



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Departamento de Electroenergética

Trabajo de Diploma

Título: *“Efecto de los armónicos de tiempo de la fuente de alimentación sobre el comportamiento de los motores trifásicos de ranuras profundas y de doble jaula”*

Autor: Nolberto Gómez Palacio

Tutora: MsC. Lucy Rovira Carralero
MsC. Miriam Blázquez Casanova

Santa Clara

2006

“Año de la Revolución Energética en Cuba”

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas



Facultad de Ingeniería Eléctrica

Centro de Estudio de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: “Efecto de los armónicos de tiempo de la fuente de alimentación sobre el comportamiento de los motores trifásicos de ranuras profundas y de doble jaula”

Autor: Nolberto Gómez Palacio

E-mail: nolberto@uclv.edu.cu

Tutora: MsC. Ing. Lucy Rovira Carralero

E-mail: lucy@fie.uclv.edu.cu

MsC. Miriam Blázquez Casanova

E-mail: MiriamB@fie.uclv.edu.cu

Dpto. de Electroenergética

Facultad de Ingeniería Eléctrica. UCLV

Santa Clara

2006

“Año de la Revolución Energética en Cuba”



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de *Eléctrica* autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Dpto.

Donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de

Información Científico-Técnica

*Quiero que rechaces siempre lo fácil, lo cómodo;
todo lo que enaltece y honra; implica sacrificio.*

Ernesto Che Guevara.

Agradecimientos:

- *A mis padres por brindarme que nunca me fallaron.*
- *A mis tutores quien no escatimaron minutos para ofrecerme ayuda y comprensión.*
- *A mis amigos del grupo por su ayuda incondicional.*
- *A todos los que de una forma u otra han contribuido al éxito de este trabajo.*

TAREA TÉCNICA

1. Revisión bibliográfica relacionada con la incidencia de los armónicos de tiempo sobre la operación de los motores asincrónicos trifásicos.
2. Selección de un circuito equivalente para el análisis de los motores de rotores especiales
3. Establecer los parámetros y magnitudes que varían con los armónicos de tiempo en el circuito equivalente del motor de ranuras profundas y de doble jaula.
4. Tomando como referencia una señal sinusoidal poner a punto el programa para la determinación de las características de comportamiento de los motores asincrónicos trifásicos.
5. Utilizar otros tipos de señales para valorar el comportamiento del motor, entre estas una onda cuadrada asimétrica y una onda escalonada.
6. Comparar el efecto de los diferentes armónicos de tiempo sobre el comportamiento de los motores de ranuras profundas y de doble jaula.
7. Escribir el informe del trabajo de tesis con todos los requisitos que se exigen.

Firma del diplomante

Firma de los tutores

Resumen

El principal propósito de este trabajo es valorar el efecto causado por los armónicos superiores de tiempo en la alimentación de los motores asincrónicos trifásicos de ranuras profundas y en los de doble jaula. Para ello se desarrolló, a partir de los modelos matemáticos y circuitales correspondientes, un programa en Matlab capaz de graficar la influencia de los armónicos de tiempo mediante diversas características de comportamiento de estos motores.

El informe consta además de un análisis teórico inicial que se simplifica con el establecimiento de ciertas consideraciones y de una descripción del programa confeccionado, donde se muestran partes del algoritmo de programación implementado y las ventanas de diálogos para la confección de los distintos tipos de ondas no sinusoidales.

Se presentan un conjunto de gráficas y resultados tabulados que contribuyen a una mejor comprensión de la influencia de los armónicos superiores de tiempo en las características de operación de los motores de rotores especiales.

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo 1. Armónicos de tiempo y efecto pelicular en los motores de jaula profunda y doble jaula	3
1.1 Introducción.....	4
1.2 Principio de operación de los motores asincrónicos de doble jaula y jaula profunda.....	5
1.3 Armónicos de tiempo en señales eléctricas.....	8
1.3.1 Influencia de armónicos de tiempo en los motores de inducción.....	9
1.3.2 Características de los armónicos de tiempo de la fuerza magnetomotriz.....	10
1.3.3 Armónicos de tiempo de la corriente.....	12
1.4 Influencia de los armónicos de tiempo en el efecto pelicular.....	13
1.4.1 Adecuación del circuito equivalente.....	14
1.5 Pérdidas del motor alimentado con fuentes no sinusoidales.....	20
1.5.1 Pérdidas de cobre del estator.....	21
1.5.2 Pérdidas de cobre del rotor.....	21
1.5.3 Pérdidas de núcleo de los armónicos.....	22
1.5.4 Eficiencia del motor.....	23
1.6 Consideraciones finales del capítulo.....	24
Capítulo 2. Diseño e implementación de programa	25
2.1 Introducción.....	25
2.2 Consideraciones para el análisis de los motores.....	25
2.3 Concepción general del programa.....	26
2.4 Caracterización de la herramienta computacional.....	27
2.4.1 Entrada de datos.....	28

2.4.2 Formas de ondas de voltaje predeterminadas.....	30
2.4.2.1 Procedimiento para la descomposición de las señales.....	33
2.5 Procedimiento para obtener las características de comportamiento.....	38
2.6 Presentación de los resultados.....	44
2.7 Consideraciones finales del capítulo.....	47
Capítulo 3. Valoración de los armónicos de tiempo en la operación de los motores	
de doble jaula y de ranuras profundas.....	48
3.1 Introducción.....	48
3.2 Datos de los motores seleccionados.....	48
3.3 Características de comportamiento bajo una señal sinusoidal pura.....	51
3.4 Influencia de las componentes armónicas en el comportamiento de los motores de ranuras profundas y doble jaula.....	54
3.4.1 Incidencia del primer armónico sobre el comportamiento de los motores.....	55
3.4.2 Incidencia del quinto armónico sobre el comportamiento de los motores.....	59
3.4.3 Incidencia del séptimo armónico sobre el comportamiento de los motores.....	63
3.5 Resultados generales de los motores energizados con los diferentes tipos de ondas..	67
3.6 Consideraciones finales del capítulo.....	70
Conclusiones.....	71
Recomendaciones.....	73
Referencias Bibliográficas.....	74

Introducción

Los motores asincrónicos de jaulas especiales fueron construidos con el objetivo de mejorar el momento desarrollado, con una menor corriente, durante el proceso de arranque. Todo esto gracias al aprovechamiento del efecto pelicular que tiene lugar en los rotores de ranuras profundas y doble jaula. Sin embargo, cuando este tipo de motor es accionado mediante dispositivos electrónicos, cuyas formas de onda a la salida no son puramente sinusoidales y por tanto están provistas de armónicos de tiempo, puede verse afectado el comportamiento del mismo debido al incremento de este efecto en toda la zona de operación de la máquina. Trayendo consigo un aumento de las pérdidas y por tanto, una apreciable reducción de su eficiencia.

Anteriormente se han realizado estudios que abordan la problemática de los armónicos de tiempo en los motores asincrónicos trifásicos convencionales [1],[17]. Sin embargo, hasta el momento no se había analizado la incidencia de estos armónicos en los motores asincrónicos de rotores especiales, para los cuales se han propuesto diferentes variantes de circuitos equivalentes [22], [11], [19] que consideran el efecto pelicular en los parámetros del rotor desde el arranque hasta la operación nominal. Es por ello que surge la formulación del problema de investigación: ¿Cómo afectan los armónicos de tiempo al comportamiento de los motores asincrónicos trifásicos de jaula profunda y doble jaula?

La definición del problema de investigación condujo al establecimiento del objetivo general de este trabajo:

Desarrollar procedimientos correspondientes a motores de jaula profunda y doble jaula, tomando como punto de partida una aplicación desarrollada anteriormente, que permitan valorar la influencia de armónicos de tiempo sobre el comportamiento en estado estable de estos motores.

Para poder desarrollar el objetivo general se establecen los objetivos específicos siguientes:

1. Análisis y selección del circuito equivalente a utilizar para los diferentes tipos de motores.
2. Seleccionar la modelación matemática de los parámetros del circuito equivalente afectados por el efecto pelicular.
3. Establecer una estrategia para la determinación de las características de comportamiento de los motores asincrónicos trifásicos de rotores especiales.
4. Desarrollar procedimientos en MatLab que simulen el comportamiento de los motores asincrónico trifásico de doble jaula y ranura profunda bajo la acción de los armónicos de tiempo, compatibles con la aplicación existente.
5. Valorar los resultados que se obtienen mediante la aplicación.

