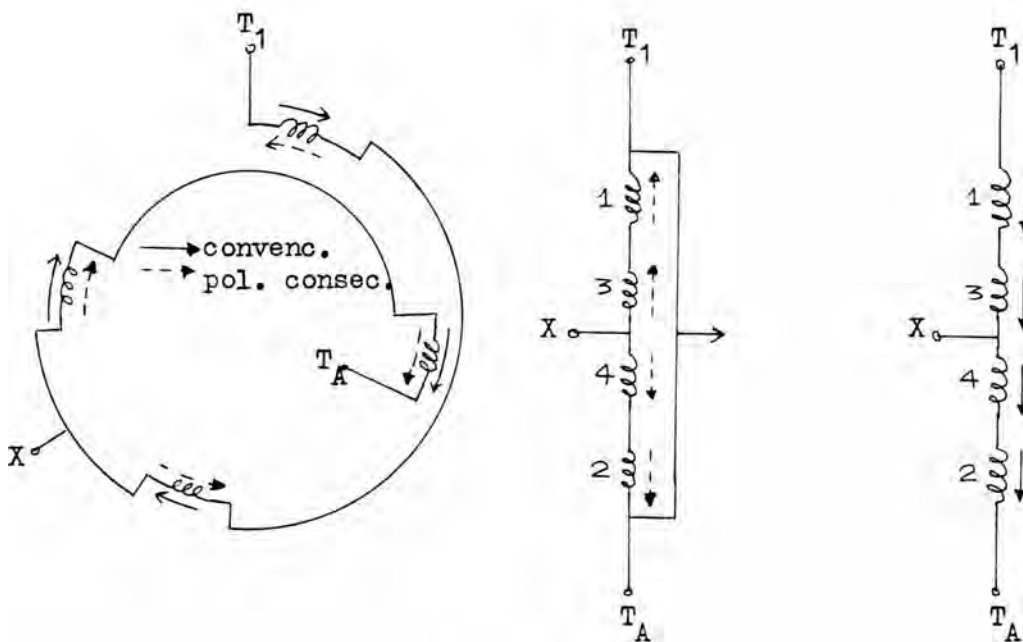
Fig.5. Principio del bobinado en serie-paralelo, en un motor de bobinado único y dos velocidades.

En el esquema serie-paralelo ilustrado en la fig. 5» cuatro grupos de polos de una de las tres fases de un bobinado de 4 polos- 8 polos van conectados en serie entre los puntos T_A y se saca al exterior la toma central X.

La conexión en serie se obtiene uniendo un par de grupos polos diametralmente opuestos, con la numeración 1 y 3 y el otro par de grupos de polos diametralmente opuestos, con la numeración 4 y 2 con la toma X, saliendo de la unión de los dos pares.

Si la corriente entra por el terminal T_1 y sale por el T_A (Como se ve en la fig.5b), se producirán cuatro polos de tipo convencional

Por otra parte, si se unen los terminales y , la corriente que entra por el terminal X se divide en dos caminos paralelos al a travezar los cuatro grupos polares. (Fig. 5C).



- a) Conexiones para fase A.
- b) Cuatro polos convencionales
- c) Ocho polos consecuentes

Fig. 6.- Principio del bobinado en serie-paralelo en un motor de bobinado único y dos velocidades.

Así se crean cuatro polos convencionales y otros cuatro grupos consecuentes, es decir, 8 polos en total. La misma disposición puede aplicarse a las fases B y C y el sistema completo de conmutación incluye también una correcta conexión en estrella o triángulo.

En el segundo esquema se desarrollan cuatro polos convencionales cuando se emplean la conexión en paralelo de los grupos de polos (Fig. 6b) la disposición en serie (Fig. 6C) produce 4 polos convencionales, mas otros 4 consecuentes.

Los bobinados de las figuras 5 y 6 dan dos velocidades que están siempre en relación de 2 a 1. Con dos bobinados de estos en el estator es posible obtener 4 velocidades cuando una de las combinaciones de polos difiere de la otra. Los motores normales en jaula de ardilla se fabrican para combinaciones de velocidad (a base de los 60 Hz) tales como 1800,1200,900 y 600 r.p.m.; 1200,900,600 y 450 r.p.m. 3600,1800,1200 y 600 r.p.m. y otras. Se han construido motores especiales en jaula de ardilla con tres bobinados y seis velocidades, que dan velocidades de 450»600,900,1200,1800,3600 r.p.m. cuando los bobinados A,B y C dan respectivamente, las velocidades primera y tercera, las segundas y cuarta, y las quinta y sexta.

1.2.1 Sus aplicaciones : Son particularmente adecuadas para el accionamiento de :

- Ventiladores
- Bombas centrífugas
- Mezcladores para industrias químicas.
- Transportadores
- Compresores
- Máquinas herramientas, etc.

En general los motores PAM, pueden ser aplicados a cualquier máquina que requiere velocidad variable en su accionamiento.

Los motores PAM, presentan la posibilidad de reducir el stock de motores de reposición, al disponer de dos velocidades que pueden usarse independientemente.

El aumento del costo respecto a un motor normal de simple velocidad es modesto y sensiblemente inferior a aquel relativo a un motor de dos arrollamientos separados.

1.3 Características de los motores de dos velocidades[^]

La N3IA ha reconocido y normalizado tres tipos generales de motores de dos velocidades; los motores de par constante, que desarrollan aproximadamente el mismo esfuerzo de giro a plena carga, con igual aumento de temperatura a las dos velocidades; motores de potencia (en CV) constante, cuyos pares a plena carga para el mismo o aproximado aumento de temperatura son inversamente proporcionales a las respectivas velocidades; y motores de par variable, cuyos pares a plena carga son directamente proporcionales a las respectivas velocidades. Desde luego, cada uno de los tipos de motor trifásico de dos velocidades debe proyectarse con sumo cuidado y de un modo especial, pero -como indica la fig. 7 - el bobinado va siempre conectado por polos consecuentes para la velocidad inferior, y por polos convencionales para la velocidad superior. Las conexiones de las fases (triángulo en serie, doble estrella en paralelo, o estrella en serie) para las dos velocidades, dependen de la clasificación del motor.

Cada una de las clasificaciones mostradas en la fig. 7 tiene ciertas características funcionales, que la hacen especialmente adaptable a determinadas aplicaciones específicas. Por ejemplo los motores de par constante, se utilizan para compresores, transportadores, cargadores de carbón, prensas de imprimir, muchas máquinas-herramientas y máquinas para las industrias textiles, de torrefacción y para las lavanderías. Aplicaciones muy comunes del motor de potencia de salida constante son los polipastos, estampadoras, pulidoras y rectificadores, así como las taladradoras, er. las que hay que desarrollar un par considerable con pequeñas velocidades, y un

par mucho menor con las marchas rápidas.

En los ventiladores, compresores, "bombas centrífugas, etc.", la potencia necesaria aumenta en proporción aproximada al cubo de la velocidad 5 para tales aplicaciones se prefiere siempre el motor de par variable.

Las curvas características par-velocidad de la fig.8 indican, como están relacionadas las tres clasificaciones de motores, suponiendo que todos operan y rinden de modo semejante cuando marchan a velocidad elevada, Gomo quiera que la potencia de salida en CV es proporcional al producto del par por la velocidad tendremos :

1. Para un motor de par constante, la máxima potencia de salida en CV a pequeña velocidad es la mitad del valor correspondiente a la velocidad mitad de la de régimen.

	(a) CONEXIONES PAR CONSTANTE.				
	Velocidad	Hilos línea	Unir Juntos	Polaridad Bobinado	Conexión Bobinado
	Baja	T1.T2.T3	---	Pol.consec.	Serie .
Alta	T4.T5.T6	T1T2T3	convencional	2Y paral.	
	(b) Conexiones potencia constante.				
	Velocidad	Hilos línea	Unir juntos	Polaridad bobinado	Conexión bobinado
	Baja	T1T2T3	T4T5T6	pol.consec.	2Y paral.
Alta	T4T5T6	---	convencional	Serie .	
	(c) CONEXIONES PAR VARIABLE.				
	Velocidad	Hilos línea	Unir juntos	Polaridad bobinado	Conexión bobinado
	Baja	T1T2T3	---	pol.consec.	Serie Y.
Alta	T4T5T6	T1T2T3	convencional	2Y paral.	

Fig. 7. Marcas de los terminales y conexiones para motores de inducción de bobinado único y dos velocidades.

2. Para un motor de potencia constante, el par máximo a pequeña velocidad es el doble que a alta velocidad.

3. Para un motor de par variable, la máxima potencia de salida en CV a baja velocidad es la cuarta parte de la potencia a gran velocidad.

Para fines de normalización, los fabricantes han adoptado ciertas marcas para las bombas de los motores de simple bobinado y dos velocidades. La fig. 7 presenta las tres clasificaciones normalizadas para el par y la potencia en CV, incluyendo las tablas anexas, que dan las conexiones de alimentación y de las bombas y las correspondientes polaridades del bobinado, mas las conexiones para las velocidades baja y alta.

La fig.9 muestra el esquema completo de las conexiones interiores del cableado de un motor de par constante proyectado para operar con 4-8 polos. El circuito de control permite al motor arrancar en las posiciones de marcha, rápida o lenta, aunque requiere un paso por la de paro antes de cambiar de rápida a lenta. Siguiendo, las flechas de trazo continuo desde los terminales T4,T5 y T6, podrá verse que el bobinado va conectado de la forma convencional y en dos estrellas en paralelo para 4 polos, cuando se unen T1,T2 y T3; las flechas de linea interrumpida pueden seguirse desde los terminales T1,T2 y T3 para mostrar que el bobinado queda conectado con polos consecuentes y triángulo en serie, para 8 polos. Con referencia a la sección de regulación, obsérvese que el contacto de encendido N.C. CR1 se abre al pulsar el botón de marcha rápido y excitarse el relé de mando; esto deja inoperante al pulsador de marcha lenta hasta que la presión del botón paro desexcita el relé CR1.

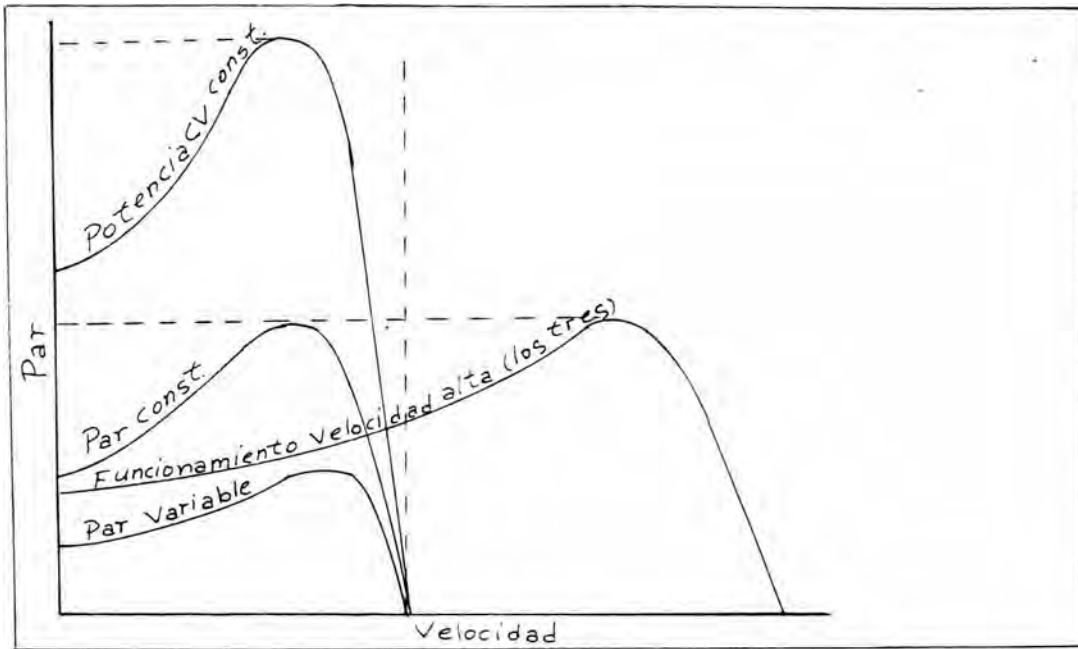


Fig. N° 8.

Curvas características de la función Par-Velocidad en los motores de inducción de bobinado único y de dos velocidades.

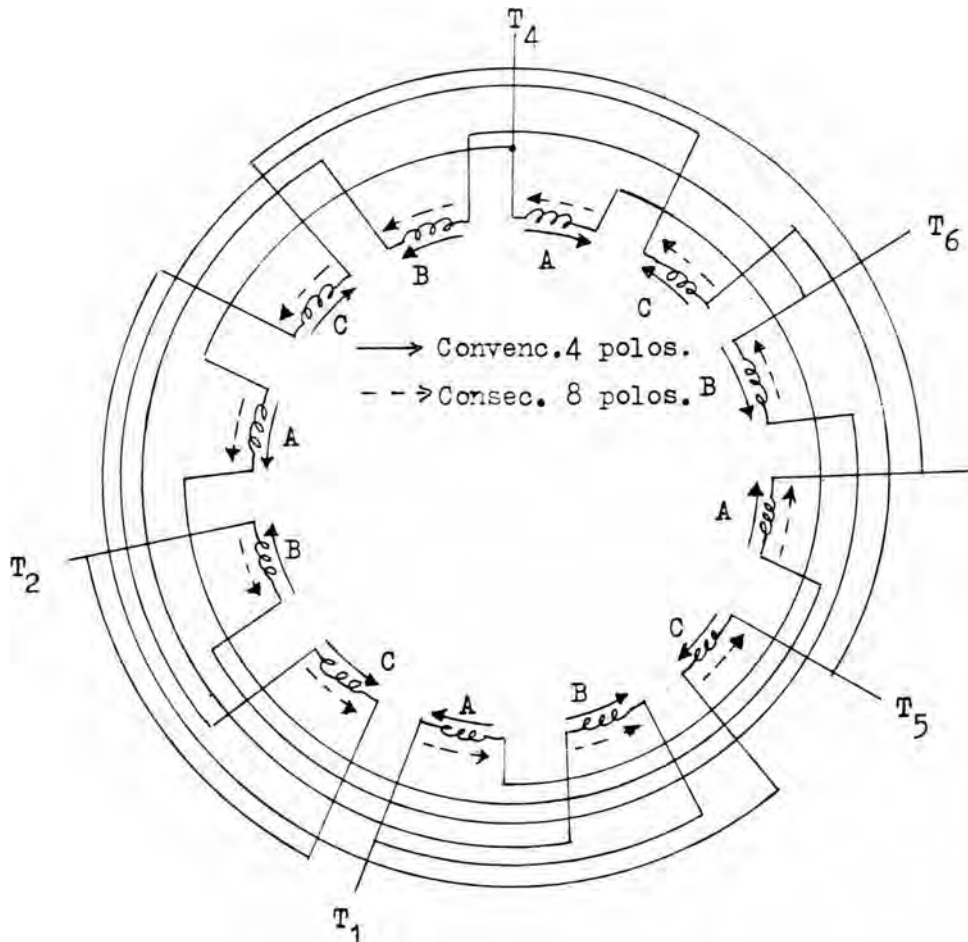


Fig. 9a» bobinado para un motor de inducción de bobinado único dos velocidades y par constante.

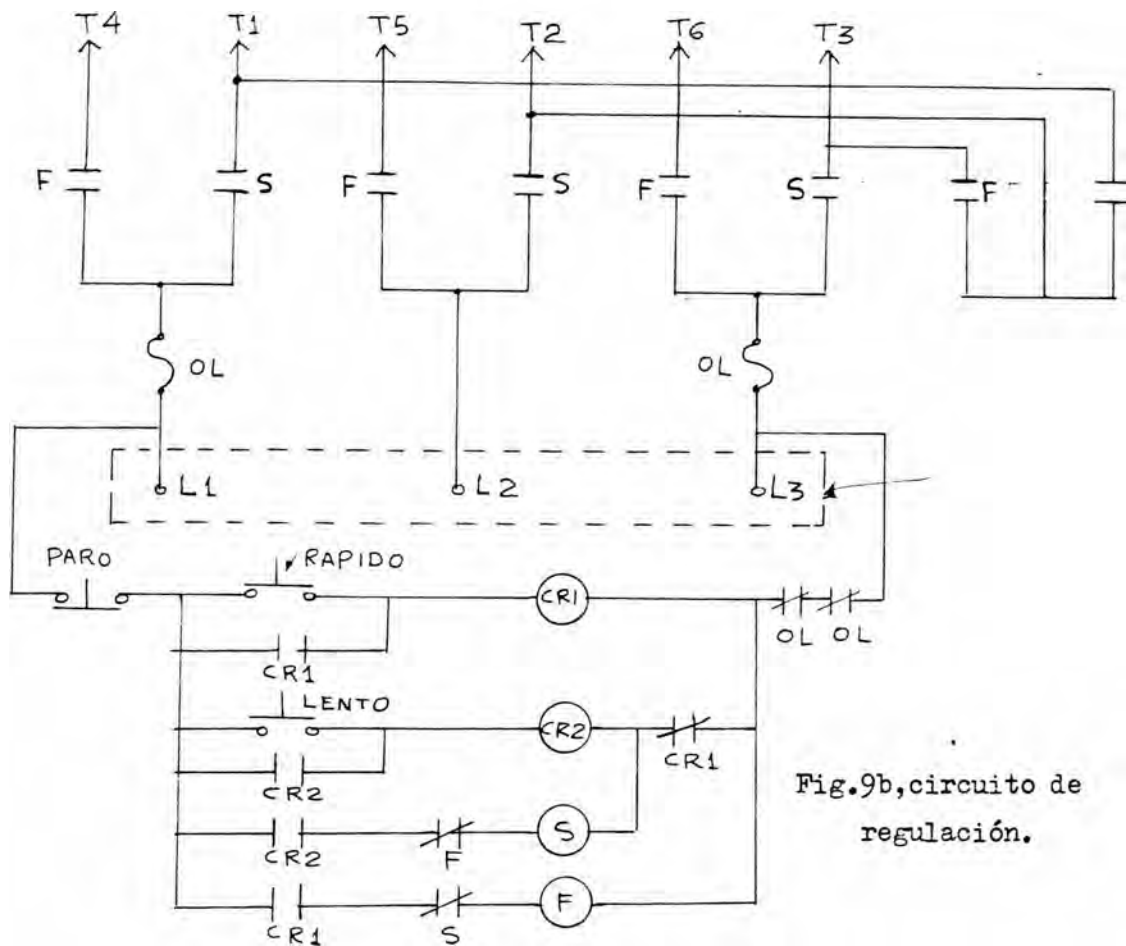


Fig.9b,circuito de regulación.

Fig.9. Bobinado y circuito de regulación para un motor de inducción de bobinado único dos velocidades y par constante. El motor puede arrancar a velocidad rápida o lenta, aunque cuando opera a velocidad rápida no puede pasar a la lenta hasta que se oprime el botón de paro.

1.4* Motores reversibles de simple bobinado y dos velocidades.-

El diagrama del circuito de regulación de la fig. 10, muestra las conexiones de un motor de bobinado único, dos velocidades y par constante que puede invertir su sentido de marcha solo con la velocidad alta. Se han incluido varios elementos de enclavamiento, destinados a proporcionar las siguientes e interesantes funciones s

1. El motor puede arrancar directamente en las posiciones derecha lento (LF). Derecha rápido (KF) o izquierda rápido (HR) por la sola presión del pulsador correspondiente.

2. Si el motor está operando en derecha lento, puede pasar di-

rectamente a derecha, rápido pulsando el correspondiente botón derecha rápido. Con esto se desexcitan el relé 1CR y el contactor LF y se permite que el contactor HF se excite durante la actuación del relé 2CR. Obsérvese que el contactor LF y el relé 2CR están enclavados mecánicamente.

3. Si el motor marcha en derecha lento, no puede hacerse cambiar directamente a izquierda rápido. Para hacerlo hay que apretar primero el botón de paro, a fin de que se desexcite el contactor LF y permita cerrar el contacto LF - T.C. después de una demora. El pulsador izquierda rápido puede entonces excitar el relé 3CR y el contactor HR.

4. No se puede pasar directamente de derecha rápido a izquierda rápido. Para ello hay que pasar primero por la parada, a fin de desexcitar el contactor HF, después de lo cual se cierra el contacto HF-T.C. con una demora, para hacer factible la actuación del botón izquierda rápido.

5. Si el motor funciona en derecha rápido, puede pasarse directamente a derecha lento apretando el botón derecha lento.

Sin embargo, el cambio a la velocidad inferior se efectúa con una demora, es decir una vez cerrado el contacto HF-T.C.

6. Si el motor marcha en izquierda rápido, solo puede pasarse a derecha lento o a derecha rápido después de apretar el botón de paro. Con esto se cierra el contacto N.C. 3CR en el circuito del contactor HF, y el contacto de enclavamiento N.C. HR-T.C. en los circuitos de 1CR y HF. Al cabo de una breve demora, quedan puestos en acción los pulsadores derecha rápido y derecha lento.

Respecto a la parte inferior del dibujo, se observará que las -

conexiones de los terminales están hechas de acuerdo con el esquema y la tabla de la fig. 7a, para las características de par constante. Los terminales T1, T2 y T3 se conectan respectivamente a L1, L2 y L3, y T1, T2 y T3, se ponen en corto circuito por los dos contactos de enclavamiento HF, y el motor marcha en derecha rápido. Los terminales de bobinado T4, T5 y T6 se conectan, respectivamente a L3, L2 y L1 para marchar en izquierda derecha, con T1, T2 y T3 en corto circuito por los dos contactos de enclavamiento HR.

Obsérvese también en la fig. 10, que se han colocado luces indicadoras, con sus colores habituales y con símbolos de identificación. Se iluminan al cerrarse el contacto de enclavamiento correspondiente (LF, HF o HR).

La fig. 11 representa un circuito de control proyectado para permitir que un motor de simple bobinado, dos velocidades y potencia constante, opere en sentido normal (derecha) o inverso (izquierda). Se han incluido contactos de enclavamiento para poder desempeñar las funciones siguientes:

1. SI motor debe arrancar en derecha lento o en izquierda lento. No puede hacerlo en derecha rápido o izquierda rápido, porque los contactos CR - T.C. están abiertos en los circuitos de los contactos HF y HR.
2. Se puede pasar de derecha lento a derecha rápido, o de izquierda lento a izquierda rápido, tras una demora, regulada por el relé de mando CR. Obsérvese que los dos contactos CR - T.O., permanecen cerrados hasta que transcurre la temporización dada por el relé CR así los pulsadores derecha rápido e izquierda rápido siguen inoperantes hasta que se abren los citados contactos. Por tanto, no es

posible pasar a la velocidad superior hasta que el motor haya acelerado a fondo en la inferior.

3. Para pasar de derecha lento a izquierda lento, o a la inversa es necesario pasar antes por la parada. Ello obedece a que hay un enclavamiento abierto (LF) en el circuito de la bobina del contactor LR cuando el motor marcha en derecha lento, y otro enclavamiento LR abierto en el circuito de la bobina del contactor LF durante la marcha en izquierda lento.

4. Para pasar de derecha rápido a derecha lento o izquierda rápido a izquierda lento, hay que apretar antes el botón de paro. Esto obedece a que estará abierto el contacto de enclavamiento N.C. HF o el N.C. ER (ambos en serie); por tanto, los pulsadores derecha lento e izquierda lento permanecen inoperantes hasta que se deseziten los contactores HF o HR.

Se observará que la parte derecha del diagrama, que representa, el bobinado del estator y sus conexiones terminales, corresponde a la fig.7b, para las características de potencia constante en CV. Con el motor en marcha lenta, los terminales de alimentación L1, L2, y L3 van conectadas a T1, T2 y T3, y el contactor IKT une a T4, T5 y T6 para formar el punto neutro de la doble estrella en paralelo. Si la máquina marcha de prisa, L1, L2 y L3 van conectados a los terminales del estator T4, T5 y T6. Las dos parejas de contactores con enclavamiento mecánico LF-IÜ y HF-HR funcionan para intercambiar los terminales de alimentación L1-L2, al objeto de invertir el sentido de rotación del motor.

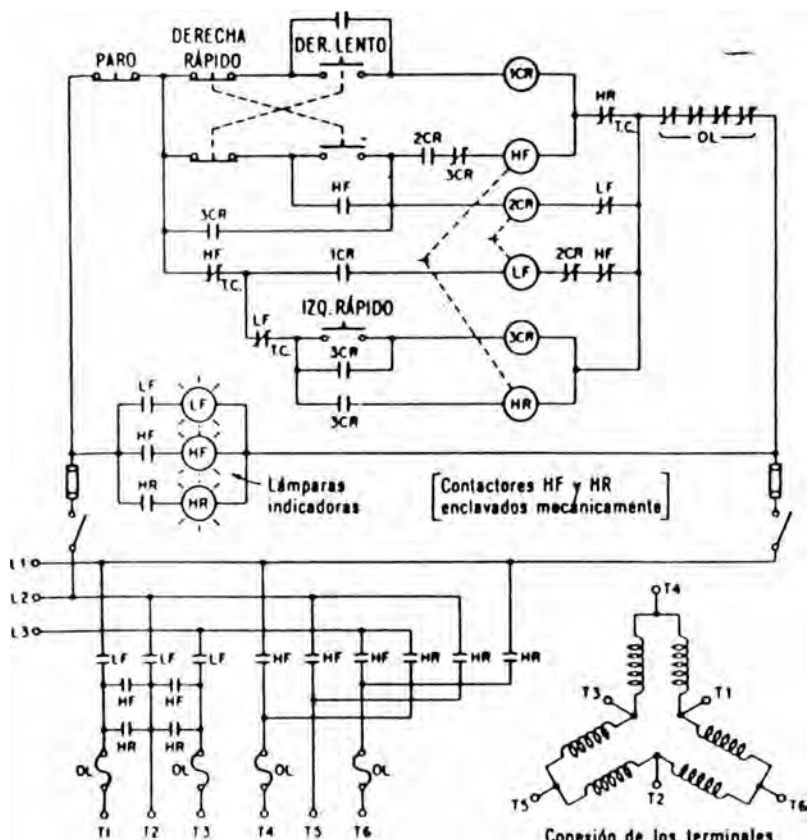


Fig. 10.

Circuito de control de un motor de hollinado único y «los velocidades, en que se puede invertir la marcha sólo en la velocidad A.I.T.A., y que lleve relés temporizad» de deceleración e inversión. Se lia proveído para operar con par constante

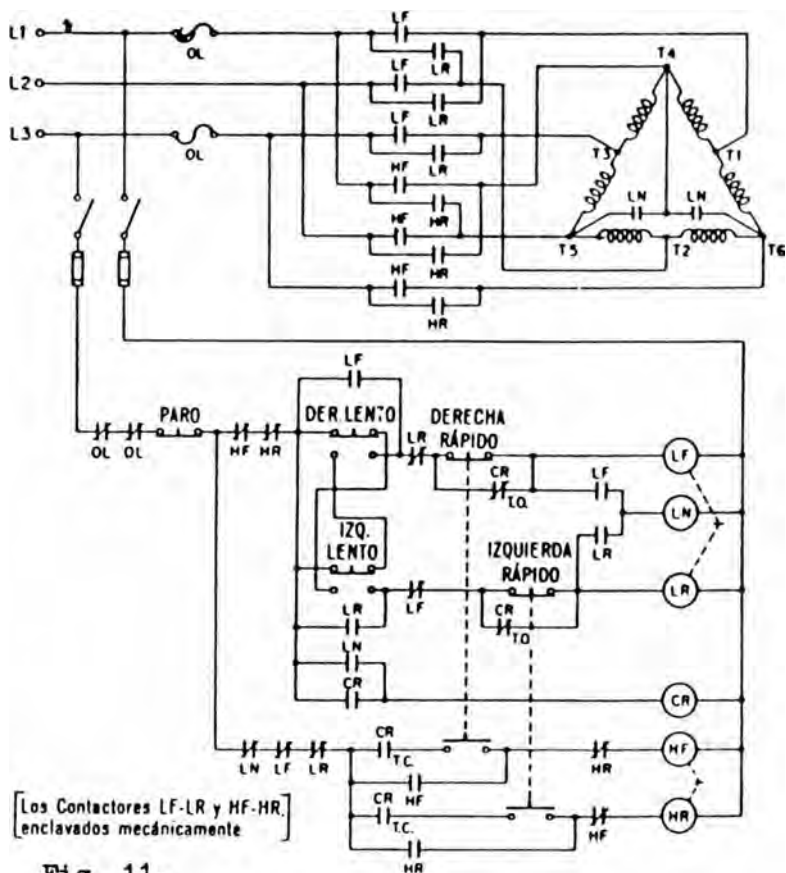


Fig. 11.

Deaframa del circuito regulador tie un motor de bobinado único y dos velocidades, en «ne sc puede Invertir lu mnrehn en ambas velocidades. I'ro-ycctndn pura operar con potencia constante

2.0 TERMINOLOGIA DE DEVANADOS ELECTRICOS.

Hay claramente dos tipos básicos de devanados s

a) DEVANADOS CONGRUENTES.- Llamado por otros autores como devanados de ranura integral o devanados "uniformemente agrupados" también puede ser "ligeramente agrupado en forma desigual".

Estos devanados se caracterizan por un agrupamiento uniforme de las bobinas. Sin embargo, aunque un devanado distribuido en un número entero de ranuras por polo y por fase (congruente) se pueda distribuir en agrupamientos uniformes, no quiere decir que sea indispensable hacerlo.

Ha sido raro para el número de bobinados por grupo en un devanado dado sea diferente, sea mayor que uno. Por ejemplo, en el caso de un devanado para 8 polos, 3 fases en 72 ranuras, normalmente se asocian sus bobinas en grupos de 3, o sea : 3*3.3.3 - 3.3.3.3 pero también podrían agruparse así s 2.4.2.4 - 2.4.2.4 ó bien 2.4.4.2 - 2.4.4.2, y su comportamiento como máquina de 8 polos en los tres , casos, sólo se distinguirá en segundo grado.

Tales devanados de agrupación irregular aunque el número de ranuras por polo y fase sea entero, han sido denominados por su inventor devanados "casi no congruentes", demostrando que al usarlos de acuerdo con las circunstancias, se obtienen ciertos efectos muy deseables

b.O) DEVALADOS NO CONGRUENTES.- Llamado también por algunos autores, de- vanados de ranura fraccional.

-En los devanados no congruentes por lo general el agrupamiento de las bobinas no es uniforme, debido a que el número de ranuras por polo y fase, no es entero . Casi sin excepción se acostumbra a agrupar las bobinas de estos devanados en la forma mas uniforme posible. En P.A.M. estos devanados se consideran como "apenas desigualmente agrupados" o "casi igualmente agrupados".

Los devanados no congruentes no debieran de ser usados arbitrariamente, sin ver algún objeto específico, ha sido demostrado que los valores resultantes pueden ser obtenidos en relación con los devanados de cambio de velocidad, las desventajas fuera de tal uso son ordinarios. En la práctica, la diferencia entre el número de bobinas por grupo rara vez es mas de uno.

-En las máquinas de baja velocidad con muchos polos, el número de ranuras por polo y por fase pueden ser dos o menos. En estos casos se utiliza el arrollamiento no congruente. Se evita el uso de $q=1$, ya que éste tiene un alto contenido de armónicas. Cuando hay una posibilidad de que corrientes armónicas puedan originar interferencias con líneas telefónicas, se utiliza un valor fraccionario de que aún en los casos donde podría ser un entero.

NOTA : $q = \left(\frac{\text{bobinas}}{\text{fase} \times \text{polo}} \right)$

b.1) DEVANADO "BRISTOL" NO CONGRUENTE O RAWCLIFFE.-

La mayoría de los devanados polifásicos en uso, en especial para motores asincronos, son de agrupación uniforme. Para los fines de P.A.K., los devanados no congruentes con agrupamiento desigual, ofrecen marcada ventaja, en contraste con los devanados congruen-

tes.

Tales arrollamientos son usados regularmente para máquinas de cambio de velocidad; y en algunos casos, el deliberado uso de alto grado de irregularidad en grupos de bobinas produce grandes ventajas. Por tanto la agrupación en la forma mas uniforme posible, que hasta ahora se consideraba como una condición necesaria, ha resultado ser un requisito bastante aleatorio.

La diferencia con la forma tradicional de un devanado no congruente consiste en el agrupamiento de las bobinas para producir un devanado tipo "Bristol", cuya distribución para una fase se representa en la fig.1, en la cuál la configuración de cierto devanado, no congruente es :

Polo N° ' 1.2.3.4 - 5.6 .7 .8

N° ranuras a-
signadas a la ' 1 2 1 2 - 1 2 1 2
fase A.

y se agruparía para tener un devanado Bristol en :

Polo N° 1 2.3.4 - 5-6.7.8

ranuras a~
signadas a la 1•2•2. 1 - 1.2.2. 1
fase A.

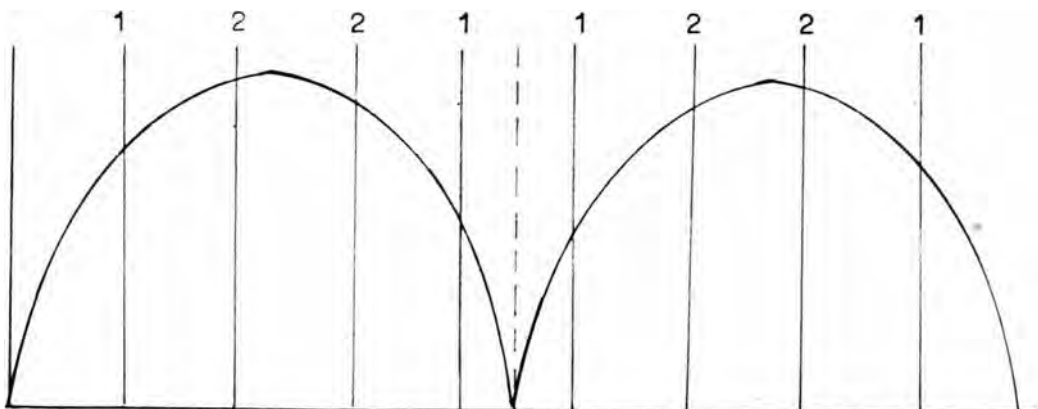


Fig. 1.

- En la cuál la pre configuración resulta en una onda que corresponda a la agrupación de los conductores. En otras palabras, se requiere variar la amplitud de onda de f.m.m. de fase (amplitud polar) senoidalmente en la periferia de la máquina, modificando para ello los grupos de bobinas, y produciendo después la modulación por medio de las inversiones, en el sentido instantáneo de la corriente en una mitad del devanado.

- Al invertir el sentido de la corriente que circula en una mitad, se produce una onda sinusoidal completa a lo largo del desarrollo del estator.

El número de ranuras por polo y por fase, en nuestro caso viene dado por :

$$q = \frac{36}{3 \times 8} = \frac{12}{8} = 1 \frac{1}{2} ;$$

o sea :

un devanado no congruente, por consiguiente 4 de los polos constarán de una ranura por fase y los cuatro restantes constarán de dos ranuras por fase.

La posibilidad de agrupación de las bobinas tipo "Bristol" sería en este caso de :

$$q = \frac{36}{2} = 18 \text{ ranuras/polo} \times \text{fase} ; \text{ repartidos en :}$$

$$S1 \quad 36$$

$$m = -y = 12 \text{ ranuras, conforme se hizo en el acápite b1.}$$

2.1 Tipos de conexión para variar el número de polos.-

Existen claramente 2 tipos de conexión.

a) Conexión Dahlander.- (Relación 2 : 1)

La velocidad de giro del campo magnético se puede variar alterando el número de polos creados en el devanado estatórico , para lo cuál se invierte el sentido de la corriente en una mitad del devanado, simultáneamente deberán cambiarse las conexiones en el rotor, cuando este no es del tipo jaula de ardilla , razón por la que éste género de control de velocidad resulta más práctico para los motores de este último tipo.

Entran en consideración fundamentalmente las siguientes posibilidades :

Conexión Dahlander con :

- 1) Dos devanados independientes con dos números cualesquiera de polos.
- 2) Un devanado en conexión Dahlander y otro devanado, es decir 3 números de polos.
- 3) Dos devanados en conexión Dahlander y, por tanto cuatro números de polos.

La conmutación polar, con conexión Dahlander, puede producir 2 o más velocidades según las combinaciones que se puedan obtener - de uno o más devanados en el estator, como puede verse en la fig.1.

Fig.1 a) La inversión sistemática de la mitad de las bobinas divide el número de polos por dos.

b) Velocidad I

Lineas a b e

Unanse A B C dos circuitos estrella en paralelo.

Velocidad II

Lineas A B C

Sepárense a b e circuito triángulo serie.

En el saco II la corriente circula por las bobinas en serie.

El sentido de la circulación de la corriente se invierte en la mitad de las bobinas con la conexión para la velocidad I, produciendo así la mitad del número de polos, y por lo tanto, el doble de la velocidad. Las combinaciones anteriores son los más usuales. A veces se emplea la siguiente combinación t

I. Líneas ABC, bobinas en serie.

II. Líneas a b e (inversión de 1/2 de las bobinas) únanse ABC.

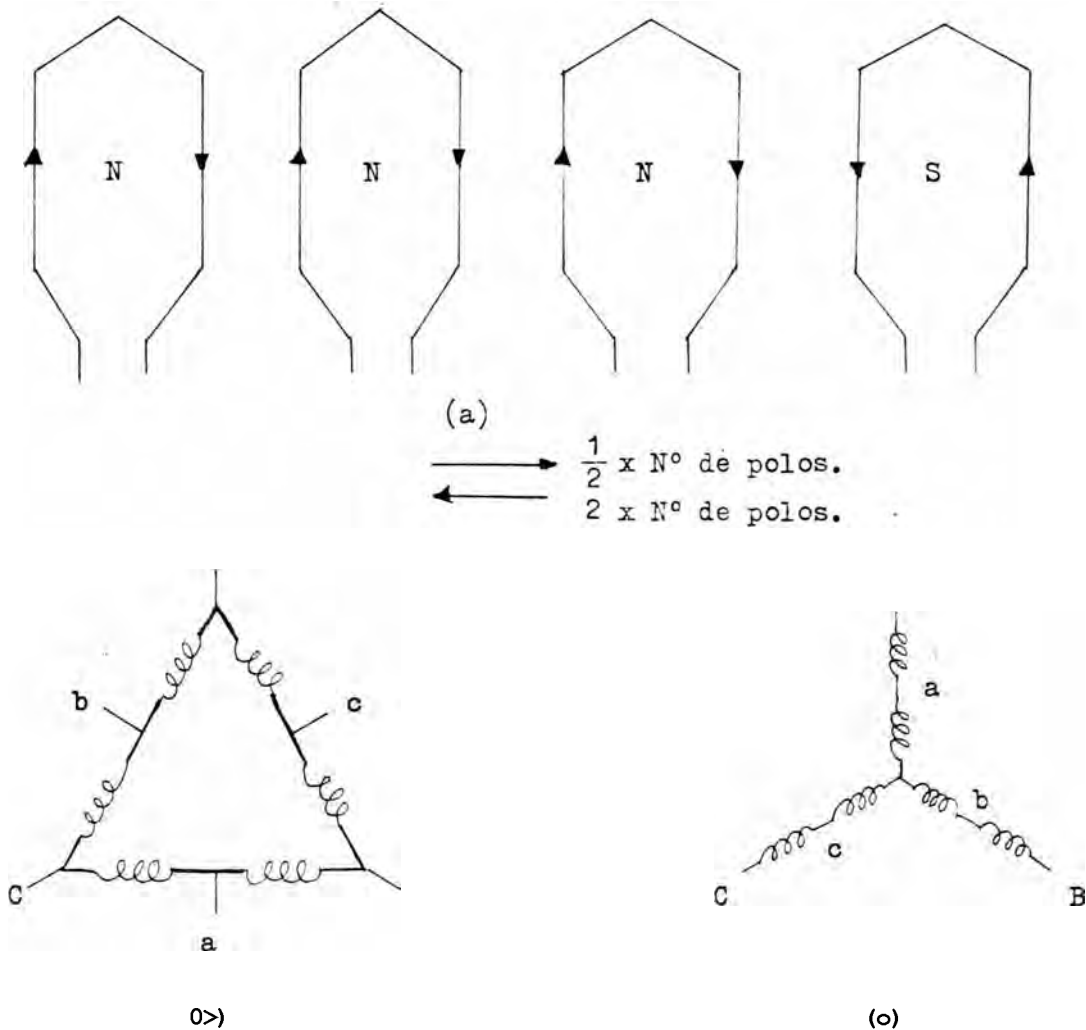


Fig. 1.0

Conexión Dahlander.

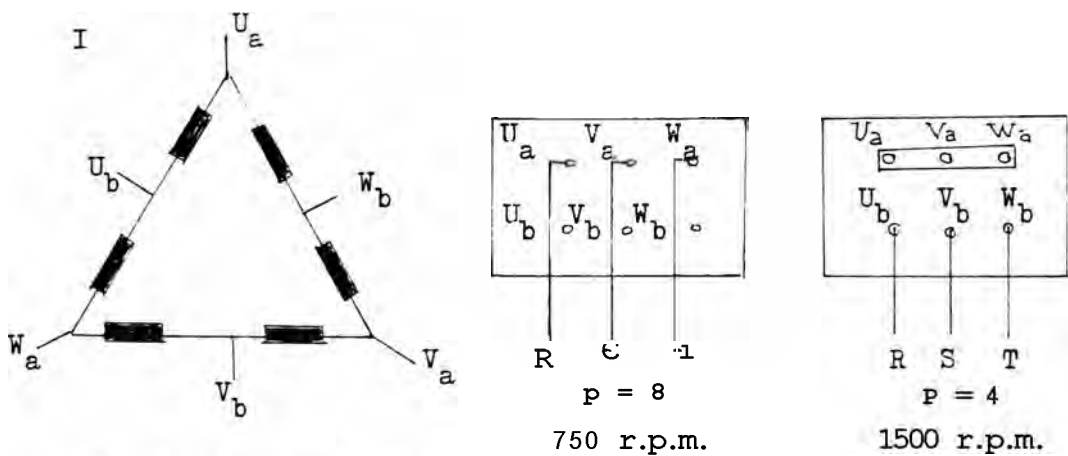


Fig. 2... (continúa en la

En la fig. 2 se relacionan, para distintos números de polos en motores de más de 30 KW (1500 r.p.m.) la conexión del devanado estático y las correspondientes conexiones de la placa de bornes. De la tabla pueden obtenerse los subíndices y las velocidades sincrónicas, así como el número y clase de devanados que aparecen en los esquemas.

Los números de polos destacados en negrilla en la tabla son I06 que con más frecuencia se presentan en la práctica y, a ser posible, deben emplearse con preferencia.

La conexión Dahlander con una relación del número de polos de 1 : 2 ocupa una posición preferente, ya que con ella se puede conseguir dos velocidades con un solo devanado.

Para ello únicamente se requieren dos bornes. Para variar el número de polos sólo es preciso conmutar las conexiones y establecer un centro neutro de estrellas. El devanado consta de dos grupos de bobinas por fase, que en la mayoría de los casos se conectan en serie y triángulo para un número de polos elevado, y en conexión de

doble estrella para un número de polos reducido.

Fig.2. Esquemas de los devanados y las correspondientes conexiones de la placa de bornes de motores trifásicos de polos conmutables. En la conexión según IV se reserva la posibilidad de abrir la conexión Dahlander y de una disposición de 13 bornes.