La importancia de este trabajo consiste en la posibilidad de analizar los efectos provocados por los armónicos de tiempo en el comportamiento de los motores de construcción especial. Además, desde el punto de vista metodológico, permite apoyar los estudios de esta temática dando la posibilidad de observar las características de operación de estos motores afectados por los armónicos de tiempo.

El trabajo tiene aspectos novedosos en cuanto a: los procedimientos utilizados para considerar los armónicos de tiempo en la agudización del efecto pelicular, propio de estos motores.

El trabajo consta de tres capítulos que permiten dar respuestas a los objetivos específicos trazados. En el capítulo 1 se hace un análisis del principio de operación de los motores de jaula profunda y doble jaula. Además se aborda teóricamente el tema de los armónicos de tiempo presentes en señales eléctricas no sinusoidales y su influencia en los motores de inducción. Finalmente se realiza la adecuación del circuito

equivalente a utilizar para estos motores y las ecuaciones que determinan sus características de operación con la variación de los parámetros. Se incluye un análisis teórico en relación con los indicadores energéticos generales de los motores asíncronos trifásicos de rotores especiales.

En el segundo capítulo se establecen un conjunto de consideraciones en el modelo circuital de los motores de rotores especiales con el objetivo de simplificar la complejidad del análisis de estos fenómenos. Además se hace una descripción detallada de la herramienta computacional diseñada para la simulación de estos motores energizados con distintas fuentes de alimentación, se especifican las diferentes etapas utilizadas para el cálculo de las características de operación.

El capítulo 3 muestra los resultados obtenidos por el programa para las corridas realizadas a un motor de jaula profunda y a uno de doble jaula cuando son alimentados por una onda sinusoidal, una cuadrada asimétrica y una escalonada indistintamente. Puede apreciarse la incidencia de los armónicos primero, quinto y séptimo en las características de comportamiento de estos motores y establecerse una comparación entre las diferentes ondas de alimentación. Por último se hace una evaluación de la influencia global de los armónicos sobre indicadores generales del motor.

Fueron consultadas diferentes fuentes bibliográficas para el desarrollo de este trabajo lo que permitió una mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en estos motores. Las características constructivas y de operación fueron estudiadas principalmente del texto *Máquinas Eléctricas de M. Kostenko, L. Piotrovsky*, así como el procedimiento para analizar el efecto pelicular sobre los parámetros de estos motores. Para el cálculo de las características de operación se siguió la estrategia utilizada por el texto *An Introduction to Electrical Machines and Transformers de G. McPherson*. Por otra parte para el desarrollo de la aplicación se tomó como punto de partida la aplicación descrita en la tesis de maestría: *Aplicación computacional para el análisis de los armónicos de tiempo y el efecto pelicular en los motores asíncronos trifásicos* desarrollado por *I. Rovira Carralero*.

Capítulo 1. Armónicos de tiempo y efecto pelicular en los motores de jaula profunda y doble jaula

1.1 Introducción

Los motores asincrónicos trifásicos cuyos rotores son de doble jaula o poseen ranuras profundas fueron creados con el objetivo de lograr un mayor momento en el arranque con menores valores de corriente. Este significativo descubrimiento apoya su basamento en el efecto pelicular o distribución no uniforme de la corriente por los conductores del rotor durante el proceso de arranque de estos motores. Una vez terminado el arranque, el comportamiento de ellos es similar a los de jaula convencional, obteniéndose excelentes características de operación en toda la zona de trabajo.

Sin embargo, si estos motores son alimentados desde fuentes de alimentación cuyas ondas de voltaje no son puramente sinusoidales, este fenómeno se verá exacerbado y extendido hasta los conductores del estator en toda la zona de trabajo de los mismos. Esto se debe al gran contenido de armónicos de tiempo, presentes en estas ondas, cuyas frecuencias son elevadas y su efecto repercute directamente en los parámetros de estos motores así como en sus características de comportamiento [20].

En este capítulo se aborda la problemática de los armónicos de tiempo y el efecto pelicular provocado por estos en el comportamiento de los motores asincrónicos

trifásicos de jaula profunda y doble jaula alimentados desde fuentes de voltaje no sinusoidales.

1.2 Principio de operación de los motores asincrónicos de doble jaula y jaula profunda

Para asociar el fenómeno del efecto pelicular y el de los armónicos de tiempo en esta clase de motores es necesario tener en cuenta sus características constructivas y principio de operación.

Motor doble jaula: En el año 1893 M.O.Dolivo-Drovolsky propuso una nueva variante de rotor para el motor de inducción, compuesta de dos jaulas (véase figura 1.1). La jaula superior, colocada cerca del entrehierro debía ser de un material de alta resistividad eléctrica como latón, aluminio o bronce, mientras que la jaula inferior sería construida generalmente de cobre por su bajo valor de resistividad. Con este modelo de motor se logra utilizar el efecto superficial o pelicular de la corriente en el devanado del rotor para mejorar las propiedades del mismo durante el arranque.

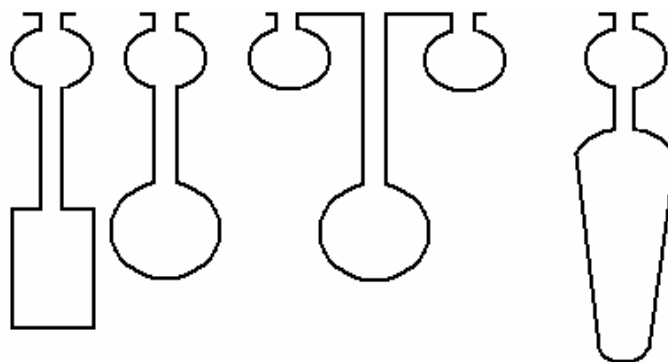


Fig. 1.1 Ranuras de rotores de doble jaula más utilizadas

En el arranque la frecuencia de la fem inducida en los conductores del rotor es alta e igual a la frecuencia del circuito de potencia. Como estos conductores están cortocircuitados por ellos circula una corriente que se distribuye entre los devanados superior e inferior de modo inversamente proporcional a sus impedancias. Puesto que el devanado inferior tiene una reactancia muy alta, su impedancia es varias veces mayor que la de la jaula superior, cuya reactancia es prácticamente nula. Siendo la corriente de la jaula inferior mucho menor que la de la jaula superior. Por otra parte, debido a la alta reactancia de dispersión de la jaula inferior, la corriente en esta jaula está retardada

respecto a la f.e.m inducida por el flujo de inducción mutuo un ángulo grande y, por consiguiente, este devanado produce un pequeño momento de arranque. Por el contrario, en el arranque la corriente de la jaula superior es no sólo de magnitud considerable, sino también de fase aproximadamente igual a la de la f.e.m de inducción mutua, debido a la reactancia despreciable y a la gran resistencia activa de la jaula, por lo cual este devanado produce un momento muy grande.

Durante el arranque, el momento lo produce principalmente la jaula superior, llamada muchas veces: jaula de arranque. Cuando aumenta la velocidad del motor, la frecuencia de la fem inducida en el devanado del rotor comienza a disminuir ya que es directamente proporcional al deslizamiento del motor. Esto da lugar a la reducción de la reactancia de la jaula inferior con el subsiguiente aumento de la corriente por ella, acompañado de una disminución del ángulo de fase entre la corriente y la tensión. Por consiguiente, esta jaula comienza a desarrollar un momento electromagnético cada vez mayor. Cuando el motor desarrolla su plena velocidad tiene un deslizamiento muy pequeño, y la reactancia de la jaula inferior se hace despreciable en comparación con su resistencia activa. En este caso la corriente total de trabajo del secundario del motor se distribuirá entre los devanados de modo inversamente proporcional a sus resistencias activas, y como la del devanado superior es de 5 a 6 veces mayor que la del inferior, la corriente en la jaula superior es considerablemente menor que la corriente en la jaula inferior. Debido a esto el momento desarrollado en este caso está dado principalmente por la jaula inferior, por lo que se denomina jaula de trabajo o de funcionamiento [14].

Un motor de dos jaulas se puede construir para diferentes valores de momento de arranque dentro del margen limitado por el nominal a plena velocidad y valores dobles del momento nominal, y en el caso de requisitos especiales, incluso tres veces el valor nominal. Sin embargo la corriente de arranque varía dentro de un margen más amplio. El cambio del momento de arranque se obtiene mediante la correspondiente elección de las resistencias activas y de la reactancia de operación [9]. Por lo general en los motores de doble jaula se cumple que:

$$K_a = \frac{M_{arr}}{M_{nom}} \approx 1.2 \div 2$$

$$K_{ai} = \frac{I_{arr}}{I_{nom}} \approx 4 \div 6$$

Motor de jaula profunda: Este tipo de motor, análogo al de dos jaulas, tiene mejores características de arranque que los motores de jaula convencional. Existen varias formas y métodos de conexión de las barras que se utilizan para los anillos terminales de cortocircuito, pero en la discusión que sigue sólo se considerarán barras de sección transversal por ser la forma fundamental y la más sencilla (véase figura 1.2). En estos motores se hace uso del efecto pelicular en las barras del devanado del rotor debido a los flujos de dispersión en las ranuras del mismo.

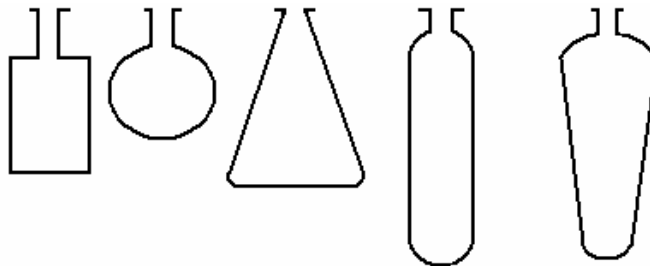


Fig. 1.2 Ranuras de rotores de jaula profunda más utilizados

Considerando primero el fenómeno en el arranque se tiene que en el instante inicial $s=1$, la frecuencia de la fem inducida en el rotor es igual a la frecuencia del voltaje de alimentación en la línea. En este instante las porciones de barras de diferentes alturas están enlazadas por diferentes números de líneas de flujo de dispersión; las porciones inferiores están enlazadas por mayor número de líneas de este flujo, y las porciones superiores por un número menor de líneas por estar más cerca del entrehierro. Debido a esto, la máxima f.e.m de dispersión es inducida en la parte inferior de la barra, y la mínima f.e.m en la parte superior. Por consiguiente, circulará menos corriente por las porciones inferiores que por las superiores; dicho de otro modo habrá un desplazamiento de la corriente (efecto superficial o pelicular) hacia las porciones exteriores del conductor [14].

La eficiencia de los motores de ranuras profundas, es de la misma magnitud que en los motores con rotor bobinado o de jaula sin el surgimiento del desplazamiento de la corriente. Sin embargo posee una reactancia de dispersión grande, debido a la colocación profunda en el núcleo del enrollado del rotor. Relacionado con esto, la multiplicidad del momento máximo de los motores de ranuras profundas también es más pequeña. En lo motores de ranuras profundas, comparado con los motores

ordinarios, la multiplicidad del momento de arranque es mayor y la multiplicidad de la corriente de arranque es menor [9]. En los motores de ranuras profundas por lo general se cumple que:

$$K_a = \frac{M_{arr}}{M_{nom}} \approx 1 \div 1.4 \qquad K_{ai} = \frac{I_{arr}}{I_{nom}} \approx 4.5 \div 6$$

1.3 Armónicos de tiempo en señales eléctricas

En la práctica, los sistemas eléctricos de potencia se encuentran contaminados de armónicos de tiempo. Esto se debe a la gran cantidad de cargas no lineales que, en creciente auge, poseen la característica de distorsionar las formas de ondas sinusoidales y por tanto contribuir a la aparición de corrientes armónicas acompañadas de sus indeseables efectos. Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales como: variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, etc. Otro tipo de cargas tales como: reactancias saturables, equipos de soldadura, hornos de arco, etc., también inyectan armónicos.

Para detectar los posibles problemas de armónicos que pueden existir en las redes e instalaciones es necesario utilizar equipos de medida de verdadero valor eficaz, ya que los equipos de valor promedio sólo proporcionan medidas correctas en el caso de que las ondas sean perfectamente sinusoidales. En el caso de que la onda sea distorsionada, las medidas pueden estar hasta un 40 % por debajo del verdadero valor eficaz [3].

Para la realización de un estudio más detallado se puede utilizar la serie de Fourier y descomponer la forma de onda no sinusoidal en sus componentes armónicas. La operación de la serie de Fourier está basada en una señal de tiempo periódica. Donde Fourier demostró que una señal de este tipo es equivalente a un conjunto de funciones senos y cosenos cuyas frecuencias son múltiplos del recíproco del período de la señal de tiempo. El resultado es que cualquier forma de onda, siempre y cuando no sea infinita en longitud se puede representar como la suma de una serie de componentes armónicas y la fundamental [10].

1.3.1 Influencia de armónicos de tiempo en los motores de inducción

Se conoce que una onda de voltaje no sinusoidal en el estator de la máquina se puede descomponer en la componente fundamental y los demás armónicos por la serie de Fourier. Para una forma de onda simétrica solo estarán presentes los armónicos impares, y en aquellas que mantengan su simetría respecto al eje de las ordenadas sus componentes armónicas serán funciones cosinusoidales. Los armónicos de orden triple, que sus tres fases están en fase [6], no inducen corrientes en el rotor en las conexiones: delta y estrella sin neutro. El armónico quinto posee una frecuencia cinco veces mayor que la fundamental y su campo magnético gira en sentido contrario al movimiento del rotor. Esto produce un momento contrario al desarrollado por el motor y por tanto una disminución de su potencia de salida y su eficiencia en toda la zona de operación. Por otro lado, la componente del séptimo armónico gira en el mismo sentido que el movimiento del rotor pero a siete veces la velocidad del primer armónico, y aunque desarrolla un momento y una potencia de valores positivos no deja de ser perjudicial, ya que la circulación de corrientes de alta frecuencia por el circuito de la máquina favorece el aumento de las pérdidas eléctricas, magnéticas, y adicionales y por tanto una reducción de la eficiencia de la máquina [12], [5]. La serie de Fourier de los voltajes de fase para estos casos quedaría de la manera siguiente:

$$v_a = V_1 \text{sen}(\omega \cdot t) + V_5 \text{sen}(5\omega \cdot t) + V_7 \text{sen}(7\omega \cdot t) + \dots \quad (1.1)$$

$$v_b = V_1 \text{sen}(\omega \cdot t - 120) + V_5 \text{sen}5(\omega \cdot t - 120) + V_7 \text{sen}7(\omega \cdot t - 120) + \dots \quad (1.2)$$

$$v_c = V_1 \text{sen}(\omega \cdot t + 120) + V_5 \text{sen}5(\omega \cdot t + 120) + V_7 \text{sen}7(\omega \cdot t + 120) + \dots \quad (1.3)$$

Donde:

V_1 - Voltaje pico máximo del armónico fundamental.

V_5 - Voltaje pico máximo del quinto armónico.

V_7 - Voltaje pico máximo del séptimo armónico.

ω - Velocidad angular de la onda.

Las ecuaciones (1.2) y (1.3) pueden plantearse de la forma siguiente:

$$v_b = V_1 \text{sen}(\omega \cdot t - 120) + V_5 \text{sen}(5\omega \cdot t + 120) + V_7 \text{sen}(7\omega \cdot t - 120) + \dots \quad (1.4)$$

$$v_c = V_1 \text{sen}(\omega \cdot t + 120) + V_5 \text{sen}(5\omega \cdot t - 120) + V_7 \text{sen}(7\omega \cdot t + 120) + \dots \quad (1.5)$$

Si se desprecia la saturación magnética del núcleo se puede considerar al motor como un dispositivo lineal y aplicarse el principio de superposición [15]. Esto significa que el comportamiento del motor puede ser analizado independientemente para la componente fundamental y para cada término de los armónicos. El comportamiento total del motor alimentado por una fuente no sinusoidal se obtiene sumando las respuestas obtenidas por cada armónico individualmente. Así, si el motor se alimenta con un voltaje no sinusoidal, la corriente y el momento resultante del motor están dados por la suma de la contribución de la corriente y del momento de cada armónico de la forma de onda de alimentación.