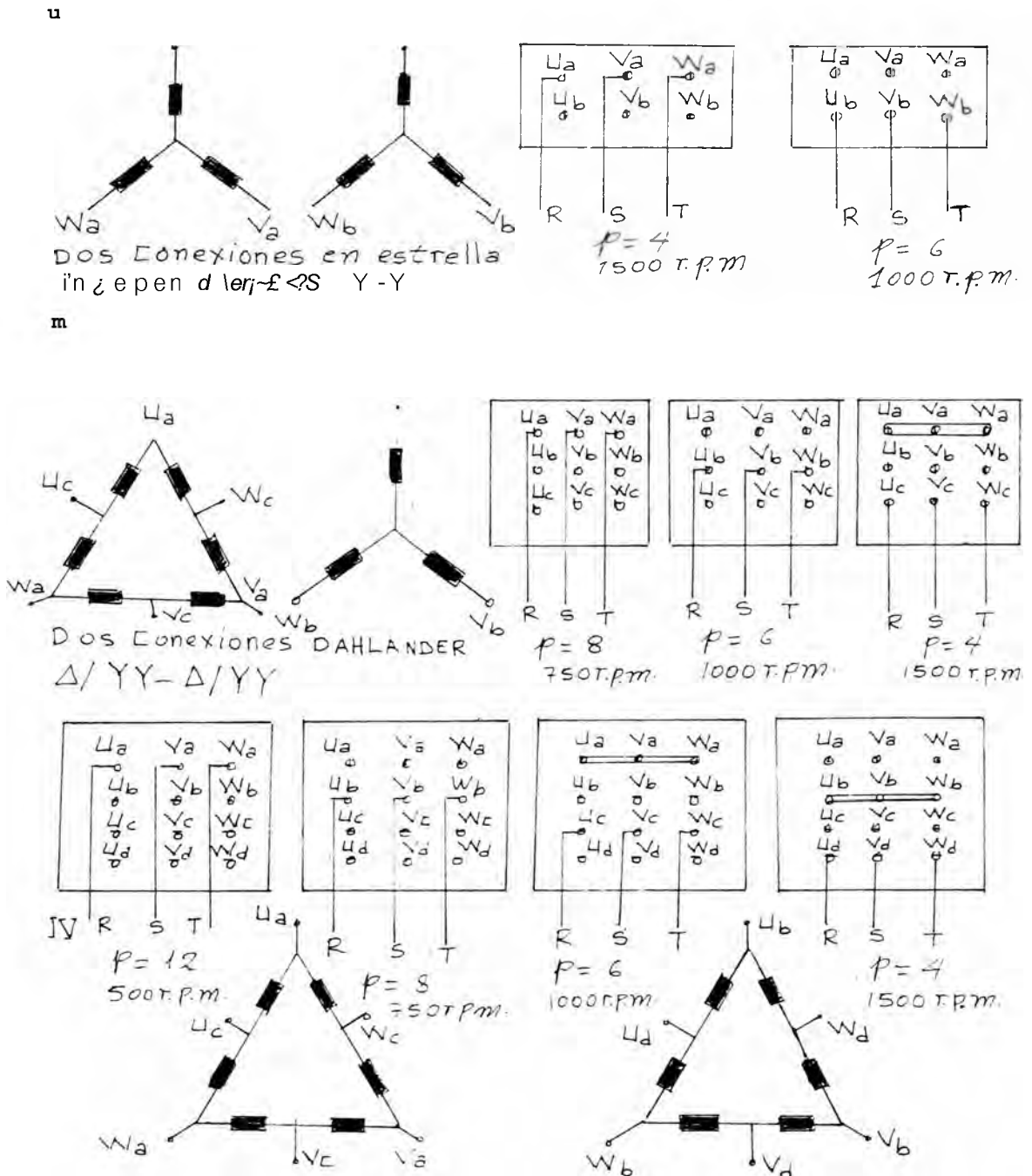


Fig.2 Esquemas de los devanados y las correspondientes conexiones de la placa de bornes de motores trifásicos de polos conmutables.

TABLA. I. NUMERO DE POLOS Y VELOCIDADES SINCRONICAS DE MOTORES TRIFASICOS DE POLOS CONMUTABLES.

NUMERO DE POLOS	Letras subíndice • Fig.	Velocidades síncronas a 50 Hz en RPM.	# de devan.	Clase de Conexión devan. según	
4/2	a/b	1500/300		devana-	
8/4	a/b	750/1500	1	do Dab-	Fig.I
12/6	a/b	500/1000		lander.	
4/6	a/b	1500/1000		devana-	
6/8	a/b	1000/750	2	dos in-	Fig.II
4/12	a/b	1500/500		dependí-	
8/12	a/b	750/500		entes	
8/4/2	a/b/c	750/1500/3000		devana-	
8/6/4	a/b/c	750/1000/1500		dos Dab-	
12/6/4	a/b/c	500/1000/1500	2	lander	Fig.III
12/8/4	a/b/c	500/750/1500		independientes.	
12/8/6	a/b/c	500/750/1000			
12/8/6/4	a/b/c/d	500/750/1000/1500	f	devana-	
12/6/4/2	a/b/c/d	500/1000/1500/3000		dos Dab-	Fig.rv
				lander	

Para el cálculo de los motores es importante conocer las potencias para ambas velocidades..

Si no se imponen otras exigencias, se supondrá siempre que el par es aproximadamente igual en ambas velocidades.

En la conexión Dablander ambas potencias nominales están en una cierta relación, en la conexión normal (triángulo-doble estrella)

viene a ser aproximadamente de 1 t 1.3 hasta 1 * 1.8 .No obstante, puede preverse también la misma potencia para ambas velocidades, (conexión Dahlander invertida, doble estrella-triángulo). Si el par varía cuadráticamente con la velocidad., como es el caso, p. e. en bombas, compresores rotativos y máquinas operadores similares , es cuando mejor puede adaptarse la relación de potencias, por aplicación de la conexión estrella-doble estrella con un valor del orden de 0.3 : 1, al par antagónico tan distinto.

Con vistas al aspecto económico, sencillez del servicio y mantenimiento, los motores trifásicos de polos conmutables se construyen generalmente con motor de jaula de ardilla y para conexión directa. Los motores pueden arrancar desde el reposo con cualquier número de polos.

No obstante, si se quieren obtener determinados valores de arranque, reducir el calor durante el arranque, o si hubiera que acelerar grandes masas de inercia, a menudo puede ser conveniente a mancar siempre el motor con una velocidad baja y conmutar mas tarde a una velocidad superior,

b) CONEXION RAWCLIFFE (Bristol).-

Con el advenimiento de la conexión Rawcliffe (Bristol), y la mejora técnica de P.A.N., la conexión Dahlander pasa a ser uno de los casos de modulación de un devanado, siendo ahora posible obtener devanados capaces de funcionar para cualquier relación de velocidades.

La fig. 3a ilustra la onda de f.m.m. producida por un devanado, convencional, cuyas bobinas se han agrupado para producir 8 polos. La intensidad del campo magnético producido por este devanado se

puede expresar por medio de la ecuación :

$$E_g = A \text{ Sen } \left(\frac{P}{2} \theta \right)$$

en donde A es igual a la amplitud, P es el número de polos y θ es igual al ángulo magnético desde el origen.

En la fig. 3'b) se representa la onda de modulación correspondiente al efecto de invertir la dirección de la corriente en la segunda mitad del devanado. Puede tomarse como una burda aproximación a una onda senoidal, pero realmente es una onda rectangular obtenida al hacerla positiva de 0 a π y negativa (-) de π a 2π .

En la onda de modulación, la amplitud polar A toma la forma $C \text{ Sen } K\theta$. Por consiguiente, el resultado corresponde a la onda representada en la fig. 3d, en la cual

$$\begin{aligned} i &= c \text{ Sen } K\theta \text{ Sen } \frac{p}{2} \theta \\ &= \frac{C}{2} \left[\text{Cos } \left(\frac{p}{2} - K \right) \theta - \text{Cos } \left(\frac{p}{2} + K \right) \theta \right] \end{aligned}$$

K = Número de ciclos completos de modulación.

Si en el devanado estático se omiten los grupos de bobinas 4 y 8, y se invierten los grupos 5,6,7 con respecto a los grupos 1,2 y 3) el resultado es igual a la aplicación de una onda moduladora, en la forma indicada en la fig.3C, y el producto $a \times c$, produce la onda modulada de la fig. 3e.

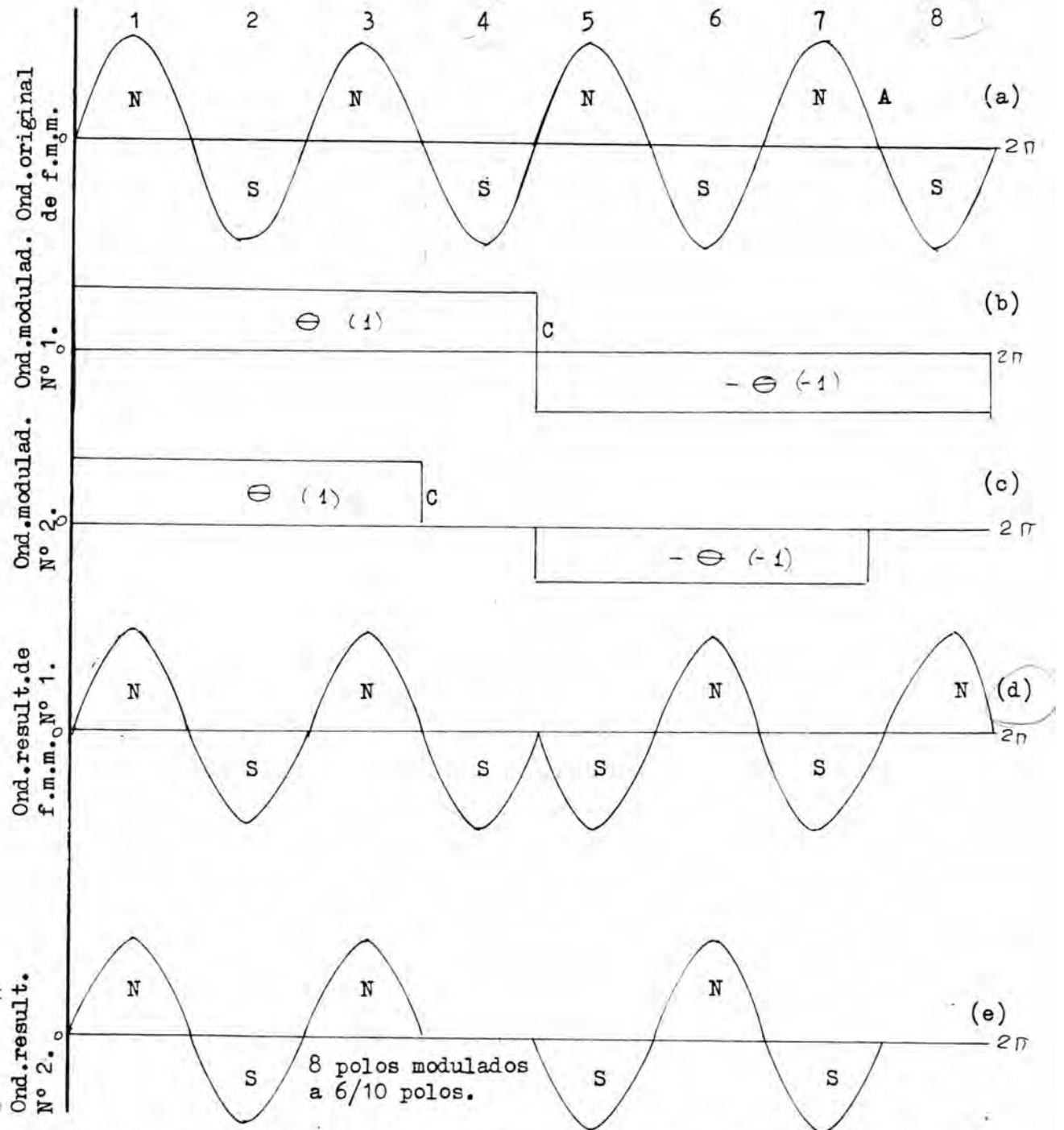


Fig. N° 3. Modulación de amplitud polar (PAM), para modular de acuerdo a la onda π° 1s inviértanse los grupos 5, 6, 7 y 8, con respecto a los grupos 1, 2, 3, y 4. Para modular de acuerdo a la onda K° 2. Omítanse los grupos 4 y 8 e inviértanse los grupos 5, 6, y 7 con respecto a los grupos 1, 2 y 3.

En la fig. 4b se puede observar cómo se ha dado cierta forma es calañada a la onda moduladora, de manera que su forma se aproxima, a una onda senoidal, suprimiendo para ello la mitad de las bobinas, en los grupos 1,4,5 y 8 6 sea las más próximas a los puntos cero de la onda moduladora, e invirtiendo las bobinas de los grupos 5j6, 7 y 8 con respecto a los grupos 1,2,3,4.

La onda de la fig.4C es el resultado de $a \times b$ en dicho gráfico. Al emplear un devanado irregular no congruente (devanado Bristol), cuya agrupación de ranuras por fase sea s

1.2.2.5 - 1.2.2.1, en lugar de la agrupación clásica

1.2.1.2 - 1.2.1.2, se produce una onda de f.m.m. de la forma indicada por la fig. 5a>la cuál, al ser modulada por la onda b de la misma fig., produce la onda representada en c, que es una aproximación bastante cercana a la onda $(\cos 3 \theta - \cos 5 \theta)$ como puede verse en el gráfico de la fig.6, en el cual se han trazado las dos ondas y obtenido la resultante representada por la curva de puntos.

Esto hace resaltar un aspecto de gran importancia, y es que no, se puede realizar simplemente una modulación completa con una onda $(\sin f \theta)$, de un devanado existente $(\sin P \theta)$.

En realidad, la única cosa que puede hacerse es invertir el sentido de la corriente en la mitad de los grupos de bobinas, en forma tal que el devanado original no produzca una onda sinusoidal, si no mas bien una onda del tipo de la fig. 5a., para que al invertir una mitad del devanado (cambio que se introduce al excitar el devanado por otros puntos, cano en la forma anteriormente descrita para la conexión Dahlander) la onda resultante viene a ser igual a la diferencia de otras dos s

$$\cos (P - E\&) \text{ y } \cos (P + K\theta)$$

La onda de modulación considerado para todos los análisis de devanados ($K=1$) consiste en una variación senoidal completa en toda la periferie de la máquina. La idea de PAM, es dar cierta amplitud a esta onda, modificando para ello los grupos de bobinas y produciendo después la modulación por medio de las inversiones en el sentido instantáneo de la corriente en una mitad del devanado. En otras palabras, se requiere variar la amplitud de la onda de f.m.m. de fase (amplitud polar) senoidalmente en la periferie de la máquina volviendo a los gráficos de la fig. 5»

a) Corresponde a la onda original de f.m.m., obtenida luego de haber alterado la distribución de los conductores, en contraste con la forma "tradicionalmente uniforme". Los 8 polos resultantes se pueden observar en el gráfico.

b) Se produce la modulación al invertir la mitad del devanado.

c) La resultante, después de invertir la mitad de las bobinas, no aparece a primera vista, ya que es igual a la diferencia entre los campos de 10 y de 6 polos. En el gráfico de la fig.6, se puede observar que la diferencia entre un campo de seis ^{6 polos*} polos (línea continua) y el campo de 10 polos (línea de trazo y punto, ambos de igual amplitud), es un campo de 8 polos (línea de puntos), la cual se ha modulado en amplitud.

Dicho gráfico, por consiguiente, ilustra el resultado de modular una onda senoidal pura de 8 polos, por una senoidal pura $S_{8\theta}$.

— Realmente este es un caso teórico mientras que los gráficos de la fig.5) revelan que con la redistribución de los conductores al invertir una mitad del devanado, se produce una onda de forma •muy

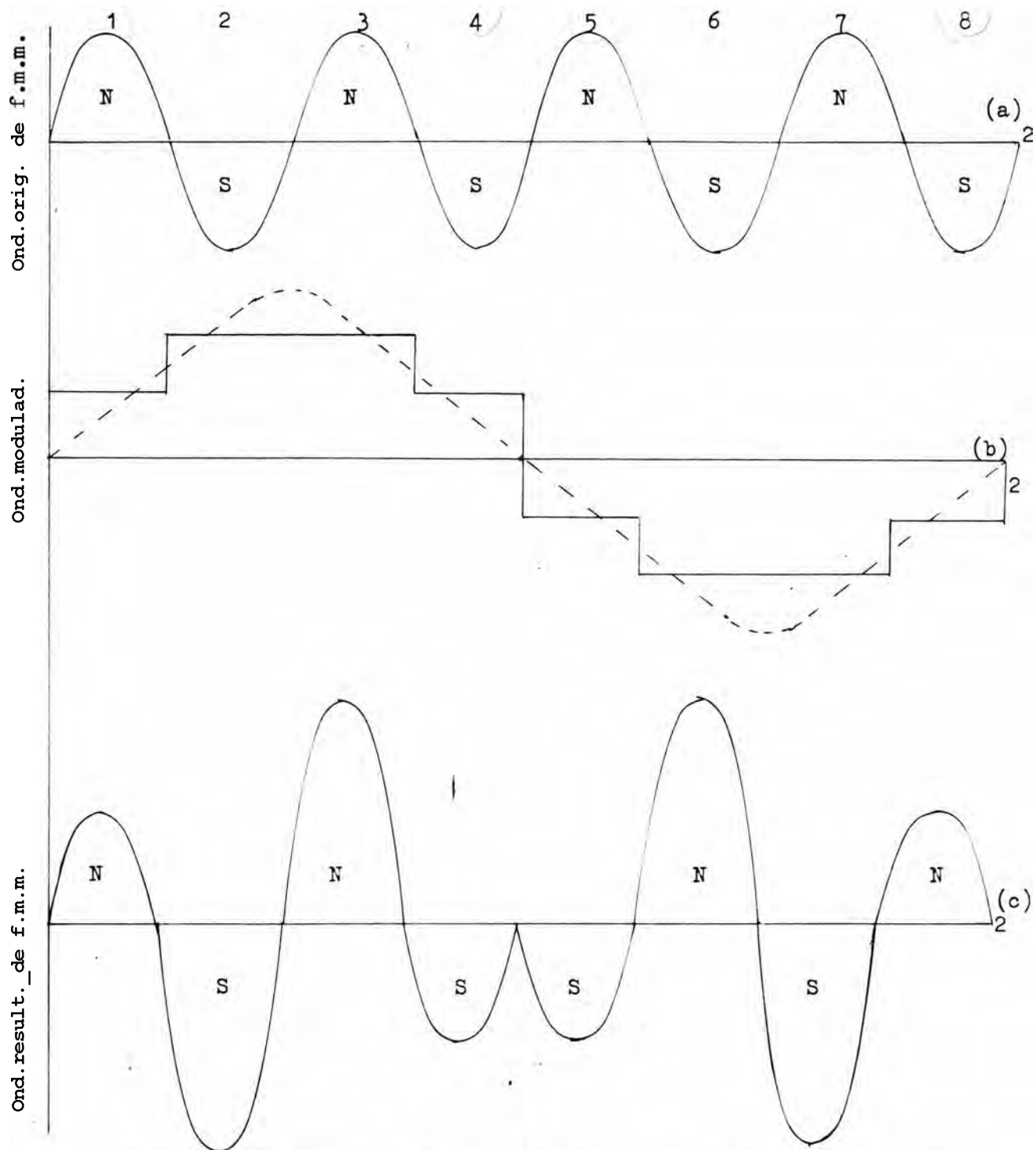


Fig. N° 4. PAM por medio de una onda aproximadamente sinusoidal. Para modular, inviértanse grupos 5, 6, 7 y 8, con respecto a los grupos 1, 2, 3 y 4) Omitiendo la mitad de las bobinas en los grupos 1, 4, 3 y 8 (omítanse las bobinas más próximas a los puntos cero en la onda de modulación).

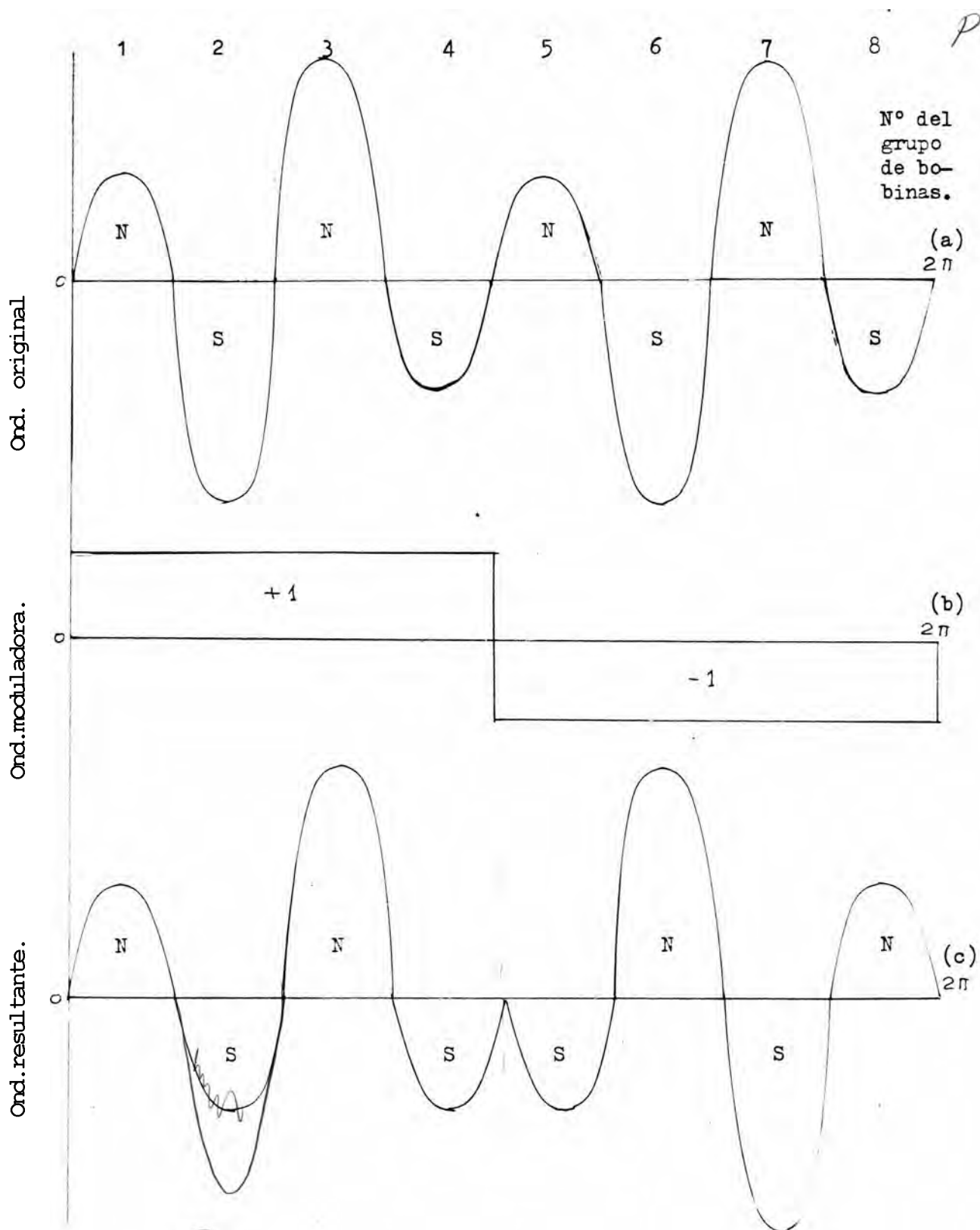
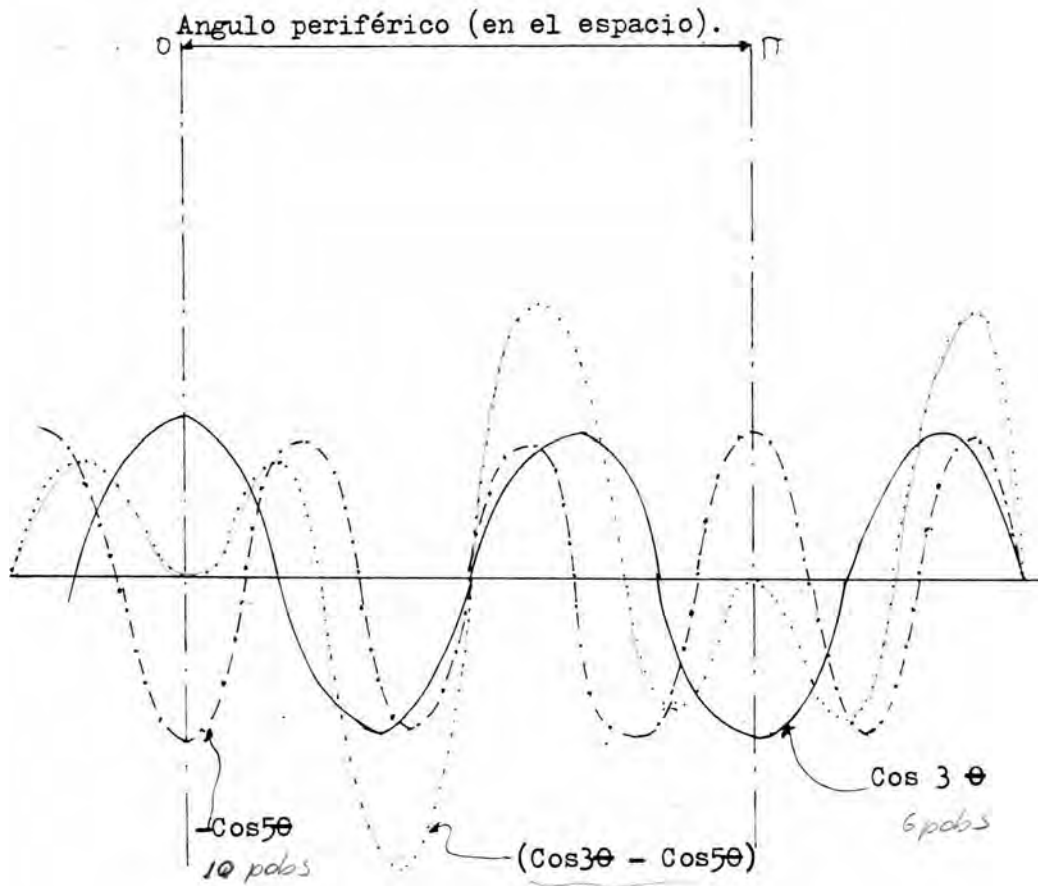


Fig.5. Modulación de amplitud polar en un devanado de paso parcial. para modular, inviértanse los grupos 5,6,7 y 8, con respecto a los grupos 1,2,3 y 4 (agrupación original: 1.2.2.1-1.2.2.1).



- _____ 6 polos
- i. 10 polos
- modulado 8 polos

Fig. 6

Supóngase que las f.m.m. de un devanado estatórico trifásico -

son :

- f.m.m. de la fase A = $\text{Sen } \left(\frac{8}{2} \right) \theta$)
- Amplitud de la onda moduladora = $C \cdot \text{sen } \theta$
- f.m.m. de la onda modulada = $C \cdot \text{Sen } \theta \cdot \text{Sen } 4 \theta$

Luego se tiene s

$$C \cdot \text{Sen } \theta \cdot \text{Sen } 4 \theta = i? (\text{Cos } 3\theta - \text{Cos } 5\theta) \gg$$

similar a la presentada por la línea de puntos de la fig.6 lo cual indica que el gráfico 50, es prácticamente igual a la diferencia entre las ondas de 6 polos y 10 polos, aunque esto no se aprecie a primera vista.

2.2 Fundamento matemático de la teoría P.A.K.

Supóngase que la distribución en el espacio de las f.m.m. correspondientes a un devanado estático trifásico son :

$$\text{Fase A : } A \text{ Sen } P\omega = M_A$$

$$\text{Fase B : } A \text{ Sen } (P\omega - 2\pi/3) = M_B$$

$$\text{Fase C : } A \text{ Sen } (P\omega - 4\pi/3) = M_C$$

P = Pares de polos.

Si la amplitud polar es modulada en el espacio, según una onda de K polos y amplitud C (K = número de ciclos completos de modulación) tenemos :

$$A = C \text{ Sen } K\omega$$

$$B = C \text{ Sen } (K\omega - \pi/3)$$

$$C = C \text{ Sen } (K\omega - 2\pi/3)$$

$$M_A = C \text{ Sen } P\omega \cdot \text{Sen } K\omega$$

$$M_B = C \text{ Sen } (P\omega - 2\pi/3) \cdot \text{Sen } (K\omega - \pi/3)$$

$$M_C = C \text{ Sen } (P\omega - 4\pi/3) \cdot \text{Sen } (K\omega - 2\pi/3)$$

Después de las transformaciones trigonométricas respectivas se obtiene s

$$M_a = \frac{1}{2} [\cos (P - K)\omega - \cos (P + K)\omega] \quad (1)$$

$$M_b = \frac{1}{2} [\cos ((P - K)\omega - \frac{2\pi}{3} + \alpha) - \cos ((P + K)\omega - \frac{2\pi}{3} - \alpha)] \quad (2)$$

$$M_c = \frac{1}{2} [\cos ((P - K)\omega - \frac{4\pi}{3} + \alpha) - \cos ((P + K)\omega - \frac{4\pi}{3} - \alpha)] \quad (3)$$

cuando $\alpha = \frac{2\pi}{3}$, y $\hat{\alpha} = \hat{\pi}$, las ecuaciones (1), (2), (3) se transfor -

man en :

$$\frac{n}{Y} \cos(p - K)e - \frac{n}{2} \cos(p + K) \quad (4)$$

$$\frac{C}{2} \cos(p - x)e - \frac{C}{Y} (\cos((p + K)e - \frac{4-17}{3})) \quad (5)$$

$$\cos(p - K)e - \frac{C}{2} (\cos((p + K)e - \frac{8\pi}{3})) \quad (6)$$

Si $\underline{U} = -21/3$, y $P = -41/3$, las ecuaciones (1), (2) y (3) se transfor-

man en :

$$\frac{n}{Y} \cos(p - K) - \frac{n}{2} \cos(p + K) \quad (7)$$

$$\frac{C}{Y} \cos((p - K)e - \frac{4\pi}{3}) - \frac{C}{Y} \cos(p + K) \quad (8)$$

$$\frac{C}{2} \cos((p - K)e - \frac{4\pi}{3}) - \frac{C}{Y} \cos(p + K) \quad (9)$$

Las ecuaciones (4) > (5) y (6) en las cuales $(Xy \wedge)$ tienen valores positivos, corresponden a una modulación en el orden a 6c .

Los primeros sumandos de las tres ecuaciones están en fase y los segundos están defasados un ángulo $2 \wedge / 3$. La resultante es una f.m.m. de $(P \ll K)$ pares de polos.

Si se asignan valores negativos para \wedge y p , o sea que la modulación se aplica en el orden ACB, los vectores correspondientes están expresados en las ecuaciones (7), (8) y (9), en las cuales los primeros sumandos de cada una de ellas se encuentran desplazados entre sí, un ángulo de $4 \wedge / 3$, y los segundos se encuentran en fase ' la resultante es una f.m.m. trifásica de $(P + K)$ pares de polos.

Donde :

P = Pares de polos de la onda premodulada.

K = Número de ciclos completos de la onda modulada.

$(P - K)$ y $(P + K)$, significan pares de polos de la onda modulada en la secuencia, ABC y ACB respectivamente.

2.3 Diagramas de f.m.m. en un devanado polifásico.-

El método a utilizar es el del trazo de ranura en ranura empleando papel cuadrículado obteniéndose resultados de gran precisión. Por lo general este sistema se encuentra mencionado en los textos de naturaleza más avanzada.

Fundamentalmente, este método consiste en considerar que la f.m.m. en cualquier punto en el desarrollo del estator, es igual a la integral de los amperios vuelta hasta ese punto, habiendo tañado cualquier punto como lugar de partida. Al recorrer el perímetro completo, el integral debe ser igual a cero. El eje horizontal de partida en el diagrama puede ser cualquier línea arbitrariamente escogida.

Los incrementos positivos de los amperios-vuelta se presentan a una escala determinada por una línea vertical ascendente, y los valores negativos en sentido opuesto. La f.m.m. a lo ancho de cada ranura es aproximadamente constante, por lo tanto se representa por una línea horizontal entre un canal y el siguiente.

El gráfico completo correspondiente a la f.m.m. debe siempre cerrarse sobre sí mismo, siendo entonces cuando se traza el eje horizontal en una posición simétrica que resulte en áreas iguales a ambos lados de esta línea de base. Por supuesto, el total de los amperios vuelta positivos debe ser igual al total de los amperios vuelta negativos, ya que cada bobina consta de dos lados los cuales transportan corrientes en sentidos opuestos, o sea que la línea de base debe trazarse simétricamente respecto a la totalidad del devanado.

La onda de f.m.m. debe trazarse por lo menos para los dos lími-

tes de posiciones instantáneas de los vectores corriente o sea la una cuando éstas tienen las magnitudes :

$$\left(\frac{I}{2}, -\frac{I}{2}, \frac{I}{2} \right)$$

y la otra cuando las tres corriente son ;

$$\left(+\frac{\sqrt{3}}{2} I, \text{Cero}, -\frac{\sqrt{3}}{2} I \right)$$

Resulta cómodo trazar la onda para el segundo grupo de valores como si estos fueran (+ I : 0s - i).

Para representar I, se puede escoger cualquier escala que convenga a las dimensiones del diagrama. En los devanados comunes la onda de f.m.m. relacionada con estos vectores de corriente, se repite a sí misma exactamente tres veces en cada ciclo. Para un desplazamiento igual a las 2/3 partes de la distancia entre centros polares consecutivos, se repite a sí misma otras tres veces por ciclo, en forma idéntica a la anterior, pero con signo invertido. Por consiguiente sin tomar en cuenta la polaridad cada una de las dos ondas características aparece seis veces por ciclo. Pueden presentarse ciertas complicaciones gráficas cuando los tres devanados de fase no son idénticos. En la mayoría de los devanados PAM sesgosimétricos se presentan 4 formas de ondas características.

En un devanado PAM no congruente, en el cual el número de polos es un múltiplo de tres, la agrupación de las bobinas en una fase, por ejemplo la fase A, es diferente de la agrupación en las otras dos fases, estas generalmente, con igual agrupación, pero con signo invertido una fase de la otra.

Para estos devanados se deben tomar cuatro posiciones instantáneas limítrofes de los vectores de corriente para las fases B o C. Tales devanados se llaman "sesgo simétricos".

En ciertos devanados de PAK de último diseño, las tres fases - tienen diversa agrupación de bobinas y su inventor los ha llamado, "totalmente sesgos". En tales devanados se requiere tomar seis posiciones instantáneas limítrofes para los vectores de corriente, y a su vez se considera una magnitud diferente de corriente para cada devanado de fase.

En cualquier tipo de devanado, y para cualquier número de polos se debe tratar de obtener un equilibrio exacto entre la onda fundamental de f.m.m. y la fundamental de la f.e.m. inducida.

Por otro lado, cuando el número polar resulta en un múltiplo de 3, los devanados no congruentes rara vez resultan equilibrados respecto a las armónicas producidas, lo cual no tiene mayor significado salvo sobre las características de arranque, y menos aún si se hace que la magnitud de esas armónicas sea lo suficientemente pequeñas.

En el trazo de la onda de f.m.m. correspondiente a las posiciones de los vectores de intensidad de corriente,) se toma por hecho que el devanado recibe corrientes equilibradas desde una fuente equilibrada de suministro, o sea que los vectores ocupan en realidad la posición instantánea que teóricamente se les ha dado.

En los devanados tradicionales y en los últimos diseños de PAK en los cuales el número de polos no resulta en un múltiplo de 3, las f.e.m. por fase resultan de hecho equilibradas, tanto para la fundamental ... para las armónicas, ya que el devanado total mantiene completa simetría con relación a los tres ejes magnéticos separados entre sí 120 :

En los devanados no congruentes correspondientes a un número de

polos múltiplo de tres, no hay tal equilibrio y en devanado PAK el problema se toma aún mas octuplicado, siendo por lo general necesario considerar el diagrama vectorial de fuerzas electromotrices, tanto para la onda fundamental, como para las principales armónicas.

En la fig.1, se ilustra el procedimiento gráfico para el trazo "de ranura en ranura" de la f.m.m. correspondiente a dos instantes de vectores de corriente. Los gráficos (a) y (b) corresponden a un devanado de paso de bobina igual al paso polar.

Los gráficos (a) y (b) corresponden a un ejercicio similar ejecutado con el devanado PAK correspondiente a un motor de 8/10 polos. En este gráfico solo se ha tomado la posición instantánea vectorial de corrientes cuando estas son :

$$(I, -\frac{I}{2}, -\frac{I}{2})$$

El gráfico 2, ilustra la f.m.m. resultante al emplear el devanado premodulado para producir 8 polos, y la fig. 2b, representa la f.m.m. al completar la modulación para producir un devanado de 8 polos se ha indicado encerrando las bobinas correspondientes con el símbolo (\underline{TL}), y en el diagrama del reloj; por medio de las barras exteriores correspondientes. (Véase fig. i>), del capítulo III.

2.3.1 Distribución circular de los conductores para los gráficos de f.m.m. de las fig.1 y fig. 2.

Para el cálculo de la capa inferior de las fases, y el signo - que deben tener; es necesario hacer algunos cálculos y gráficos.

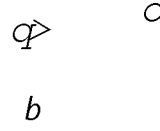
1) Para el caso de las fig. 1a y 1b.

$S_1 = 24$ ranuras,

$m = 3$ fases,

$p = 4$ polos,

$c = 1$ capa.



- El paso polar será : $T_b = \frac{S_1}{P} = \frac{24}{4} = 6.$

- El paso relativo : $K = \frac{X}{T_b}$, para paso de bobina completo :

$1 - * \blacksquare$

Luego $s X = 6$ ranuras.

El paso de bobinas será de 1-7 ranuras, y la distribución circular de conductor es según la fig. 3.

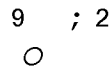
2) Para el caso de las fig. 1c y 1d.

$S^{\wedge} = 24$ ranuras,

$p = 4$ polos,

$c = 2$ capas,

$m = 3$ fases.



- El paso polar : $T_b = \frac{s_1}{P} = \frac{24}{4} = 6.$

Si queremos eliminar la \wedge ta y J_{ma} armónicas, el paso relativo - según el gráfico de la fig. 12, capítulo III, se tiene :

$K = 0.833 = \frac{3}{6} = \frac{*}{T_b}$

luego :

luego :

$$x = \frac{5}{6} \times 6 = 5.$$

SI paso de botinas será de s (1-6) ranuras, y la distribución -
de conductores según la fig.4.

3) Para el caso de la fig. 2a y 2b.

$S^{\wedge} = 36$ ranuras,

$c = 2$ capas,

$m = 3$ fases.

$p = 8$ polos, (premodulado), 10 polos (modulado).

- El paso polar será s

$$Tb = \frac{S, \quad 36}{8} = -g = 4.5$$

si queremos eliminar' la 3ra armónica :

$$K = 0.666 = -| = \frac{X}{Tb}$$

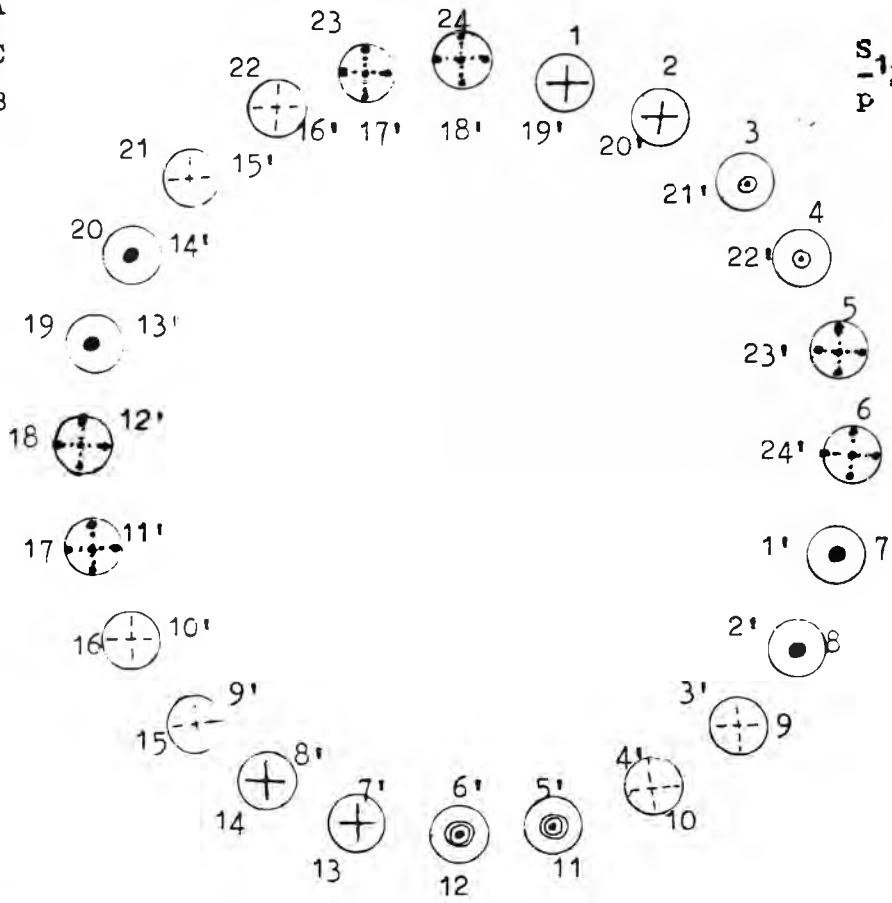
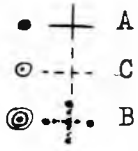
luego :

$$X = -| \times 4.5 = 2.97-$$

pero, X debe s^r entero, $X = 3^*$

Luego :

El paso de bobinas para el devanado premodulado (8 polos) será
de : (1 - 4) y las distribución de conductores según el gráfico,
de la fig.5.



$$\frac{S_1}{p} = \frac{24}{4} = 6$$

Paso de bobina: 1-7.