1.3.2 Características de los armónicos de tiempo de la fuerza magnetomotriz

Los armónicos de tiempo de la fuerza magnetomotriz (fmm) son producidos por los armónicos de la corriente en las bobinas de la fase. Asumiendo, por ejemplo, que la corriente de fase presenta componente del quinto armónico, cada fase establece una forma de onda de la fuerza magnetomotriz que tiene la misma distribución espacial que el armónico fundamental pero que pulsa a cinco veces la frecuencia fundamental. El quinto armónico de la fuerza magnetomotriz de la fase a está dada por:

$$fa = \hat{F}_{1,5} \cos \theta \sin 5\omega \cdot t \quad (1.6)$$

Donde $\hat{F}_{1,5}$ es la amplitud máxima de la onda de fmm de espacio fundamental, debido al quinto armónico de la corriente y θ es el ángulo de desplazamiento. De manera similar, para las demás fases:

$$fb = \hat{F}_{1,5} \cos(\theta - 2\pi/3) \sin(\omega \cdot t - 2\pi/3) \quad (1.7)$$

$$fc = \hat{F}_{1,5} \cos(\theta - 4\pi/3) \sin(\omega \cdot t - 4\pi/3) \quad (1.8)$$

La fmm resultante se obtiene sumando la contribución de la fmm de las tres fases. Así:

$$f = \frac{3}{2} \hat{F}_{1,5} \sin(5\omega \cdot t + \theta) \quad (1.9)$$

Este resultado confirma que la componente de quinto armónico de la corriente provoca una fmm rotatoria. La velocidad de rotación está dada por $d\theta/dt = -5\omega$, y significa que la onda está girando a cinco veces la velocidad sincrónica en la dirección opuesta a la componente fundamental. Igualmente, puede ser demostrado que el séptimo armónico provoca una fmm cuya onda rota a siete veces la velocidad sincrónica en la misma dirección que el campo fundamental. En general, los armónicos del orden $k = (3n-1)$, donde $n = 1, 2, 3, \dots$, provocan en la máquina un campo rotatorio que gira en sentido opuesto al fundamental a una velocidad k veces la velocidad sincrónica, mientras que los armónicos del orden $k = (3n + 1)$ provocan campos magnéticos rotatorios que giran en el mismo sentido que la componente fundamental a una velocidad k veces la velocidad sincrónica.

Como se analizó existen armónicos cuyos campos rotan en el mismo sentido que el campo del armónico fundamental, estos serán llamados armónicos de secuencia positiva; otros armónicos cuyos campos rotan en sentido contrario al fundamental serán llamados armónicos de secuencia negativa y aquellos armónicos cuyas corrientes no provocan campos rotatorios por estar sus tres fases en fase serán llamados armónicos de secuencia cero.

Los armónicos de secuencia cero del estator están en fase, y por lo tanto no crean campo rotatorio fundamental en el entrehierro. Sin embargo, los armónicos de secuencia cero establecen pequeños armónicos pulsantes de la fmm en el entrehierro, y si se aplica la teoría de los dos campos rotatorios, tal y como se hace en los motores monofásicos, cada onda pulsante puede descomponerse en una onda viajera que gira en el sentido de las manecillas del reloj y otra que gira en sentido contrario. Estas ondas de flujo hacen que circule corriente por el rotor debido a esos armónicos de magnitudes desiguales, y por lo tanto la presencia de las corrientes de secuencia cero en el estator puede tener efectos perjudiciales en el momento desarrollado por el motor [6]. Sin embargo su incidencia no se considerará en este estudio por carecer de los datos necesarios para su determinación.

1.3.3 Armónicos de tiempo de la corriente

Cuando el motor de corriente alterna es alimentado por un circuito inversor con una forma de onda específica a su salida y con una frecuencia particular, los armónicos de la corriente se mantienen prácticamente constantes para cualquier condición de operación del motor, desde la condición de vacío hasta plena carga. La corriente fundamental del estator es determinada por la carga del motor y, como resultado, la presencia e incidencia de armónicos se constata con mayor fuerza cuando el motor opera en vacío o subcargado que cuando opera a plena carga [6], ya que las magnitudes de las corrientes armónicas constituyen un porcentaje elevado de la corriente total de vacío. Este hecho puede causar un aumento significativo de las pérdidas en la operación sin carga de la máquina comparada con la operación cuando se alimenta el motor con una onda sinusoidal. El comportamiento del motor en vacío alimentado con una onda sinusoidal es, por lo tanto, una medida de su funcionamiento para los diferentes armónicos. Si el motor posee una corriente de arranque alta, también tiene armónicos de la corriente de arranque altos para fuentes no sinusoidales de alimentación. Si el motor tiene una reactancia de dispersión muy baja, debe ser utilizado con precaución para voltajes no sinusoidales, porque las componentes armónicas de la corriente pueden recalentar el motor.

Si V_k denota el armónico de orden k del voltaje de la fuente, el armónico de la corriente correspondiente del estator es $I_k = V_k/Z_k$, donde Z_k es la impedancia de entrada para el armónico de orden k .

Estas fórmulas permiten la rápida evaluación de los armónicos de la corriente debido a una forma de onda no sinusoidal de voltaje conociendo la amplitud de sus armónicos. Generalmente, no hay armónicos de secuencia cero, y por lo tanto la corriente efectiva (rms) total producida por los armónicos está dada por:

$$I_{arm} = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots + I_k^2 + \dots} \quad (1.10)$$

Si I_1 es la corriente fundamental rms del motor, la corriente rms total del estator, incluyendo el armónico fundamental, es:

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots + I_k^2 + \dots} = \sqrt{I_1^2 + I_{arm}^2} \quad (1.11)$$

1.4 Influencia de los armónicos de tiempo en el efecto pelicular

El efecto pelicular es el fenómeno donde las corrientes alternas de alta frecuencia tienden a fluir cerca de la superficie más externa de un conductor. Esto se debe al hecho de que las concatenaciones de flujo no son de densidad constante en toda la altura del conductor, sino que tienden a decrecer cerca de la superficie más exterior, disminuyendo la inductancia e incrementando el flujo de corriente [16]. El resultado neto del efecto pelicular es que el área transversal efectiva del conductor es reducida a medida que la frecuencia es incrementada, y por tanto, mayor es la resistencia a corriente alterna. Cuando una corriente de carga armónica está fluyendo en un conductor la resistencia ante corriente alterna equivalente para el conductor es elevada, aumentando las pérdidas de cobre en el mismo. Este es el efecto que provoca que numerosos equipos, a diferentes niveles en los sistemas de distribución de potencia, se vean sometidos a sobrecalentamientos excesivos.

Ya se conoce que los motores asincrónicos de jaula profunda y doble jaula fueron diseñados con el objetivo de utilizar el efecto pelicular o superficial de la corriente en función del mejoramiento de las condiciones de arranque de este tipo de motores. Sin embargo, cuando estos son alimentados desde fuentes de voltaje no sinusoidales este fenómeno se verá mucho más agudizado en este tipo de motores.

Al circular una corriente armónica de orden k en los devanados del estator, cuya frecuencia es también k veces la fundamental hace que varíe el valor de la reactancia de dispersión del devanado del estator al ser esta directamente proporcional a la frecuencia del voltaje de alimentación. Se puede comprobar también que la resistencia del estator afectará su valor debido al efecto pelicular provocado por las altas frecuencias de los armónicos superiores. En cambio, cuando esta corriente circula por el rotor con la frecuencia del armónico k , aumentará en k veces las reactancias de las jaulas superior e inferior durante toda la zona de operación de estos motores, y variará el valor de las

resistencias de estas jaulas al aumentar el efecto pelicular debido al incremento de la frecuencia de estos armónicos de orden superior.

1.4.1 Adecuación del circuito equivalente

Este proceso se realiza para poder facilitar el complejo análisis del comportamiento de estos motores en presencia de armónicos de tiempo.

En el caso del motor jaula profunda su circuito equivalente se ajusta al del motor asincrónico trifásico convencional, pues solo se diferencian en que cada uno de los parámetros del circuito secundario del motor de ranuras profundas representa una suma de parámetros constantes y variables a consecuencia del efecto pelicular (véase ecuaciones (1.19) y (1.20)).

Para el caso del motor doble jaula se tiene una complejidad mayor en el cálculo de los parámetros de su circuito equivalente, pues no todos los especialistas consideran de igual manera la dependencia de estos con las dimensiones de la máquina. Esto se debe fundamentalmente a la complejidad de los cálculos exactos de estos parámetros, que obligan a utilizar expresiones empíricas que se diferencian para cada autor y como resultado proponen diferentes variantes de circuito equivalente, tal y como se muestran a continuación:

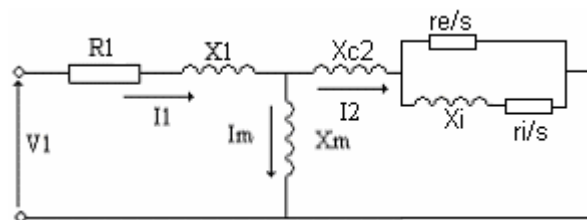


Fig. 1.3. Circuito equivalente para un motor doble jaula convencional.

En el circuito propuesto por Fitzgerald en la figura 1.3 se representa el motor con una rama en paralelo donde están los parámetros específicos de las barras. Siendo r_i la resistencia de la barra interna del rotor, r_e , la resistencia de la barra externa y X_i la reactancia de la barra interior. Además posee una rama común donde aparece la reactancia debida al flujo disperso común a las dos jaulas [X_{c2}].

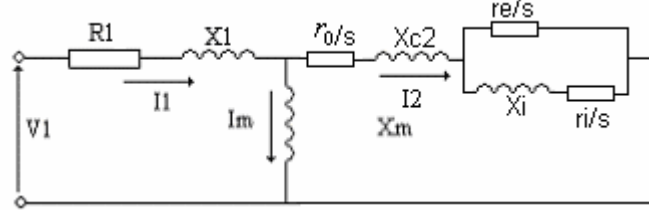


Fig. 1.4. Circuito equivalente para un motor doble jaula convencional

La figura 1.4 se muestra la variante propuesta Baur, A.K . En la que se puede observar que se le ha añadido a la rama común la resistencia debida a los anillos (r_0). Debe aclararse que en la variante anterior, esta resistencia está incluida en las resistencias de las barras, por lo que se puede apreciar cierta similitud con el caso anterior.

Sin embargo, cuando las jaulas de este tipo de motor son ambas de aluminio fundido se ha comprobado según estudios realizados [4] que este puede considerarse como un motor de jaula profunda con una forma geométrica más compleja [22],[23]. Obteniéndose de esta manera resultados más exactos en sus características de comportamiento.

Como el motor de doble jaula que se analiza en este trabajo posee un rotor de aluminio fundido se utilizará el mismo circuito equivalente que el empleado para el motor de ranuras profundas. Este, como se analizó anteriormente será el mismo que el del motor trifásico convencional con las correspondientes diferencias en sus parámetros.

A continuación se muestra el circuito equivalente seleccionado para la realización de este trabajo teniendo en cuenta además la variación que sufren cada uno de sus parámetros con los armónicos de tiempo.

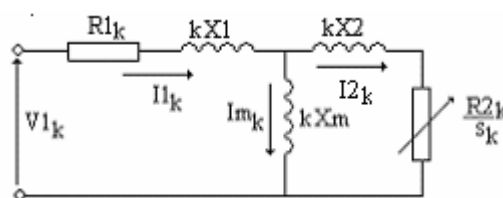


Fig.1.5 Circuito equivalente de una fase del motor asincrónico trifásico bajo la influencia de los armónicos de tiempo

Siendo R_1 , R_2 , X_1 y X_2 las resistencias y reactancias del estator (1) y rotor (2) respectivamente para la frecuencia fundamental de la fuente, X_m es la reactancia de magnetización correspondiente y k denota el orden del armónico analizado.

El resbalamiento del rotor con respecto al campo rotatorio fundamental, será denotado por s_1 y puede calcularse como:

$$s_1 = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (1.12)$$

Donde n_1 es la velocidad sincrónica del campo rotatorio fundamental, y n es la real del rotor. El resbalamiento del rotor para un armónico del orden $k = (3n + 1)$ que gira en el mismo sentido que el fundamental es:

$$s_k = \frac{kn_1 - n}{kn_1} \quad (1.13)$$

y para los armónicos del orden $k = (3n - 1)$ que giran en sentido opuesto al fundamental:

$$s_k = \frac{kn_1 + n}{kn_1} \quad (1.14)$$

En general:

$$s_k = \frac{kn_1 \mp n}{kn_1} \quad (1.15)$$

Donde el signo negativo es válido para los armónicos de secuencia positiva y el signo positivo se aplica para los armónicos de secuencia negativa.

El resbalamiento fundamental, s_1 , se sustituye por el resbalamiento del armónico de orden k que se desee analizar, s_k , y en general todas las reactancias inductivas son multiplicadas por el factor k . Las resistencias del estator y del rotor aumentan también debido al efecto pelicular, producido por las frecuencias de los armónicos de orden superior.

Para el caso de la reactancia del estator bajo la influencia del armónico k tenemos que:

$$X_{1k} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot k \cdot L \quad (1.16)$$

o

$$X_{1k} = k \cdot X_1 \quad (1.17)$$

donde

f_1 : Frecuencia del armónico fundamental.

k: Orden del armónico analizado.

L: Inductancia del circuito del estator.

X_1 : reactancia de dispersión del estator para el armónico fundamental

La resistencia del devanado del estator también se verá afectada por la circulación de armónicos superiores debido al efecto pelicular producido por estos [2].

$$R_{1k} = R_1 (0.4 + 0.6\sqrt{k}) \quad (1.18)$$

Donde:

R_1 : Resistencia del devanado estatórico para la componente fundamental.

Sin embargo, para el caso de la impedancia del rotor no es tan simple, pues también se verá afectada por el efecto pelicular producto de la variación de la frecuencia del rotor desde el arranque hasta la operación nominal, este fenómeno provoca grandes variaciones en los parámetros del rotor. En el caso del motor con rotor de tipo jaula profunda están determinados por las expresiones siguientes

$$R'_{2k} = Rb \cdot \frac{Sb}{Sbr} + R_0 \quad (1.19)$$

$$X'_{2k} = X_2 \cdot \frac{\lambda_{2e}}{\lambda_2} \quad (1.20)$$

Donde:

Rb y R_0 : Resistencia de la barra del rotor y del anillo respectivamente.

R'_{2k} : Resistencia del rotor debido al efecto pelicular producto del armónico k

X'_{2k} : Reactancia del rotor debido al efecto pelicular producto del armónico k

S_b : Área de la barra del rotor.

S_{br} : Área de la barra considerando el efecto pelicular en el rotor.

λ_2 : Permeancia de dispersión total para el rotor.

λ_{2e} : Permeancia de dispersión total para el rotor considerando el efecto pelicular en el rotor.

Una vez obtenido el valor de X'_{2k} , se multiplica por el orden del armónico que se esté analizando, pues esta, igual que la reactancia del estator, también depende directamente de la frecuencia de la onda de alimentación.

El área de la barra está dada como:

$$S_b = \frac{\pi}{8} (d1^2 + d2^2) + h1r \left(\frac{d1 + d2}{2} \right) \quad (1.21)$$

Donde:

$d1$: Diámetro de la semicircunferencia de la parte mayor de la ranura del rotor

$d2$: Diámetro de la semicircunferencia de la parte menor de la ranura del rotor

$h1r$: Altura entre el centro de la circunferencia de la ranura del rotor

Para el caso del área considerando el efecto pelicular se determina la altura descrita por el propio efecto h_r y como en este caso la forma de la ranura del rotor es oval el ancho de la misma es función de la altura h_r por tanto le corresponde un ancho b_r .

Por tanto:

$$S_{b_r} = \frac{\pi d1^2}{8} + \frac{d1 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{d1}{2} \right) \quad (1.22)$$

Donde:

$$h_r = \frac{h}{K_r} \quad (1.23)$$

$$b_r = d1 - \frac{d1 - d2}{h1r} \left(h_r - \frac{d1}{2} \right) \quad (1.24)$$

K_r : Factor que tiene en cuenta el aumento de la resistencia con el efecto pelicular en el rotor.

$$K_r = \xi \frac{\sinh 2\xi + \cosh 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad (1.25)$$

Siendo:

$$\xi = h \sqrt{\frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot b_{bar} \cdot f_2}{b_s \cdot \rho}} \quad (1.26)$$

Donde:

h : Altura de la barra

μ_0 : Permeabilidad magnética del aire

b_{bar} , b_s : Ancho de la barra y la ranura respectivamente

f_{2k} : Frecuencia de la corriente por la barra para el armónico k

ρ : Resistividad del material de la barra

En caso de la reactancia de dispersión del rotor afectada por el efecto pelicular de la corriente, la permeancia que cambia es la de la ranura λ_{n2} y por lo tanto hay que recalcularla.

$$\lambda_{2e} = \lambda_{n2e} + \lambda_{d2} + \lambda_{12} \quad (1.27)$$

Donde :

λ_{d2} : Permeancia de dispersión diferencial.