$Z = 24$
 $y_b = 1-7$

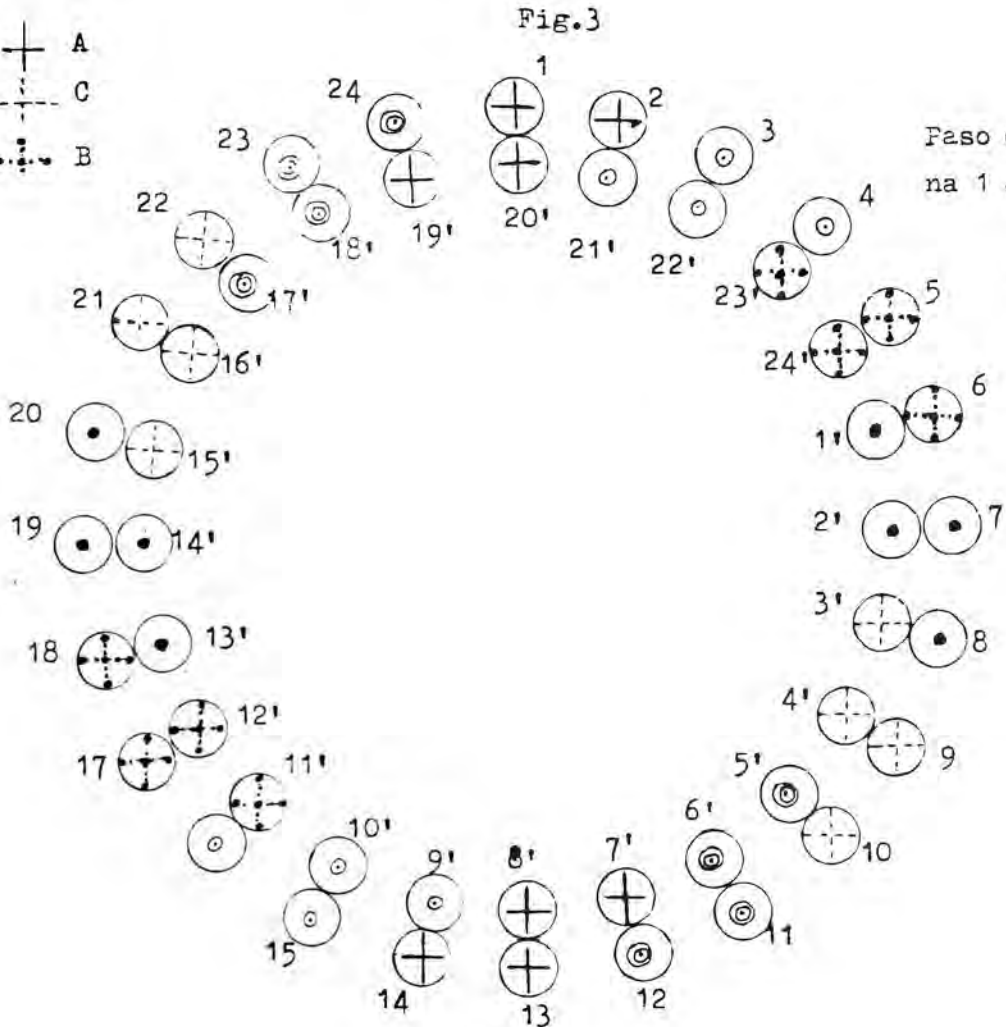
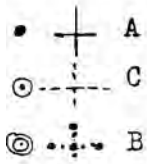


Fig.3

Paso de bobina 1 - 6.

$Z = 24$
 $y_b = 1-6$

Fig.4

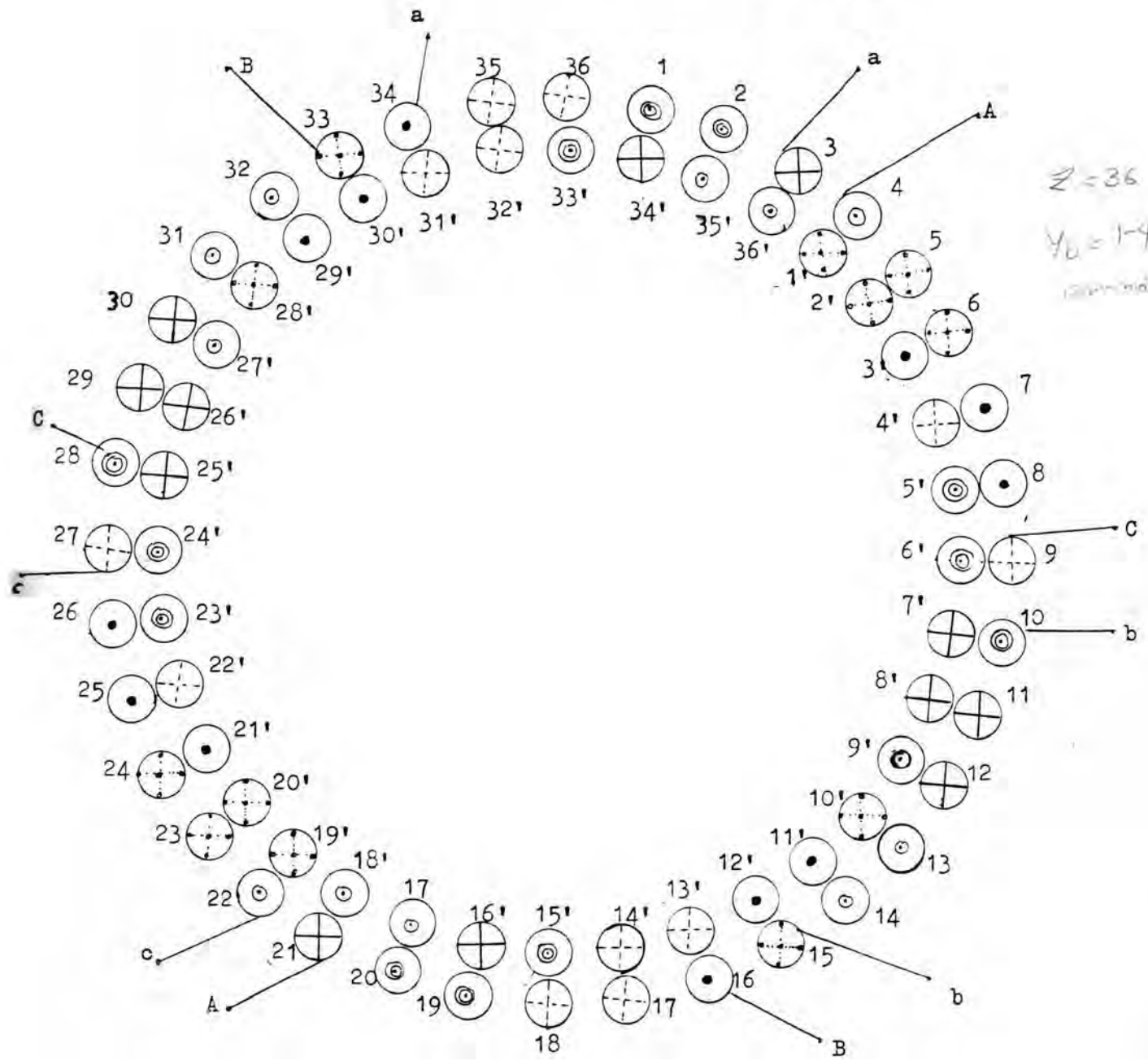
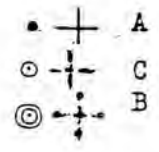


Fig.5* Distribución de conductores según el gráfico de la figura 2.

2.4 Clases de devanados trifásicos.-

Hay una diferencia básica entre devanados trifásicos para un número de polos, el cual es múltiplo de 3, y otros para un número en el cual el número de polos no es múltiplo de 3. Para bobinas de ranura integral (congruentes), la diferencia entre bobinados para triple y no triple, y no triple número de polos no es de fácil reconocimiento, pero si esto no ha sido claramente reconocido, ni siquiera en cuanto a devanados de ranura fraccional (no congruentes) es probablemente al muy limitado uso de devanados irregulares. Estas dos clases de devanados serán considerados separadamente.

1) Devanados trifásicos para número - no - triple de polos.-

No obstante existir los grupos de devanados irregulares para arrollamientos, en cada fase, es posible obtener una simetría geométrica precisa para un número de polos el cual no sea múltiplo de 3 por cuanto es imposible obtener una simetría geométrica exacta para un número de polos múltiplo de 3. Esto es una verdad importante y general, el cual ha llegado a ser confuso como una verdadera complejidad artificial.

Si es tomado una secuencia por fase por cada par de polos, en todo caso es: + A - C + B - A + C - B, 3 puntos a 120° mecánicos en un sentido de cuadrante que se ubicará en serie con los arrollamientos trifásicos A, B y C, para un $(6m + 2)$ polo por arrollamiento donde $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ etc.

Si el número de polos es de la forma $(6m + 4)j3$ puntos de 120° mecánicos en un sentido del cuadrante, que será ubicado en arrollamientos de fases A, C, B. Si estos tres puntos son tomados como fase origen, comenzando, por el cual la secuencia de grupos de bobina

dos es la misma, aunque este devanado sea irregular, se pone fuera cada fase, un arrollamiento el cual tiene una simetría exacta, los que siempre serán obtenidos.

El problema llegará a ser mas claro refiriéndonos a la fig.1.

El diagrama superior de la fig. 1, muestra la secuencia por fase del grupo de bobinados $n^{-r} \hat{ } -n^{\hat{ }} -n^{\hat{ }} \dots n^{\hat{ }m+2}$; y $n^{\hat{ }} - n^{\hat{ }} \dots n^{\hat{ }m+4}$ respectivamente para un arrollamiento de $(6m + 2)$ - polo , donde m ha sido puesto a la unidad. El símbolo n denota el número, de bobinados en grupo de bobinas dados; y esto a su vez puede ser, tomado como algún valor entero incluido el cero. (Un grupo de cero bobinados es representado solo idealmente y puede ser como un grupo de arrollamiento "sombra". Es importante incluir esto, no obstante cuando invertimos un arrollamiento; u ocurrirá errores en el signo de grupos de arrollamientos adyacentes en la misma fase). Los orígenes de fase son mostrados desplazados 120° mecánicos, el cual es equivalente a $(6m + 2) \frac{\pi}{3}$ y $(6m + 4) \frac{\pi}{3}$ eléctricos y ambos, bobinados en consecuencia tendrán fuerzas electromotrices, los cuales son balanceados entre fases.

Un exámen mas exhaustivo de estos diagramas revelaron que el mismo grupo de arrollamientos de secuencia es repetido 3 veces para cada bobina.

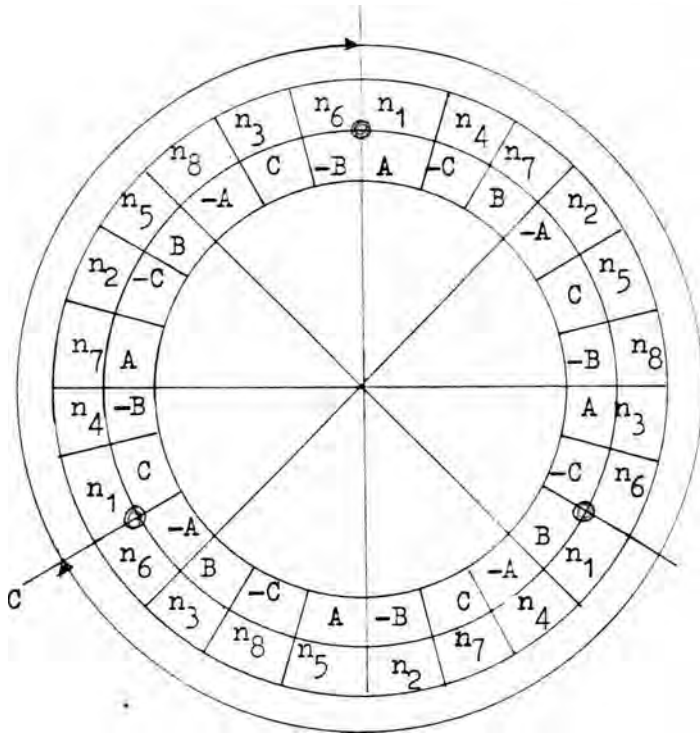
Igualmente por comparación en el diagrama inferior de la fig. 1. con el correspondiente diagrama superior, podremos apreciar que existe un intercambio completo, con relación a la fase y la cubierta de grupo de bobinados de secuencias para arrollamientos de geometría simétrica.

Deberíamos decir sin embargo que en relación a arrollamientos -

trifásicos, para lio-triple número de polos, existen métodos de diseño. Rendirán principalmente arrollamientos con una efectividad - por fase extendido a 60° , para desear la mas alta posibilidad del factor de extensión (capa) y aún los grupos de bobinados son simultaneamente alcanzados. 3s posible tener alguna variación sobre el, método de diseño básico. Esta manera de usar una fase amplia y efectiva de arrollamientos de ranura fraccional (no congruentes) y - la medida a ser tomada son similares a la técnica "esperciendo" aplicada a los bobinados convencionales congruentes.

2) Devanados trifásicos para triple número de polos.-

Para el número de polos el cual son múltiplos de 3, no puede - ser obtenida una simetría geométrica exacta; esto algo menos posi-* ble para obtener un balance eléctrico exacto para triple número de polos con arrollamientos de ranura integral, así como con muchos a rrollamientos de ranura fraccional. Donde no es posible obtener un preciso balance eléctrico, habrá comunmente varios grupos de alter nativas; y el cambio ha llegado a ser considerado sobre las bises, de uniformidad máxima de grupos de bobinados.



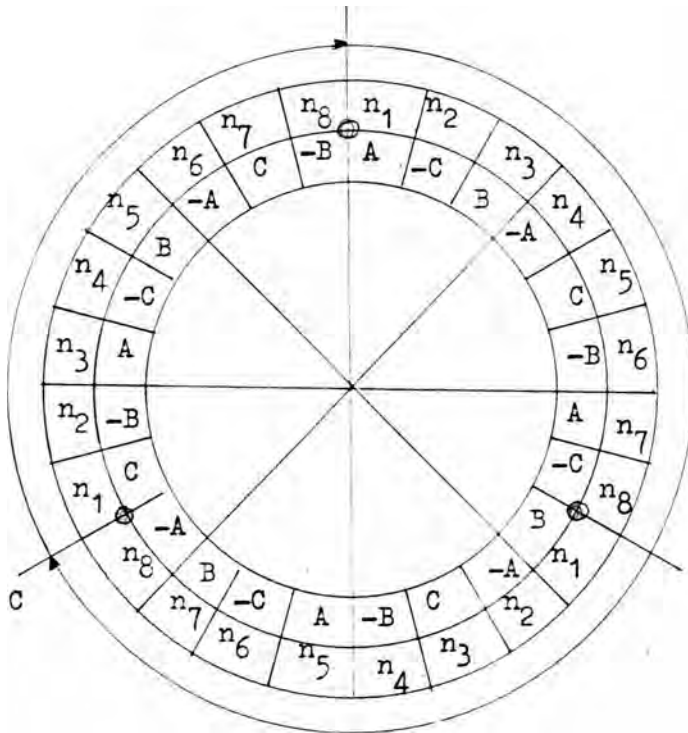
Secuencia de fase en el grupo de bobinas

$n1 - n2 - n3 - n4 - n5 - n6 - n7 - n8$

secuencia en la superficie del grupo de bobinas

$n4 - n7 - n2 - n5 - n8 - n3 - n6$

B



Secuencia de fase en el grupo de bobinas

$n4 - n7 - n2 - n5 - n8 - n3 - n6$

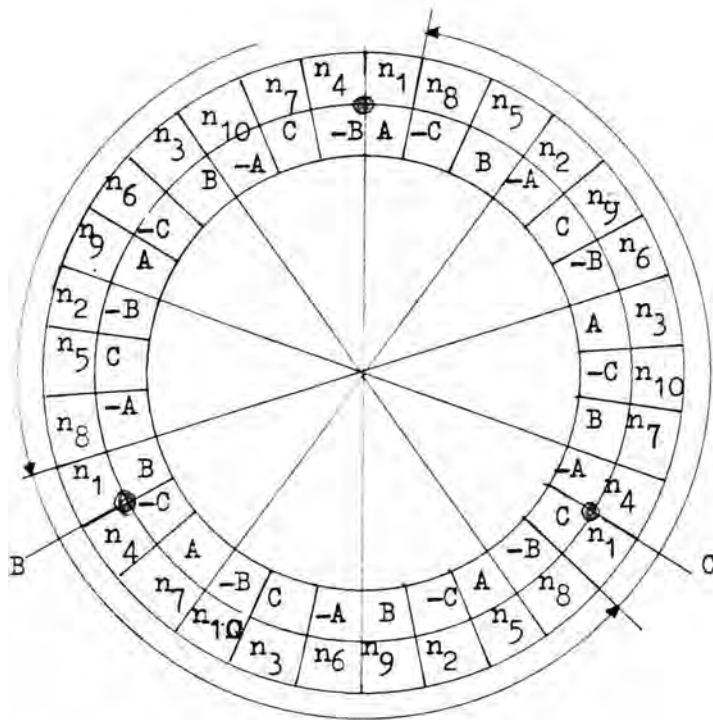
secuencia en la superficie del grupo de bobinas,

$n2 - n3 - n4 - n5 - n6 - n7 - n8$

B

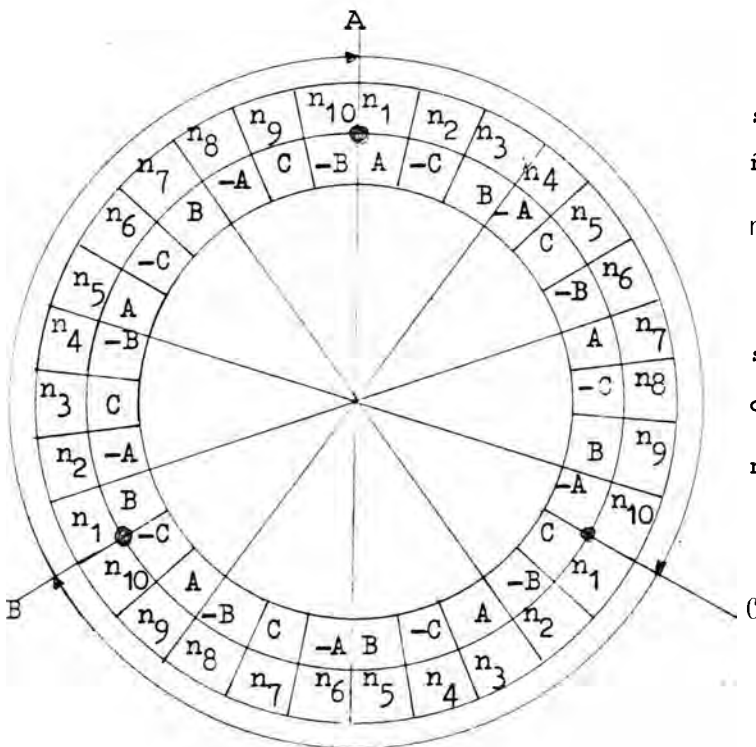
S) Número de polos $(6m + 2) : m = 1$

Fig.1. Intercambio de fases y secuencia superficial del grupo de bobinas.



Secuencia de grupos de bobinas:
 $n_1-n_2-n_3-n_4-n_5-n_6-n_7-n_8-n_9-n_{10}^*$

secuencia en la superficie
 del grupo de bobinas $n^{\wedge}-n^{\wedge}$
 $n_7-n_{10}-n_3-n_6-n_9-n_2-n_5-n_8^*$



secuencia de grupos de bobinas:
 $n_1-n_2-n_3-n_4-n_5-n_6-n_7-n_8-n_9-n_{10}$

secuencia en la superficie
 del grupo de bobinas: $n^{\wedge}-n^{\wedge}$
 $n_3-n_4-n_5-n_6-n_7-n_8-n_9-n_{10}^*$

b) número de polos $(6m + 4)$ $\lambda_{ra} = 1$.

. Denota origen de fase.

Fig. 1. Intercambio de fases y secuencia superficial del grupo de bobinas.

3.0 DESARROLLO DE LA TEORIA RAM PARA UN DEVANADO RAWCLIFFE EN 36 RANURAS, PARA 8/10 POLOS.

El presente capítulo tiene la finalidad de encontrar un devanado óptimo para las dos velocidades en 36 ranuras.

Al aumentar el número de polos $p = 2, 4, 6, 8, 10$ y $q = \frac{4}{3}, 2, 3, 4, 5$ el orden de modulación es ABC.

el número de ranura por fase :

$$1) \frac{S_1}{m} = \frac{36}{3} = 12 \text{ ranuras/fase.}$$

El número de ranuras por polo y por fase :

2) $\frac{12}{p} = \frac{12}{8} = 1 \frac{1}{2}$, o sea un devanado no congruente, por consiguiente 4 de los polos constarán de una ranura por fase y 4 restantes constarán de dos ranuras por fase.

- El devanado convencional tendría la siguiente distribución de ranuras :

Polo N° : 1.2.3.4 - 5.6.7.8

N° de ranuras

asignados a la : 1.2.1.2 - 1.2.1.2

fase A.

Las fases B y C se agruparán en la misma forma 1.2.1.2 - 1.2.1.2, desplazándolos a 120° y 240° respectivamente con relación a la fase A.

La ecuación 2), $\frac{q}{p} = \frac{36}{8} = 4 \frac{1}{2} = 1 \frac{1}{2}$

$$q = \frac{3}{2} = 1 \frac{1}{2} = 1.5$$

$$q = \frac{1 + 2}{2}$$

$S_1 = 36$ ranuras estatóricas.

$p = 8$ polos,

$m = 3$ fases.

no significará que a cada par de polos corresponden una bobina entera y media, sino que cada fase tendrá 1 y 2 bobinas parciales alternativamente por cada par de polos.

Las cuestiones referentes a la determinación de la posibilidad, y trazados de tales devanados y al cálculo de sus características, pueden resolverse en ciertos casos por tanteos gráficos, pero cuando los problemas de este tipo se multiplican, o los arrollamientos son de estructura compleja, es necesario acudir a soluciones sistemáticas conforme mas adelante iremos desarrollando.

Empezaremos, sin embargo por una introducción a esta materia resolviendo el devanado que estamos tratando. j

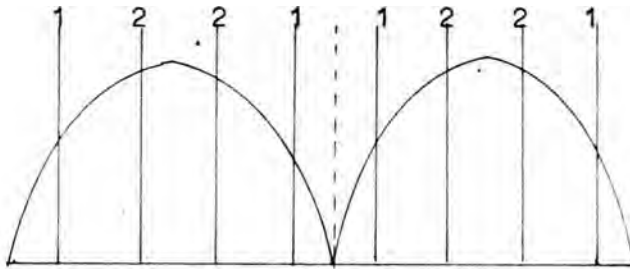
- Para cambiar el número de polos, producidos por el devanado original, de 8 a 10 polos, es menester modular los devanados de fase de acuerdo con una onda moduladora de dos polos ($K=1$).

Esta modulación se obtiene alterando de antemano la distribución de los conductores en la primera y segunda mitad de cada devanado de fase, de acuerdo con una variación en el espacio aproximadamente sinusoidal, luego de la cual se invierten la segunda mitad obteniendo así los 10 polos requeridos.

En otras palabras, el módulo "de la onda de modulación se obtiene de la "preconfiguración" del devanado, y el "signo" por medio

de la "inversión" de la mitad del arrollamiento. La diferencia con la forma tradicional de un devanado no congruente consiste en la forma de el agrupamiento de las "bobinas para producir un devanado, tipo "Bristol", cuya distribución para una fase se representa en la fig.N0 1. en la cual, en la preconfiguración resulta en una onda que corresponde a la agrupación de los conductores.

Al invertir el sentido de la corriente que circula en una mitad se produce una onda sinusoidal completa a lo largo del desarrollo, del estator.



Devanado no congruente tipo Bristol / Fig. 1.

Nº polos * 1.2.3.4 - 5.6.7.8 Devanado premodulado.

Nº de ranuras
asignados a la '1.2.2.1 - 1.2.2.1
fase A.

Las fases B y C se agruparán en la misma forma 1.2.2.1-1.2.2.1 desplazándolos 120° y 240° respectivamente con relación a la fase A.

La determinación de grupos que tenga el devanado premodulado siempre que el ángulo de distribución que forman los grupos es 60° ó aproximadamente 60° grados magnéticos. Bajo esta condición el número de grupos totales es igual al producto, producto del número de polos por el número de fases.

3) $m_p = 3 \times 8 = 24$ grupos totales.

4) $\frac{36}{3} = 12$ grupos / fase.

5) Fase A será :

1.2.2.1-1.2.2.1

$Z = 36$
 $p = 8$
 $m = 3$
 $\gamma = \frac{36}{8} = 4\frac{1}{2}$ $\gamma < \pi$

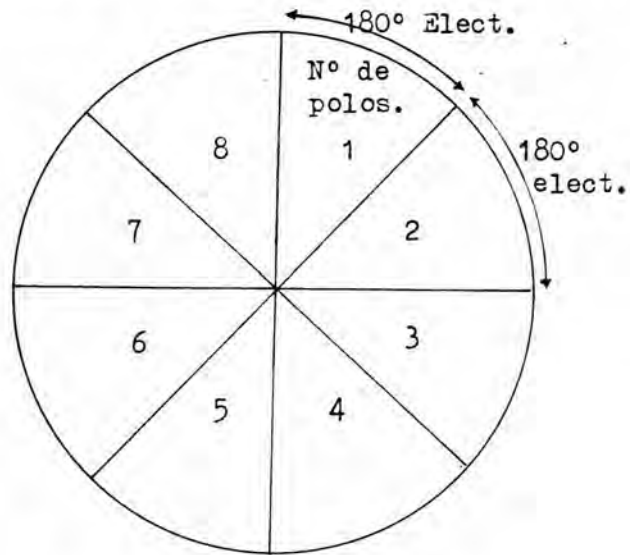


Fig.2 Devanado pramodulado.8 polos.

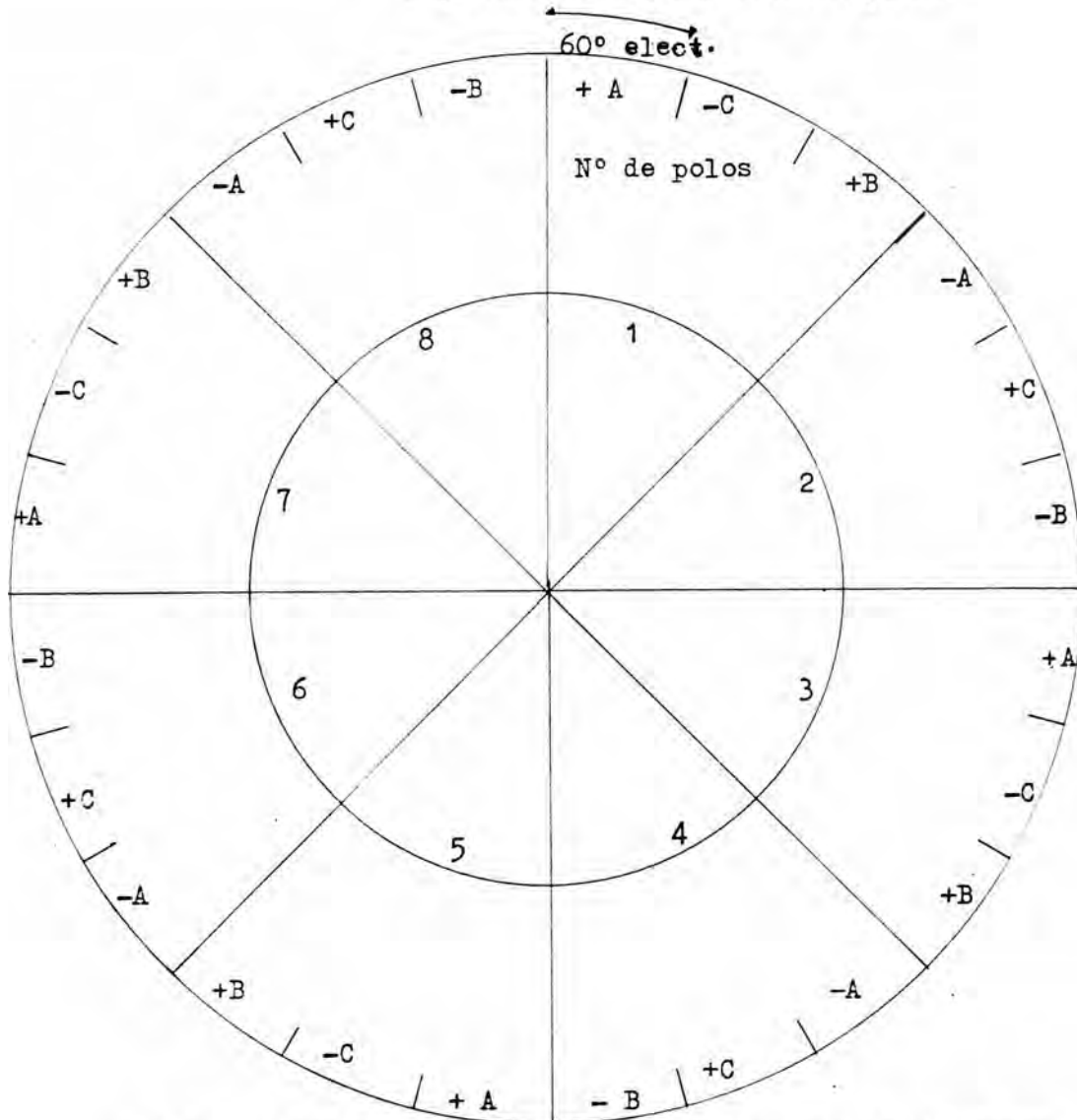


Fig.3. 8 polos, bandas de fase con un tendido de 60º elect., 24 grupos totales.

Los números indicados en el diagrama de la fig. 4 corresponden a la distribución de las bobinas en la fase A, requerida para producir 8 polos, en un total de 12 ranuras o sea $4^2 = 12$, luego de agruparlos en el espacio de acuerdo a una onda moduladora sinusoidal de 2 polos ($K=1$).

Las fases B y C deberán modularse en el espacio con ondas moduladoras similares a la aplicada para la fase A, excepto que estas ondas deben estar desplazados sobre ángulos de $2/3$ y $4/3$, respectivamente, en la escala $K\lambda$.

En este caso $K=1$ por consiguiente los ángulos de desplazamiento son $2/3$ y $4/3$ en el espacio.

En la fig. 4 se observa que la línea neutra de la fase A corresponde a la línea OO' que divide al devanado de la fase en dos mitades, de las cuales una deberá invertirse bajo modulación, por consiguiente, la onda de modulación tendrá el origen en el punto O , y las ondas de modulación para las fases B y C tendrán sus orígenes en P ($\odot = \frac{2}{3} \pi$) y Q ($\blacksquare = \frac{4}{3} \pi$) respectivamente.

La agrupación de las bobinas para cada una de estas fases-, es también 1.2.2.1-1.2.2.1, comenzando desde los puntos "P" y "Q" respectivamente, lo cual se puede observar en la fig. 5*

En esta, el círculo interior corresponde al número de ranura ocupada por las respectivas bobinas, el círculo siguiente a la agrupación de las bobinas y el círculo exterior a las bandas de fase, por polo.

A partir del eje neutro de la fase A, y numerando sucesivamente las 36 ranuras en la superficie del estator, se podrá observar que la banda -B ocupa dos ranuras correspondientes a los números 1 y 2;

banda +A ocupa una ranura, o sea el número 3j banda -C una ranura correspondiente al número 4 y así sucesivamente hasta completar - las 36 ranuras del estator.

La capa inferior del devanado se distribuirá de acuerdo al p&- so de la bobina escogida, pero será idéntica a la capa superior , que desplazada de esta y con signo invertido.

Para proceder a modular el devanado anterior de 8 a 10 polos, se debe invertir el sentido instantáneo de la corriente en la segunda mitad de cada fase, operación que se ha representado con las ba^~ rras en el exterior del diagrama, (J~L).

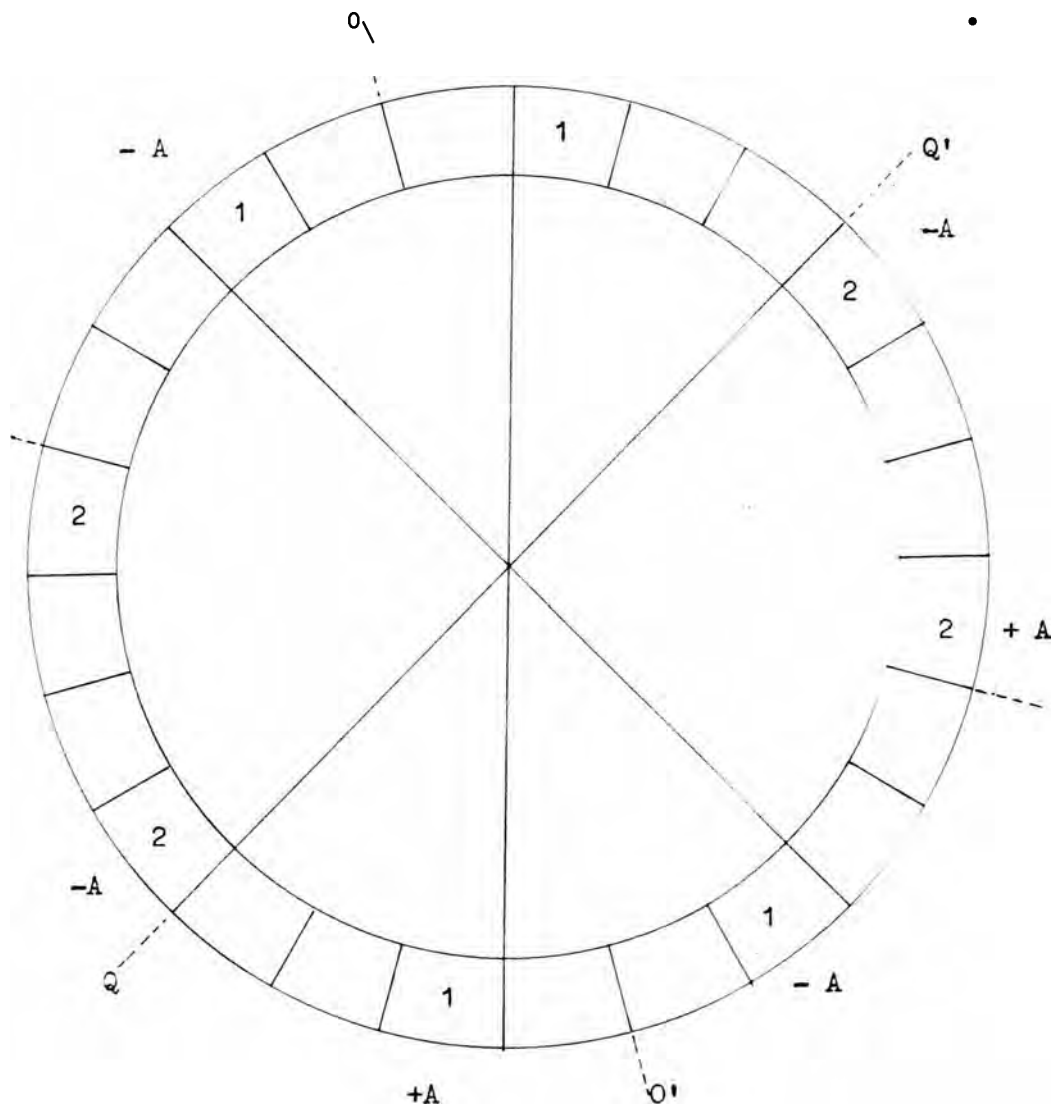


Fig.4. Distribución de las bobinas en la fase A, 8 polos

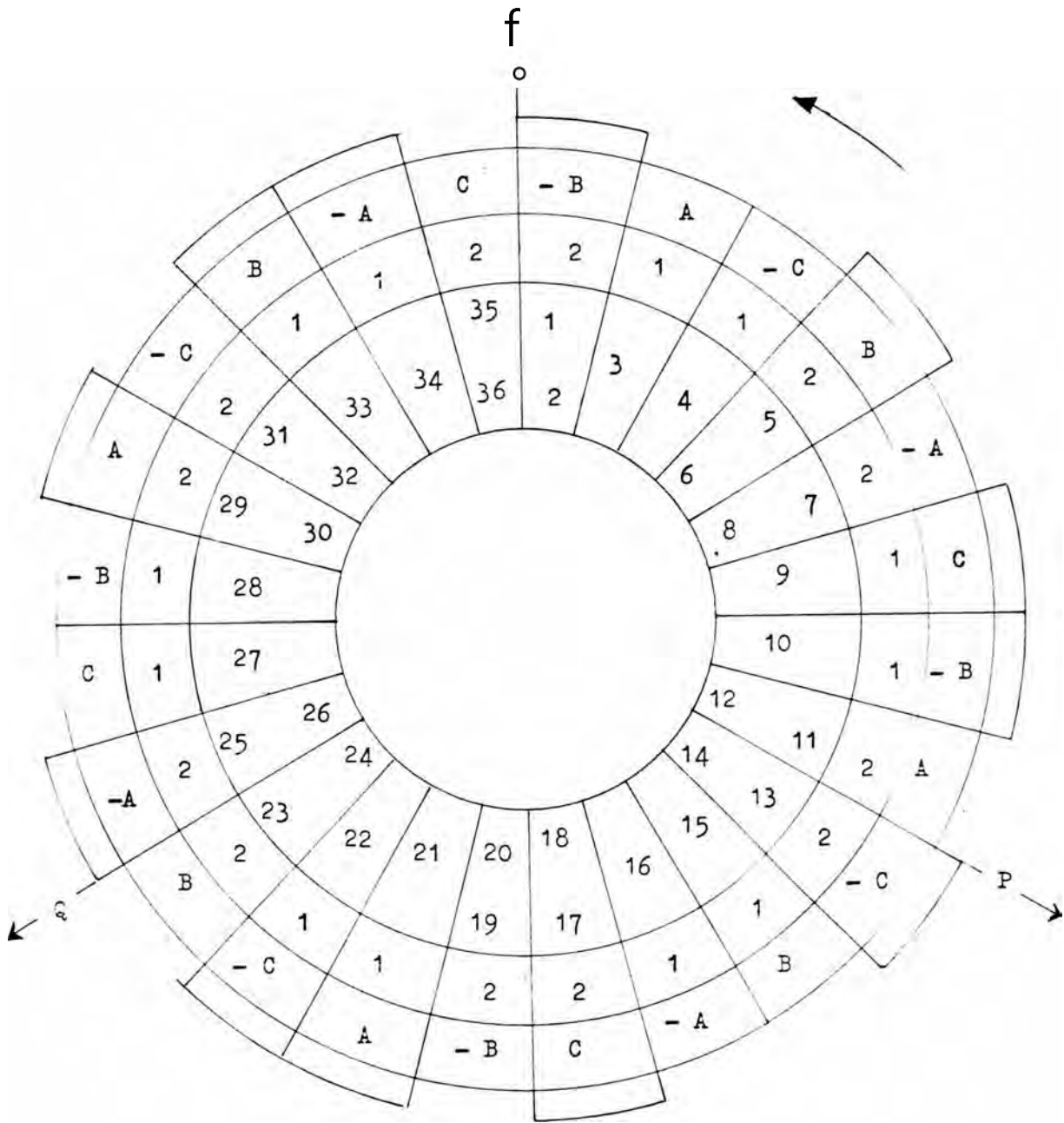


Fig.5. Diagrama reloj para modulación.

Devanado premodulado $P_1 = 8$ polos.
 Onda moduladora fase por fase $K_1 = 2$ polos.
 Onda moduladora total $K_2 = 18$ polos.
 Devanado modulado fase por fase $K_1 + P_1 = P^{\wedge} = 10$ polos.
 Devanado modulado (Kod. total) $K^{\wedge} - P^{\wedge} = F^{\wedge} = P^{\circ} 1^{\circ} s^*$

J L indica las "bodinas que tengan que invertirse".

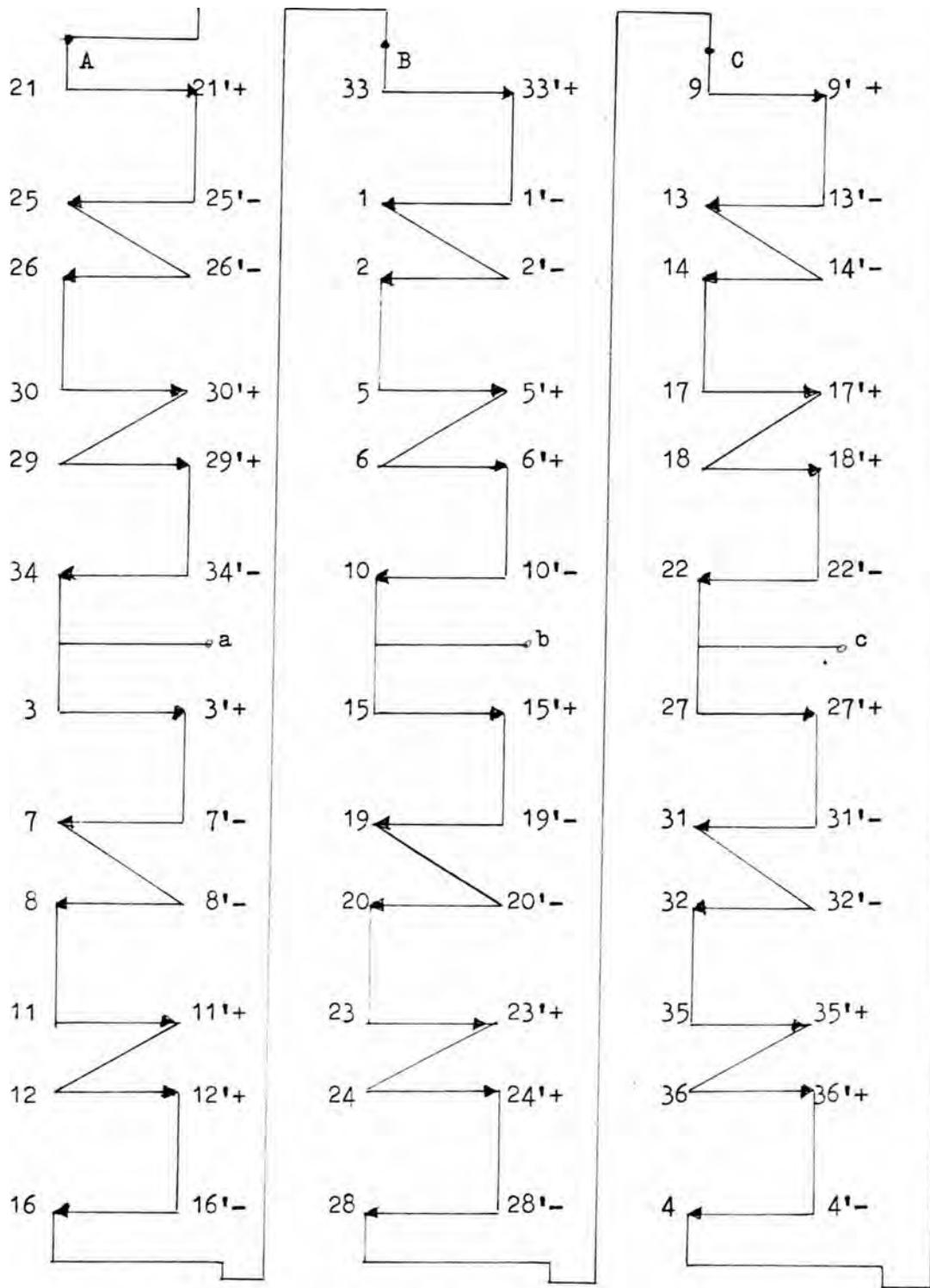


Fig. 6.

(a)

8 polos :

- Aliméntense terminales (a,b,c)
- Interconéctense terminales A,B,C.
- Conexión resultante es la de dos circuitos estrella, en paralelo (X A) .
- 10 polos.
- Cámbiese la alimentación de terminales (a,b,c) a (A,B,C), luego de abrir su interconexión.
- Conexión resultante es la de triángulo (A)•

piras en el devanado. Al conmutar a otro número de polos se requiere que la densidad de flujo sea también adecuada para el nuevo caso, por lo tanto, el factor importante de diseño depende en la proporción entre las dos densidades de flujo. Manteniendo un mismo nivel de flujo magnético en ambas velocidades, no se tendrá problemas de saturación, altas corrientes de excitación, ni demasiadas pérdidas en el núcleo.

3.1 Características técnicas del motor.-

La aplicación de esta teoría se realizará sobre un motor de 24 HP de la serie de fabricación normal Delcrosa : NVD 200 L de 6 a 8 polos. En el cual variaremos de 8 a 10 polos.

Estatador.

El número de ranuras estáticas será de 36.

Número de fases = 3 = m.

Número de capas = 2 (ranura estática).

Tipo de devanado imbricado.

Frecuencia nominal = 60 Hz.

Tensión entre líneas = 220 V.

Velocidad síncrona : 900 r.p.m. para 8 polos y

720 r.p.m. para 10 polos.

Conexión entre fases s Y Y (8 polos)

A (10 polos).

Tipo de arranque a plena tensión (directo) en ambas velocidades.

Número de terminales : 6 (seis).

Este motor PAK, será proyectado para funcionamiento a potencia constante.

Tipo de ranura estática s Tipo trapezoidal y de fondo circular,

según se muestra en la fig. 7*

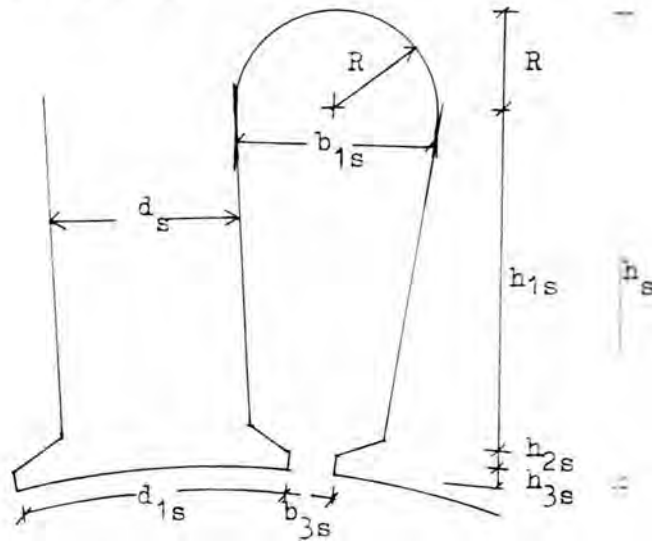
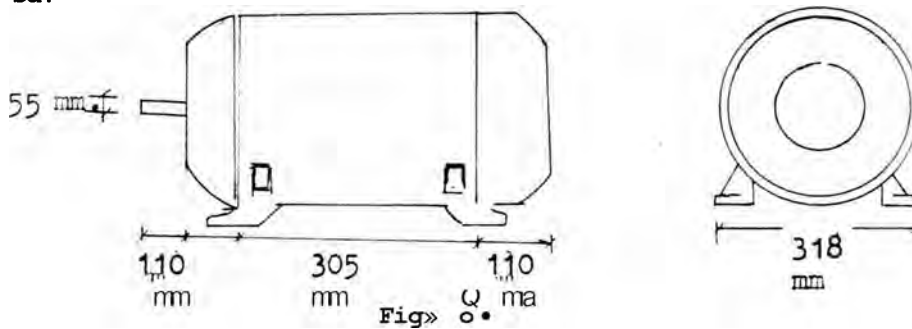


Fig. K^o 7

Las normas ITEJTEC 370.009 normalizan las dimensiones de la carcasa.



Para nuestro caso, utilizaremos el tamaño 200 L con forma de protección P34 y forma B3. Cuyas dimensiones de carcasa se muestran en la fig. 8.

ROTOR.

Las características del rotor, que constituye la parte mecánica de un motor de 8 polos.

Tanto las Larras y anillos serán de latón.

Material ■ Latón de resistividad a 75°C es de 0.0744 Ohm-mm² /mt.

Para contrarestar el aumento de temperatura, que tiene una alta

capacidad de absorción del calor.

la forma de ranura rotórica que elegimos de forma similar al del estator, fig.9.

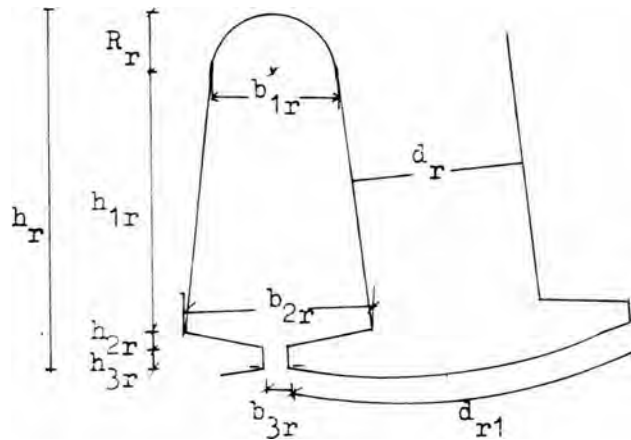


Fig.9.

Características del motor de inducción, en ambas velocidades,

potencia de salida : 24 HP.

Tensión entre líneas s 220 V.

Frecuencia nominal : 60 C/S.

Velocidad síncrona í ~~500~~ RFK > 720 RPM.

Húmero de polos : 8 polos, 10 polos.

Conexión entre fases : Δ , A •

número de ranuras en el estator : 36.

número de fase : 3.

número de capas del devanado estatórico : 2

En el rotor s

Jaula de ardilla simple, de material de latón.

La elección del número de ranuras del rotor, se hará mas adelante según los criterios que recomienda Corrales Martín.

3.2 Factor de capa K_c y factor de paso.

Factor de capa K_c

En la fig.10 se han representado los componentes y la resultante de las f.e.m. de un grupo de fase con $q = 3$.

Cada uno de los vectores componentes es proporcional al valor eficaz de la componente fundamental de la tensión en cada conductor de la ranura.

Su defase con relación a la tensión del conductor de la ranura vecina es igual al ángulo de ranura expresado en grados eléctricos

El factor de capa lo definiremos como el cociente t

$$t = \frac{\text{Suma vectorial de las componentes de f.e.m.}}{\text{Suma aritmética de las componentes de f.e.m.}}$$

Como estas bobinas están conectadas en serie

$$\text{Tensión de grupo} = E_g = 2 AN$$

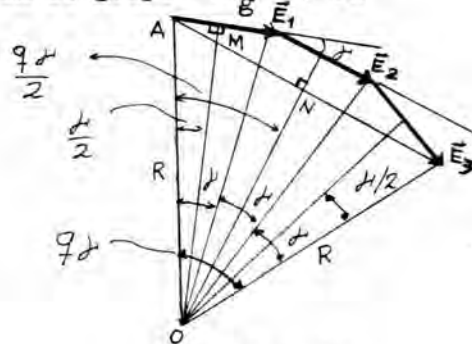


Fig. 10.

$$\frac{1}{2} E_1 = AM = OA \text{ Sen } \frac{\delta}{2}$$

$$E_{jj2} = AN = QA \text{ Sen } \left(\frac{q\delta}{2} \right)$$

$$5 \text{ Sen } q \wedge / 2 \quad \rightarrow \quad 51 \text{ Sen } (4 \wedge AO)$$

$$i \ 8 \text{ Sen } // 2 \quad \gg \quad v \text{ Sen } \wedge y 2$$

$$\frac{E_g}{g} = \frac{q \cdot E_i \cdot \text{Sen } (q \wedge i 2)}{\text{Sen } \delta i 2}$$

pero : \vec{E}_g Suma vectorial de las componentes de f.e.m.
 $K_c = \frac{\vec{E}_g}{q \cdot E^\wedge}$ Suma aritmética de las componentes de f.e.m.

$$E_c = \frac{\langle l \cdot E, r^- \cdot \text{Sen} (q/V2) \rangle}{q \cdot E^\wedge \text{ Sen}^\wedge / 2}$$

$$K_c = \frac{\text{Sen} (q^\wedge / 2)}{q \text{ Sen} (/^\wedge / 2)} \quad 0)$$

Como l es pequeño, esta relación tiende a :

$$\frac{\text{Cuerda}}{\text{Arco}} = \frac{\text{Sen} (q^\wedge / 2)}{q^\wedge / 2} \quad (2)$$

donde q , es el arco ocupado por la fase, expresado en radianes eléctricos.

$$\mu = \frac{360 \cdot P}{S_1} \quad (3)$$

donde :

f = ángulo entre ranuras consecutivas.

P = pares de polos = $\frac{p}{2}$

p = 180° de polos.

S^\wedge = UO de ranuras estáticas.

Factor de capa para el n -ésimo armónico, K_n^\wedge .

Los armónicos temporales de la f.e.m. están producidos por armónicos espaciales en la onda de densidad de flujo.

$$K_n^\wedge = \frac{\text{Suma vectorial de las f.e.m. de la armónica } n.}{\text{Suma aritmética de la f.e.m. de la armónica } n.} \quad (4)$$

$$K_n^\wedge = \frac{\text{Sen} (n \cdot q^\wedge / 2)}{n \text{ Sen} (n^\wedge / 2)} \quad (5)$$

Factor de acortamiento de paso (K_n^\wedge).

Si la bobina no es de paso diametral o completo, esto es, si se trata de una bobina de paso acortado o alargado, las f.e.m. de sus dos lados no estarán en fase y habrá de sumarlas vectorialmente.

Lo normal, aunque no imprescindible es construir las bobinas con paso acortado, es decir, con un paso de $K1$ Tradianes eléctricos

siendo su diferencia con el paso polar $(T_p = \frac{\pi D}{p})$

donde :

D = diámetro del entrehierro,

$p = F$ de polos,

lo que se denomina ángulo de acortamiento ($\hat{3}$), ver fig. 11.

Se ha tomado de 30° K es el paso por unidad. El factor de acortamiento de paso se define como :

f _ Suma vectorial de la f.e.m. del lado de la bobina.

p Suma aritmética de la f.e.m. del lado de la bobina.

$$K_p = \frac{26 \text{ Sen } KTr/2 + \text{Sen } (KT7/2)}{2e}$$

$$K_p = \text{sen } \hat{3} / 2.$$

Con un paso acortado o alargado en ángulo eléctrico $\hat{3}$, el factor de acortamiento está dado por el seno del ángulo correspondiente a la mitad del paso de la bobina.

Para el enésimo armónico de paso de bobina con relación a los polos armónicos es $n \times TT$, con lo que la expresión general para el factor de acortamiento será s

$$K_{pn} = \text{Sen } n K 1T/2 = \text{Sen } n \frac{\hat{3}}{2}$$

Si la bobina estuviera acortado un ángulo $\hat{3}/n$, las dos tensiones de enésimo armónico que se inducen en sus dos lados estarán defasadas un ángulo $n(2\hat{3}) = 2n\hat{3}$ radianes; es decir, estarán en oposi-

ción y, por consiguiente, se anularán a la mitad del paso de bobina para este armónico es $n(TT-17/n)2 = (n-1) / 2$, con lo que $K_{Pn}=0$, el enésimo armónico queda totalmente acortado.

En los arrollamientos de dos capas se utiliza normalmente un paso de bobina de de 0.8 a 0.9 por unidad, lo cual reduce apreciablemente los armónicos 5o y 7o. En un arrollamiento trifásico, el tercer armónico desaparece conectando convenientemente los terminales.

Paso de bobina : Para paso completo, se define :

$$T_{be} = \frac{S_1}{p}$$

donde :

$S_1 = N^\circ$ de ranuras estáticas.

$p = N^\circ$ de polos,

definamos :

$$\frac{T_r}{T - nb} = \frac{\text{Paso recortado}}{\text{Paso completo}} = \frac{X}{T_{be}}$$

$$K_p = \text{Sen} \frac{KTT}{2} \quad T_r = \frac{T_p}{2} \text{Sen} \dots$$

$$K_p = \text{Sen} \frac{K\pi}{2} = \text{Sen} 90^\circ K$$

Factor de paso de bobina para enésimo armónico.

$$K_{P_n} = \text{Sen} n 90^\circ K$$

$K = 0, 0.1, 0.2, 0.63, 0.65, 0.833 \dots$ que es factor para eliminar los armónicos.

$X =$ número de ranuras totales que cubre entre devanados. Ver fig,

12.

3.3 Técnica utilizada para el cálculo del factor de capa y factor

De paso en ambas velocidades.-

La técnica para determinar el factor de capa así como las f.e.m. resultantes es por medio del diagrama reloj determinado en el capítulo III. Fig.5. EL cual también sirve para confeccionar el diagrama de conexión total, y trazar las estrellas de ranuras , tanto para 8 polos y 10 polos respectivamente.

Cálculo del factor de capa.-

La determinación del factor de paso, tendrá que hacerse buscando una mayor capacidad de ranura (factor de arrollamiento alto) y un menor contenido de armónicos en las dos velocidades.

Mediante la estrella de ranura se determina el "factor de capa", en ambas velocidades, y se tendrá que observar si el devanado es , simétrico en ambas velocidades. Lo que mas adelante se verá que esto es cierto. Si consideramos que en cada ranura, en una de sus capas se colocan los lados de bobinas de las diferentes fases, estos lados de bobina tendrán tensiones inducidas de uno u otra polaridad, es decir que solo hay dos posibilidades en que aparezca instantáneamente una f.e.m. en estas condiciones las fuerzas electromotrices de ranuras contiguas estarán defasadas en un ángulo que es proporcional al número de pares de polos, e inversamente proporcional al número de ranuras.

Numerando las ranuras en forma consecutiva y tomando una cierta referencia se podrá referir las fuerzas electromotrices de todos los lados de bobina a la referencia. La f.e.m. inducida en cada lado de bobina se considerará unitaria.

Habiendo numerado en forma correlativa con el módulo de cada f.e.m. unitario, el ángulo de fase podrá expresarse en forma propor-

cional a su numeración correspondiente.

Así la f.e.m. inducida en el conductor ubicado en la ranura "q"

sera :

$$\bar{E}_q = 1e^{jq\psi}$$

$$\bar{E} = 1/q$$

donde :

$$\psi = \frac{P}{2} * \frac{360}{S1}$$

El ángulo " ψ " calculada. aquí es el que empleará en el cálculo del factor de capa de la onda fundamental, para las armónicas "n", el ángulo simplemente cambia a :

$$K_r = 0 \wedge$$

y el ángulo de factor de capa para dicha armónica sigue el mismo - procedimiento.

La fuerza electromotriz inducida por fase y por capa será igual a la suma de las f.e.m. inducidas de todos los lados de bobina que se encuentran conectados en serie. Si la polaridad de la fé.m. inducida en un lado de bobina fuera de polaridad negativa instantánea, se puede expresar esta f.e.m. con un módulo negativo, es decir:

$$E = -1e \wedge$$

de esta forma, el cálculo de factor de capa es completamente general, ya que lo único que interesa es la forma como se conectan las diferentes bobinas entre si, así como los diferentes grupos.

Cálculo del factor de paso KP.-

El cálculo de factor de paso es muy sencillo y es aplicación directa de la fórmula clásica, sin embargo como es necesario escoger

aquel paso que satisfaga a las ¿Los velocidades algunas veces se podrá seguir un procedimiento que permita encontrar un "bajo contenido de armónicas en ambas velocidades y en otros casos tendrá que sacrificarse el nivel de armónicas contra una mayor disponibilidad de área de ranura. Si se escoge un factor de paso muy pequeño , el factor arrollamiento tenderá a reducirse, lo que implica que para obtener un número efectivo de conductores se necesita un gran número de conductores reales, y por lo tanto se corre el peligro que no se tenga capacidad suficiente en ranura para aceptar conductores de un determinado calibre.

Reducir por otra parte la sección del conductor, significa reducir la potencia que se le puede sacar al motor. Se hará en el acápite 3.7) un cálculo rápido de las amplitudes de las armónicas en ambas velocidades, y para distintos pasos que pueda acogerse.

3.4 Diagrama reloj.-

El diagrama reloj para modulación, determinado ya en el capítulo III, fig.5, es muy importante para el trazado de estrellas de ranuras. Se ha vuelto a dibujar como Fig. I, en este acápite (3.4).

El mismo diagrama se indica con el símbolo J !_ las bobinas que tengan que invertirse para obtener el devanado modulado en otra velocidad. En este diagrama puede observarse que el número de polos de la onda moduladora total del devanado trifásico es de , 18 polos. En la modulación suma fase por fase se pasa de 8' a 10 polos, $(8 + 2 = 10)$, mientras que en la modulación total se hace por diferencia $(18 - 8 = 10)$, también se pasa en este caso de 8 a 10 polos

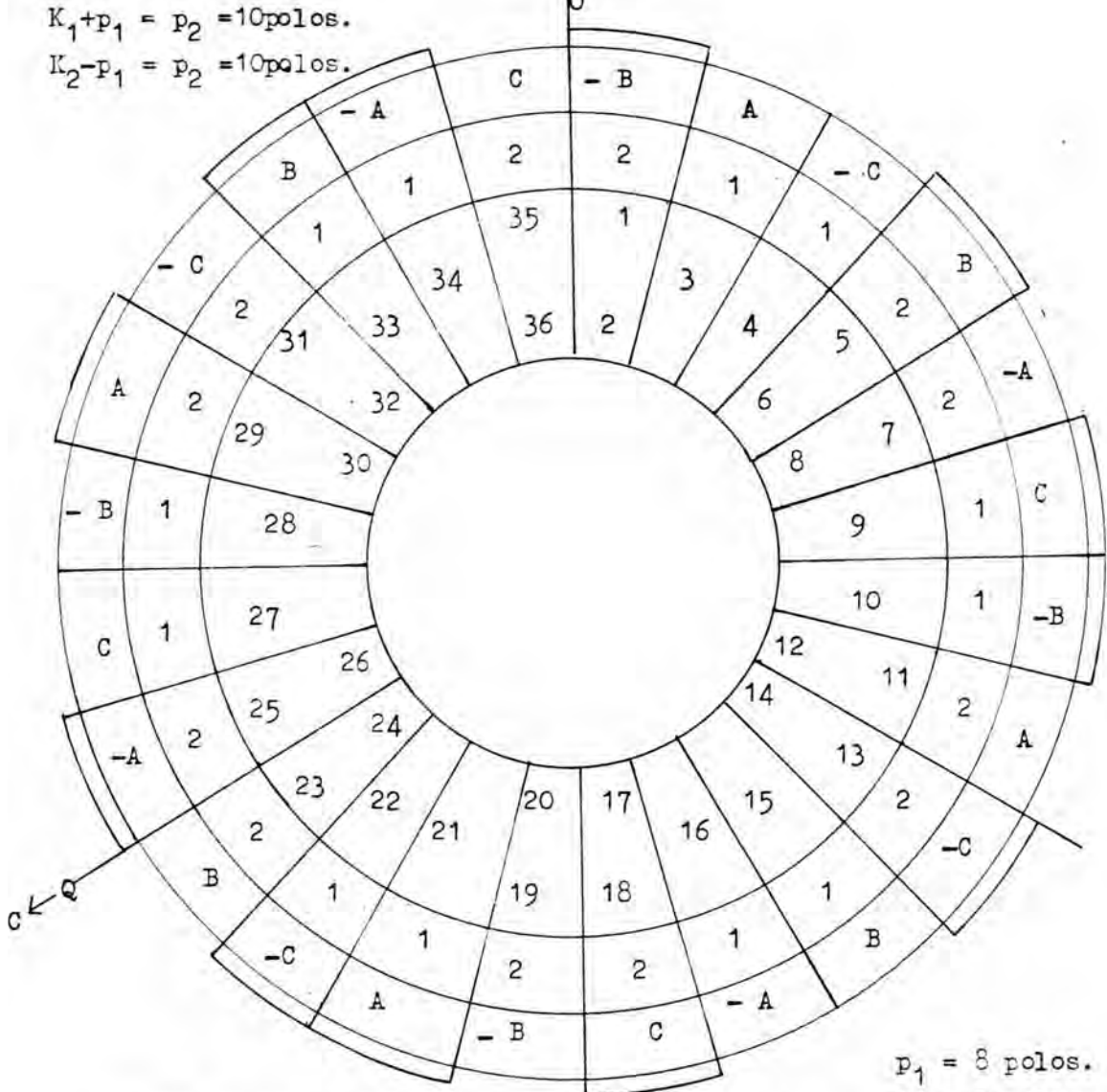


Fig. I. Diagrama reloj (para determinación de las estrellas ranuras)

3.5 Estrella de ranuras.-

Cano en ambos polos 8 y 10 se trata de devanados fraccionarios no congruentes, existen métodos o reglas para su determinación, de la estrella de ranuras. Nos limitaremos a enunciarlas y resumirlas prescindiendo de su demostración matemática, que es "bastante laboriosa".

En los arrollamientos trifásicos de dos capas, "q" viene dado por

$$q = \frac{S_1}{mp} \quad (1),$$

y al ser fraccionario, lo expresamos siempre como un número mixto compuesto de la parte entera E, que puede ser nula, y de la fracci-

ón $\frac{E}{P}$ en foima siranificada, es decir de un quebrado irreductible ,
(c/ y β , primos entre sí).

$$q = E + \frac{\wedge}{P} \quad (2)$$

Las condiciones de simetría para los arrollamientos trifásicos en dos capas, a fin de extender las ventajas de supresión de armónicas y de la elasticidad que ofrecen respecto al número de conductores totales de la máquina cuando caben solo dos o cuatro por ranura. Son las siguientes :

$$\frac{D}{P} = \text{entero.} \quad (3)$$
$$\frac{E}{3} f \text{ entero.}$$

Estrella de ranuras para 8 polos.

El autor [^]José Manuel Puchol ^{-v} en su libro rebobinados de motores de corriente alterna para arrollamientos fraccionarios, indica el método siguiente para construir la estrella de ranuras :

$$S_1 = 36 \text{ ranuras estatóricas.}$$

$$p = 8 \text{ polos.}$$

$$P = 4 \text{ pares de polos,}$$

$$m = 3 \text{ fases,}$$

$$c = 2 \text{ capas.}$$

Antes de continuar con los cálculos ; de la estrella de ranuras especificaremos algunos términos, tales como :

$$t = \text{íí}^\circ \text{ de rayos superpuestos, m.c.d. de } (S_1 \text{ y } P)$$

$$\alpha = \text{ángulo entre ranuras consecutivas, o contiguas.}$$

$$\alpha' = \text{ángulo entre ranuras adyacentes.}$$

$$\beta = \text{ángulo entre vectores adyacentes.}$$

1) Se determina q :

$$q = -j^{\wedge} = \frac{S_1}{XQ} = \frac{36}{3} = 12 = 1 \times 12 = 12 \text{ ranuras/polo y fase.}$$

2) Siendo S^{\wedge} el número total de ranuras y p el número de pares de polos, las tensiones inducidas en dos lados de bobina situados en ranuras contiguas tendrán un desfase mutuo de :

$$f = \frac{360 \times p}{S^{\wedge}} = \frac{360 \times 8}{36 \times 2} = 40 \text{ eléctricos, } 1^{\circ} \text{os}$$

3) EL ángulo existente entre dos vectores consecutivos será :

$$P = \frac{360}{S_1} \cdot t = \frac{360}{36} \cdot 4 = 40^{\circ} \text{ eléctricos.}$$

t es el m.c.d. de ($S^{\wedge} = 36$ y $P = 4$ pares de polos).

$$t = 4.$$

4) EL número de rayos no superpuestos es $\frac{S_1}{t} = \frac{36}{4} = 9$ rayos no superpuestos.

5) EL número de rayos superpuestos es t (m.c.d) de S_1 y p pares de polos, $t = 4$

6) EL número de rayos para cada devanado parcial es s

$$\frac{S_1}{q} = \frac{36}{6} = 6 \text{ rayos positivos.}$$

$$y. \frac{S_1}{6} = 6 \text{ rayos negativos.}$$

Con estos datos se grafican las figuras 13, 14 y fig. 15*

Estrella de ranuras para 10 polos,

$$t = 1 \text{ m.c.d. (36 y 5)}$$

$S^{\wedge} = 36$ ranuras estáticas.

$p = 10$ polos.

$P = 5$ pares de polos,

$m = 3$; $c = 2$.

1)
$$q = \frac{il}{mp} = \frac{36}{3 \cdot 10} = \frac{12}{10} = \frac{6}{5} = 1 + \frac{1}{5}$$

2) Angulo entre ranuras contiguas.

$$\hat{=} = \frac{360 \cdot 10}{36 \cdot 2} = 50^\circ \text{ eléctricos.}$$

3) Angulo entre dos vectores consecutivos.

$$\beta = f \cdot \frac{360}{S_1} \times t = 36^\circ \cdot 1 \cdot 10 \gg \text{ eléctricos.}$$

4) Rayos no superpuestos.

$$\frac{S_1}{t} = \frac{36}{1} = 36 \text{ rayos no superpuestos. } t = \text{Im.c.d. de } (36, 5)^*$$

5) El número de rayos superpuestos es :

$$t = 1 \text{ rayo. No hay rayos superpuestos.}$$

6) El número de rayos para cada devanado parcial es :

$$\frac{g}{3} = 12 \text{ rayos para cada devanado parcial.}$$

7) El número de rayos positivos y negativos son :

$$\frac{S_1}{6} = 6 \text{ rayos positivos.}$$

$$\frac{S_1}{g} = 6 \text{ rayos negativos.}$$

Ver fig. 16 y 17.

Con las estrellas de ranuras de 8 y 10 polos determina el factor de capa, factor de paso y factor de arrollamiento de la onda fundamental.

Condiciones de simetría :

$$\frac{P}{P} = \frac{10}{5} = 2 \text{ entero}$$

$$\frac{f}{y} = 5 \wedge f \text{ entero,}$$

cumple simetría.

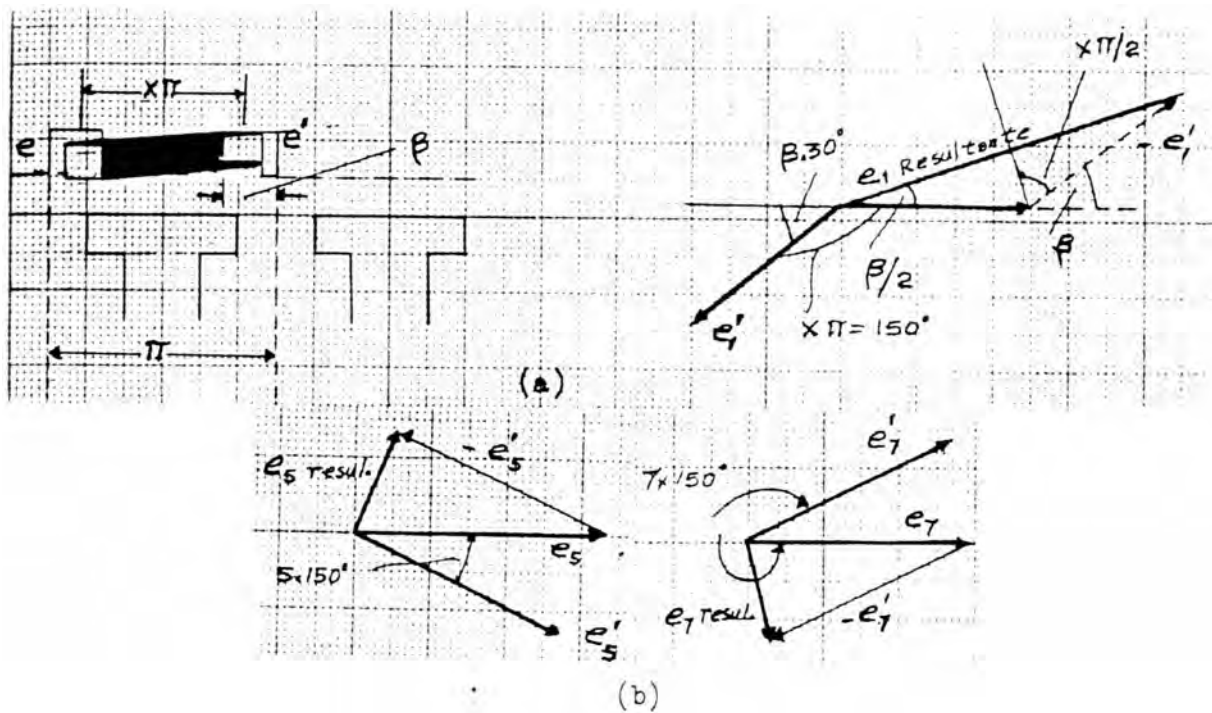


Fig. 11 Factor de paso de bobina.

a) Fundamental.

b) Armónicos 5 & 7 •

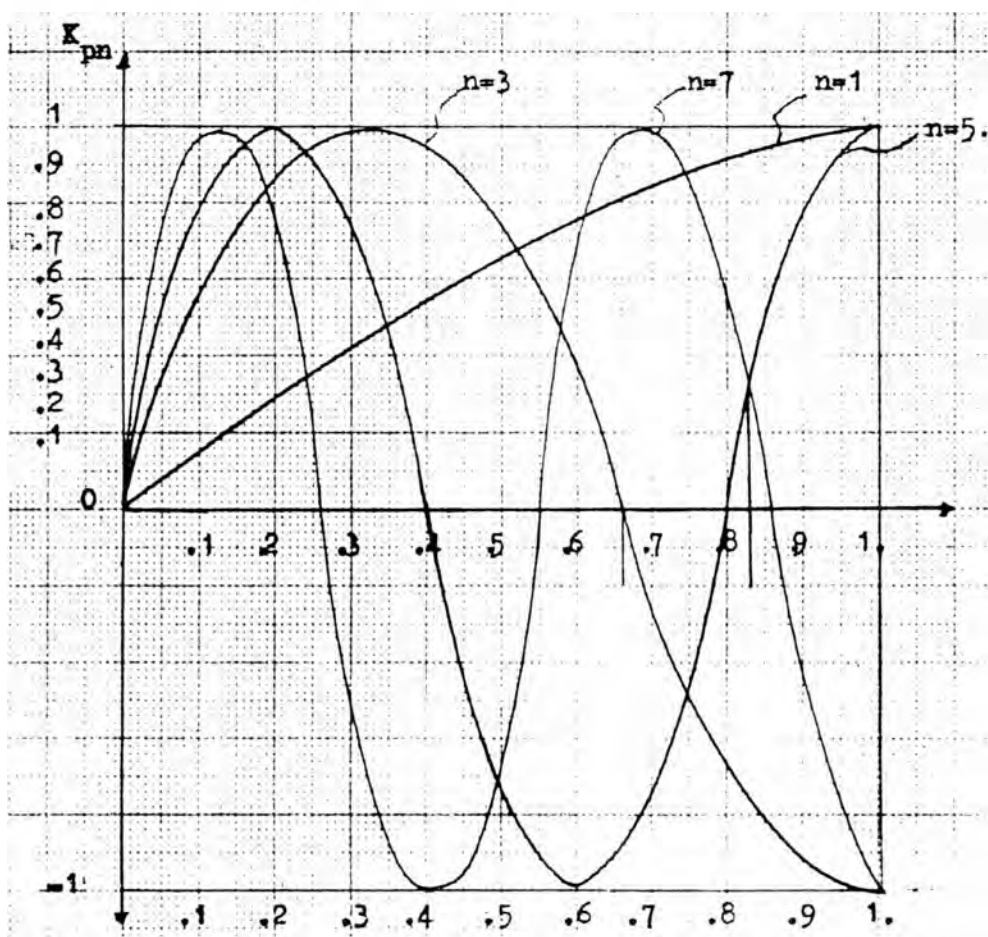


Fig. 12.

K_{pn} = Factor de paso n-ésimo armónico
 $(K = \frac{X}{T_{bc}}) \frac{\text{Paso recortado}}{\text{Paso completo}} = K$

Estrella de ranuras :

9 rayos no superpuestos

- 80 -

6 rayos positivos.

6 rayos negativos.

t 4 m.c.d.(36,4)

P = 4 pares de polos.

p = 8 polos.

$S_1 = 36$

m = 3

c = 2

$\frac{c}{p} = \frac{2}{8}$

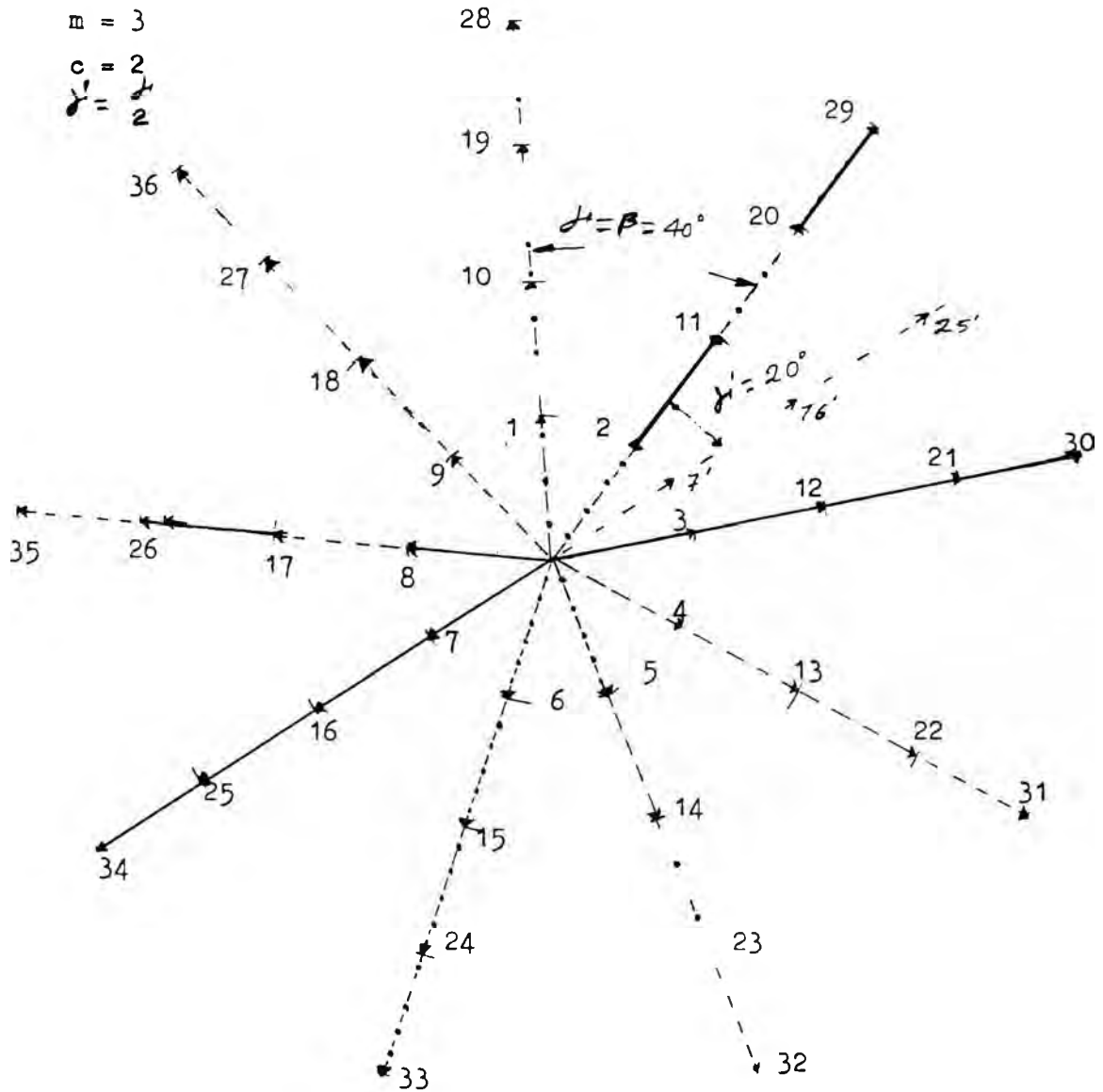


Fig. 13. Estrella de ranuras para 8 polos.

Paso relativo : $K = \frac{2}{3}$ paso completo.

$\alpha = 40^\circ$ eléct.

$\alpha' = 20^\circ$ eléct.

$\beta = 40^\circ$ eléct.

q = 3

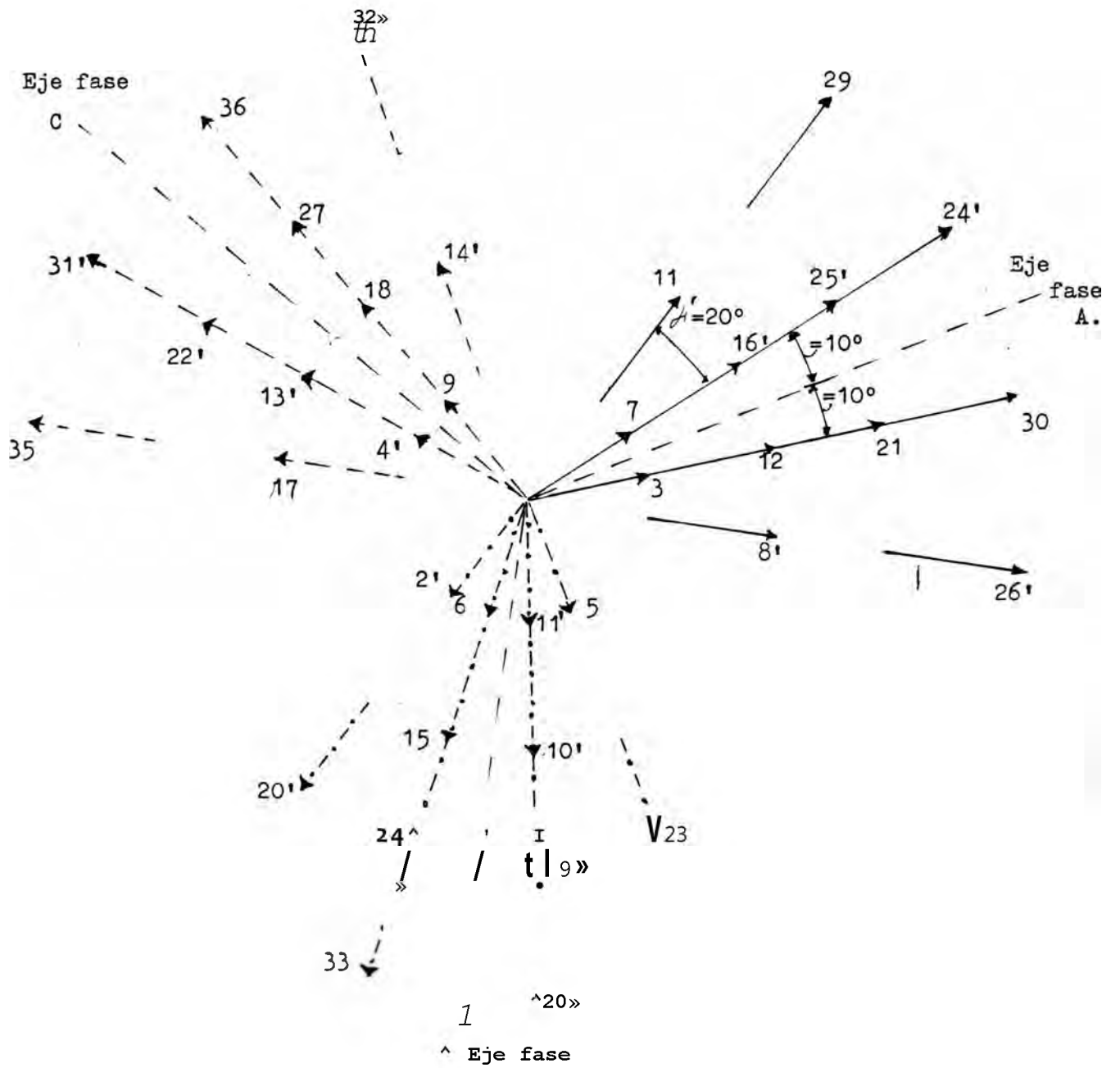


Fig. 15# Estrella de ranuras para 8 polos

Estrella de ranuras : 10 polos.

12 rayos para cada devanado parcial.

36 rayos no superpuestos

$Y = 50^\circ$ eléct. (ranuras consecutivas) $\frac{Y}{5}$

$\alpha' = 10^\circ$ eléct. (ranuras adyacentes) $= \frac{5}{5}$

$\beta = 10^\circ$ eléct. (vectores adyacentes),

$\frac{5}{5}$ paso completo.

6 rayos positivos

6 rayos negativos

$t = 1m.c.d. (36,5)$

$P = 5$ pares de polos.

$S1 = 36$

$m = 3$

$c = 2$

$q' = 6$

----- A
———— C
———— 3

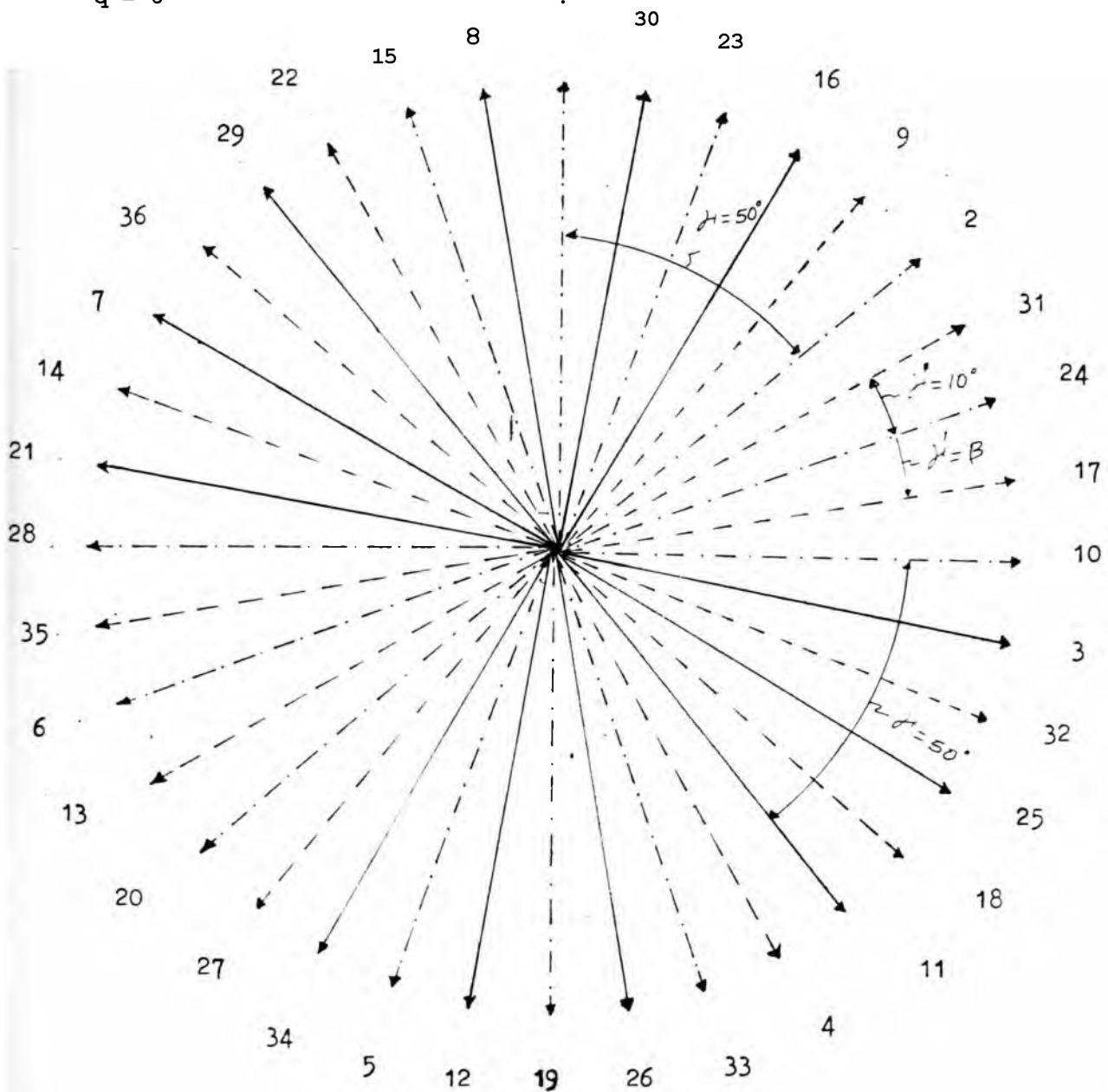


Fig. 16.