λ_{12} : Permeancia de dispersión del anillo.

$$\lambda_{n2e} = 0.4\pi 10^{-6} \left[0.66 + \frac{2(h_x - 0.5d1)}{3(d1 + b_x)} + \frac{h4r}{ap} \right] \quad (1.28)$$

h_x y b_x Son valores de altura y ancho respectivamente descritos por el efecto pelicular para el cálculo de la variación de la reactancia de dispersión causada por el propio efecto pelicular en el caso de ranura oval.

$$h_x = h \cdot K_x \quad (1.29)$$

$$b_x = d1 - \frac{d1 - d2}{h1r} \left(h_x - \frac{d1}{2} \right) \quad (1.30)$$

K_x : Factor que tiene en cuenta la disminución de la reactancia con el efecto pelicular en el rotor.

$$K_x = \frac{3}{2\xi} \frac{\sinh 2\xi - \cosh 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad (1.31)$$

Para el caso del motor doble jaula se sigue el mismo procedimiento que en el motor de ranuras profundas. Como la penetración de la corriente no depende de la geometría de la ranura, se puede aplicar el mismo procedimiento, sin que esto implique errores.

Conociendo la forma en que varían los parámetros del motor, y con ayuda del circuito equivalente, se puede obtener el comportamiento del motor bajo la incidencia de los armónicos de tiempo.

1.5 Pérdidas del motor alimentado con fuentes no sinusoidales

Como se ha dicho los motores son expuestos a una serie de efectos con la presencia de armónicos de tiempo en su onda de alimentación que dan lugar a una degradación de sus indicadores energéticos. Esto, a la larga, provoca una reducción de la vida útil del mismo. Mientras mayor sea el contenido de armónicos en la forma de onda de voltaje no sinusoidal, mayor magnitud tendrán los armónicos de la corriente, esto, unido a un apreciable aumento de las resistencias con el efecto pelicular, origina un aumento de las pérdidas eléctricas, la temperatura y un envejecimiento térmico prematuro de sus devanados. Además, con la circulación de altas frecuencias, provenientes de los armónicos superiores, aumentan también las pérdidas magnéticas y adicionales,

trayendo consigo una disminución de la eficiencia del motor en toda la zona de operación [8].

En general, los armónicos también disminuyen el factor de potencia, el momento desarrollado y la capacidad de potencia, y provocan indeseables ruidos y vibraciones durante la operación del motor.

1.5.1 Pérdidas de cobre del estator

El incremento en las pérdidas del motor con la presencia de los armónicos de la corriente en las bobinas del estator es notable debido al aumento de la resistencia del rotor. Las pérdidas de cobre del estator para una fuente no sinusoidal son proporcionales al cuadrado de la corriente rms total. Si m_1 es el número de fase del estator y R_{1k} es la resistencia del estator por fase, las pérdidas totales de cobre del estator son:

$$P_{cu1} = m_1 \cdot I_{rms}^2 \cdot R_{1k} \quad (1.32)$$

Sustituyendo por I_{rms} de la ecuación 1.11 se obtiene como resultado:

$$P_{cu1} = m_1 (I_1^2 + I_{arm}^2) R_{1k} \quad (1.33)$$

Donde se aprecia el aumento que experimentan las pérdidas eléctricas en estator con las corrientes armónicas en la onda de alimentación.

1.5.2 Pérdidas de cobre del rotor

Para el motor de corriente alterna hay un aumento de la resistencia del estator con la frecuencia que depende de la forma, del tamaño, y de la disposición de los conductores en el estator. También en el rotor es donde el efecto pelicular es mucho más apreciable y principalmente en el caso de los motores jaula profunda y de doble jaula, que experimentan un aumento significativo en la resistencia bajo la influencia de las altas frecuencias de los armónicos. A estas frecuencias, la resistencia del rotor es mayor que a valores de corriente directa. El aumento real depende de la forma geométrica de la

sección transversal del conductor y de la ranura del rotor. Puesto que la resistencia del rotor es una función de la frecuencia de los armónicos, las pérdidas eléctricas del rotor se calculan independientemente para cada armónico. En general, para el armónico de orden k , las pérdidas de cobre del rotor son:

$$P_{cu2} = m_1 (I_{2k})^2 R_{2k} \quad (1.34)$$

Donde I_{2k} es la corriente del rotor para el armónico de orden k , y R_{2k} es la resistencia correspondiente del rotor, considerado el efecto pelicular para el armónico k .

Las pérdidas de cobre total producidas por los armónicos se obtienen sumando la contribución de cada armónico por separado. En los motores de inducción, las pérdidas adicionales de cobre del rotor debido a los armónicos de la corriente es la causa principal de la reducción de la eficiencia de los motores alimentados con fuentes no sinusoidales.

1.5.3 Pérdidas de núcleo de los armónicos

Las pérdidas de núcleo en los motores también aumentan notablemente con la presencia de los armónicos de tiempo en el voltaje de alimentación y en la corriente. Según se ha explicado anteriormente, los armónicos de tiempo de la fmm son establecidos en el entrehierro por cada armónico de la corriente del estator. Estos armónicos de tiempo de la fmm tienen el mismo número de polos que el campo fundamental, pero rotan en su misma dirección o en sentido contrario a un múltiplo de la velocidad sincrónica. Sin embargo, los armónicos de tiempo del flujo del entrehierro resultante son pequeños, indicando que los armónicos de la fmm del estator y del rotor se neutralizan casi totalmente el uno al otro. Si las fuerzas magnetomotrices del entrehierro de los conductores del estator y del rotor se balancean una a la otra a lo largo de la longitud del núcleo, hay una fmm radial resultante en el entrehierro que se mueve axialmente en cualquier dirección [6]. Esta inclinación de la fmm, que es más grande en los extremos del núcleo, establece un flujo disperso oblicuo en el entrehierro que produce pérdidas de núcleo en las laminaciones del estator y del rotor. Para la corriente del armónico fundamental, las pérdidas de núcleo son pequeñas, porque el flujo oblicuo cambia con

la frecuencia fundamental en el núcleo del estator y con el resbalamiento en el núcleo del rotor, y aunque no se abordará en este trabajo, para los armónicos de la corriente, los cambios producidos por el flujo de dispersión oblicuo con la frecuencia de los armónicos en el núcleo del estator y del rotor pueden aumentar significativamente las pérdidas magnéticas asociadas a este efecto.

1.5.4 Eficiencia del motor

Cuando se habla de eficiencia, se está tratando del funcionamiento del sistema de conversión electromecánico en general, y está caracterizada por los parámetros energéticos del sistema, es decir que tendrá más o menos calidad en la medida en que menos pérdidas ocurran durante el proceso de conversión de la energía. En el caso de los motores de inducción se puede definir como:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{sal} + P_{\text{p\u00e9rdidas}}} \quad (1.35)$$

Donde:

η : Eficiencia

P_{sal} : Potencia de salida del motor

$P_{\text{p\u00e9rdidas}}$: Pérdidas totales

La presencia de armónicos en la alimentación del motor conlleva a una perceptible reducción de la eficiencia de la máquina, puesto que se tiene que el contenido de armónicos del voltaje de suministro y la influencia de este sobre los parámetros del motor hace variar la magnitud de las pérdidas en la máquina. Armónicos del voltaje de amplitudes altas, y bajas frecuencias, causan aumentos apreciables en las pérdidas eléctricas del motor, por otro lado los que poseen amplitudes bajas y frecuencias altas también aumentan las pérdidas eléctricas, magnéticas y adicionales.

1.6 Consideraciones finales del capítulo

La utilización del efecto pelicular en los motores de doble jaula y de jaula profunda contribuye a la obtención de un elevado momento de arranque sin perjuicio alguno en la operación de estos motores. Sin embargo, con la presencia de armónicos de tiempo en las fuentes de alimentación, habrá corrientes de altas frecuencias circulando por los devanados del rotor y del estator haciendo más notable el efecto pelicular en las resistencias del motor. Además provocarán un incremento de todas las pérdidas de la máquina y una apreciable disminución de su eficiencia en toda la zona de operación.

Capítulo 2. Diseño e implementación de programa

2.1 Introducción

La determinación de las características de comportamiento de motores asincrónicos trifásicos de jaula profunda y doble jaula teniendo en cuenta los armónicos superiores de tiempo es un procedimiento complejo que requiere de soporte computacional.

Matlab es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices. Como caso particular puede trabajar también con números escalares, tanto reales como complejos. Una de las capacidades más atractivas es la de realizar una amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones. Matlab tiene también un lenguaje propio de programación.

El Matlab como herramienta de cálculo potente ofrece muchas facilidades para la descomposición en series de Fourier de señales no sinusoidales, así como para la confección de gráficos. Para la implementación de este trabajo, se necesitaba un programa capaz de realizar cálculos matemáticos complicados como por ejemplo hacer la descomposición en series de Fourier de señales no sinusoidales y cálculos con números complejos, por estas razones se utilizó este software para este trabajo [13].

2.2 Consideraciones para el análisis de los motores

Como se puede apreciar el análisis de los armónicos de tiempo y el efecto pelicular en los motores doble jaula y de ranura profunda presenta cierto grado de complejidad, con el objetivo de facilitarlos se realizan un conjunto de consideraciones en el modelo circuital de estas máquinas:

- Se utiliza un mismo circuito equivalente para el estudio de los armónicos de tiempo en los dos tipos de motores.
- Las resistencias y reactancias del circuito equivalente varían con el orden del armónico y con el tipo de rotor.
- Se desprecia la resistencia de la rama de magnetización debido a que se consideran todas las pérdidas rotacionales en el rotor.
- Para los cálculos de eficiencia se considera la potencia de salida igual a la potencia desarrollada.

Otras consideraciones que se hacen son las siguientes:

- No se toma en cuenta la saturación magnética del núcleo, lo que permite considerar al motor como un dispositivo lineal y por tanto para el análisis del comportamiento del motor puede aplicarse el principio de superposición independientemente para cada armónico de la señal de alimentación [21].
- El efecto de los armónicos de tiempo en las pérdidas de núcleo o magnéticas del motor es despreciable.

2.3 Concepción general del programa

La figura 2.1 muestra un diagrama de bloques general con la secuencia lógica para la confección del programa. Primeramente el usuario tendrá la oportunidad de insertar simultáneamente datos del tipo de motor y de ondas que sean seleccionados; después ocurre que los datos suministrado para el motor son procesados y los de la onda son utilizados para la descomposición de la misma en series de Fourier. En el siguiente bloque se produce lo que se puede llamar zona de cálculo que es donde se obtienen las

características de comportamiento del motor. Y la etapa final o último módulo grafica las características obtenidas.

Los cálculos que se realizan para obtener las características de comportamiento de cada motor se efectúan a través del circuito equivalente mediante la aplicación del método de la superposición, o sea realizando los cálculos para cada uno de los armónicos por separados.

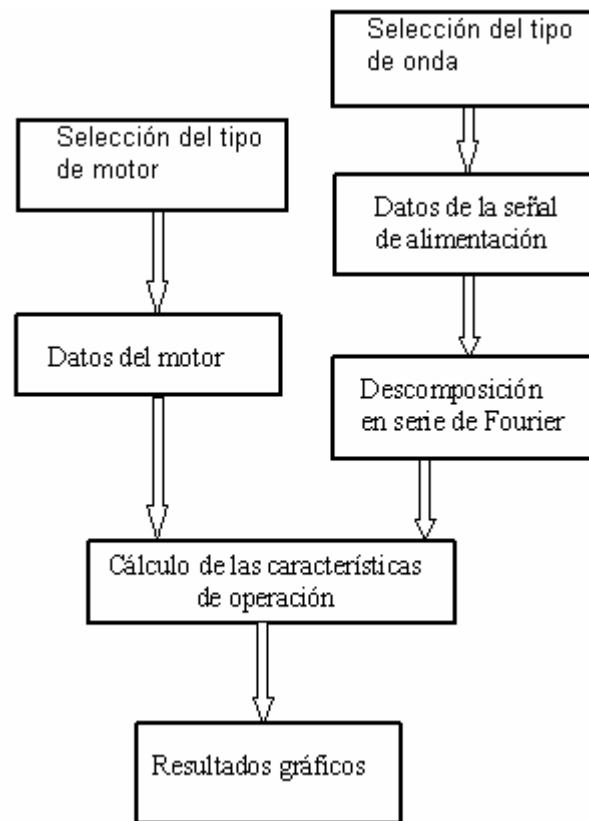


Fig. 2.1 Diagrama del procedimiento seguido

2.4 Caracterización de la herramienta computacional

Este programa se realiza con el fin de que pueda ser utilizado con facilidad por el usuario. Es válido aclarar que el programa debe ejecutarse desde el *Matlab* utilizando la versión 6.5 ó una superior. La ventana principal (ver figura 2.2) muestra en su parte

superior izquierda las barras con menú desplegable para la entrada de los datos requeridos por la aplicación. Solo si todos los datos son introducidos se podrá ejecutar la aplicación una vez activado el botón “Calcular”. A través de los botones ubicados en la parte izquierda central de la ventana se pueden visualizar los resultados obtenidos mediante gráficas. Cada uno señala, con abreviaturas, los nombres de las características de comportamiento del motor cuando es alimentado por una onda seleccionada con anterioridad. Con solo activar alguno de estos botones se pueden ir observando las características de operación desarrolladas en toda la zona de trabajo de la máquina. Por otro lado la parte central derecha posibilita activar el orden del armónico así como las formas de ondas que se deseen analizar.

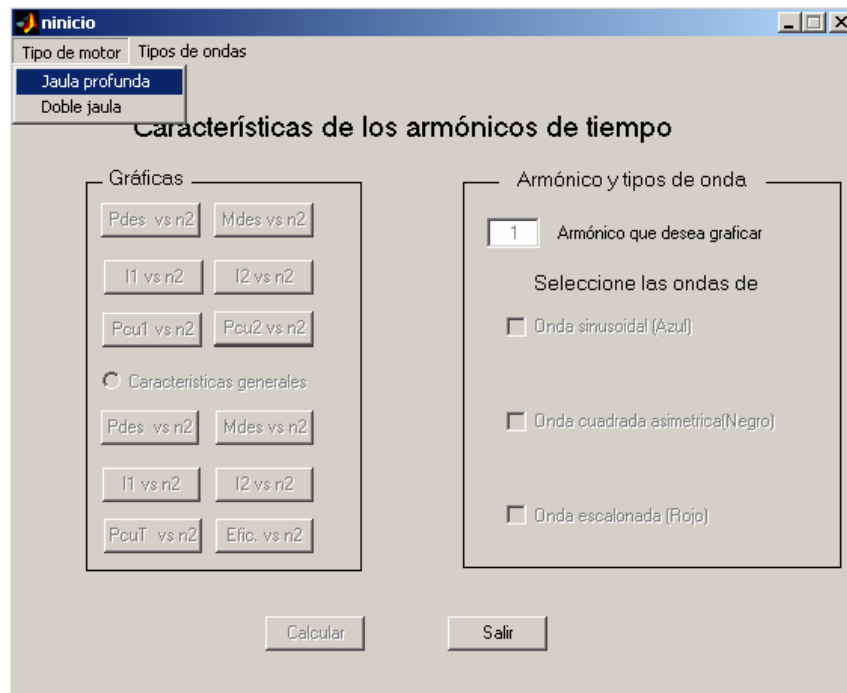


Fig. 2.2 Ventana principal del programa solicitando datos del motor

2.4.1 Entrada de datos

La entrada de datos se lleva a cabo después de haber seleccionado el tipo de motor o de las ondas que se deseen para el desarrollo del programa. Para facilitar la comunicación usuario-programa toda la transferencia de datos se realice a través de ventanas de

diálogo. En la figura 2.3 se muestra la primera ventana de entrada de datos donde se introducen los datos del motor doble jaula. Esta ventana posee en la parte superior izquierda una barra desplegable con la ayuda que pueda necesitar el usuario en caso de existir desconocimiento con el significado de los datos a insertar.