3.5.1 .Determinación del factor de arrollamiento a partir de la estrella de ranuras.

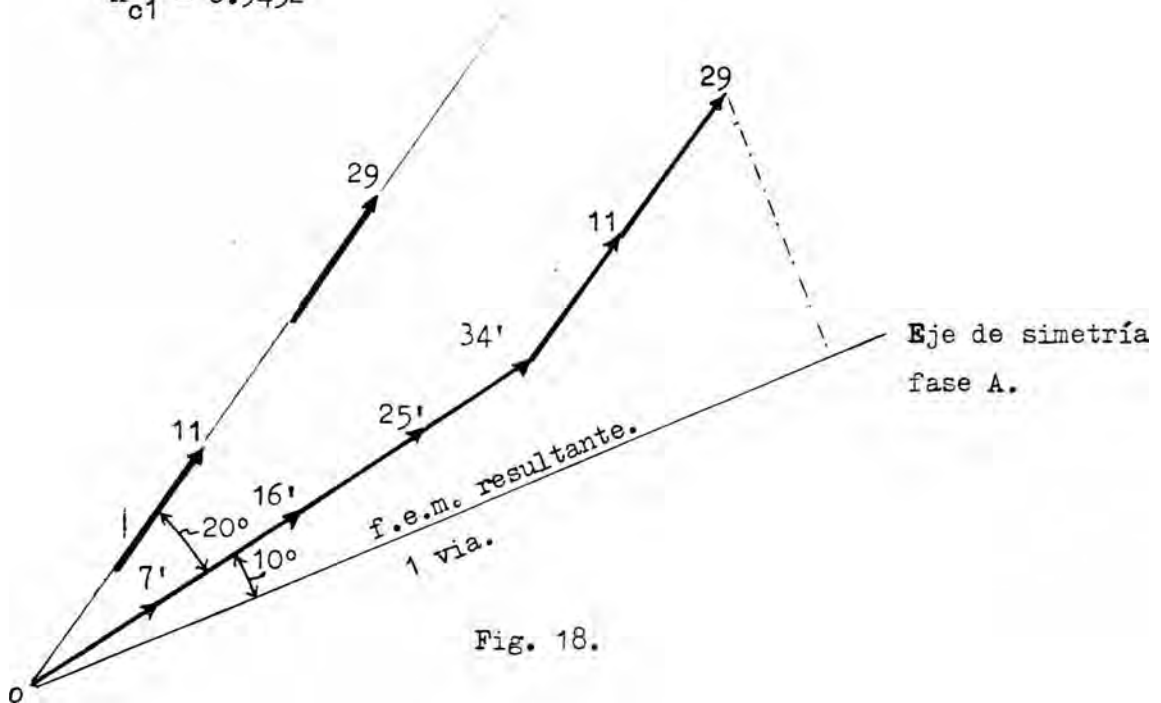
Fara 8 polos.

Factor de capa K_{c1}

A partir de la fig. 15 determinaremos el factor de capa de la onda fundamental.

$$K_{c1} = \frac{2 [4 \cos 10^\circ + 2 \cos 30^\circ]}{12} = \frac{(2 \cos 10^\circ + \cos 30^\circ) \times 2}{6}$$

$$K_{c1} = 0.9452$$



Factor de paso K^{\wedge} .-

Si observamos la fig.12 y queremos iluminar la 3ra,escogemos :

$$K = 0.666.$$

$$K = \frac{X}{T_b} = 0.66 = \frac{X}{T_b} \gg$$

pero :

$$T_b = \frac{S_1}{p} = \frac{36}{8} = 4.5$$

luego :

$$K = 0.66 \approx -|-5, \quad X = 2.97$$

X debe ser entero, (ranuras que cubre entre devanados)

$$X = 3.$$

luego : El paso de bobina debe ser entre las ranuras 1-4«

modificando :

$$* = \frac{X}{4.5} = \frac{3}{4.5} = \frac{2}{3}$$

$$K = \frac{30}{45} = \frac{2}{3} = \frac{2}{3} \text{ paso completo.}$$

luego el factor de paso en 8 polos, conexión (2A) es !

$$K_{p1} = \text{Sen } K \times 90^\circ = \text{Sen } 90^\circ \times \frac{2}{3}$$

$$K_{p1}'' = 0.86602.$$

Factor de arrollamiento $\{ K_{w1} = K_{p1} \times K_{c1} \}$,

$$K_{w1} = 0.86602 \times 0.9452$$

$$K_w^\wedge = 0.81856, \text{ para 8 polos.}$$

3.5.2. Determinación del factor de arrollamiento a partir de la estrella de ranuras

10 polos.

Si observamos la fig. 17«

El factor de capa K^\wedge . -

$$K_{c1} = \frac{2}{12} [2 \text{ Cos } 13^\circ + 2 \text{ Cos } 35^\circ + 2 \text{ Cos } 55^\circ] = \frac{\text{Cos}150 + \text{Cos}35^\circ + \text{Cos}550}{3}$$

$$K_{c1} = 0.788$$

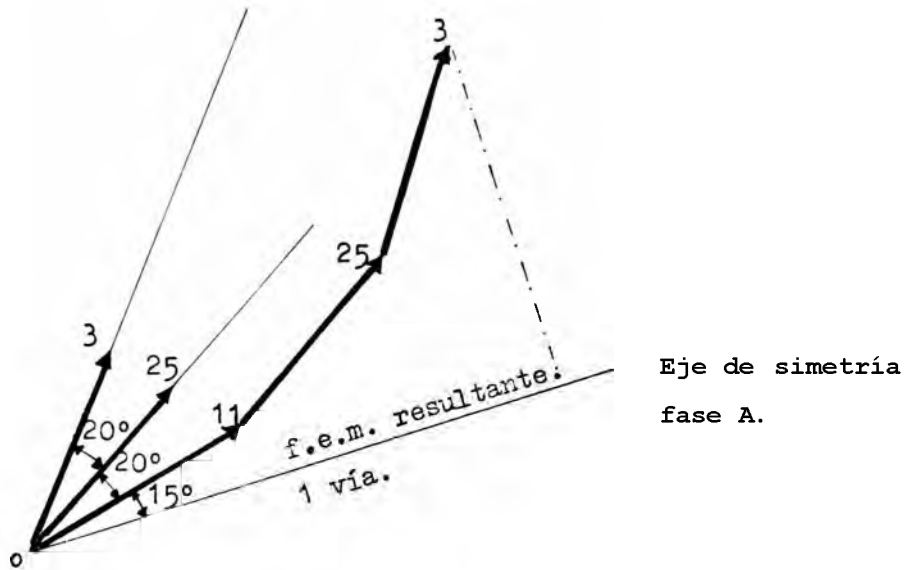


Fig. 19.

Factor de paso K_{p1}

Si observamos la fig. 12 y queremos eliminar la *5ta* y *7ma* armónica, escogemos : $K = 0.83 = \frac{X}{8}$, 0.83 elimina la *5ta* y *7ma* armónica

ca. Pero :

$$T_s = \frac{S_1}{P} = \frac{36}{10} = 3.6$$

luego :

$$0.83 = \frac{X}{Y} \Rightarrow X = 2.988$$

X debe ser entero, luego $X = 3$. 31 paso de bobina debe ser entre 1 - 4.

Recalculando s

$$K = \frac{3}{8} = 0.375 = \frac{5}{13}$$

$$K = \frac{5}{13} \text{ paso completo.}$$

luego el factor de paso en 10 polos (conexión ζ) es :

$$K_{p1} = \text{Sen} K \times 90^\circ = \text{Sen} \frac{5}{13} \times 90^\circ$$

$$K_{p1} = 0.9660$$

Factor de arrollamiento ($K_{w1} = K_{p1} \times K_{\phi 1}$)

$$K_{w1} = 0.761144 = 0.9660 \times 0.788, \text{ para 10 polos.}$$

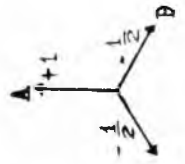
3.6 Diagramas de f.m.m-r

En el capítulo 2.3 se hizo la introducción teórica para el cálculo de las f.m.m.; tomando la posición instantánea vectorial de las corrientes cuando estas son ($I, - \hat{}, - \hat{}$).

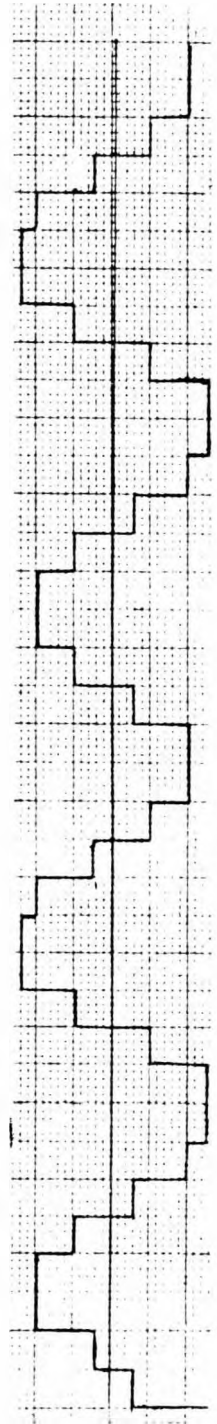
El gráfico de la fig. 20, ilustra estos diagramas para $\frac{2}{3}$ de paso completo para 8 polos y su diagrama de f.m.m. después de modularse, es decir en 10 polos, con un paso de "bobinas (1 - 4) en ambas polaridades.

DIAGRAMA DE FASES

Ranuras N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Bandas por fase	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+
	BB	A	C	BB	A	A	BB	A	CC	BB	A	CC	BB	A	CC	BB	A	CC	BB	A	CC	BB	A	CC	BB	A	CC	BB	A	CC	BB	A	CC	BB	A	CC
A.V. capa (s)	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A.V. capa (i)	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A.V. total.	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



$K = \frac{2}{3}$

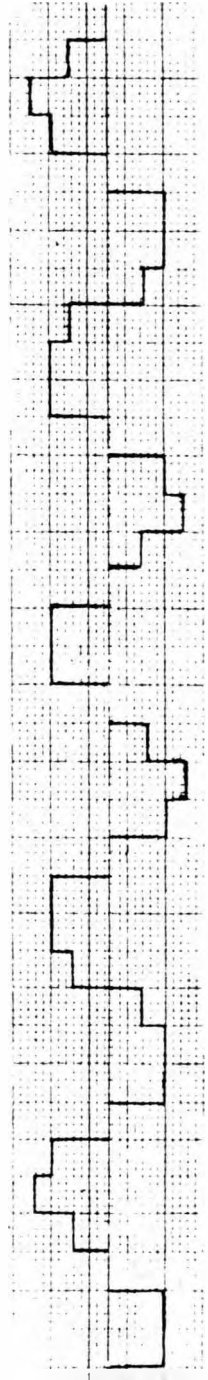


(a) 8 polos.

A.V. capa (s)	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A.V. capa (i)	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A.V. total.	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Después le modularse a 10 polos.

$K = \frac{2}{6}$



Paso de bobina:
1-10
I.S (8/10).

(b) 10 polos.

3.7 Cálculo de los $\frac{A_n}{A_1}$ de la f.m.m.-Eliminación de armónicos.

La amplitud de la onda fundamental de f.m.m. con respecto a la armónica n de la onda fundamental A_{n1} será $s \frac{A_n}{A_1}$ donde la amplitud de la fundamental A_{n1} será:

$$A_{n1} = \frac{4 \cdot N \cdot i_s \cdot K_{pn} \cdot K_{cn}}{\pi \cdot p} \quad (1)$$

donde :

N = número de conductores en serie por fase.

i_s = corriente por fase,

p = número de polos.

K_{pn} y K_{cn} = Factor de paso y factor de capa para la fundamental,

La amplitud de la armónica n (A_n).

$$A_n = \frac{4 \cdot N \cdot i_s \cdot K_{pn} \cdot K_{cn}}{\pi \cdot n \cdot p} \quad (2)$$

luego :

$$\frac{A_n}{A_1} = \frac{K_{pn} \cdot K_{cn}}{n \cdot K_{p1} \cdot K_{c1}} = \frac{K_{wn}}{n \cdot K_{w1}}$$

$$\frac{\%K_n}{A_1} = 100 \times \frac{K_{wn}}{n \cdot K_{w1}}$$

Tabla I. Factor de arrollamiento devanado PAK (paso 1-4) » en ambas velocidades (8 y 10 polos) y $\%K_n$ amplitud de armónica con relación a la fundamental. Se calculará para los 20 primeros armónicos espaciales.

En la tabla las armónicas múltiplos de 3 se eliminan por tratarse de un devanado trifásico.

Tabla I.- Factor de arrollamiento devanado PAM

N° de armónica	Factor de capa K_C		Factor de paso K_P	
	8 polos	10 polos	8 polos	10 polos
1	.9452	.7880	.8660	.9660
2	.7931	.2888	.8660	.5000
* 3	.5773	-.1725	0	-.7071
4	.3440	-.3440	-.8660	-.8660
5	.1398	-.2167	-.8660	.2588
* 6	0	0	0	1.0000
7	- .0606	.07495	.8660	.2588
8	- .0509	-.0509	.8660	-.8660
* 9	0	-.2357	0	-.7070
10	.0509	-.2886	-.866	.5000
11	.0606	-.1607	-.8660	.9650
» 12	0	0	0	0
13	- .1398	-.01896	.8660	-.9650
14	- .3440	-.2886	.8660	-.5000
* 15	- .5773	-.6439	0	.7070
16	- .7931	-.7931	-.8660	.8660
17	- .9452	-.5505	-.8660	-.2588
. 18	-1.0	0.0	0	-1.000
19	- .9452	0.5505	.8660	-.2588
20	- .7931	0.7931	.8660	.8660

* Se eliminan por ser devanado trifásico

(paso 1 - 4)-

Fact, de arroll, K_w		Ampl.de armón. $\$ A^{\wedge}/A^{\wedge}$	
8 polos	10 polos	8 polos	10 polos.
.8185	.7611	100.00	100.00
.6868	.1444	41.95	9.48
0	.1219	0	5.34
-.2970	.2970	-9.071	9.755
-1.210	-.0560	-2.956	1.471
0	0	0	0
-.0520	.0193	- .9070	-0.362
-0/14	.0440	- .6719	0.722
0	,1660	0	0
-.0440	-.1440	-.5375	-1.891
-.0520	-.1550	-.5775	-1.851
0	0	0	0
-.1210	.0182	-1.1371	0.183
-.2979	;1443	-2.599	1.354
0	-4.552	0	-3.987
.6868	-6868	5.244	-5.639
-.8185	.1420	-5.882	1.097
0	0	0	0
-.8185	-1.420	-5.263	-0.981
-.6868	.6868	-4.195	4.511

3.7•1. Contenido de armónicas en la f.e.m. inducida en un devanado trifásico.

Las densidades del flujo magnético en los diferentes puntos de la circunferencia del estator, y que se encuentran separados a una distancia igual al paso polar, tienen iguales magnitudes pero signo diferente.

Cada medio ciclo de la tensión de la tensión generada, por consiguiente, solamente puede contener armónicas impares, o sea $3^a, 5^a, 7^a, 9^a$ etc., la comprobación matemática de este enunciado se puede obtener mediante el análisis de Fourier.

Las armónicas producidas por las ranuras, en el caso de un motor asincrono de campo giratorio el flujo atraviesa el entrehierro pasando al estator, y sigue caminos principalmente a través del hierro. Las aberturas de las ranuras en el cuerpo del estator producen armónicas de flujo en el espacio que a su vez generan una f.e.m. adicional en los conductores. El efecto de este campo armónico es la producción de ondulaciones en el flujo total por polo y por consiguiente en la f.e.m. resultante. Cuanto mayor es el número de ranuras por polo, menor resulta el efecto de los flujos armónicos, hasta que por último llegan solo a tener un interés puramente teórico. Refiriéndonos a la fig. 21, si existen n ranuras por polo, la frecuencia de las ondulaciones es igual a $2n - 1$ veces el valor de la fundamental y podrá verse cómo para una frecuencia de 60 Hz, en una máquina con 36 ranuras por polo.

Las armónicas de ranura, tendrán una frecuencia de 4380 Hz y 4260 Hz, la cual puede ser molesta y causar interferencias en sistemas de comunicación, así como producir considerables corrientes

de carga en los circuitos de distribución. El diagrama de la fig. 22, representa un estator sin ranuras.

(En la práctica esto corresponde a un estator con un devanado uniformemente distribuido ya que tiende hacia el infinito, y el intervalo de la armónica también tiende hacia el infinito).

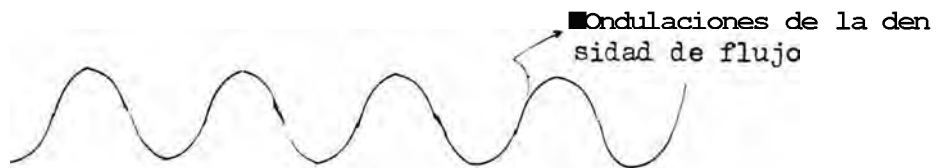
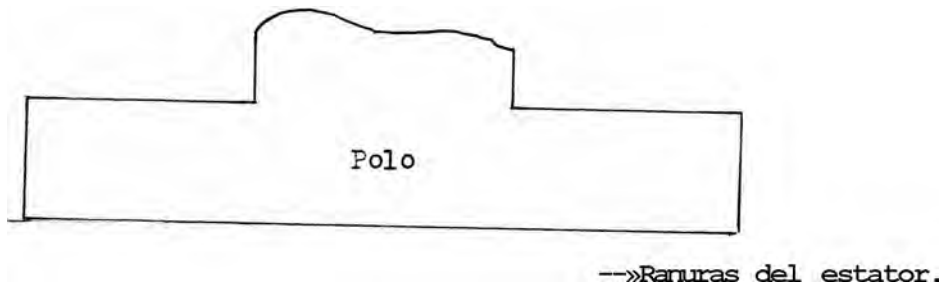


Fig. 21

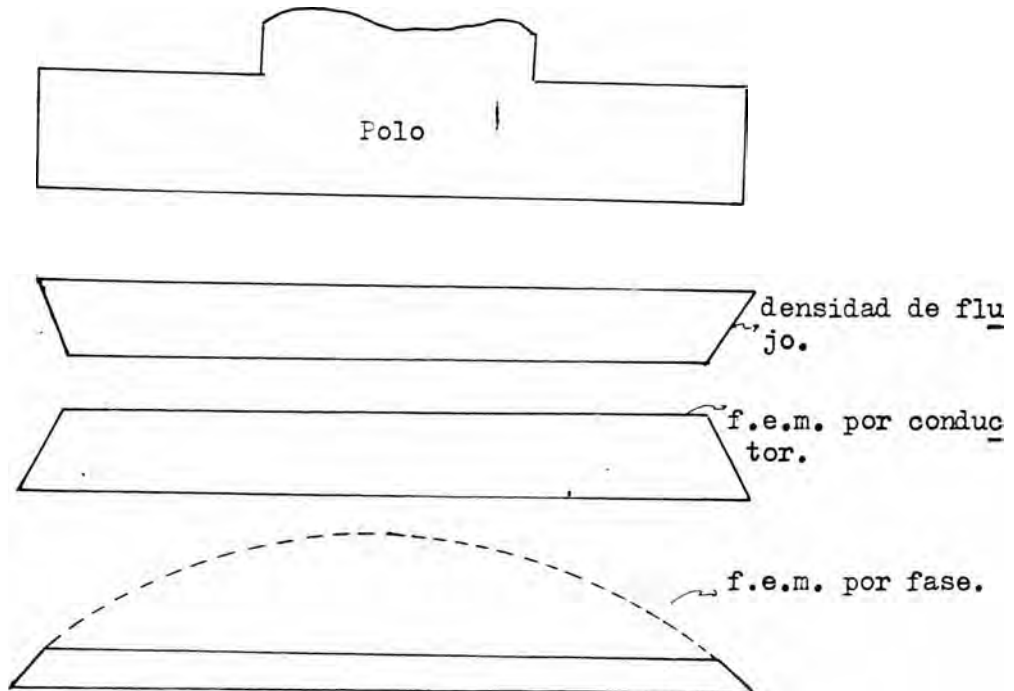


Fig. 22.

El efecto del paso de bobina en un devanado, con relación a la generación de armónicas impares encontrados en un devanado trifásico pueden atenuarse o eliminarse empleando el paso de bobina adecuado, por ejemplo con bobinas cuyo paso es igual a $\frac{2}{3}$ del paso total resultan eliminados todas las terceras armónicas, un paso de $\frac{1}{2}$ suprime las quintas armónicas. Un paso intermedio de 83.3 % reduce la 5^a y 7^a armónicas en un 75% mientras la fundamental se reduce únicamente en un 3%*

El efecto de la conexión triángulo sobre las armónicas de f.e.m. m. (A).

La tercera o cualquier otra armónica triple está en fase en cada una de las tres fases y establece una corriente circulatoria.

Efecto de la conexión estrella sobre las armónicas de f.e.m. (Y).

Las terceras armónicas son las únicas que no aparecen en la tensión de línea.

3.7.2 .Eliminación de armónicas.-

Las armónicas que normalmente aparecen en un devanado, son principalmente de orden impar, como puede comprobarse en las series de Fourier. Los resultados de la presencia de tales armónicas pueden resultar muy contraproducentes, y para eliminarlas o restringir, sus efectos, se recurre al cambio en el paso de bobina, como puede verse en el caso de una armónica de tercer orden representada en la fig. 23 (a)-(b).

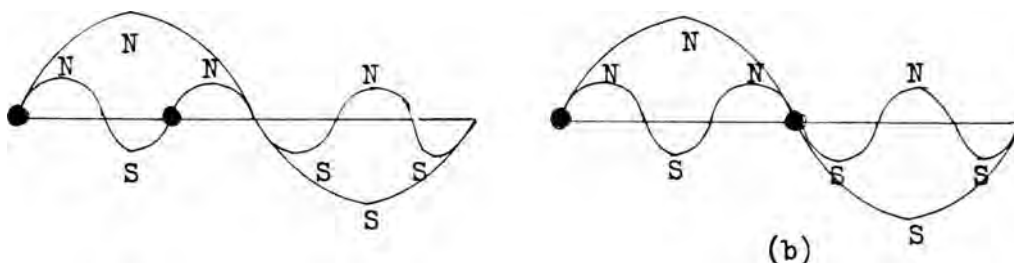


Fig. 23

La primera corresponde a un devanado de paso completo, en el cual el lado de "ida" de la bobina se aproxima al norte (lí), de la armónica de tercer grado, y el "retorno" al sur de esta onda, resultando en la suma de tensiones inducidas por la fundamental y su armónica. La fig. 23 (b), representa una bobina con $2/3$ de paso, o sea que desaparece la tensión de la armónica de tercer orden ya que ambos lados de la bobina en el instante dado se aproximan al polo N, por consiguiente las tensiones en ambos lados se encuentran en fase. En este caso, el factor de paso (F_0) es 86.6%.

Con un raciocinio similar se puede ver como es posible eliminar la armónica de 5^{to} orden, dando a la bobina un paso de $\frac{4}{5}$

Por lo tanto será factible eliminar totalmente una armónica dada, o atenuar sus efectos escogiendo un paso de bobina intermedio para ciertas armónicas, aunque no se las elimine por completo.

El factor de paso difiere para cada armónica, así como el ángulo eléctrico a considerarse en cada caso. Así por ejemplo, para un paso de bobina de $\frac{2}{5}$, $F_0 = \text{Sen } 60^\circ$ para la fundamental, y $\text{Sen } (3.0 \times 60^\circ)$ para la armónica de tercer orden, ya que, un ángulo θ para la fundamental es igual a 3θ para la tercera armónica.

El ángulo de desplazamiento $2\pi/3$ para la fundamental en un devanado trifásico auténtico se convierte en $2\pi/3$ para la armónica de tercer orden. En este tipo de devanado trifásico, si las tensiones correspondientes a las armónicas de tercer orden en ambos lados de las bobinas son iguales, estos resultan auto-eliminados, quedando, solo las tensiones correspondientes a la fundamental, 5^a y 11^a armónica. Las máquinas de doble devanado (por ejemplo para 6 y 2 polos) a veces tienen cierta tendencia a producir la inducción mutua

entre los conductores alojados en la misma ranura.

Refiriéndonos a la fig. 24, si las bobinas del devanado para 2 polos (trazo de puntos), se las hace de paso completo recogerían el signo (+) en el lado de "ida" y el signo (-) en el de "regreso" al ser cortadas por el campo de seis polos, ya que uno de sus lados se encontraría en la proximidad del N del sistema exapolar, mientras el otro estaría en la proximidad del S.

Dando a las bobinas del devanado de dos polos un paso de $\frac{2}{3}$, como lo indica la línea continua en el diagrama, el campo de seis polos no induce tensión en ellas.

El paso de bobina puede acortarse o extenderse, según las convenciones de diseño. En las máquinas construidas para conmutación bipolar, por ejemplo para 8/10 polos, por lo general se busca un valor intermedio para los dos números de polos, en este caso, 9 polos, o sea que se acorta el paso para la conexión de 10 polos y se alarga para la de 8 polos. Los devanados de 2 capas se prestan admirablemente para tales combinaciones en virtud de la disposición física de los extremos de sus bobinas.

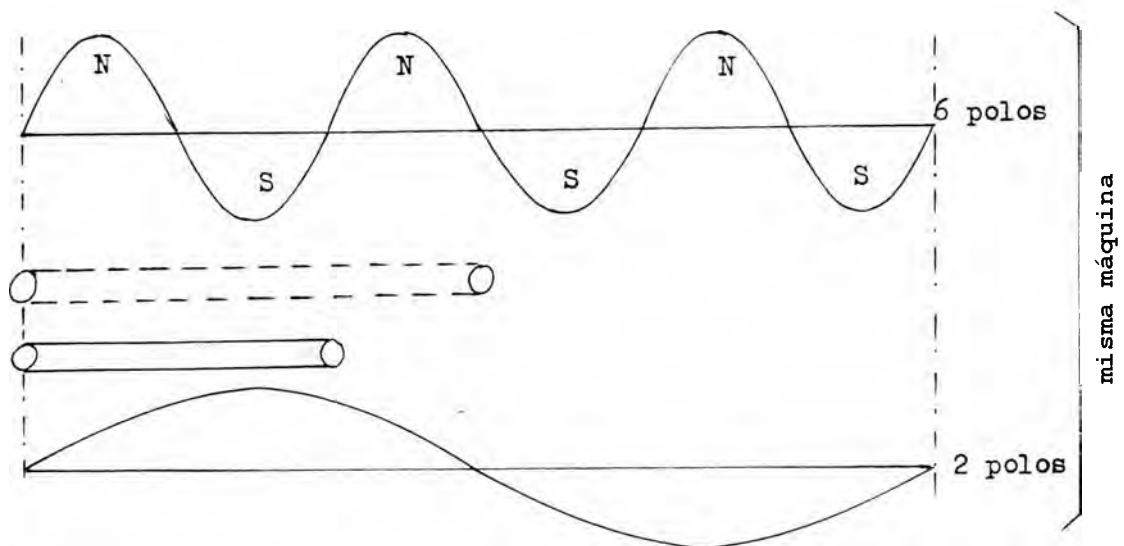


Fig. 24

3.8 Características a potencia constante.-

La fig. muestra las conexiones entre fases de los dos circuitos para llegar a obtener la misma potencia en el eje en las dos velocidades.

En la conexión a potencia constante, en alta velocidad el circuito está en $(\mathcal{Y}\mathcal{H})$ paralelo (8 polos) y en "baja velocidad (A) en serie triángulo, como se demuestra a continuación.

Supongamos que :

V_L = tensión entre líneas en cada diagrama.

I = corriente útil por conductor.

$\eta_{\Delta}, \eta_{\mathcal{Y}}$ = rendimiento respectivo de las conexiones de las 2 velocidades.

$\cos \theta^{\Delta}, \cos \theta^{\mathcal{Y}}$ = factores de potencia para las conexiones de las dos velocidades.

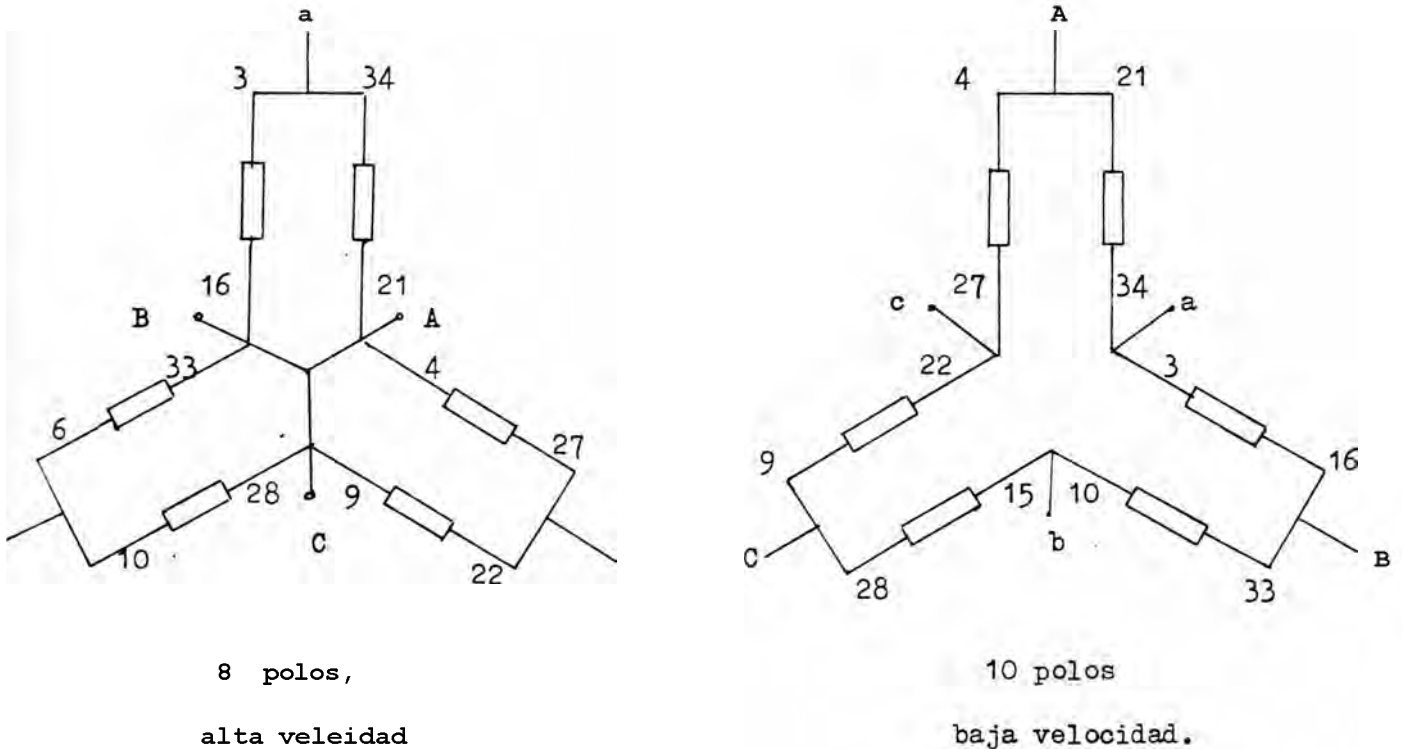


Fig. 25.

Es evidente pues :

$$I_a \cdot V_T \cdot V_L (2 I) \cdot c \cdot c \cdot s^k$$

$$P_{\Delta} = 7 \cdot T \cdot V (\sqrt{I}) \cdot 0.7 \cdot \cos \theta_{\Delta}$$

Se supone que I es el mismo, lo que no es necesariamente cierto, sin embargo hacer dicha suposición no se comete mucho error.

Luego s

$$P_A = 1.15 (7 \cos \theta) v y$$

$$P_{\Delta} = (\cos \theta) A$$

La relación $\frac{(\cos \theta) v y}{(\cos \theta) A}$ es menor que una unidad por experiencia -

de otros diseños, catálogos Delcrosa) y para máquinas análogas en ambas velocidades, podemos asumir los siguientes valores iniciales para que las potencias en el eje en ambas velocidades sean iguales

$$\frac{1.15 (\cos \theta) A L}{(\cos \theta) A} = 1$$

entonces :

$$P_{XX} = P_A ; T_{XX} = 2 T_L$$

luego :

$$\frac{(7 \cos \theta)_L}{L} = \frac{(7 \cos \phi)_{\Delta}}{1.15 M}$$

Para motores de 25 HP, y 8 polos.

$$(7 \cos \phi)_{\Delta} = 0.83 \times 0.8$$

$$(7 \cos \phi)_{\Delta} = 0.664$$

y según la ecuación :

$$(7 \cos \theta)_{\Delta} = 1.15 \times 0.664 = 0.7636$$

Si queremos comparar las densidades de flujo en el entrehierro en ambas conexiones, lo haremos teniendo en cuenta que la tensión

por fase es :

$$E = f \cdot f_n \cdot n_s \cdot z \cdot l \cdot K_w \cdot B_{medg} \cdot \pi \cdot D \cdot L$$

donde :

B_{med} = densidad media en el entrehierro,

f_f = factor de forma = 1.1

$$n_s = \frac{120 \times f}{p \times 60} \text{ cr. ps;}$$

K_w = factor de arrollamiento o de devanado.

D = diámetro en el entrehierro.

L = longitud en el entrehierro o paquete del núcleo.

Luego :

$$B_{medg} = \frac{E}{f \cdot f_n \cdot n_s \cdot z \cdot l \cdot K_w \cdot \pi \cdot D \cdot L}$$

y la relación de densidades de flujo en el entrehierro en ambas velocidades es :

$$\frac{B_{medgA}}{B_{medgAA}} = \frac{n_{sa} \cdot l_a \cdot K_{WA}}{n_{sA/k} \cdot K_{WA} \cdot K_{WAA}}$$

donde :

$$n_{sa} = \frac{120 \times 60}{10 \times 60} = 12 \text{ r.p.s.}, \quad n_{sA/k} = \frac{120 \times 60}{8 \times 60} = 15 \text{ r.p.s.}$$

y ya se determinó.

$$K_{WAA} = 0,618562. \quad , \quad 6 \text{ polos.}$$

$$K_{W\Delta} = 0.761144. \quad , \quad 10 \text{ polos.}$$

reemplazando estos valores y simplificando, obtenemos :

$$\frac{B_{medSA}}{B_{medA}} = \frac{n_{sA} \cdot l_{AA} \cdot K_{WA}}{n_{sA} \cdot l_{AA} \cdot K_{WA} \cdot K_{WAA}} = \frac{12 \cdot 15 \cdot 0.818862}{15 \cdot 12 \cdot 0.761144} = 0.761144$$

$$\frac{B_{\text{medg}\Delta}}{B_{\text{medg}\lambda\lambda}} = 1.164227$$

$$B_{\text{medg}\lambda\lambda}$$

$$\frac{B_{\text{medg}\lambda\lambda}(8 \text{ polos})}{B_{\text{medg}\Delta}(10 \text{ polos})} = 0.85893.$$

$$B_{\text{medg}\Delta}(10 \text{ polos})$$

4.0 Relación entre densidades de flujo resultantes de las combinaciones polares.

Para diseñar un devanado P.A.M., perfectamente satisfactorio para cualquier número de polos considerados es menester asegurarse - que la máquina tenga el máximo de flujo en cada una de sus combinaciones polares, y que la relación de flujo entre una y otra combinación sea lo mas apropiado al caso ideal.

El valor ideal entre ϕ_8 / ϕ_{10} , debería aproximarse lo más posible a la unidad.

El voltaje eficaz inducido por fase en el devanado estatórico , está representado por la siguiente fórmula :

$$E = f_f \cdot N \cdot n_s \cdot K_w (B_{medg}) \pi \cdot D \cdot L \quad (1)$$

f_f = factor de forma = 1.1 (de la onda de flujo)

B_{medg} = inducción media máxima en el entrehierro en W_b/m^2 .

D = diámetro del entrehierro en mt.

L = longitud activa del paquete de chapas magnéticas en mt.

K_w = factor de arrollamiento.

n_s = velocidad síncrona del rotor en r.p.s.

$$n_s = \frac{120 \times f}{p \times 60} \text{ (r.p.s.)}$$

p = número de polos.

f = 60 c.p.s.

N = número de conductores en serie por fase.

Para lograr la modulación polar por medio de la inversión de una mitad del devanado se recurre al cambio de conexiones, sean de circuitos paralelos en estrella (A A) a circuitos serie (A) en triángulo, o viceversa, contribuyendo por lo tanto a nivelar el flujo como consecuencia del cambio en la tensión aplicada.

Para el caso de un estator conectado con dos circuitos en estrella correspondiente al arreglo para 8 polos tenemos :

$$E_x = f \cdot \frac{N}{p} \cdot K_{w1} \cdot B \cdot n \cdot DL \quad , \quad A \quad A$$

$$*i = ? = *8$$

$$n_i = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times f}{8 \times 60} = n_8 \quad , \quad (r.p.s.)$$

$$E_1 = \frac{V_T}{\sqrt{3}} = \frac{E_p}{8}$$

$$E_8 = \frac{f \cdot \frac{N}{2} \cdot K_{w8} \cdot B \cdot n \cdot DL}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

En la conexión triángulo serie para producir 10 polos tenemos:

$$E_3 = f \cdot \frac{N}{3} \cdot K_{w3} \cdot B \cdot n \cdot PL \quad , \quad A$$

$$E_j = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = E_{1C}$$

$$n_3 = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times f}{10 \times 60} = n_{10} \quad , \quad (v.p.s.)$$

$$E_{10} = f \cdot \frac{N}{10} \cdot K_{w10} \cdot B \cdot n \cdot PL \quad (2)$$

$$E_{10} = \frac{f \cdot \frac{N}{10} \cdot K_{w10} \cdot B \cdot n \cdot PL}{\sqrt{3}}$$

luego :

$$\frac{B_{medi}}{8} = \frac{E_p}{f} \cdot \frac{f}{I} = \frac{120 \times f}{10} \cdot f \cdot K_{w10} = \frac{0.8 \times 2 \times V_L \times K_{w10}}{\sqrt{3}}$$

$$B_{medi, 10} = \frac{E_{10}}{f} = \frac{1}{f} \cdot \frac{120 \times f}{9} \cdot f \cdot K_{w8} = \frac{\sqrt{3}}{3} \times V_L \cdot K_{w8}$$

$$B_g = 0.8 \times K_{w10}$$

$$B_{10} \sim \sqrt[2]{X} K_{w8}$$

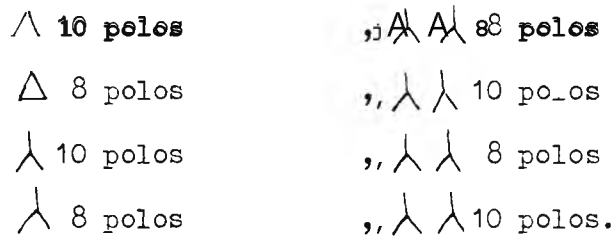
$$\frac{B_n}{B_{r10}} = 0.9237 \times \frac{k}{K_{w8}} \quad (I)$$

Si examinamos la fórmula I, el valor ideal de B_g / B^Q , se hace teóricamente cuando $K = K^Q = 1$, y el valor ideal de diseño para esta relación es 0.9237*

El sentido de rotación se invierte en 10 polos para el mismo valor de tensión aplicado.

4.1 Las alternativas desarrolladas para la conexión.

Las alternativas para el caso del ejemplo desarrollado son :



La conexión adecuada se hace comparando las densidades de flujo en el entrehierro en ambas conexiones :

$$n_s = \frac{120 \times f}{p \times 60} \text{ (r.p.s.)} = \frac{2f}{p} \text{ (r.p.s.)}$$

Si :

$$E_1 = f \cdot \frac{p}{f} \cdot n_1 \cdot K_{w1} \cdot \frac{B}{\text{med}} \cdot A \cdot \text{TTDL}$$

$$E_3 = f \cdot \frac{p}{f} \cdot n_3 \cdot K_{w3} \cdot \frac{B}{\text{med}} \cdot A \cdot \text{TTDL}$$

Entonces :

$$\frac{B_1}{B_3} = \frac{E_1 \cdot \frac{p}{f} \cdot n_3 \cdot K_{w3}}{E_3 \cdot \frac{p}{f} \cdot n_1 \cdot K_{w1}}$$

Para la conexión A 10 polos y X 8 polos se tiene :

$$i = 8, E_i = VL / \sqrt{2}, n_i = \frac{2f}{\omega}, N_i = \frac{\pi}{2}$$

$$j = 10, E_j = VL, n_j = f, N_j = \pi$$

$$\frac{B_8}{B_{10}} = \frac{v_1 \cdot 1 \cdot \dots \cdot 1 \cdot E_{W10} \cdot 1 \cdot 2f}{\frac{N}{f}}$$

$$\frac{B_8}{B_{10}} = \frac{0.8 \cdot K_{w10}}{E_{10} \cdot (\sqrt{2} \cdot n)^2 \cdot K_{w8}} = \frac{0.8 \cdot 2 \cdot K_{w10}}{V? \cdot K_{w8}}$$

$$\frac{B_8}{B_{10}} = 0.9237 \cdot \frac{K_{w10}}{K_{w8}}$$

$$\frac{B_8}{B_{10}} = 0.9237 \cdot \frac{0.76114}{0.781856} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{Or_1}{Or_2} = 0.585$$

Para la conexión ^ 8 polos y Xk 10 polos se tiene :

$$i = 8, S_i = \frac{V_L}{\sqrt{2}}, n_i = \frac{2f}{\omega}, li_i = \pi$$

$$j = 10, E_j = \sqrt{2} \cdot V, n_j = f, li_j = \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{B_8}{B_{10}} = \frac{VL \cdot (\frac{\pi}{2}) \cdot (2f/10) \cdot K_{w10}}{\dots}$$

$$B_{10} = (VL / \sqrt{2}) \cdot \dots \cdot (2f/8) \cdot K_{w8}$$

$$B_8 = 0.9237 \cdot \dots \cdot K_{w10}$$

$$\frac{B_8}{B_{10}} = 0.6442$$

$$B_{10} = 2 \cdot K_{w8}$$

$$\frac{B_8}{B_{10}} = 0.6442$$

$$B_{10}$$

Para la conexión A 8 polos y Xs, 8 polos.

$$i = 8 \text{ "Dolos"} , E_i = V_T , n_i = \frac{2f}{8} , N_i = N/2.$$

$$j = 10 \text{ polos} , E_j = V_L , n_j = \frac{2f}{10} , N_j = 11$$

$$\frac{B_8}{B_{10}} = \frac{V_T}{V_L} \times \Pi \times 2f \times K_{w10}$$

$$B_{10} = V_L Z 1 X 10 i 2S i Kk 8$$

$$\frac{B_8}{B_{10}} = \frac{0.5 \times 2 \times K_{w10}}{K_{w8}} \ll 1.6 \times \frac{K_{w10}^n}{K_{w8}} = 1.6 \times 0.76114$$

$$B_{10} = K_{w8} \times 0.81856$$

$$\frac{B_D}{B_{10}} = 1.4877.$$

Para la conexión ⁸ polos y **AA** 10 polos.

$$i = 8 , E_i = V_L , n_i = \frac{2f}{8} , N_i = N$$

$$j = 10 , E_j = V_L , n_j = \frac{2f}{10} , H_j = H/2$$

$$\frac{B_8}{B_{10}} = \frac{V_T}{V_L} \times H \times 2f \times K_{m1q}$$

$$B_{10} = V_L x i ; / 2 x 8 x - f S - x K w 8$$

$$\frac{B_D}{B_{10}} = \frac{1 \times K_{w10}}{1.6 \times K_{w8}} = \frac{1 \times 0.76114}{1.6 \times 0.81856}$$

$$B_{10} = 1.6 \times K_{w8} \times 0.81856$$

$$\frac{B_C}{B_{10}} = 0.581157.$$

$$B_{10}$$

Como el diseño de un motor de dos velocidades radica principalmente en ubicar las conexiones adecuadas, para mantener aproximadamente un mismo nivel de flujo magnético en ambas velocidades.

Manteniendo un mismo nivel de flujo magnético en ambas velocidades

des, no se tendrá problemas de saturación, altas corrientes de excitación, ni demasiadas pérdidas en el núcleo.

De acuerdo al factor de arrollamiento encontrado en el devanado y según las alternativas planteadas escogemos la conexión de :

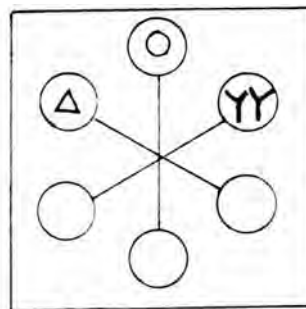
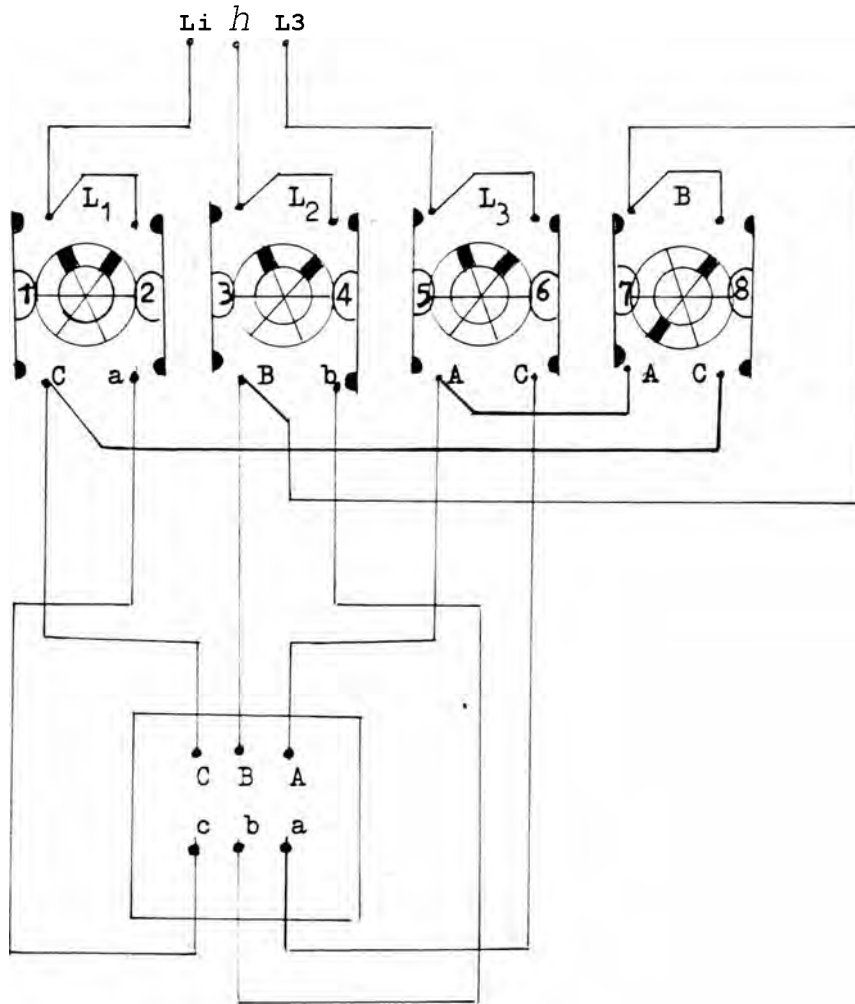
A 10 polos y 8 polos,
por ser :

$$\frac{3e}{B_{10}} = 0.8589.$$

valor perfectamente aceptable para aplicaciones que requieran una potencia constante. Puesto que si se hacen mayores concesiones para un mayor flujo de dispersión en el caso de 10 polos, el valor $\frac{e}{\mu}$ ideal de diseño es mas o menos igual a 0.9235 es decir : $K_{w10} = K_{w8}$ y en la fórmula s

$$\frac{B_g}{B_{10}} = 0.9237 \times \frac{K_{w10}}{K_{w8}} = 0.9237.$$

EsQUEMA DE CONEXIONES DEL CONMUTADOR ROTATIVO DE 4 ELEMENTOS.



	X		X		X	X	X	YY	Posición.
								○	
X	X	X						Δ	
1	2	3	4	5	6	7	8	Contacto	
I	II		III		IV			Elemento	

5.0 CARACTERÍSTICAS DE LA EA^{UIHA}. ■

5.1 Circuito equivalente.-

Partimos de las condiciones en el estator. La onda de flujo en el entrehierro, que gira a la velocidad de sincronismo, crea una fuerza contraelectromotriz polifásica equilibrada en las fases - del propio estator, y la tensión en sus terminales difiere de la fuerza contraelectromotriz en el valor de la caída de tensión en su impedancia de dispersión. La relación vectorial en la fase considerada es :

$$V_1 = 3I_1 + I_1' + jx_1' \quad (1)$$

Donde :

V_1 = Tensión en bornes.

I_1' = Fuerza contraelectromotriz inducida por el flujo resultante en el entrehierro.

I_1 = Corriente por fase en el estator.

El circuito equivalente del estator es como se muestra en la fig.1•

Donde :

r_1 , x_1' = Resistencia y reactancia de dispersión del estator por fase.

I_1' = Corriente en el rotor visto desde el estator, por fase.

I_j = Corriente de excitación.

I_w = Corriente de pérdidas en el núcleo.

I_1 = Corriente magnetizante,

g_0 = Conductancia de pérdidas en el núcleo.

b_m = Susceptancia magnetizante.

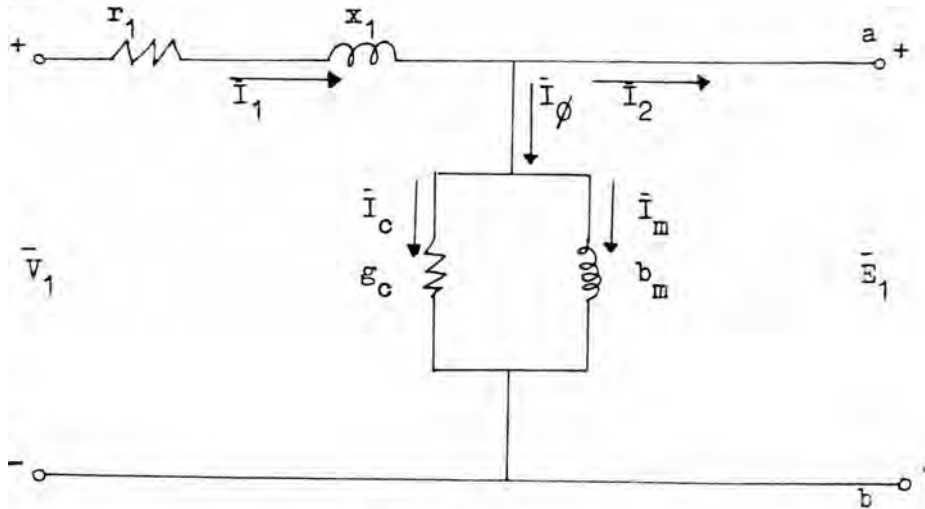


Fig.1

SI estator genera unas ondas de flujo y de fuerza magnetomotriz que giran a la velocidad de sincronismo. La onda de flujo induce en el rotor una tensión S_2g (reducida al estator) a frecuencia de deslizamiento, y en el estator una fuerza contraelectromotriz E_1 , retrasadas con respecto al flujo en 90° eléctricos.

Cedido a que la velocidad relativa de la onda de flujo respecto al estator, la relación entre los valores efectivos de la f.e.m. en estator y rotor será ;

$$\bar{E}_{2s} = \frac{\bar{E}_1}{s} \quad (2)$$

La onda de f.m.m. del rotor está contrarestada por la componente de carga I_2 de la intensidad en el estator, y por tanto, para, valores efectivos :

$$\bar{I}_{2s} = \bar{I}_2 \quad (3)$$

Si dividimos las ecuaciones (2) y (3), obtenemos s

$$\frac{\bar{E}_{2s}}{\bar{I}_{2s}} = \frac{s \bar{E}_1}{\bar{I}_2} \quad (4)$$

La ecuación (4) representa la impedancia rotórica a frecuencia de deslizamiento, por lo que podemos obtener :

$$\frac{\bar{E}_{2s}}{\bar{I}_{2s}} = \frac{s \bar{E}_1}{\bar{I}_2} = r_0 + j s x_2 \quad (5)$$

Siendo :

sx^{\wedge} = La reactancia de dispersión del rotor por fase a la frecuencia de deslizamiento reducida al estator.

r_2^{\wedge} = La resistencia efectiva del rotor reducida al estator.

La fig, 2 representa el circuito equivalente de una fase del rotor reducido, a frecuencia de deslizamiento.

Si dividimos la ecuación (5) por s :

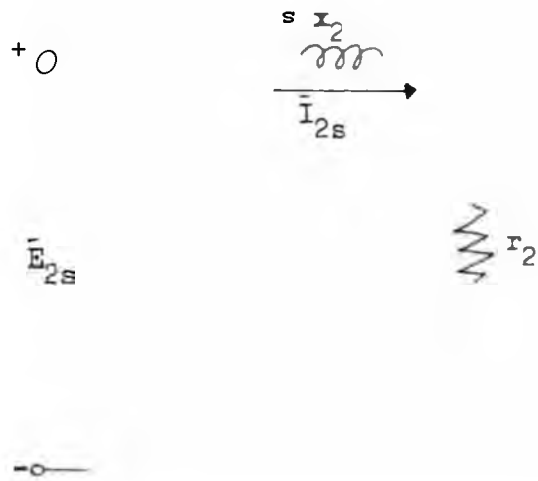
$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{I}_2} = \frac{r_2}{s} + j x_2 \quad (6)$$

Según esto, los efectos del rotor se pueden incorporar al circuito equivalente de la fig. 1, conectando esta impedancia entre los puntos a y b, resultando finalmente el circuito de la fig. 3.

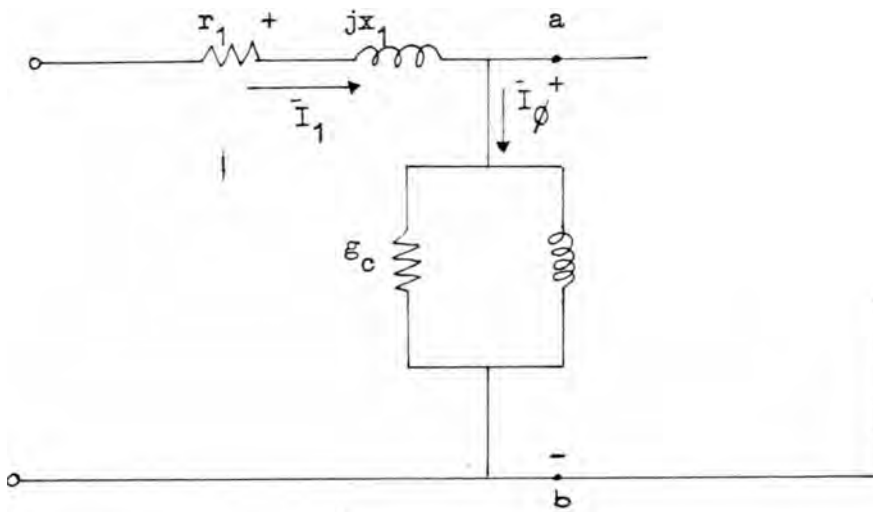
Donde :

$\frac{r_2}{s}$ = representa el efecto combinado de la carga mecánica y de la resistencia del rotor.

31 diagrama vectorial de ese circuito se muestra en la fig. 4»



• 2. 1. 2.



0

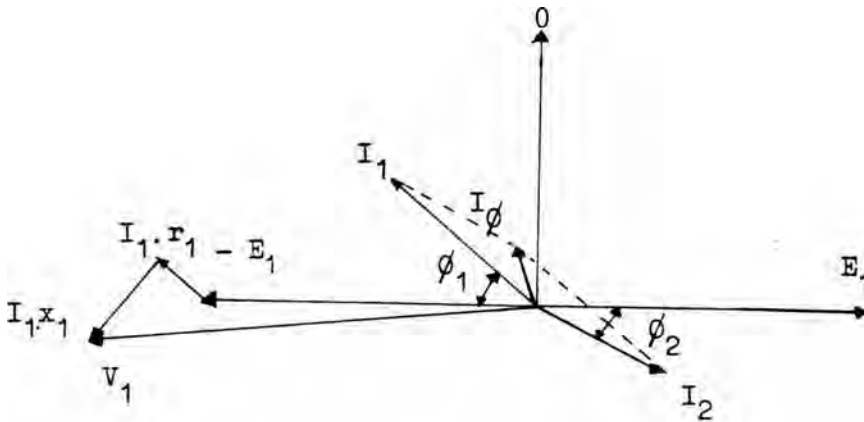


Fig. 4.

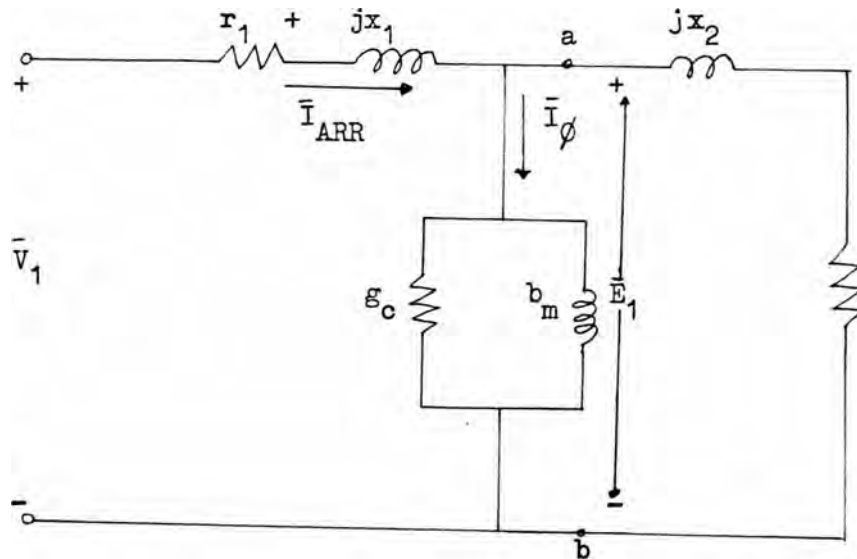
5.1.1 Circuito equivalente en ambas velocidades.-

El circuito equivalente en condiciones nominales es como muestran las figs. siguientes, los valores en paréntesis son los valores de las resistencias en el momento del arranque.

5.1.2 Circuito equivalente para la conexión A (10 polos).

Los valores de estos parámetros se calcularéis en el capítulo

6.3.



Fifi.5-

5.1.3 Circuito equivalente en conexión Y ¿Y (8 polos).-

Los valores de los parámetros, se calcularon en el capítulo 6.

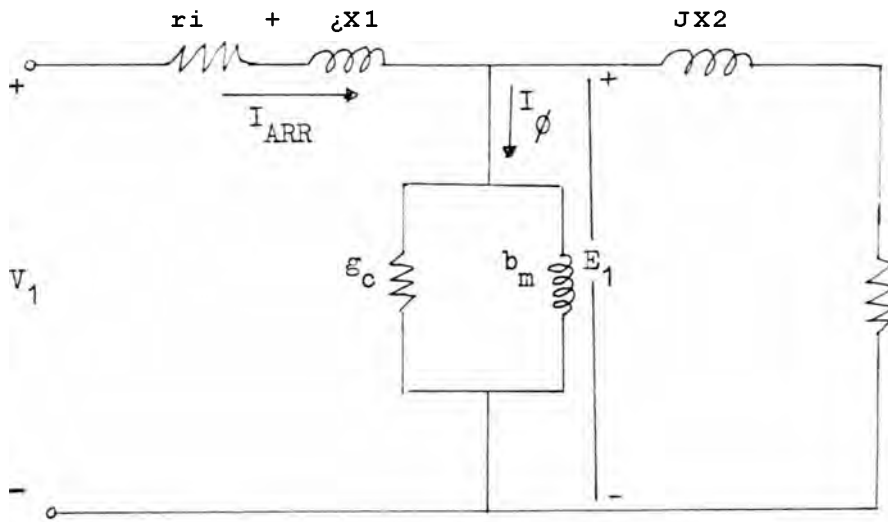


Fig. 6.

5.2 Corriente en el arranque.-

Al momento del arranque, el rotor se encuentra sin movimiento, es decir, $s = 1$, y el circuito equivalente de la fig. 3, se transforma en la fig. 5*

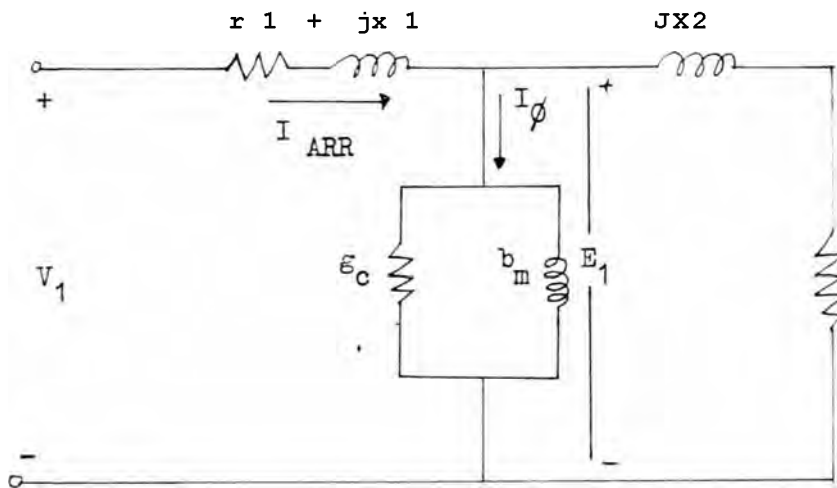


Fig. 7 .

Si conocemos los diferentes valores del circuito de la fig. 5» podemos encontrar la impedancia equivalente total en el momento del arranque vista desde el estator, según muestra la fig. 8.

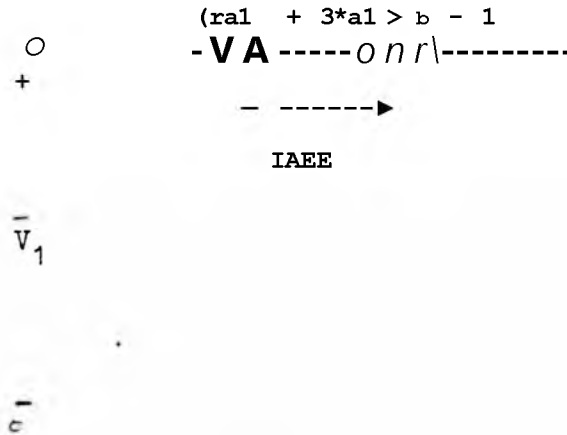


Fig. 8.

Donde : $Z_{a1} + jX_{a1}$ $s = 1$: Impedancia equivalente total en el momento del arranque visto desde el estator.

$$I_{ARR} = \frac{V_1}{(r_{a1} + jX_{a1})_{s=1}} \quad (7)$$

5.3 Potencia y Par según el teorema de Thevenin.-

El teorema de Thevenin permite sustituir cualquier red formada de elementos de circuitos lineales y de generadores de tensión vectorialmente constantes, por una tensión única E_{th} en serie con una impedancia única Z_{th} .

La tensión E_{th} es la que existe en los terminales en mención, cuando éstos están en circuito abierto, y la impedancia Z_{th} es la existente desde los mismos terminales cuando todas las fuentes de tensión de la red están en corto circuito

Fara la aplicación del teorema de Thevenin al circuito equivalente de un motor de inducción, los puntos a y b de la fig. 3, corresponden a los terminales mencionados. Según esto, el circuito equivalente toma la foma de la fig. 9.

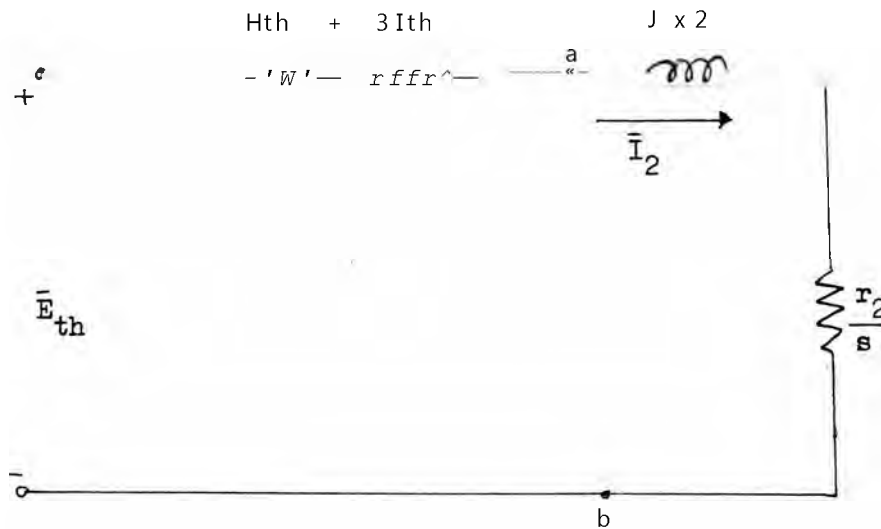


Fig. 9.

Según el teorema de Thevenin :

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_{th}}{r1 + jx1 + \frac{R2}{s}} \quad (8)$$

Donde : \bar{I}_2 , es la corriente en vacío.

\bar{E}_{th} es la tensión Thevenin equivalente.

La impedancia equivalente Thevenin del estator $R^{\wedge} + jx_{th}$, es la impedancia entre los terminales a y b vista hacia la alimentación, estando cortocircuitada la fuente de tensión, por tanto :

$$R_{th} + jx_{th} = (r1 + jx1) // \left(\frac{R2}{s} \right) \quad (9)$$

SI circuito equivalente muestra que la potencia total P_g^{\wedge} , transferida por el estator a través del entrehierro es :

$$P_{g1} = m i_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (10);$$

Siendo m el número de fases del estator.

La pérdida total en el cobre del rotor, evidentemente es :

$$\text{Pérdidas en el cobre del rotor} = n I_2^2 r_2 \quad (11)$$

Por lo que, la potencia mecánica interna P_m desarrollada por el motor es :

$$P_m = m I_2^2 \left(\frac{r_2}{s} - r_2 \right)$$

$$P_m = m i_2^2 r_2 \cdot \frac{1-s}{s} \quad (12)$$

Y la potencia P desarrollada en el eje es :

$$P = m i_2^2 \frac{r_2}{s} \cdot \frac{1-s}{s} = \eta_m P_m \quad (13)$$

Donde : η_m , es la eficiencia que toma en cuenta las pérdidas por fricción y ventilación.

Según la Fig. 7, I_2 es :

$$I_2 = \frac{E_{th}}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (U)$$

Que reemplazando en la Ec. (13) obtenemos :

$$P = m E_{th}^2 \frac{r_2}{s} \cdot \frac{1-s}{s} \cdot \frac{1}{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (u)$$

El par electromagnético interno T_{em} , correspondiente a la potencia interna P_m , puede obtenerse recordando que la potencia mecánica es igual al par por la velocidad angular,

Si ω_s , es la velocidad angular síncrona del rotor expresada en radianes/seg., obtendremos :

$$T_{em} = (1-s) \cdot \frac{P_m}{\omega_s} \quad (16),$$

Y el par correspondiente a la potencia en el eje :

$$T = \frac{P}{(1-s) \omega_s} \quad (17)$$

Reemplazando P, según la ecuación (13), obtenemos :

$$T = -\frac{1}{\omega_s} \frac{2}{DI2} - \frac{r_2}{s} \cdot \frac{E_m}{L_m} \quad (18)$$

Reemplazando en A₂, según la ecuación (14)» obtenemos :

$$T = \frac{mE_m^2}{s \omega_s} \cdot \frac{r_2}{(R_{th} + \frac{r_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (19)$$

En el arranque, s=1, y el torque de arranque será :

$$T_{ARR} = \frac{mS^2}{\omega_s} \frac{r_2}{(R_{th} + r_2)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (20)$$

T_{ARR} , también es igual a $T_{mío}$, puesto que en el momento del arranque no existe ningún tipo de rozamiento ni ventilación.

Tanto el par como la potencia electromagnética máxima $T_{m\acute{a}x}$ y $P_{m\acute{a}x}$, pueden determinarse por consideraciones sobre el circuito, El par máximo y la potencia máxima no se consiguen a la misma velocidad.

El par interno pasa por su máximo, cuando es máxima la potencia suministrada a r^2/s de la Fig. 9« Esta potencia será mayor cuando iguale en magnitud a la impedancia existente entre ella y la tensión constante $E_{m\acute{a}x}$, o par un deslizamiento $S_{m\acute{a}xT}$ en el que se cumpla que :

$$S_{m\acute{a}xT} \frac{r_2}{s} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (21)$$

Ei la que el deslizamiento con mar máximo será :

$$S_{m\acute{a}xT} = \frac{r_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (22)$$

Y el par máximo será entonces :

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \frac{mE_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (23)$$

Para encontrar la potencia máxima, consideraremos el Circuito de la fig. 10.

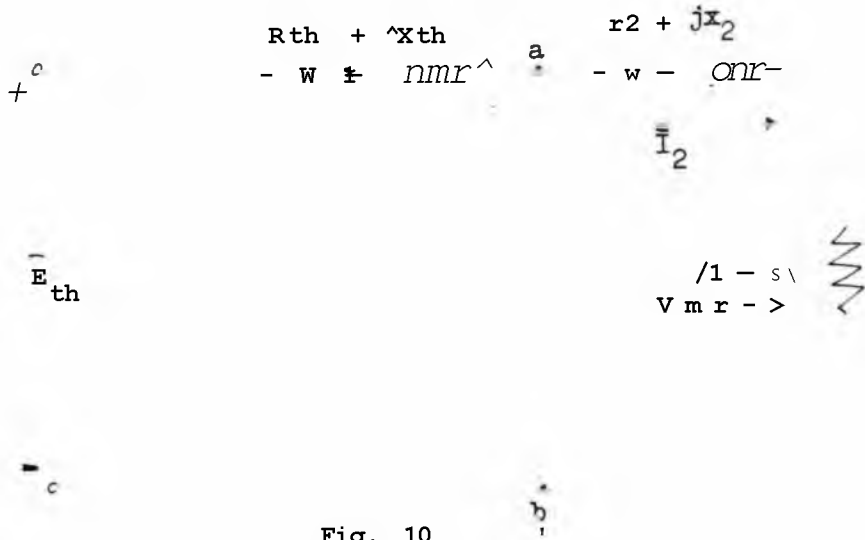


Fig. 10

Donde la potencia absorbida por $r_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)$ es la potencia mecánica interna (electromagnética) por fase de la máquina.

Esta potencia será mayor, cuando $r_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)$ iguale en magnitud a la impedancia existente entre ella y la tensión constante E_{th} o para un deslizamiento $S_{\max P}$ en el que se cumpla que :

$$r_2 \left(\frac{1 - S_{\max P}}{S_{\max P}} \right) = \sqrt{(R_{th} + r_2)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (24)$$

En la que el deslizamiento con potencia máxima será :

$$S_{\max P} = \frac{r_2}{r_2 + \sqrt{(R_{th} + r_2)^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (25)$$

One reemplazando en la ecuación (15)5 haciendo $T_m = 1$, y simplificando obtenemos :

$$P_{MAX} = \frac{mE_{th}^2}{2} \cdot \frac{1}{R_{th} + r_2 + \sqrt{(R_{th} + r_2)^2 + (X_{th} + x_2)^2}} \quad (26)$$

6.0 CALCULO DEL COKPORTAKIMTO.

Para verificar que la máquina cumpla con las especificaciones - previas de diseño, utilizaremos las ecuaciones del circuito equivalente de Thevenin en ambas velocidades, teniendo en cuenta todos sus parámetros de comportamiento tales como : torque nominal, potencia nominal, corriente nominal, corriente en el arranque, torque máximo, potencia máxima, deslizamiento máximo y eficiencia.

6.1 Pérdidas.-

6.1.1 Pérdidas en el núcleo.

Según la curva de pérdidas específicas del material para los dientes :

$$B_{\max d \Delta} = 1.649 \text{ Wb/m}^2 \quad ; \quad P_{d \Delta} = 7.0 \text{ W/Kg.}$$

$$B_{\max d \gamma \gamma} = 1.424 \text{ Wb/m}^2 \quad ; \quad P_{d \gamma \gamma} = 5.0 \text{ W/Kg.}$$

Y para la corona :

$$B_{\max c \Delta} = 1.4038 \text{ Wb/m}^2 \quad ; \quad P_{c \Delta} = 5.1 \text{ W/Kg.}$$

$$B_{\max c \gamma \gamma} = 1.5153 \text{ Wb/m}^2 \quad ; \quad P_{c \gamma \gamma} = 5.3 \text{ W/Kg.}$$

En acápites anteriores, se encontró los pesos de la corona y dientes. (A.2.1.9)

$$G_c = 33.077 \text{ Kg.}$$

$$G_d = 30.903 \text{ Kg.}$$

Y las pérdidas en el hierro para ambas velocidades es :

$$W_{Fe \Delta} = P_d \times G_d + P_c \times G_c$$

$$W_{Fe \Delta} = 385.01 \text{ W.}$$

$$W_{Fe \gamma \gamma} = P_d G_d + P_c G_c$$

$$V_{*e \gamma \gamma} = 329.82 \text{ W.}$$

Debido al punzonado, estado de las herramientas de corte, manipulaciones del empilado, posible ajuste, rectificado o limado del entredierro, ranuras γ de cualquier otra operación a que deben sanear las chapas durante el proceso de fabricación, las pérdidas en el fierro aumentan, estimándose un incremento del 25\$ a 50\$ del total de las pérdidas calculadas, en algunos casos puede llegar hasta 105 %

Si tomamos un incremento del 100\$, obtenemos :

$$W_{Fe \Delta} = 770.02 \quad " \quad ;$$

$$w_{Fe \gamma \gamma} = 659.4 \quad * \quad ;$$

6.1.2 pérdidas por fricción y ventilación.-

En nuestro caso cuando la máquina trabaje a 9⁰ r.p.m. estas pérdidas pueden estimarse en un 1.0\$.

$$P_m = P + w_{FV}$$

Donde : W_{FV} son las pérdidas por fricción y ventilación.

$$\text{También : } P = 24 \text{ HP.}$$

$$\text{Que equivale al } 99\% \text{ de } P_m \quad (\eta_{m\gamma\gamma} = 99 \%).$$

$$\text{Por lo tanto : } P_{m\gamma\gamma} = \frac{100}{99} \times 24 = 24.2424 \text{ HP.}$$

$$W_{r\gamma\gamma} = 0.2424 \text{ HP} = 180.83 \text{ "4.}$$

La velocidad tangencial en la superficie del eje es :

$$\text{TTD eie x RPK}$$

$$vt = \text{-----55-----}$$

Para ambas velocidades :

$$v_{t\Delta} = \sqrt{0.055 \times 684} = 1.9697 \text{ m/seg.}$$

$$v_{typ} = \frac{0.055 \times 855}{5022 - 22} \times 2.4622 = 2.4622$$

Las pérdidas en baja velocidad se deducen a continuación :

$$W_{FV_{yy}} = 180.83 = A (2.4622)^3$$

de donde :

$$A = 46.8042.$$

$$W_{PVA} = A (1.9697)^3 = 46.8042 \times (1.9697)^3$$

$$W_{FV_{\Delta}} = 129.385 \text{ w}$$

y la potencia mecánica :

$$P_{ma} = 24 \times 746 + 129 \times 385 = 18,033.385 \text{ W}$$

$$W_{FV_a} = 0.717474 \text{ \$ de } P_{ma}$$

$$Y_{\%} = 99.282 \text{ \$}$$

6.1.3 Pérdidas adicionales.-

La forma geométrica que tiene la onda de f.m.m. dan origen a muchas armónicas, lo cual supone otras ondas extendidas sobre el desarrollo del entréhierro ocasionando corrientes parásitas que son fuentes de nuevas pérdidas. Las normas VL3 estiman su evaluación en un 0.5% de la potencia nominal en vatios por lo tanto :

$$W_{adA} = 0.005 \times 24 \times 746 = 8952 \text{ W.}$$

$$W_{adY} = 89.52 \text{ W.}$$

6.2 Comportamiento en vacío.-

Las pérdidas en el cobre del estator debidas a la corriente de vacío son aproximadamente :

$$W_{\text{Cuo}} = I_m^2 R_{\text{m}} \text{ (75}^\circ\text{C)}$$

Para ambas velocidades :

$$W_{\text{Cuo } \dot{\zeta}} = 423.19 \text{ W} = 34.1442 \times 3 \times 0.121.$$

$$W_{\text{Cuo } \text{yy}} = 165.25 \text{ W} = 41.1692 \times 3 \times 0.03025$$

La componente activa de la corriente en vacío es :

$$L_{\text{A}} = \frac{W_{\text{Fe}} + W_{\text{FV}} + W_{\text{ad}} + W_{\text{Cuo}}}{mV}$$

Para ambas velocidades :

$$L_{\text{A}} = \frac{770.02 + 129.3847 + 89.52 + 423.19}{3 \times 220}$$

$$L_{\text{A}} = \frac{659.64 + 180.83 + 89.52 + 165.25}{3 \times 220} \text{ V}$$

$$L_{\text{A}} = 2.1395 \text{ Amp.}$$

$$L_{\text{A}} = 2.8743 \text{ Amp.}$$

La corriente en vacío será :

$$I_0 = \sqrt{I_m^2 + I_W^2}$$

Y para ambas velocidades :

$$I_0 \text{ A} = \sqrt{34.1442^2 + 2.1395^2} = 34.21 \text{ Amp.}$$

$$I_0 \text{ yy} = \sqrt{41.169^2 + 2.8743^2} = 41.26 \text{ Amp.}$$

$$\cos \phi_o = \frac{I_w}{I_o}$$

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{6.2}{6.2}$$

$$\cos \phi = \frac{43}{6.2} = 6.935$$

6.3 Circuito equivalente.-

Para tener en cuenta las pérdidas adicionales en el circuito equivalente podemos incluirla en la conductancia (\$m).

La conductancia es :

$$g_m = \frac{P_e + W_{ad}}{E^2}$$

$$g_{m\Delta} = \frac{770.02 + 89.52}{3(10 \times 0.95 \times 220)^2} = 6.5592 \times 10^{-3} \text{ Ilos}$$

$$g_m = \frac{659.64 + 89.52}{3(0.95 \times 220 / \sqrt{3})^2} = 17.1507 \times 10^{-3} \text{ Khos.}$$

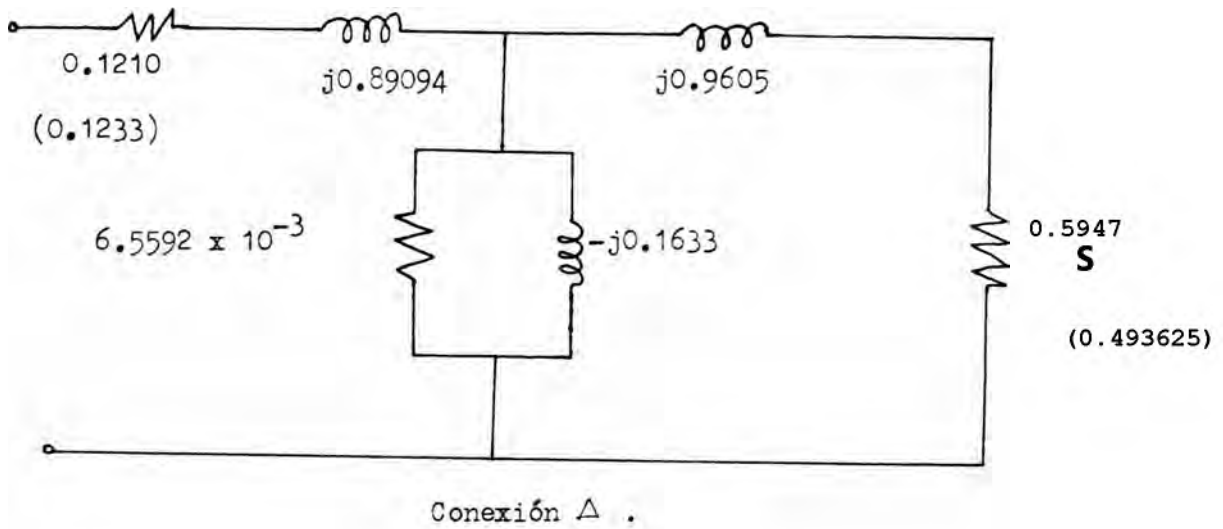
Y la susceptancia será : (según A.2.1.15*1)

$$b_m = \frac{1}{X_m}$$

$$b_{m\Delta} = 0.1633 \text{ Khos.} ; b_{mYY} = 0.3412 \text{ Khos.}$$

Y el circuito equivalente en condiciones bominales es como se muestra en las figuras siguientes. Los valores entre paréntesis son los valores de las resistencias en el momento del aman- que

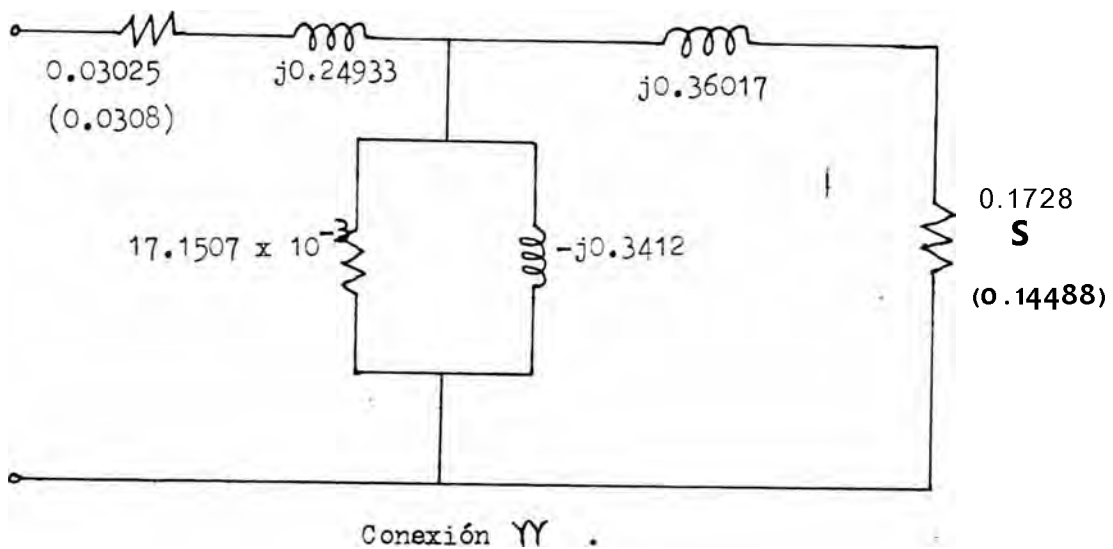
6.3.1 Circuito equivalente para 10 polos (A).-



Conexión Δ .

Fig. 1.

6.3.2 Circuito equivalente para 8 polos (Y T)•



Conexión $\Upsilon\Upsilon$.

Fig. 2.

6.4 Comportamiento en condiciones nominales.-

6.4.1 Potencia nominal.-

Según la ecuación siguiente y reemplazando valores :

$$P = \frac{4 \cdot (1 - s)}{s} \cdot \frac{r - 4 \cdot 2}{(H_{th} + S) \cdot (X_{th} + i)}$$

$$P = 8443.75 \quad w = 11.31 \quad HP = 12 \quad HP \quad \%$$

$$SB = 5 \quad \$$$

$$P = 10806.48 \quad W = 14.5 \quad E?.$$

YY

$$v = 5 \quad *$$

Estos deslizamientos se encuentran en el límite y por debajo de las condiciones iniciales de diseño, (5/)

6.4.2 Torque nominal.-

Según la ecuación y para deslizamiento nominal :

$$T_{II} = \frac{P}{(1 - s) \cdot w \cdot g}$$

Y para deslizamiento nominal obtenemos :

$$T_{Na} = \frac{12 \times 746}{(1 - 0.05) \cdot 175.39} = 125 \quad \text{Ut-m.}$$

$$T_{i} = \frac{14.5 \cdot S? \times 746}{(1 - 0.05) + 94.24} = 120 \quad \text{Ut-m.}$$

6.4.3 Corriente nominal.-

La impedancia equivalente total en condiciones nominales vista desde el estator es :

$$Z_{eq1} = \left(r_s + jX_s \right) + \sum_{m=1}^n \frac{1}{s} \left(\frac{r_m}{s} + jX_m \right)$$

Y para ambas velocidades :

$$Z_{eq1A} = 0.121 + j0.89044 + \frac{1}{s} \left(0.65592 - j0.1633 \right) + \frac{1}{s} \left(1.7 + j30.9605 \right)$$

$$Z_{eq1} = 6.0486 / 65.02^\circ \text{ ji}$$

$$Z_{eq1} = 0.03025 + j0.24933 + \frac{1}{s} \left(0.01715 - j0.3412 \right) + \frac{1}{s} \left(0.1118 + j0.36017 \right)$$

$$Z_{eq1Y} = 2.3257 / 54.82^\circ \text{ JZ}$$

La corriente nominal de línea, según las ecuaciones :

$$I_A = \frac{220 \times \sqrt{3}}{6.0486} = 62,99 \text{ Amp}$$

$$I_Y = \frac{220 \sqrt{3}}{2.3287} = 54.54 \text{ Amp}$$

Y el factor de potencia :

$$\cos \Delta = \cos 65.02^\circ = 0.4223$$

$$\cos \phi_{1Y} = \cos 54.52^\circ = 0.5804$$

6.5 Comportamiento en el arranque.-

6.5*1 Corriente en el arranque.-

En el arranque $s = 1$ y la impedancia equivalente total en el momento del arranque vista desde el estator es :

$$Z_{a1} = (r_{a1} + 3X_{a1}) + j(\omega L_{a1} - 3V) + \dots$$

En las dos velocidades :

$$Z_{a1} = 0.121 + j0.89094 + \dots$$

$$Z_{a1} = 1.84233 / 72.10^\circ$$

$$Z_{p1} = 0.03025 + j0.24933 + \dots$$

$$Z_{a1} = 0.5997 / 73.68^\circ$$

Y de acuerdo a las conexiones, las corrientes de arranque de línea :

$$I_{ARR \Delta} = \frac{V \times 220}{1.84233} = 206.83 \text{ Amp.}$$

$$I_{ARR Y} = \frac{220}{0.5997} = 211.80 \text{ Amp.}$$

Que representan :

$$I_{a1} = 328.35 \times I_N$$

$$I_{OIS Y} = 388.33 \times W$$

El factor de potencia :

$$\cos \phi_{apjia} = \cos(2 \times 10) = 0.9397$$

$$\cos \phi_{ARR Y} = \cos(73.68) = 0.281$$

6.5.2 Torque en el arranque.-

Reemplazamos valores en la relación siguiente :

$$T_{ARR} = \frac{m_4}{s_s} \frac{R_{th} + t_2}{R_{th} + V_2} \cdot \frac{I_2}{I_T}$$

$$T_{ARR} = \frac{309 \cdot 0.907}{75.39} \cdot \frac{0.5947}{((0.096617 + 0.5917)^2 + (0.77831 + 0.9605))}$$

$$T_{ARR} = 248.95 \text{ lit-ci.}$$

$$T_{ARR} = \frac{3 \times 116.998^2 \times 0.1728}{94.24 \cdot ((0.2658 + 0.1728)^2 + (0.22982 + 0.36017)^2)}$$

$$T_{ARR_{yy}} = 194.14 \text{ Nt-m}$$

Que representan :

$$T_{ARR_{\Delta}} = 199.16 \% \cdot \frac{T_{ARR}}{T_T} = \frac{248.95}{125} \times 100$$

$$T_{ARR_{yy}} = 161.75 \% \cdot \frac{T_{ARR_{yy}}}{T_{T_{yy}}} = \frac{194.14}{120} \times 100$$

6.6 Comportamiento en máximas condiciones.-

6.6.1 Torque electromagnético máximo.-

Reemplazando en la ecuación siguiente :

$$T_{max} = \frac{1}{2W_s} \frac{mE_{th}^2}{(R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2})^2}$$

$$T_{max_{\Delta}} = \frac{1 \times 3 \times 191.9072}{2 \times 75.39 \cdot ((0.096617 + 0.9517)^2 + (0.77831 + 0.9605)^2)}$$

$$T_{max_{yy}} = \frac{1 \times 3 \times 116.9982}{2 \times 94.24 \cdot ((0.02658 + 0.2658)^2 + (0.22982 + 0.36017)^2)}$$

$$T_{\max}^{\wedge} = 351.74 \text{ ITt-m.}$$

$$T_{\max}^{yy} = 353.02 \text{ ITt-m.}$$

Que representan :

$$T_{\max}^{\Delta} = 281.39 \text{ l} \cdot T^{\wedge} = M_{125} \times 100$$

$$T_{\max}^{yy} = 2^{\wedge} \cdot 18 \cdot \cdot \backslash w = \frac{353.02}{120} \times 100$$

El deslizamiento para el torque electromagnético máximo resulta de reemplazar valores en la siguiente ecuación :

$$s_{\max T} = \frac{r_2}{\sqrt{R_{th} + (x_{th} \cdot s)^2}}$$

$$s_{\max T}^{\wedge} = \frac{0.5947}{\sqrt{0.096172 + (0.77831 + 0.9605)^2}}$$

$$s_{\max T}^{yy} = \frac{0.1728}{\sqrt{0.026582 + (0.22982 + 0.36017)^2}}$$

$$s_{\max T}^{\Delta} = 34.14 \text{ l}$$

$$s_{\max T}^{yy} = 29.25 \%$$

6.6.2 potencia electromagnética máxima.-

Reemplazando los valores obtenidos en la relación siguiente se obtiene :

$$E_{ax} = \frac{m_{th}^2}{2} \left[H_{th} + r^2 + \sqrt{(E_{th} + r^2)^2 + (z_{th} + X)^2} \right]$$

$$E_{ax} \Delta = \frac{3 \times 191.907^2}{2} \left[0.09617 + 0.5947 + \sqrt{(0.09617 + 0.5947)^2 + (0.77831 + 0.9603)^2} \right]$$

$$P_{Eaxyy} = \frac{3 \times 116.998^2}{2} \left[0.02658 + 0.1728 + \sqrt{(0.02658 + 0.1728)^2 + (0.22982 + 0.36017)^2} \right]$$

$$E_{max} = 25.90 \text{ HF} = 21,563.0 \text{ W}$$

$$p_{maxyy} = 33.47 \text{ HP} = 24,974.56 \text{ W}$$

Que representa el :

$$P_{Eax A} = 240.83 \text{ PTT} \text{ N A''}$$

$$P_{maxyy} = 232.43 \text{ PPT} \text{ NYy}$$

El deslizamiento para la potencia electromagnética máxima resulta de reemplazar la ecuación :

$$S_{maxp} = \frac{r^2}{r^2 + \sqrt{(R_{th} + r^2)^2 + (X_{th} + X)^2}}$$

$$S_{maxP} = \frac{0.5947}{0.5947 + \sqrt{(0.09617 + 0.5947)^2 + (0.77831 + 0.9605)^2}}$$

$$S_{maxr^2yy} = \frac{0.1728}{0.1728 + \sqrt{(0.02658 + 0.1728)^2 + (0.2298240 + 0.36017)^2}}$$

$$S_{\text{maxPa}} = 24 - 12^{\wedge}$$

$$S_{\text{maxPyy}} = 21.72 \%$$

6*7 Cálculo de la eficiencia.- (7/)

Las pérdidas totales del cobre en el estator y rotor está expresada por :

$$W_{\text{Cu}} = 3(r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2)$$

Donde :

$$I_2 = \frac{M}{Z_2} I_1$$

$$I_{0A} = 13.97 = \frac{220 - (0.121 + j0.89094) 62.99A}{\cos(-7^{\circ} + i^{\circ} - 96^{\circ}5)}$$

$$I_{2yy} = 33.14 = \frac{220 / \sqrt{3} - (0.03025 + j0.24933) 54.95A}{\cos(2^{\circ} - 36017)}$$

Luego :

$$W_n = 3 (0.121^2 + 13.972^2 + 0.5947^2) = 828.28 \text{ W}$$

$$W_{\text{Uyy}} = 3 (54.542 \times 0.03025 + 33.142 \times 0.1728) = 839.28 \text{ W}$$

Las pérdidas totales serán:

$$W_{\text{tot}} = W_{\text{Cu}} + W_{\text{Fe}} + W_{\text{FV}} + W_{\text{ad}}$$

$$W_{\text{Xox}} = 828.28 + 770.02 + 129.385 + 89.52 = 1817.20 \text{ W}$$

$$W_{\text{tot yy}} = 839.28 + 659.64 + 180.83 + 89.52 = 1769.27 \text{ W}$$

Y la eficiencia del motor a plena carga es :

$$\eta = \frac{P}{P + W_{tot}}$$

Para las dos velocidades :

$$\eta_{(11)} = \frac{R_i}{3.12} \cdot 12 \cdot \frac{1}{100} = \frac{12 \cdot 746 \cdot 100}{12 \cdot 746 + 1517.20}$$

$$\eta_{(15)} = \frac{8s}{15} \cdot \frac{14 \cdot 3}{10} \cdot \frac{746 \cdot 100}{14.5 \cdot 746 + 1769.27}$$

y :

$$(\eta_{(11)} \cos \theta)_{\Delta} = 0.83125 \times 0.4223 = 0.3510.$$

$$(\eta_{(15)} \cos \theta)_{\gamma} = 0.8594 \times 0.5804 = 0.4987.$$

Si comparamos con los valores asumidos de la página 98 :

$$(r_i \cos \theta)_{\Delta} = 0.7636 = 0.83 \times 0.8$$

$$(r_i \cos \theta)_{\gamma} = 0.664 = 0.84 \times 0.79$$

Se ve que se sacrifica el $\cos \theta$ en ambas velocidades en un 38 % para 10 polos y en un 21 % en la de 8 polos.

6.8 Influencia de las armónicas superiores en el momento del arranque.-

Las armónicas superiores originan en los arrollamientos de las tres fases del estator, ampere-vueltas que producen campos giratorios con un número de polos iguales al número de orden (r) de las respectivas armónicas, multiplicado por el número de polos p de la onda fundamental, o sea rp.

Estos campos no se aprecian durante el funcionamiento normal de terminando únicamente pérdidas adicionales, pero en cambio, si perturban visiblemente la puesta en marcha de los motores cuando el inducido rebasa sucesivamente el número de revoluciones del referido campo.

En el presente trabajo, no entran en consideración las armónicas pares ni las de tercer orden, deberán analizarse entonces el resto de las armónicas impares, teniendo en cuenta que la 7^a, 13^a, 19^a etc. giran en igual sentido que la onda fundamental, mientras que la 5^a, 11^a, 17^a etc., giran en sentido contrario.

En el momento del arranque las curvas presentan depresiones producidas esencialmente por los campos de las armónicas superiores, que giran en el mismo sentido que el de la fundamental, teniendo escasa influencia las que giran en el sentido opuesto.

Los torques creados por las armónicas superiores de f.m.m. se pueden calcular por la ecuación :

$$T = \frac{mE_{th}^2 \cdot \eta_m \cdot r_2}{S W_s \left(R_{th} + \frac{r_2}{s} \right)^2 + \left(X_{th} + X_2 \right)^2}$$

Sustituyendo en ella las magnitudes correspondientes a la armónica dada.

Pero lo que verdaderamente interesa es el valor de torque máximo de la armónica en referencia, que es el que producirá la mayor, depresión del torque en el momento del arranque debido a la onda fundamental. Esto sucede, cuando el inducido rebasa el número de revoluciones del referido campo.

La tensión inducida para la armónica r es :

$$E_r = \frac{1}{r} \frac{K_t f_r}{K_w} ; \quad E = \frac{A_r}{A} E$$

Y la velocidad angular :

$$\omega_r = \omega / r$$

Y reemplazando estas ecuaciones en la ecuación :

$$T_{max} = \frac{1}{4} \left[\frac{E_r}{V} + \sqrt{\left(\frac{E_r}{V}\right)^2 + 4} \right]^2$$

Y simplificando tenemos el siguiente resultado :

$$T_{max_r} = \left(\frac{A_r}{A}\right)^2 T_{max}$$

De acuerdo a los valores obtenidos en la tabla I (3.7) y el valor de torque máximo obtenido en la ecuación del torque electromagnético (6.6.2), obtenemos para las dos velocidades.

Para la conexión triángulo (A).

$$\omega = 7 \cdot 2\pi \cdot 50 = 351.74 \text{ rad/s} \quad \omega_r = 0.2075 \text{ rad/s}$$

$$\omega = 13 \cdot 2\pi \cdot 50 = 351.74 \text{ rad/s} \quad \omega_r = 0.5912 \text{ rad/s}$$

$$T_{max19} = 19 \left(\frac{15 \cdot 263}{100}\right)^2 \times 351.74 = 18.511 \text{ Nt-m.}$$

Para la conexión estrella paralelo (Yr)

$$T_{max7} = 7 \left(\frac{15 \cdot 263}{100}\right)^2 \times 351.74 = 0.0323 \text{ K m.}$$

$$T_{m*13} = 13 \left(\frac{18}{\sqrt{10} T_2} \right) 21 \cdot 353 \cdot 02 \cdot 0 \cdot 0153 \text{ Nt-m.}$$
$$T_{inaz19} = 19 \left(\frac{0.98}{\sqrt{10} T_1} \right) 21 \cdot 253 \cdot 02 - 0.6454 \text{ Ht-n.}$$

Estos valores encontrados no influyen mayormente en el del torque en el arranque producido por la onda fundamental. Esto hace, que el torque mínimo no llega en ningún caso a ser menor que el torque nominal

A P E N D I C E A. 1

A.1 Consideraciones de diseño.-

Antes de iniciar el diseño de una máquina, se debe conocer su utilización, es decir, las condiciones de trabajo a que va a estar sometida. Esto nos lleva a dar ciertas especificaciones especiales que recomiendan las normas.

El motor en mención, tendrá las características del tipo 3, según la terminología establecida por la NEMA.

Estos tipos de motores que se conocen como de torque de arranque normal y baja corriente de arranque, tienen el par de arranque entre el 200 % del par a plena carga en motores pequeños y el 110% en los motores grandes; y la corriente de arranque entre los 400 y 600 % de la corriente nominal. Por lo tanto, podrán emplearse en arranque directo a plena tensión.

El deslizamiento y el rendimiento a plena carga son buenos, y al conseguir una reducción de la corriente de arranque, baja un poco el factor de potencia y apreciablemente el par máximo, consiguiéndose apenas superar el 200 % del de plena carga.

Este tipo es el más común en el campo de potencias comprendidas entre 7.5 y 200 HP, empleándose principalmente en aplicaciones a velocidad constante sin grandes exigencias en el arranque, tales como : ventiladores, bombas y máquinas herramientas. Particularmente, la conexión a potencia constante que rinde aproximadamente a baja velocidad dos veces el par de alta velocidad, se emplea,

para impulsar máquinas herramientas.

31 motor a diseñarse deberá operar a 220 voltios, 60 Hz, con velocidades síncronas de 900 y 720 RPK, que según las especificaciones de las normas NEMA., el motor de 24 HP, deberá cumplir con las siguientes características :

1. El deslizamiento nominal para motores con un número de polos menores a diez, no deberá ser mayor al 5 %
2. la corriente de arranque a 220 voltios y 60 Hz., no deberá, sobrepasar los 365 Amp.
3. El torque de arranque a tensión y frecuencia nominal deberá ser por lo menos del 150 % del torque nominal.
4. El torque máximo no deberá ser menor del 150 % del torque nominal. El torque mínimo no deberá ser menor al 70 % del torque a rotor bloqueado, y en ningún caso, menor al torque nominal.

En nuestro diseño introduciremos dos condiciones mas que nos asegure que para las dos velocidades, el motor deberá entregarnos una potencia determinada en su eje :

5. La potencia mínima nominal admisible al 5 % del deslizamiento, será por lo menos de 1.1. HP.
6. La máxima potencia no será menor al 160 % de la potencia nominal.

El torque y potencia máxima nos proporcionará el grado de sobrecarga que podrá soportar el motor, para servicio limitado durante, 15 a 20 minutos.

El aislamiento en las ranuras será de clase E que según normas C.E.I. soportan una temperatura máxima de trabajo de 115°C sobre una temperatura ambiente de 40°C y una altura hasta 1000 m.s.n.m.

EL motor tendrá una carcasa cerrada con enfriamiento mediante ventilador que irá colocado sobre la extremidad del eje opuesto al acoplamiento y protegido con una tapa.

El motor podrá trabajar con un 9% de la tensión nominal sin llegar a un calentamiento excesivo en los arrollamientos, se considerará una fluctuación posible del $\pm 10\%$ de la tensión nominal y una desviación en la frecuencia del $\pm 5\%$.

Las dimensiones de carcasa se ajustarán a las normas ITE7TEC - 370*003» y la protección a los mismos, ITI1TT3C 370.005.

Los materiales a usarse en el diseño serán los siguientes :

- Conductores de cobre E5DEC0 de doble esmalte que pertenecen a la clase E y que se utilizan en motores con una tensión de trabajo hasta 500 voltios.
- Para el aislamiento en las ranuras y entre bobinas se emplearán láminas de MYLAP FILM PCLIE3TSR de 0.5 mm., que pertenecen a la clase P que según las normas C.S.I. puede soportar una elevación de temperatura de 140°C sobre la del ambiente de $d0^{\circ}\text{C}$.
- Para el núcleo utilizaremos acero eléctrico no orientado rolado en frío del tipo HILITE CORE grade H23 en láminas de 0.5 mm de espesor, con un peso específico estimado de 7.75 gx/cm^3 . Estas láminas proporcionan un factor de afileamiento de 0.98 según sus fabricantes.

Según sus características dadas anteriormente, el motor tendrá, las siguientes especificaciones previas :

	Conex. A (10 polos)	Conex. (8 polos)
PN	24 HP	24 EP.
T N	125 Nt-m	120 I7t - m.

E_N	= 5 $\hat{\Delta}$	= 5 I°
IARH	$\wedge \bullet 3654.$	$\wedge 365$ A.
tarr	≥ 187.5 ITt-m	$\wedge 180$ ITt-m
tyjjl	≥ 250 lit -m	≥ 240 ITt-m
P_{MAX}	$\wedge 19.2$ HP	$\wedge 23.0$ HF
w_s	= 75*39 rad/seg.	= 94*24 rad/seg

A.2 Características del motor de inducción.-

Potencia de salida	24 EP.
Tensión entre líneas	220 Voltios.
Frecuencia nominal	60 c/s
Velocidad síncrona	72 C , 900 RPK.
Húmero de polos	10 , 8 polos.
Conexión entre fases	A , Y Y
Factor de devanado	0.761144 , 0,818562
húmero de ranuras en el estator	36
Húmero de fases	3
Húmero de capas del Devanado Estatórico	•2

Además tendrá las siguientes características iniciales, que después deberán rectificarse :

Factor de potencia por rendimiento	:	0.7636 , 0.664
Dens. media máxima en el entrehierro	:	0.7 Fb / m ²
Dens. máxima en el diente	:	1.7 Fb / m ²
Dens. de corriente máxima en el cond.	:	5.3 Amp / mn ²

2.1 Diseño del estator :

2.1.1 Diámetro y longitud.-

Las dimensiones del estator se calculan teniendo en cuenta la carga lineal específica del estator (ac[^]) dado en Amper-conductores / cm., y la densidad media máxima en el entrehierro admisible (@ne¿g) úadm en Fb/m² .

Los Amper - conductores van a influir en el tipo de ventilación de la máquina y en la reactancia de dispersión permisible.

Para obtener características de operación razonablemente buenas, las densidades deben ser moderadas. La densidad en el diente del estator es directamente proporcional a la del entreCie -

ro. Grandes densidades en el diente, producen altas pérdidas , en el núcleo y aumenta la corriente magnetizante, disminuyendo, el factor de potencia. La densidad influye también por tanto, en el rendimiento.

La densidad media máxima en el entrehierro se puede considerar entre valores de 1.6 y 1.7 Tlb/m².

La carga lineal específica en el sistema I-IPS está representada por :

$$L^{\circ}g \left(\frac{ac_1}{D} \right) = b_1 + m_1 \text{Log} \left(\frac{100}{p} \right) \quad (1)$$

Donde :

D = Diámetro del entrehierro en metros.

ac = Carga lineal específica en Amp-Cond/m.

P = número de polos.

h[^] , m[^] = Constantes que dependen del número de polos.

La inducción máxima media en el entrehierro está expresada por:

$$\text{Log} (3m_{medg} \times 1000^{\circ}) = b_2 + m_2 \text{Log} \frac{100}{p} \quad (2)$$

Donde :

B_{medg} = Inducción media máxima en el entrehierro en Wh/m²

b₂ , m[^] = Constantes que dependen del número de polos.

La potencia que absorbe el motor está expresada por la siguiente relación :

$$\text{Log } P_a = \text{Log } ac_1 + \text{Log } B_{medg} + \text{Log} \left(\pi^2 f^{\wedge} \text{ng} \right) + \text{Log } D^2 L \quad (3)$$

Donde :

P_a = Potencia aparente que absorbe el motor en VA

f_f = Factor de forma de la onda de flujo

K_w = Factor de devanado,

n_s = Velocidad síncrona del rotor en rpm.

L = Longitud activa del paquete de chapas en metros.

Según Kuhlmann, el factor L/f , deberá encontrarse entre 0.6 y

2.0

Gomo :

$$\text{Paso Polar} = \frac{T}{\frac{P}{2} - 1}$$

Se deduce que :

$$K_{1m} = 1/d = (0.18849 > 0.62831)$$

$$K_{LD} = L/D = (0.23561, 0.78539)$$

Luego de algunos tanteos se escoge :

$$K_{LD} = L/D = 0.6 \quad (4)$$

Entonces :

$$(L/T) d = 1.90985$$

$$(i/T)^{-1} = 1.52788$$

Las constantes b_1, m_1, b_2, m_2 están dadas en la tabla

Polos	2	4	6 8 6 micis.
*1	1.45048731	1.91615299	2.04902699
m1	0.61624095	0.39957894	0.54103692
*2	3.67460775	3.74667049	3.7732799
m2	0.07958579	0.05192219	0.05488329

Tabla R°

Reemplazando (1), (2), (4) en (3) se obtiene;

$$\text{Log } P \& = (2 + b_1) + (m_1 + m_2) \text{Log}(i^{\frac{100P}{\zeta}}) + (b_2 - 4) + \text{Log}(ffK_w n_s) + \text{Log}K_{LD} + \text{Log}DJ$$

(5)

$$\text{Para } p = 10 \quad p_a = \sqrt[7.36]{x \cdot 746} = 23446.83 \text{ Va.}$$

$$\text{Para } p = 8 \quad p_a = \sqrt[0.664]{24 \cdot 746} = 26963.85 \text{ Va.}$$

Como la ecuación (5) está en función de la variable D, entonces un mayor valor de P_{SI} , exige un aumento de la variable D. Esto determina que reemplacemos p_a de la ecuación (5) con el valor de 4 - polos.

$$\text{Log } P_a = \text{Log } 26963.85 = 4.43078.$$

Como el flujo en el entrehierro es aproximadamente senoidal, el factor de forma será igual a 1.11. Reemplazando valores en (5)

$$\begin{aligned} 4.4307 &= (2 + 2.04902699) + (0.54103692 + 0.65488329) \text{Log} \frac{100 \text{ ft T}}{g} \\ &+ (3.7732799 - 4) + \text{Log} (TIC \times 1.11 \times 0.818562 \times 15) + \\ &3 \log D + \text{Log } 0.6 \\ - 2.24595 &= 3.5959 \log D \end{aligned}$$

$$D = 0.237 \text{ mt.}$$

$$l) = 23.7 \text{ cm.}$$

Como se utiliza una carcasa NV 200 L8, se escoge $L = 30.5 \text{ cm}$
 $D_{ex} = 31.8 \text{ cm.}$

Según la relación :

$$j = 0.6, \quad L = 14.24 \text{ cm.}$$

Redondeando al tercer decimal :

$$D = 0.237 \text{ nt.}$$

$$L = 0.1424 \text{ nt.} = 30.5 \text{ cm (tamaño 200 L)}$$

2.1.2 Número de conductores.-

$$I_t = 35.523 \text{ A}$$

La sección transversal del conductor está dada por :

$$A_c = \frac{I_b}{J} \quad (11)$$

Donde J es la densidad de corriente en Amp/mm^2 .

Las pérdidas en el cobre en cualquier devanado varían directamente con J^2 . La elevación de temperatura depende de las pérdidas, para un tipo dado de construcción.

La densidad de corriente en el estator deberá escogerse de tal modo que pueda lograrse una eficiencia satisfactoria, sin elevación excesiva de temperatura. Kuhlmann recomienda que las densidades entre 3.1 y $5.3 \text{ Amp} / \text{mm}^2$ serán generalmente satisfactorias, el menor valor se usa para máquinas de baja velocidad, y el mayor para grandes capacidades y alta velocidad.

Se toma: $J = 4.0 \text{ Amp}/\text{mm}^2$, y la sección del conductor sería :

$$A_c = \frac{35.523}{4.0} = 8.88 \text{ mm}^2$$

El rango del conductor a usarse es entre el N° 14 y W° 18 AWG - para la mejor facilidad del devanado.

Se utilizarán 11 conductores en paralelo del N°18 AWG; se emplearán conductores IND3C0 de doble esmalte que tienen las siguientes características :

Sección del conductor	0.8232 mm^2
Diámetro del conductor desnudo	$d = 1.024 \text{ mm}$.
Diámetro del conductor aislado	$d' = 1.062$
Ohmios por Km. a 20°C	$r = 20.95 / \text{Km}$.

Luego el área de los 11 conductores en paralelo será :

$$A_c = 11 \times 0.8232 = 9.055 \text{ mm}^2.$$

El voltaje eficaz inducido por fase en el devanado estático ,
está representada por la siguiente fórmula :

$$E = V_{ns} K_v \cdot W \cdot 1 \text{ DL} \quad (6)$$

Donde : N = número de conductores en serie y por fase.

E ya tiene en cuenta la caída de tensión en la reactan-
cia de dispersión del estator, que es aproximadamente -
el 5 % de la tensión en bornes.

Despejando en (6), el número de conductores en serie y por fase
sería s

$$N = \frac{E}{f_f \cdot H_w \cdot B_{medg} \cdot \pi \cdot D \cdot L} \quad (7)$$

La densidad media máxima en el entrehierro se puede considerar va-
lores entre 0.6 y 0.7 wb/ m².

Desarrollando para ambas velocidades, tomando :

$$B_{medg} = 0,7 \text{ wb/m}^2, \text{ obtenemos :}$$

$$N_d = \frac{0.93 \times 220}{1.11 \times 12 \times 0.761144 \times 0.70 \times \pi \times 0.237 \times 0.305}$$

$$N'_d = 129.68 \text{ conduc. en serie y por fase,}$$

$$N_{YY} = \frac{0.95 \times 220 \sqrt{fT}}{1.11 \times 15 \times 0.416562 \times 0.70 \times \pi \times 0.237 \times 0.305}$$

$$N_{YY} = 55 \cdot 69 \text{ conduct. en serie y por fase.}$$

El número de conductores por ranura :

$$N_{rd} = \frac{122^{68} \times 3}{6} = 10.806 \text{ cond/ran.}$$

$$N_{ryy} = \frac{55 \cdot 69 \times 2 \times 3}{3} = 220 \text{ cond/ran.}$$

Adoptamos : $N_r = 12 \text{ cond/ran.}$

Teóricamente, el valor N_r tiene que ser entero y par, ya que el devanado es de dos capas.

Recalculando los conductores en serie por fase :

$$N_d = 12 \times 36/3 = 144 \text{ cond. en serie/ fase.}$$

$$N_{yy} = 12 \times 36/6 = 72 \text{ cond. en serie / fase.}$$

Recalculando la densidad en el entrehierro :

$$B_{medgA} = \frac{129.68 \times 0.7}{144} = 0.63030 \text{ wb/m}^2$$

$$B_{medgYY} = \frac{59.69 \times 0.7}{72} = 0.5414 \text{ wb/m}^2$$

Y la relación entre ambas densidades :

$$\frac{B_{medgYY}}{B_{medgA}} = 0.85895. \quad \blacksquare$$

2.1.3 Ancho del diente .-

para un flujo total dado, las dimensiones de las ranuras determinar. la densidad en los dientes. Para altas densidades en los dientes, las pérdidas de las mismas serán altas.

El valor máximo de la densidad en el diente del estator para la sección mínima es :

$$B_{maxd} = \frac{\pi \cdot B_{medg} \cdot \pi}{2 \cdot d_s \cdot s_1 \cdot K_o} \quad (8)$$

Donde $s \cdot d_s$ es el ancho mínimo del diente

s_1 es el número de ranuras en el estator

K_o es el factor de laminación

Despejando obtenemos :

$$d_s = \frac{\pi \cdot B_{medg} \cdot \pi \cdot D}{2 \cdot B_{maxd} \cdot s_1 \cdot K_o} \quad (9)$$

Si hacemos que $B_{\max d} = 1,7 \text{ wb/m}^2$, el ancho del diente para ambas velocidades será :

$$d_{sd} = \frac{\sqrt{IT}^2}{2} \frac{0.6303 \times 0.237}{1.7 \times 36 \times 0.95} = 0.012676 \text{ mt.}$$

$$d_{syy} = \frac{\sqrt{IT}^2}{2} \frac{0.5414 \times 0.237}{1.7 \times 36 \times 0.95} = 0.01089 \text{ mt.}$$

Adoptamos :

$$d_g = 1.3 \text{ cm.}$$

Los dientes serán de caras paralelas.

Recalculando la densidad máxima en el diente ;

$$B_{\max dd} = \frac{1.261 \times 1.7}{1.3} = 1.649 \text{ wb/m}^2$$

$$B_{\max dyy} = \frac{1.089 \times 1.7}{1.3} = 1.4240 \text{ wb/m}^2$$

2.1,4 Sección del conductor.- La corriente de línea está representada por la siguiente fórmula :

$$I_{1d} = \frac{J \text{ HP} \times 746}{\sqrt{3} \eta \cos \phi V_1} \quad (10)$$

Donde V_1 es la tensión en los bornes.

$$I_{1d} = \frac{24 \times 746}{\sqrt{3} \times 220 \times 0.664} = 61.53 \text{ A.}$$

$$I_{1yy} = \frac{24 \times 746}{\sqrt{3} \times 220 \times 0.664} = 70.75 \text{ A.}$$

Y las corrientes por bobina y por fase serán :

$$X_{bd} = I_{1d} / \sqrt{3} = 61.53 / \sqrt{3} = 35.52 \text{ Amp.}$$

$$I_{Byy} = I_{1yy} / 2 = 70.75 / 2 = 35.37 \text{ Amp.}$$

Para el dimensionamiento de la sección del conductor se escoge:

Y recalculando la densidad, de corriente para anibas velocidades:

$$j_d = \frac{35.52}{9.055} = j.02 \text{ A/mm}^2$$

$$j_{yy} = \frac{35.37}{9.055} = 3.90 \text{ A/mm}^2$$

2.1.5 Dimensiones de la ranura :

Para encontrar el área que deben ocupar las ranuras, se toma en cuenta, como si cada conductor fuera un cuadrado, con cada lado igual a d^* , siendo d_1 el diámetro del conductor aislado.

Para tener en cuenta los aislamientos y la facilidad necesaria, de manipulación, se considera un factor de espacio ó factor de relleno (K^{\wedge}) que varía entre 0.6 y 0.75*

Si asumimos $K_{11} = 0.64$

Según lo anterior, el área de la ranura será :

$$A_{\text{ran}} = \frac{11 \times Nr \times d'^2}{K_{11}}$$

$$A_{\text{ran}} = \frac{11 \times 12 \times 1.0622}{0.64} = 232.61 \text{ mm}^2$$

La forma de la ranura será trapezoidal y de fondo circular, según muestra la fig. 1.

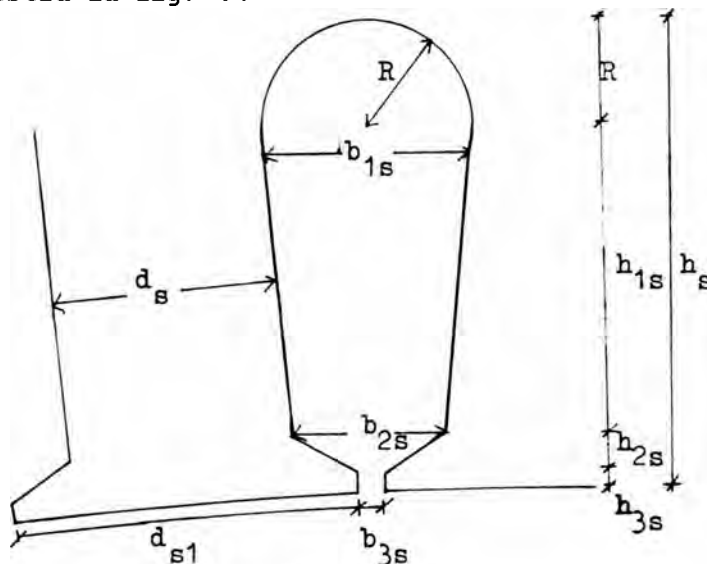


Fig.1.

Como ya se ha indicado en 2.1.3, los dientes del estator serán, de lados paralelos.

las dimensiones de la ranura se encuentran a continuación s

$$\hat{u}_{is} = \frac{1T(D+2.(h_{2s} + h_{3s}))}{S_1} - d_s \quad (12)$$

Euhlmann recomienda que la abertura de la ranura b_{2s} sea 0.25cm para diámetros de 20 cm. y menos. Elegimos $b_{2s} = 0.25 \text{ cm}^*$

Las dimensiones h^{\wedge} y h_{3s} son generalmente de 0.76 mm. para diámetros pequeños y hasta de 1.5 mm. para los diámetros mayores del entrehierro. En nuestro caso, el valor h_{3s} debe escogerse de tal foima que las reactancias de dispersión del estator para ambas velocidades sea tal que se encuentren los valores de ractancia y resistencia rotórica dentro de las regiones de diseño y que físicamente sea factible.

Según lo anterior adoptamos :

$$h^{\wedge} = 0.1 \text{ cm.}$$

$$h_{3s} = 0.2 \text{ cm.}$$

Reemplazando valores en la ecuación (12) obtenemos :

$$b_{2s} = 0.9 \text{ cm.}$$

El área de la ranura (A_{ran}) según la fig. 1 es :

$$A_{\text{ran}} = e \cdot b_1 \cdot \left(\frac{h^{\wedge}}{4} + \frac{h_{3s}}{4} + \frac{b_{2s}}{8} \right) \quad (13)$$

Además :

$$b_{1s} = \frac{2h_{1s}T}{S_1} + b_{2s} \quad (K)$$

For tanteos obtenemos :

$$h_{1s} = 0.7 \text{ cm.}$$

$$b_{1s} = 1.2 \text{ cm.}$$

Y obtenemos :

$$A_{\text{ran}} = 241.04 \text{ mm}^2$$

En resumen, las dimensiones de la ranura son :

$$\begin{aligned} b_{1s} &= 1.2 \text{ cm.} & h_{1s} &= 1.7 \text{ cm.} \\ b_{2s} &= 0.9 \text{ cm.} & h_{2s} &= 0.1 \text{ cm.} \\ b_{3s} &= 0.3 \text{ cm.} & h_{3s} &= 0.1 \text{ cm.} \\ R &= 0.6 \text{ cm.} & d_s &= 1.3 \text{ cm.} \\ & & b_s &= 2.5 \text{ cm.} \end{aligned}$$

2.1.6 Corona del estator y Diámetro Exterior.-

Las líneas de flujo al ingresar al yugo del estator se dividen en dos, por lo que, la densidad máxima en la corona será :

$$B_{\text{max c}} = \frac{1}{2} \frac{B_{\text{medg}}}{\pi D L K_o} \quad (15)$$

Despejando h_c :

$$h_{cl} = \frac{\pi D B_{\text{medg}}}{2p B_{\text{maxc}} K_o} \quad (16)$$

La densidad de flujo en la corona no deberá exceder de 1.7 Wb/m^2 .

Haciendo $B_{\text{maxc}} = 1.7 \text{ Wb/m}^2$ y reemplazando datos, obtenemos para ambas velocidades ;

$$\begin{aligned} h_{cl} &= \frac{\pi \times 23.7 \times 0.6303}{2 \times 1.7 \times 0.95 \times 1.445} = 1.5599 \text{ cm.} \\ h_{cl} &= \frac{\pi \times 3.7 \times 0.5414}{2 \times 1.7 \times 0.95} = 1.5599 \text{ cm.} \end{aligned}$$

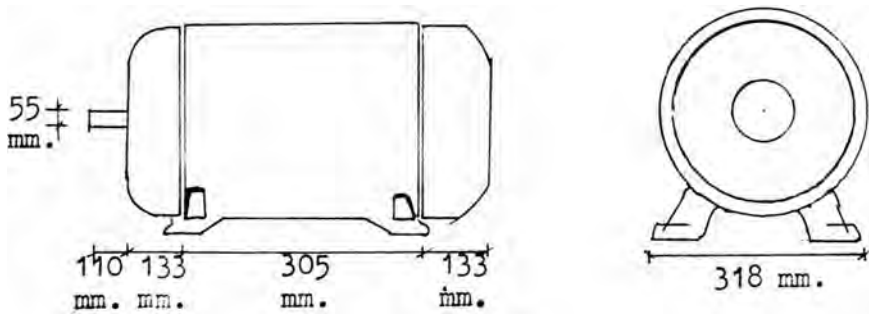
Con las dimensiones de la ranura y la corona se puede encontrar el diámetro exterior ;

$$\begin{aligned} D_{\text{ex}} &= D + 2(h_s + b_{cl}) = 23.7 + 2(2.5 + 1.5599) \\ D_{\text{exd}} &= 31.80 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Las normas ITHTT3C 370*003 normalizan las dimensiones de la car

CcIScl »

Para nuestro caso, utilizaremos el tamaño 200 L con la forma - de protección P34, cuyas dimensiones de carcasa se muestran en la, Fig. 2.



Se puede observar que el diámetro exterior del estator normalizados es de 318 mm y longitud de 305 mm. Con el diámetro exterior, calculado de 31.8 cm. y longitud de 305 cm., podemos utilizar - esta carcasa.

Hacemos :

$$D_{ex} = 31.80 \text{ cm.}$$

La nueva longitud de la corona será :

$$h_{cl} = T + D_{ex} - D - 2 \cdot V$$

$$h_d = r + 31.8 - 23.7 - 2 \cdot (2.5)$$

$$k_{cl} = 1.55 \text{ cm.}$$

Cuando se tiene ranuras de fondo circular, la longitud efectiva de la corona aumenta y es igual a la profundidad radial del yugo - bajo las ranuras, mas 1/3 del radio del fondo de la ranura por lo que :

$$h_{def} = 1 \cdot 55 + \frac{1}{y} (0.6) = 1.75 \text{ cm.}$$

Recalculando la densidad de flujo en el yugo :

$$B_{n,axcd} = \frac{.4}{1.7} \cdot 1'4038 \text{ wb/m}^2$$

$$B_{mazcyy} = \frac{1.5599}{1.75} \times 1.7 = 1.5153 \text{ wb/m}^2$$

2.1.7 Longitud media del conductor.-

Seguiremos el método de J.H. Kuhlmann.

El autor recomienda que la separación de las bobinas en los cabezales (s), así como la parte que sale de la armadura (b), para motores de 0 - 300 V, deberán ser : $s = 0.204 \text{ cm.}$, y $2b = 2.54 \text{ cm.}$

El ancho de la bobina (b_{sm}) se toma como el ancho medio de la ranura. La fig. 3 representa una vista del bobinado.

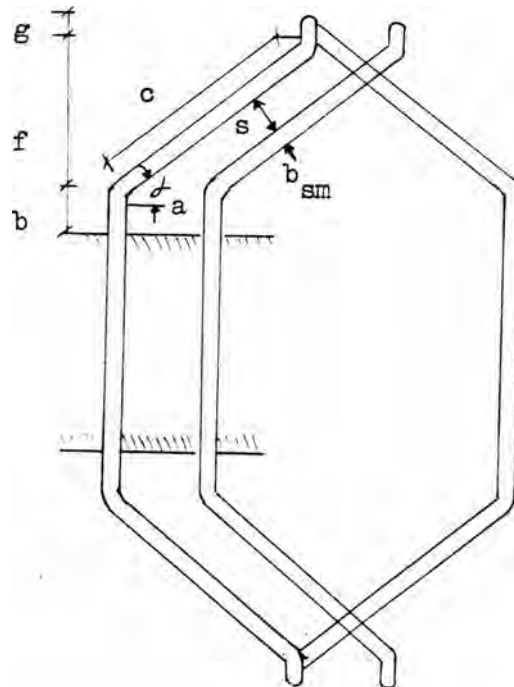


Fig. 3.

La longitud media de un conductor se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula :

$$L_{me} = \frac{\pi D (0.7 + K)}{P \cos \phi} K + 2b + h_s + L_s \text{ , cm.} \quad (17)$$

Donde !

$$\text{Sen } \phi = \frac{s + b}{s}$$

$$t = \text{Paso del diente} = \frac{\pi D}{S1} = \frac{\pi \times 2.5}{1} = 2.0682 \text{ cm.} \quad (18)$$

$$b_{sm} = \frac{b1s + b2s}{2} = \frac{1.2 + 0.9}{2} = 1.05$$

$$\text{Sen } \phi = 0.7952 \quad \phi = 51.3^\circ$$

$$\phi = 37.32^\circ$$

$$\text{Coseno } \phi = 0.7952 \quad \text{Tan } \phi = 0.7623.$$

K = Paso relativo de bobina.

$$K = \frac{5}{2} \text{ para conexión d.}$$

$$K = \frac{2}{3} \text{ para conexión YY.}$$

Reemplazando valores en la fórmula de L_{mc} , obtenemos :

$$L_{me} = \frac{1 \pi (23.7 + 2.5)}{10 \times 0.7952} \times \frac{5}{6} + 2.54 + 2.5 + 30.5$$

$$L_{me} = 44.12 \text{ cm.} = 0.4412 \text{ mt.}$$

2.1.8 Resistencia por fase.-

Según catálogo IIDDCO, para el conductor N° 18 AWG, la resistencia por Km. a 20°C es :

$$r = 20.95 \text{ Ohm / Km.}$$

La resistencia en continua a 20°C está expresado por :

$$r = \frac{L_{mc} \cdot R \cdot r \text{ (Ohm/Km)}}{a \times 1000} \quad (19)$$

Donde a representa el número de vías en paralelo

$$r = \frac{0.4412 \times 144 \times 20.95}{11 \times 1000}$$

Bn regimen nominal (75°C)

$$r_{1d} = 0.12100 \text{ Ohm.}$$

Para la conexión y la resistencia por fase será igual a la cuarta del de la conexión en d. Entonces :

$$r_{1yy} = \frac{r_{1d}}{4} = 0.03025. \text{ Si}$$

Y en el momento del arranque (25°C)

$$r_{1d} = 0.1233 \text{ } \Omega$$

$$r_{1yy} = \frac{r_{1d}}{4} = 0.0308 \text{ } \Omega$$

2.1.9 Peso de la corona y dientes del estator. -

El peso de la corona está dado por :

$$G_c = \frac{\pi}{4} \cdot D_L \cdot (B_e I - 2ic_1) \cdot 2 \cdot l \cdot K_0 \cdot g^{\wedge} \quad (19)$$

Donde g^{\wedge} es la densidad del material e igual a 7.75 gr/cm³, reemplazando valores :

$$G_c = 33.07 \text{ Kg.} = 33,077 \text{ gr.}$$

El peso de los dientes (G_d) está expresado por :

$$G_d = \frac{\pi}{4} \cdot W_{ex} \cdot (D_{ex} - 2h_{c1} \cdot 2 \cdot u_2) \cdot S_1 \cdot A_{ran} \cdot l \cdot K_0 \cdot g^{\wedge} \quad (20)$$

Reemplazando valores :

$$G_d = 30.903 \text{ Kg.} = 30,903 \text{ gr.}$$

Peso total del fierro del estator !

$$G_s = G_c + G_d = 3^\circ * 9^\circ + 33 - 07$$

$$G_s = 63.98 \text{ Kg.}$$

2.1.10 Cálculo del entrehierro.-

Las normas DIN establecen que para motores entre 22 Kw y 40 Kw.

y $p = 2$ polos, $g = 0.8 \text{ mm.}$ y 1.25 mm reforzado.

Elegimos : $g = 0.8 \text{ mm.}$

2.1.11 Diámetro del rotor.-

Obtenida ya la longitud del entrehierro, el diámetro del rotor queda determinado por :

$$D_r = D - 2g = 23,7 - 2 (0.8) = 23.4 \text{ mm.}$$

2.1.12 Elección del número de ranuras del rotor.-

Para la elección del número de ranuras del rotor, se seguirán los criterios que recomienda Corrales Martín, a saber :

a) En ningún caso los números de ranuras del estator y del rotor han de ser iguales o múltiplos entre sí.

$$S_2 \neq 36$$

b) Las ranuras de uno de estos dos órganos, las del rotor generalmente, conviene disponerlas con una inclinación tangencial igual al paso de ranura opuesta.

c) El devanado de doble capa de paso acortado es siempre favorable.

d) Se recomienda que el número de ranuras del rotor S_2 sea par.

e) Al mismo tiempo S_2 debe ser lo mas bajo posible.

f) También es recomendable

$$S_2^{1.25} S_1^{1.25} \times 36 = 45$$

g) La diferencia de S_1 y S_2 será al menos de un 10 %.

h) Se tomará siempre :

$$s_2 = 51 \dot{i} t p$$

$$s_2 = s_1 \dot{i} \dot{i} 2p$$

•Donde p es el número de polos

Luego, $s_{2d} \dot{i} 16, 26, 46, 56.$

$$s_{2yy} \dot{i} 20, 28, 42, 44-$$

i) El número de ranuras s_2 no ha de ser múltiplo de $(7 \gg 13 \gg 19) \times p$, de lo contrario ,aparecerán en el arranque manifestaciones de marcha monofásica a ciertas velocidades reducidas.

j) En general conviene que s_1 , y s_2 no sean divisibles por $7j$ $13, 19$, es decir del orden de los armónicos de sentido giratorio directo.

k) Interesa a ser posible, que el número de ranuras del rotor - sea múltiplo del de pares de polos.

El entrehierro amplio y las ranuras muy cerradas contribuyen siempre a mejorar las condiciones de la máquina :

Elegimos entonces :

$$s_2 = 30$$

2.1.13 Factor de Cáster.-

El factor de Cáster aumenta la longitud del entrehierro considerando las aberturas de las ranuras. Usamos la fórmula de T.C. - Boillie, que son aproximaciones empíricas a la de Cáster, mas rigurosas.

Para el estator s

$$K_{c1} = \frac{t_{s1} (5g + b_{3s})}{1, <5g - V - 123s} \quad (21)$$

$$t_{si} = \frac{\pi D}{36} = \frac{23.7\pi}{36} = 2.0682 \text{ cm.}$$

$$Y_{ci} = \frac{1.0662}{2.0682} \cdot \frac{2.0682}{(5 \times 0.08 + 0.3)} = 0.3 \text{ f}$$

Para el rotor :

$$K_{c2} = \frac{s_2 (5g + b_3r)}{t_{s2} (5g + 0.3r - r^2)}$$

$$t_{s2} = \frac{D_r}{30} = \frac{23.4}{30} = 0.78 \text{ cm.}$$

$$K_{c2} = \frac{1.0662}{2.4651} \cdot \frac{2.4651}{(5 \times 0.8 + 0.12)} = 0.12$$

Y el factor de Cáster total será :

$$K_o = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1 \cdot 0.12 = 0.12$$

2.1.14 Cálculo del circuito magnético.-

La fuerza magnetomotriz a lo largo de un circuito magnético, aplicando la ley de Ampere, es :

$$f.m.m. = \oint H \cdot dX \quad (22)$$

Las partes que comprende el circuito magnético son : el entrehierro, dientes del rotor y estator, corona del estator y yugo del rotor.

2.1.14.1 Ampere - vueltas en el entrehierro.-

Los ampere-vueltas por polo que requiere el estator para enviar el flujo hacia el entrehierro, está definida por :

$$AY_g = H_g \cdot g \cdot K_c = \frac{B}{\mu_0} \cdot g \cdot X \quad (23)$$

Reemplazando valores en ambas velocidades :

$$AY_g = 0.6303 \times 0.0008 \times 1.07839 = 432.71 \text{ av.}$$

$$AV = \frac{0.0008 \times 1.07839}{4 \times 10^{-4}} = 371.68 \text{ av.}$$

2.1.14.2 Ampere-vueltas en los dientes del estator.-

Los lados de los dientes son paralelos, por lo tanto, la densidad de flujo será constante a través de todo el diente.

Para ranuras de fondo circular, la longitud del diente se considera igual a :

$$l_{ds} = \sqrt{h1s^2 + h2s^2 + h3s^2 + f^2} \quad B \quad (24)$$

Entonces :

$$l_{ds} = \sqrt{1.7^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.6^2} = 2.1 \text{ cm.}$$

Pe la curva de magnetización, para un núcleo compuesto por láminas de acero no orientado H 23 y para :

$$B_{max} = 1.649 \text{ wb/m}^2$$

$$I_{max} = 1.424 \text{ wb/m}^2$$

Se obtiene :

$$H_{ds} = 30.00 \text{ av.}$$

$$I_{ds} = 7.0 \text{ av.}$$

Pe donde : $AV_{ds} = H_{ds} \times l_{ds}$

Y para ambas velocidades :

$$AV_{ds} = 6.3 \text{ av.}$$

$$AV_{ds} = 14.7 \text{ av}$$

2.1.14.3 Ampere-vueltas en la corona del estator.-

La longitud de la trayectoria del flujo deberá tañarse como el de la mitad del paso polar en el diámetro de la corona.

$$i_{es} = \frac{f_{ex} - \phi_{clef}}{2p} \quad (25)$$

Según Corrales Martín, en el caso de rotores asincronos, teniendo en cuenta el rápido decrecimiento de la inducción a partir del máximo de la onda, se suele tomar :

$$i_{es} = \frac{\pi^* (f_{ex} - \phi_{clef})}{2p} \quad (26)$$

Para las dos velocidades : $K = 0.30$ g-ara 8 polos o más.

$$i_{csA} = \frac{\pi \cdot (31.8 - 1.75) \times 0.30}{2 \times 10} = 1,416 \text{ C}''$$

$$i_{csyy} = \frac{\pi \cdot (31.8 - 1.75) \cdot 0.30}{2 \times 0} = 1.77 \text{ CE.}$$

De la curva de magnetización y para las siguientes densidades en la corona :

$$B_{maxca} = 1.4038 \text{ wb/m}^2$$

$$B_{maxcyy} = 1.5153 \text{ wb/m}^2$$

Se obtiene :

$$H_{ca} = 70 \text{ av/cm.}$$

$$H_{cyy} = 15.5 \text{ av/cm.}$$

Y para ambas velocidades :

$$AV_{CA} = 1.416 \times 7 = 9.912 \text{ av.}$$

$$AV_{cyy} = 1.77 \times 15.5 = 27.435 \text{ av.}$$

2.1.14.4 Factor de saturación.-

Está representada por la siguiente ecuación :

$$F_s = \frac{AV_{\xi} + AV_{ds} + AV_{es} + AV_{dr} + AV_{yr}}{AV_g} \quad (27)$$

Si consideradlos muy pequeños a AV_{dr} y AV_{yr} como se verá mas adelante, no se comete mayor error si no los consideramos en la ecuación (27).

Luego :

$$F_s = 1.16E = \frac{432.71 + 63 + 9.92}{432.71}$$

$$r_{s, \dots} = 1.102 = \frac{371.68 + 14.71 + 27.43}{371.68}$$

Si queremos encontrar los Ampere - Vueltas totales, empleamos la siguiente fórmula :

$$AV_t = AV_g \times F_s \quad (28)$$

2.1.15 Cálculo de la reactancia de magnetización y de dispersión del estator.-

Para evitar diferencia de criterios en los cálculos de reactancias, se ha creído conveniente utilizar las recomendaciones de un solo autor (Kuhlmann).

2.1.15.1 Cálculo de la reactancia de magnetización.-

La corriente de magnetización eficaz está representada por s

$$i_n = \frac{P AV_t TT}{\sqrt{2} \cdot m \cdot \Gamma K_w} \quad (29)$$

Reemplazando valores :

$$I_m = \frac{34.4 \cdot 10 \times 432.71 \times 1.168}{\sqrt{2} \times 3 \times 144 \times 0.761144}$$

$$I_{m, \dots} = 41.169 ; = \frac{111.8 \times 371.68 \times 1.102}{1/T \times 3 \times 72 \times 0.818562}$$

Y la reactancia de magnetización es :

$$\omega L_m = \frac{E}{I_m} \quad (30)$$

Para ambas velocidades :

$$x_{m\Delta} = 6.121 \text{ Ohm} = \frac{0.95 \times 220}{34.144}$$

$$x_{myy} = 2.930 \text{ Ohm} = \frac{0.95 \times 220}{4.1169} \sqrt{J}$$

2.1.15.2 Reactancia de Dispersión de la ranura Estatórica.-

La reactancia de dispersión está representada por la siguiente fórmula :

$$x_{rans} = \frac{N^2 m f}{101} \times \frac{0.79 L K_s}{\sqrt{f_{ran}}} \quad (31)$$

Donde K_s es el factor de corrección para devanados cordales en el estator.

F_{ran} es el factor de ranura del estator.

$$F_{ran} = \frac{t_u}{b_{3s}} + \frac{2h_0}{b_{2s} + b_{3s}} \quad (32)$$

Donde, para :

$$\frac{h_{1s}}{b_{1s}} = \frac{1.7}{1.2} = 1.4166$$

$$\frac{2s}{b_{1s}} = \frac{0.9}{1.2} = 0.75$$

Entonces :

$$\sqrt{J} = 0.78$$

Luego :

$$F_{ran} = \frac{n}{0.78} + \frac{0.1}{0.3} \frac{4.2 \times 0.1}{0.9 + 0.3}$$

$$F_{ran} = 1.280.$$

Reemplazando valores en x_{rans} para las dos velocidades

$$X_{ransz} = \frac{144^2 \times 3 \times 6.0 \times 0.79 \times 30.5 \times 0.875 \times 1.28}{101 \times 36}$$

$$X_{rans} = 0.2797 \text{ Ohm.}$$

$$X_{ransyy} = \frac{72^2 \times 3 \times 6.0 \times 0.79 \times 30.6 \times 0.79 \times 1.28}{10^7 \times 36}$$

$$X_{ransyy} = 0.0599 \text{ Ohm.}$$

2.1.15.3 Reactancia de dispersión en Zig Zag del estator.-

Está representado por :

$$X_{zzs} = 4 X_m \left(\frac{P}{S_1} \right)^2 \quad (33)$$

Reemplazando valores para ambas velocidades :

$$X_{zzs} = -f (6.121) (-4)^2 = 0.3935 \text{ Ohm.}$$

$$W = f (2) (j)^2 = 0.1205 \text{ C.}$$

2.1.15.4 Reactancia de Dispersión de los Cabezales de 3/bina del

Estator.- Se podrá calcular según el método sugerido por

L.A. Kilgore.

$$X_{cabs} = \frac{(m_w)^2 m f}{10^7 P} < b + 0.5 (fs + 2^*) \quad (34)$$

De acuerdo a las recomendaciones de Rubíman :

$$b = 1.27 \text{ cm.}$$

Además :

$$f_s = \frac{(3 + h_s)}{2P} \tan \alpha \quad (35)$$

Según el acápite 2.1.7

$$b = 1.27 \text{ cm.}$$

$$t_{an} \alpha = 0.7623.$$

Entonces :

$$f_{s \Delta} = 3.1372 = \frac{(23.7 + 2.5) 0.7623}{2 \times 10}$$

$$f_{syy} = 3.9215 = \frac{(23.7 + 2.5) 0.7623}{2 \times 8}$$

Reemplazando valores :

$$x_{cabs \Delta} = \frac{(144 \times 0.761144)^2 \times 3 \times 60 \times 0.315 (1.27 + 0.5(3.1372 + 2.5/2))}{10^7 \times 10}$$

$$x_{cabs \Delta} = 0.02359 \text{ Ohm.}$$

$$x_{cabsyy} = \frac{(72 \times 0.818562)^2 \times 3 \times 60 \times 0.315 (1.27 + 0.5 \cdot (3.9205 + 2.5/2))}{10^7 \times 8}$$

$$x_{cabsyy} = 0.009489 \text{ Ohm.}$$

2.1.15.5 Reactancia dispersa por inclinación.-

La reactancia de dispersión por inclinación del estator es :

$$x_{sk} = x_m \left(\frac{\Theta_{sk}^2}{12} \right) \quad (36)$$

Donde Θ_{sk} es la inclinación expresada en radianes y es igual a π veces la relación de número de ranuras que abarca la inclinación, al número de ranuras por polo de la parte inclinada. La inclinación se realizará en el rotor y será igual al paso de la ranura estática.

$$\Theta_{sk \Delta} = \frac{10\pi}{36} = 0.8726.$$

$$\Theta_{skyy} = \frac{8\pi}{36} = 0.6980.$$

$$x_{sk\Delta} = 0.3883 \text{ Ohm} = 6.121 \times \left(\frac{0.8726}{12}\right)^2$$

$$x_{skyy} = 0.1189 \text{ Ohm} = 2.930 \left(\frac{0.6980}{12}\right)^2$$

2.1.15.6 Reactancia de dispersión total en el estator.-

La reactancia de dispersión total será, según Kuhlmann

$$x_1 = x_{rans} + x_{zss} + 0.5 x_{sks} + x_{cabs}$$

Para ambas velocidades :

$$x_{1\Delta} = 0.2797 + 0.3935 + 0.5 \times 0.3883 + 0.02359$$

$$x_{1yy} = 0.059 + 0.1205 + 0.5 \times 0.1189 + 0.009489$$

$$x_{1\Delta} = 0.89094 \text{ Ohm.}$$

$$x_{1yy} = 0.24933 \text{ Ohm.}$$

2.2 Cálculo del circuito equivalente simplificado por el teorema - de Thevenin.- Resumiendo los valores estadísticos encontrados :

Resistencia en el arranque (25°)

$$r_{1\Delta} = 0.1233 \text{ Ohm.}$$

$$r_{1yy} = 0.0308 \text{ Ohm.}$$

Resistencia en condiciones nominales (75°)

$$r_{1\Delta} = 0.121 \text{ Ohm.}$$

$$r_{1yy} = 0.03025 \text{ Ohm.}$$

La reactancia de dispersión :

$$x_{1\Delta} = 0.89094 \text{ Ohm.}$$

$$x_{1yy} = 0.24933 \text{ Ohm.}$$

Como se verá en el acápite (6.3), la suceptancia y la conductancia tienen los siguientes valores :

$$b_{mY} = 6.5592 \times 10^{-3} \text{ Khos.}$$

$$b_{niyy} = 17.1507 \times 10^{-3} \text{ Mhos.}$$

$$b_{mA} = 0.1633 \text{ liaos,}$$

$$b_{niyy} = 0.3412 \text{ Khos.}$$

2.2,1 En conexión triángulo.-

a.- En el arranque.- Impedancia equivalente , también puede escribirse :

$$R_{th} + jx_{th} = \frac{1}{r_1 + jx_1 + \frac{1}{\frac{r_m}{s} - jx_m}} \quad (3!?)$$

Reemplazando valores :

$$R_{th} + jx_{th} = 0.9780 + j 0.77830$$

Tensión equivalente Thevenin, también puede escribirse :

$$E_{th} = \frac{V}{r_1 + jx_1 + \frac{1}{\frac{r_m}{s} - jx_m}} \times \frac{1}{\frac{r_m}{s} - jx_m} \quad (38)$$

Reemplazando valores s

$$E_{th} = 191.910 \text{ V.}$$

b.- En condiciones nominales.- Reemplazando los valores a 75°0 , en las ecuaciones (36) y (37) obtenemos :

$$R_{th} + jx_{th} = 0.96170 + j 0.77831$$

$$E_{th} = 191.907 \text{ V.}$$

2.2.2 En conexión estrella paralelo :

Calculando en forma similar al de la conexión triángulo, obtene -

mos :

a. - En el arranque :

$$R_{th} + \hat{t}h = \hat{^{\circ}}*02625 + 3 0.2300) \text{ Ohm.}$$

$$E_{th} = 117.044 \text{ V.}$$

b. - En condiciones nominales :

$$R_{th} + \acute{a}xth = (\acute{^{\circ}}*02658 + 3 0.22982) \text{ Ohm.}$$

$$E_{th'} = 116.998 \text{ V.}$$

2.3 Diseño del rotor.-

La densidad de corriente nominal en la jaula debe ser pequeña , para conseguir un aumento de temperatura moderada en el arranque. Puesto que las resistencias rotóricas a elegir de acuerdo al gráfico tienden a aumentar excesivamente la temperatura, podemos contrarestar esto, utilizando en la jaula, material de alta capacidad de absorción del calor.

Según lo anterior, utilizaremos el latón cuya resistividad aproximada es 4 veces mayor que la del cobre, y por lo tanto, de doble diámetro.

La resistividad del latón a 75°C es de 0.0744 Ohm-mm² /m.

2.3.1 Area de las barras y anillos.-

Teniendo en cuenta que los valores de impedancia rotórica para las dos velocidades deben caer dentro de sus regiones de diseño, y luego de ciertos tanteos elegimos la forma de ranura similar al del estator, y con el mismo procedimiento logramos obtener :

$$b_{1r} = 0.305221255 \text{ cm.}$$

$$b_{2r} = 0.50 \text{ cm.}$$

(

$$\begin{aligned}
 b_{3r} &= 0.10 \text{ cm.} \\
 R_r &= 0.15261063 \text{ cm.} \\
 h_{1r} &= 0.93 \text{ cm.} \\
 h_{2r} &= 0.10 \text{ cm.} \\
 h_{3r} &= 0.13 \text{ cm.} \\
 d_r &= 3.54 \text{ cm.} \\
 h_r &= 1.31261063 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

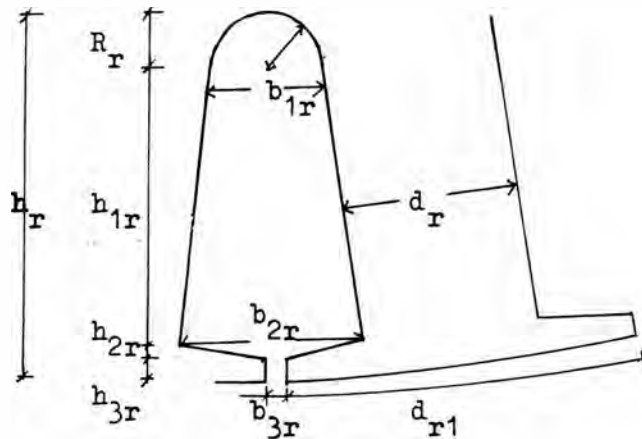


Fig. 4.

Con estas dimensiones, el área de cada barra es : $A_b = 47.76 \text{ mm}^2$ y escogiendo el anillo con las dimensiones de 1.8 x 3.6 cm., obtenemos una sección de de : $A_a = 648 \text{ mm}^2$

2.3.2 Resistencia rotórica.- La resistencia del rotor referida al estator está expresada por la siguiente fórmula :

$$r_2 = m (N K_w)^2 f \left(\frac{L_b}{S_2 A_b} + \frac{2 \times D_a}{p^2 A_a} \right) \quad (39)$$

Donde L_b es la longitud de la barra la que deberá sobresalir 5.0 mm. a cada lado del núcleo rotórico.

f es la resistividad del latón.

D_{el} es el diámetro medio del anillo.

La siguiente figura ilustra con mayores detalles :

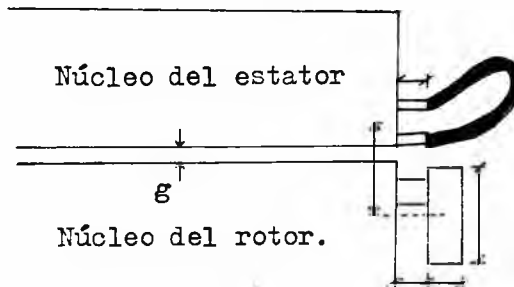


Fig. 5.

Donde :

$$L_b = 305 + 2(5) = 315 \text{ mm.}$$

$$D_a = D - 2g - d_{er} = 237 - 1.6 - 3.6 = 199.4 \text{ mm.}$$

Para ambas velocidades, la resistencia rotórica a 75°C :

$$r_{2\Delta 75^\circ C} = 3(144 \times 0.761144)^2 0.0000744 \left(\frac{315}{30 \times 47.76} + \frac{2(199.4)}{100 (648)} \right)$$

$$r_{2 75^\circ C} = 0.59947 \text{ Ohm.}$$

$$r_{2yy 75^\circ C} = 3(72 \times 0.818562)^2 0.0000744 \left(\frac{315}{30(47.76)} + \frac{2(199.4)}{64 (648)} \right)$$

$$r_{2yy 75^\circ C} = 0.1728 \text{ Ohm.}$$

Y a 25°C :

$$r_{2\Delta 25^\circ C} = 0.5947 \left(\frac{234.5 + 25}{234.5 + 75} \right) = 0.498625 \text{ Ohm.}$$

$$r_{2yy 25^\circ C} = 0.1728 \left(\frac{234.5 + 25}{234.5 + 75} \right) = 0.14488 \text{ Ohm.}$$

2.3.3 Reactancia de dispersión del rotor.-

2.3.3.1 Reactancia de dispersión de la ranura rotórica.- El valor de esta reactancia está representada por :

$$x_{\text{ranr}} = \frac{N^2 m_f K_w^2}{10^7} \left(0.79 \times \frac{L}{S_2} \right) F_{\text{ranr}} \quad (40)$$

Donde : F_{ranr} es el factor de ranura del rotor y se calcula como sigue :

$$F_{\text{ranr}} = \phi + \frac{h_{3r}}{b_{3r}} + \frac{2h_{2r}}{b_{2r} + b_{3r}} \quad (41)$$

Con las dimensiones de la ranura y según la curva de la fig.B.1.1 obtenemos :

$$\phi = 0.68$$

$$F_{\text{ranr}} = 2.3135.$$

Y la reactancia de dispersión de la ranura rotórica para ambas, velocidades es :

$$x_{\text{ranr}\Delta} = \frac{(144 \times 0.761144)^2}{10^7} (3)(60)(0.79)\left(\frac{30.5}{30}\right)(2.3135)$$

$$x_{\text{ranr}\Delta} = 0.17367 \text{ Ohm.}$$

$$x_{\text{ranr}\gamma} = \frac{(72 \times 0.818562)^2}{10^7} 3(60)(0.79)\left(\frac{30.5}{30}\right)(2.3135)$$

$$x_{\text{ranr}\gamma} = 0.1161 \text{ Ohm.}$$

2.3.3.2 Reactancia de dispersión en Zig - Zag del rotor.-

Esta reactancia está representada por :

$$x_{\text{zrz}} = \frac{5}{6} x_m \left(\frac{P}{S_2} \right)^2 \quad (42)$$

Y para ambas velocidades :

$$x_{z zr \Delta} = \frac{5}{6} \times 6.121 \left(\frac{10}{30} \right)^2$$

$$x_{z zr \Delta} = 0.5667 \text{ Ohms.}$$

$$x_{z z r y y} = \frac{5}{6} \times 2.930 \left(\frac{8}{30} \right)^2$$

$$x_{z z r y y} = 0.1736 \text{ Ohms.}$$

2.3.3.4 Reactancia de dispersión para las conexiones extremas del

rotor.- Está expresada por la siguiente fórmula :

$$x_{cer} = \frac{1.2 \text{ mf } C_r K_w^2}{10^7 p^2} \left(2pbr + \frac{\pi D d_c}{1.7w_{er} + 1.2d_{er} + 1.4d_c} \right) \quad (43)$$

Cuando las barras van más allá de núcleo del rotor

$$C_r = 0.4$$

La dimensión d_c es la distancia radial desde el centro del anillo extremo, al centro de la parte llena de la ranura del estator. Según esto obtenemos :

$$d_c = \frac{1}{2} (h_{1s} + R) + h_{2s} + g + (d_{er}) 0.5 \quad (44)$$

Reemplazando valores :

$$d_c = \frac{1}{2} (1.7 + 0.6) + 0.1 + 0.1 + 0.08 + 0.5 \times 3.6 = 3.23 \text{ cm.}$$

b_r es la distancia de la barra que va más allá del núcleo del rotor :

$$b_r = 0.5 \text{ cm.}$$

Reemplazando valores y para ambas velocidades :

$$x_{cer \Delta} = \frac{(144 \times 0.761144)^2 \times 3 \times 60 \times 0.4}{10^7 \times 10^2} (2 \times 10 \times 0.5 + \frac{3.14 \times 23.7 \times 3 \times 23}{(1.7)(1.18) + 1.2(3.6) + 1.4(3)(25)})$$

$$x_{cer \Delta} = 0.02612 \text{ Ohms.}$$

$$x_{\text{ceryy}} = \frac{(72 \times 0.818562)^2}{10^7 \cdot 64} \left(3(60)((2)(8)(0.5) + \frac{\pi \times 23.3 \times 3.23}{1.7(1.8) + 1.2(3.6) + 1.4(3.23)}) \right)$$

$$x_{\text{ceryy}} = 0.01102 \text{ Ohm.}$$

2.3.3.5 Reactancia de dispersión total del rotor.-

En forma similar que en el acápite 2.1.15.6, la reactancia de dispersión total del rotor está expresada por:

$$x_2 = x_{\text{ranr}} + x_{\text{cer}} + x_{\text{zzr}} + 0.5 x_{\text{sk}} \quad (45)$$

Reemplazando valores y efectuando para ambas velocidades, obtenemos :

$$x_{2\Delta} = 0.17367 + 0.02612 + 0.5667 + 0.5(0.3883)$$

$$x_{2\Delta} = 0.9605$$

$$x_{2yy} = 0.1161 + 0.01102 + 0.1736 + 0.5(0.1189)$$

$$x_{2yy} = 0.36017$$

2.3.4 Diámetro del eje.-

El diámetro del eje se puede calcular con la sgte. expresión :

$$D_{\text{eje}} = 3.2 \dots 3.5 \sqrt[4]{\frac{P}{\text{RPM}}} \text{ (cm) Si } \frac{P}{\text{RPM}} < 100 \quad (46)$$

$$D_{\text{eje}} = 2 \dots 2.3 \sqrt[4]{\frac{P}{\text{RPM}}} \text{ (cm) Si } \frac{P}{\text{RPM}} > 100 \quad (47)$$

Donde P es la potencia mecánica en vatios.

$$\text{Como } \frac{P}{\text{RPM}} = \frac{24 \times 746}{684} = 26.17 < 100$$

Obtenemos :

$$D_{\text{eje}} = 3.2 \sqrt[4]{26.17} = 7.23$$

Pero según normas debe tomarse :

$$D_{\text{eje}} = 5.5 \text{ cm.}$$

2.3.5 Densidad de flujo en el yugo y dientes del rotor.-

2.3.5.1 Densidad máxima en el diente del rotor.-

Está dada por la siguiente expresión :

$$B_{\max dr} = \frac{\pi^2 \cdot B_{medg}}{2 \cdot d_r \cdot S_2 \cdot K_o} \cdot D \quad (48)$$

Donde $d_r = 3.54$ cm.

Reemplazando valores en $B_{\max dr}$, obtenemos :

$$B_{\max dr \Delta} = \frac{\pi^2 \times 0.6303 \times 23.7}{2 \times 3.54 \times 30 \times 0.95}$$

$$B_{\max dr} = 0.73066 \text{ wb/m}^2$$

$$B_{\max dryy} = \frac{\pi^2 \times 0.5414 \times 23.7}{2(3.54) \cdot 30 \times 0.95} = 0.6276 \text{ wb/m}^2$$

2.3.5.2 Densidad del yugo del rotor.-

Al igual que en la corona del estator, las líneas de flujo se dividen en dos al ingresar al yugo del rotor, por lo que, la densidad máxima de flujo en el yugo será :

$$B_{\max yr} = \frac{1}{2} \times \frac{B_{medg} \cdot D}{p h_{yef2} \cdot K_o} \quad (49)$$

Donde, la altura de la corona es :

$$h_{y2} = \frac{D_r}{2} - h_r - \frac{D_{eje}}{2} \quad (50)$$

Reemplazando valores :

$$h_{y2} = \frac{235.4}{2} - 1.31261063 - \frac{5.5}{2} = 7.707 \text{ cm.}$$

Y el valor efectivo :

$$h_{yef2} = 7.707 + \frac{1}{3} (0.15261063) = 7.7578 \text{ cm.}$$

Y para ambas velocidades :

$$B_{\max y \Delta} = \frac{0.6303 \times 23.7}{2 \times 10 \times 7.7578 \times 0.95} = 0.1013 \text{ wb/m}^2$$

$$B_{\max yyy} = \frac{0.5414 \times 23.7}{(2)(8)(7.7578)(0.95)} = 0.1088 \text{ wb/m}^2$$

2.3.6 Cálculo de Ampere - Vueltas en el rotor.-

2.3.6.1 Ampere - vueltas en los dientes del rotor.-

En forma similar al estator :

$$l_{dr} = h_{1r} + h_{2r} + h_{3r} + \frac{2}{3} R_r \quad (51)$$

Luego :

$$l_{dr} = 0.93 + 0.1 + 0.13 + \frac{2}{3} \times 0.15261063$$

$$l_{dr} = 1.2617 \text{ cm}$$

De la curva de magnetización, para :

$$B_{\max dr \Delta} = 0.73066 \text{ wb/m}^2$$

$$B_{\max dryy} = 0.6276 \text{ wb/m}^2$$

Se obtiene :

$$H_{dr \Delta} = 1.2 \text{ av/cm}$$

$$H_{dryy} = 1.05 \text{ av/cm}$$

Y los ampere-vueltas para las dos velocidades :

$$AV_{dr \Delta} = 1.2 \times 1.26174 = 1.5140 \text{ av.}$$

$$AV_{dryy} = 1.05 \times 1.26174 \text{ av.}$$

2.3.6.2 Ampere-vueltas en el yugo del rotor.-

Similarmente como en el estator :

$$l_y = \frac{1}{2} \left(\frac{D_r - 2l_{dr} - h_{yef}}{2 \times p} \right) \pi \quad (52)$$

Donde h_{yef} = Altura eficaz del yugo del rotor.

$$h_{yef} = \frac{1}{2} (D_r - 2l_{dr} - D_{eje}) = \frac{1}{2} (23.54 - 2 \cdot 1.26174 - 5.5)$$

$$y \quad h_{yef} = 7.7582 \text{ cm.}$$

$$l_{y\Delta} = \frac{1}{4 \times 10} (23.54 - 2 \times 1.26174 - 7.7582) \pi$$

$$l_{y\Delta} = 1.0413 \text{ cm.}$$

$$l_{yyy} = \frac{1}{2 \times 2 \times 8} (23.54 - 2 \times 1.26174 - 7.7582) \pi$$

$$l_{yyy} = 1.3016 \text{ cm.}$$

De la curva de magnetización para :

$$B_{maxyr} = 0.1013 \text{ wb/m}^2$$

$$B_{maxyryy} = 0.1088 \text{ wb/m}^2$$

Se obtiene :

$$H_{yr\Delta} = 0.50 \text{ av/m}^2$$

$$H_{yryy} = 0.52 \text{ av/m}^2$$

Y los ampere-vueltas para las dos velocidades :

$$AV_{yr\Delta} = 0.6508 \text{ av.}$$

$$AV_{yryy} = 0.6768 \text{ av.}$$

Si reemplazamos en la ecuación (27) con todos los valores (incluyendo los de este acápite), obtendremos los siguientes factores de saturación :

$$F_{s\Delta} = 1.1735 = \frac{432.71 + 63 + 9.92 + 0.6508 + 1.5140}{432.71}$$

$$F_{syy} = 1.1760 = \frac{371.68 + 14.71 + 27 + 0.6768 + 1.3248}{371.68}$$

El error que se comete en los valores obtenidos en 2.1.14.4 no superan al 6.3 %

APENDICE C.

INDICE DE SIMBOLOS.

A_a	= Area de la barra.
A_b	= Area del anillo
A_c	= Sección transversal del conductor.
A_r	= Amplitud de la onda de f.m.m. de orden r.
A_{ran}	= Area de la ranura.
A_1	= Amplitud de onda de f.m.m. de la fundamental.
AV_c	= Ampere-vueltas en la corona del estator.
AV_{dr}	= " " en los dientes del rotor.
AV_{ds}	= " " en los dientes del estator.
AV_g	= " " en el entrehierro.
AV_t	= " " totales.
AV_y	= " " en el yugo del rotor.
a_{c1}	= Carga lineal específica del estator.
B_{maxc}	= Densidad máxima en la corona del estator.
B_{maxd}	= " en los dientes del rotor.
B_{maxy}	= " en el yugo del rotor.
B_{medg}	= " media en el entrehierro.
b	= Parte de la bobina que sale de la armadura.
b_m	= susceptancia de magnetización.
b_r	= Distancia de la barra que va más allá del núcleo del rotor.
b_{sm}	= Ancho de la bobina.

	=	constante que depende del número de polos.
b ₂	=	Dimensión de la ranura del rotor.
b _{1r}	=	Dimensión de la ranura del rotor.
b _{2r}	=	Dimensión de la ranura del rotor.
V	=	Tensión por fase inducida.
b _{is}	=	Dimensión de la ranura del estator.
b _{2s}	=	Dimensión de la ranura del estator.
b _{3s}	=	Dimensión de la ranura del estator.
C _r	=	Constante cuando las barras van mas allá del rotor.
D	=	Diámetro del estator en el entrehierro.
D _a	=	Diámetro medio del anillo.
D _{eje}	=	Diámetro del eje.
D _{ex}	=	Diámetro del rotor en el entrehierro.
d	=	Diámetro del conductor desnudo.
d _{>}	=	Diámetro del conductor aislado.
d _r	=	Distancia radial desde el centro de la parte la ranura del estator.
	=	Ancho del diente del rotor.
	=	" del diente del estator.
E	=	Tensión por fase inducida.
E _{th}	=	" equivalente Thevenin del estator.
E _l	=	Fuerza contraelectromotriz inducida en el estator.
i _{2s} ²	=	Tensión inducida en el rotor reducida al estator y a frecuencia de deslizamiento.
P _{rans}	=	Factor de ranura del estator.
ranr	=	" " " " rotor.
	=	" " saturación.

- f = Frecuencia en Hz.
- f_p = Factor de forma de la onda.
- G_c = Peso de la corona del estator.
- G_d = " de los dientes del estator.
- G_s = " total del fierro del estator.
- g = Ancho del entrehierro.
- g_c = Conductancia de pérdidas en el núcleo.
- H_c = Intensidad magnética en la corona del estator
- H_{ir} = " en dientes del rotor.
- H_{ds} = " magnética en el diente del estator
- H_g = " " en el entrehierro.
- H_y = " " en el yugo del rotor.
- h_{c1} = Altura de la corona.
- h_{c1ef} = " efectiva de la corona del estator.
- h_{yef2} = " " del yugo del rotor.
- h_r = Dimensión de la ranura del rotor
- h_s = II II II ti " estator.
- h_{1r} = ti II II ii " rotor.
- h_r = II II II ii II II .
- h_{3r} = II II II ii II II .
- h_{1s} = Dimensiones de la ranura del estator.
- h_s = II ti ti ii ii ii .
- h_{3s} = II it ii ii n ii .
- I = Corriente útil por conductor.
- I_{ARR} = " de arranque.
- *b = " por bobina y por fase.
- I_c = " de pérdidas en el núcleo.
- I_m = " de magnetización.

- I_o = Corriente en el estator en vacío.
- I_w = " activa en vacío.
- I_ϕ = " de excitación.
- I_1 = " por fase en el estator.
- I_{1a} = " máxima admisible en el arranque.
- I_2 = " en el rotor reducida al estator.
- I_{2s} = " " " " " " " y a frecuencia de deslizamiento.
- J = Densidad de corriente.
- K = Paso relativo de bobina.
- K_c = Factor de Cárter.
- K_{c1} = " " capa para la onda fundamental.
- K_{or} = Factor de capa para el orden r.
- K_d = Factor de distribución.
- K_{dr} = " para la armónica de orden r.
- K_f = " de paso.
- K_{pr} = " para la armónica de orden j).
- K_s = " de corrección para devanados cordales.
- K_w = " de devanado.
- K_{wr} = " de devanado de la armónica r.
- K_{w1} = " de devanado de la fundamental.
- K_o = " de laminación.
- K_{ll} = " de espacio.
- L = Longitud del entrehierro (log. activo).
- h = " de las barras.
- L_{me} = " media de un conductor.
- l_{es} = " de la trayectoria de flujo en la corona del estator

r_{eq1}	= Resistencia equivalente en condiciones nominales vista desde el estator.
r_1	= Resistencia equivalente en el estator.
r_2	= " " " " rotor reducida al estator.
S	= ^ección del conductor.
S_{maxP}	= Deslizamiento con potencia máxima,
S_{maxT}	= " " par máximo.
s_1	= número de ranuras en el estator.
s_2	= n ti ti ii ii rotor.
s	= deslizamiento.
s	= Separación en los cabezales de las bobinas.
S_N	= " " condiciones nominales.
T_{be}	= Peso de la bobina completa.
T	= Par desarrollado en el eje.
T_{ARE}	= " " en el arranque.
T_a	= " " mínimo admisible durante el arranque.
T_{em}	= " " electromagnético interno.
t	= m.c.d. (pares de polos y número de ranuras estatóricas)
T_{max}	= Par desarrollado máximo.
T_m	= " " mínimo máximo admisible.
T_{np}	= " " nominal.
t_s	= paso del diente.
t_{sl}	= " " " del rotor.
V	= Tensión entre líneas.
V_I	= " entre fases del estator.
v_1	= Velocidad tangencial en la superficie del eje.
w_{ad}	= Pérdidas adicionales.
w_{cu}	= " en el cobre.

- \mathbb{W} = Pérdidas del cobre del estator en vacío
- w_{fe} = t_i en el fierro.
- w_{fv} = t'' por fricción y ventilación.
- \mathbb{W}_s = velocidad angular síncrona.
- X_{th} = reactancia equivalente Thevenin del estator.
- X_{al} = t \parallel en el arranque vista desde el estator.
- X_{calis} = Reactancia equivalente de dispersión de los cabezales de bobina en el estator.
- X_{cer} = Reactancia de dispersión para las conexiones extremas del rotor.
- X_{eq1} = Reactancia equivalente en condiciones nominales vista desde el estator.
- X_m = Reactancia equivalente de magnetización.
- X_{rans} = " de dispersión de la ranura estatórica.
- X_{ranr} = " " " " " " rotórica.
- X_{sk} = " " " por inclinación.
- X_{zzr} = " " " en zig-zag del rotor.
- X_{zzs} = " " " " » " » estator.
- x_1 = " " " del estator.
- x_2 = " " " " rotor.
- Z_{eq1} = Impedancia equivalente en condiciones nominales vista desde el estator.
- = Angulo entre ranuras consecutivas.
- = Paso de ranuras en grados magnéticos.
- = Angulo entre ranuras adyacentes.
- = " " vectores adyacentes.
- = Eficiencia.

- θ_{sk} = Angulo de inclinación del rotor en grados magnéticos.
- f = Resistividad.
- η_m = Rendimiento mecánico.
- τ = Paso polar.
- r = " de 'bo'bina.
- Φ = Flujo magnético.
- k = Constante en el factor de ranura,
- $\cos \phi$ = f.d.p. = Factor de potencia de la máquina.
- μ_0 = " " " " en vacío.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se utilizó un núcleo de un motor normal de 8 polos, con este núcleo se obtiene 12HP en 8 polos y 14.5 HP en 10 polos utilizando un solo devanado PA¹¹, es decir que la pérdida de potencia nominal es en cada caso 50 % para 8 polos, 40 % en 10 polos.

Esto se debe a que el diseño de los parámetros del circuito equivalente, no es relativamente óptimo, pudiendo mejorar mediante reajustes o utilizando un rotor de ranura profundo o de doble jaula.

2. De acuerdo a lo visto en el acápite 3.5 > estrella de ranuras, el cambio polar produce la inversión del sentido de rotación, por tal motivo, si el motor ha de seguir girando en el sentido primitivo, deberán permutarse a la vez dos de los terminales de línea.
3. De acuerdo a la experiencia de otros diseños, a mayor velocidad en RPM, le corresponde mayor f.d.p. lo mismo sucede con la eficiencia. Para obtener mayor eficiencia se sacrifica el f.d.p.
4. El paso de bobina 1 - 4 se escogió eliminando la 5ta. y 7ma armónicas para 10 polos por ser las más perjudiciales y en 8 polos se elimina la 3ra armónica.
5. El torque de arranque alcanzado en 8 polos es 199.16 % del mientras que en 10 polos es 161.75 % del 'nyy'

El efecto de la armónica del 19 orden pura u] tonino m/tilmo mi la conexión d , en que manifiesta con mayui* iuihi timo ión '111◊ mi el yy.

6. Para el cálculo del factor de capa, en difícil olil.ciuur nnn íci* muía genérica que permita obtener ente cálculo do unto lu f.α, ya que intervienen muchas variables.
7. Teniendo un núcleo tal cano el NV 200 L cumplumentu derinido la relación de densidades do $B_{modg10} / B_{modg0} = 0,8185$, no su puede variar, por quo está definido por las carao Lorí11Lton.» - dol devanado premodulado, tipo de modulación impuesta, y por - la conexión adaptada para cada velocidad, a parto dol nivel - de flujo fijado para una de las velocidades. Una reducción en el nivel de flujo para lograr una corriento de vacío menor, tra ería consigo una variación sustantiva tal como, quo la co.rri.on te do vacío en una velocidad puedo ;suocobi' que noa igual o ma- yor que la corriente del motor» a una sola velocidad.
8. El factor de arrollamiento en 10 polos os U.'/óld y en i pelo» os 0,8185» estos valores nos dan una idea do quo en 8 polos - tiene mejor comportamiento.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Close - ratio phase - modulated change - pole machines with improver winding balance - Proc. IEE, Vol. 115-Nº 11, November, 1968.
- 2.- Technique de la commutation de poles pour les machines de grande puissance des centrales de pompage.
Rev. Brown - Boveri : 7 - 74.
- 3.- Polyphase symetrisation a new method for the design of electrical - machine windings. Proc. IEE - Vol. 115, Nº 8 August 1968.
- 4.- Ingeniería Eléctrica Experimental; Ingº Luis A. Salazar.
- 5.- Diseño de aparatos eléctricos : John Kuhlmann.
- 6.- Cuaderno de diseño de máquinas eléctricas II : Ingº Juan Nuñez Ch.
- 7.- Electrical machines, T. II : Kostenko.
- 8.- Cálculo industrial de máquinas eléctricas ; Tomos I y II : Juan Corrales Martines.
- 9.- Electrotecnia general y aplicada, T. II ; Mueller- Werr.
- 10.- CONIMERA IV .- Diseño de motores asíncronos de 2 ó más velocidades aplicando la teoría de modulación de amplitud de polos : Ingº Juan Nuñez e Ingº Manuel Regalado.

R E S U M E N.

Alguien con experiencia de diseño conoce que una cantidad considerable de cálculos es necesario para hacer un "buen diseño.

La máquina tiene estructura normal usada para motores de 24 HP

La optimización del modelo propuesto para una máquina PAU es el uso de un rotor de ranura profunda equivalente para ajustar la resistencia del rotor y la reactancia de dispersión para tener en cuenta el efecto Skin en las barras del rotor.

Hoy en día las máquinas modernas tienden a aumentar la relación potenciad-peso en contradicción con lo que antiguamente se hacía que era fijarse especialmente en el rendimiento. El ingeniero se encuentra ahora ante el problema de diseñar una máquina para uso particular, sabiendo que haga lo que haga las cualidades de dicha, máquina no serán excelentes, comparadas con las de tipo convencional.

La dificultad en el diseño de una máquina reside en el hecho de que se presentó mas variables ecuaciones, por lo cual para intentar resolver dicho problema es preciso imponer ciertos supuestos, basados fundamentalmente en el diseño de otras máquinas de estructura semejante. Por tal motivo para estas realizaciones el proyectista tiene que ser una combinación de artista y científico, ya que debe conocer toda la experiencia acumulada sobre el tema y al mismo tiempo desarrollar una labor creativa.