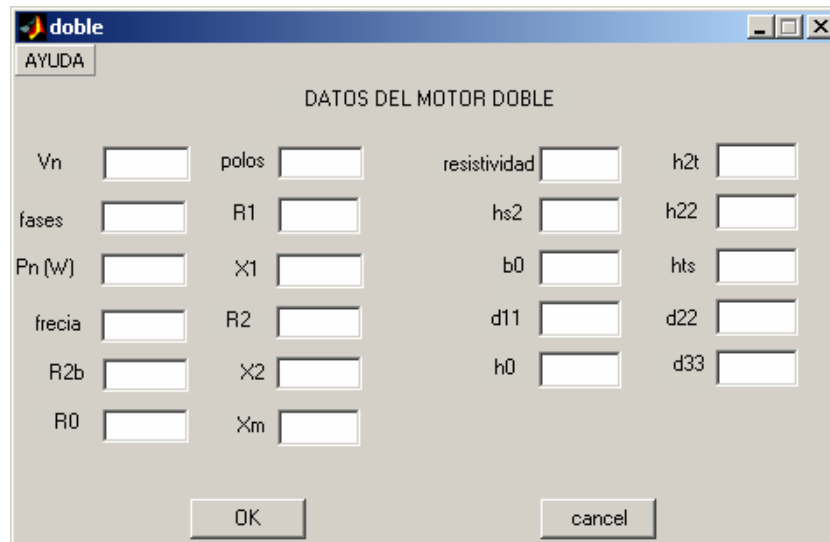


Fig. 2. 3 Ventana de diálogo para introducir los datos del circuito equivalente

En caso de que se seleccione el motor de ranuras profundas se crea una segunda ventana solicitando sus datos, tal como aparece en la figura 2.4, ofreciendo las mismas posibilidades de ayuda que el caso anterior.

Después de haber accedido a estas ventanas el usuario tiene opciones de trabajo que además de dar continuidad al procedimiento se le ofrece la posibilidad de rectificar algún error oprimiendo:

OK: Para que el programa utilice sus datos en los cálculos.

Cancel: Para salir si hay error y volver a introducir los datos.

profunda

AYUDA

DATOS DEL MOTOR JAULA PROFUNDA

Vn X1 resistividad

polos X2 ap

fases Xm d1

Pn (W) Rm d2

frecia Rk h4r

R1 Xk h1r

R2 r2b A

OK cancel

Fig. 2.4 Cuadro de diálogo para introducir los datos del circuito equivalente

2.4.2 Formas de ondas de voltaje predeterminadas

Luego haber seleccionado el tipo de motor con sus datos, la aplicación tiene además posibilidades de conformar algunas formas de ondas del voltaje de alimentación. En este caso se utilizaron tres tipos de ondas, entre estas están la onda sinusoidal, la cuadrada asimétrica y la onda escalonada.

Para introducir los datos de la onda de alimentación se emplean ventanas con el nombre de la onda seleccionada. En ella se introducen los datos necesarios para construirla y posteriormente descomponerla en serie de *Fourier*.

a) Onda Sinusoidal

En la figura 2.5 se muestra la ventana perteneciente a la onda seno, esta ofrece la posibilidad de entrar el valor máximo de la onda o su valor efectivo (rms) y se puede generar una señal sinusoidal a la frecuencia que se fije inicialmente.

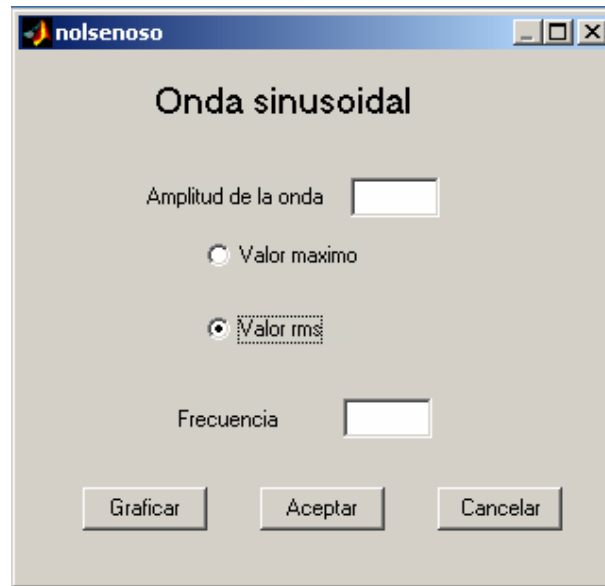


Fig. 2.5 Ventana de diálogo para introducir los datos de la onda seno

Los botones que aparecen en la parte inferior realizan las funciones siguientes:

- **Graficar:** Muestra la forma de onda con las características definidas por el usuario.
- **Aceptar:** Con esta acción se le transfieren al programa los datos necesarios para calcular las características de comportamiento del motor alimentado con esta onda.
- **Cancelar:** Cancela la forma de onda.

b) Onda cuadrada asimétrica

Para generar una onda cuadrada asimétrica se solicitan los datos que se aprecian en la figura 2.6. El dato número de armónicos, permite limitar el número de armónicos en que el usuario desea descomponer la onda de alimentación al motor. Es válido aclarar que para realizar este estudio en esta onda solo se tuvieron en cuenta los armónicos impares con el objetivo de establecer una comparación entre los armónicos de las restantes ondas.

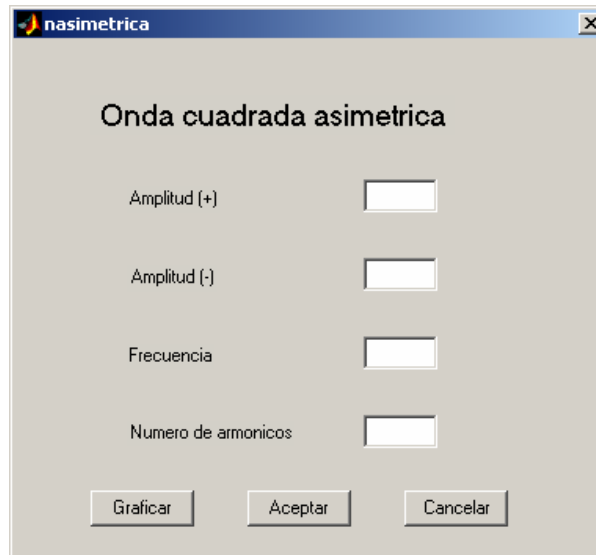


Fig.2.6 Ventana de diálogo para introducir los datos de la onda cuadrada

c) Onda escalonada

De igual forma se procede con la onda escalonada, sin embargo, para poder construirla se necesita conocer además el número de escalones que esta posee. Para ello se añade un cuadro que permite introducir este dato (Figura 2.7) y la onda puede ser generada por el programa.

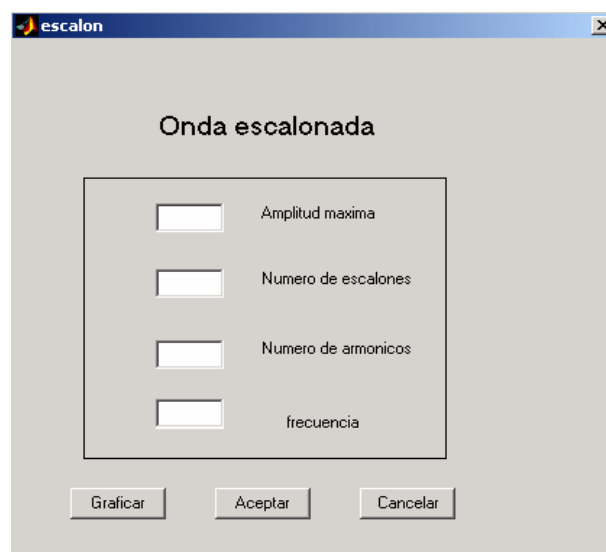


Fig. 2.7 Ventana de diálogo para introducir los datos de la onda escalonada

El proceso de entrada de datos al programa como se ha explicado, resulta muy sencillo, lo que facilita a los usuarios su utilización. Además la mayoría de los datos requeridos son de fácil adquisición, sólo se dificultan un poco aquellos más específicos de la jaula del rotor, que se necesitan para considerar el efecto pelicular en el comportamiento de los motores.

2.4.2.1 Procedimiento para la descomposición de las señales

Primeramente son procesados todos los datos obtenidos de las ondas seleccionadas por el usuario, ya sea para generarlas, para descomponerlas en serie de *Fourier*, o para graficarla con sus componentes armónicas. A manera de ejemplo se muestra un fragmento del programa utilizado para generar la onda sinusoidal:

```
if get(handles.rb1,'value') == 1
    amplitud = str2num(get(handles.edit1,'string')); % amplitud de la onda
else
    amplitud = str2num(get(handles.edit1,'string'))*sqrt(2); % amplitud de la
onda
end
frecuencia = str2num(get(handles.edit2,'string'));
t=[0:1.000399e-5:0.016666];
y=amplitud*sin(2*pi*frecuencia*t); % confección de la onda seno
plot(t,y)
end
```

Ya con la introducción de los datos necesarios de esta onda pueden obtenerse los resultados mostrados en la figura 2.8.

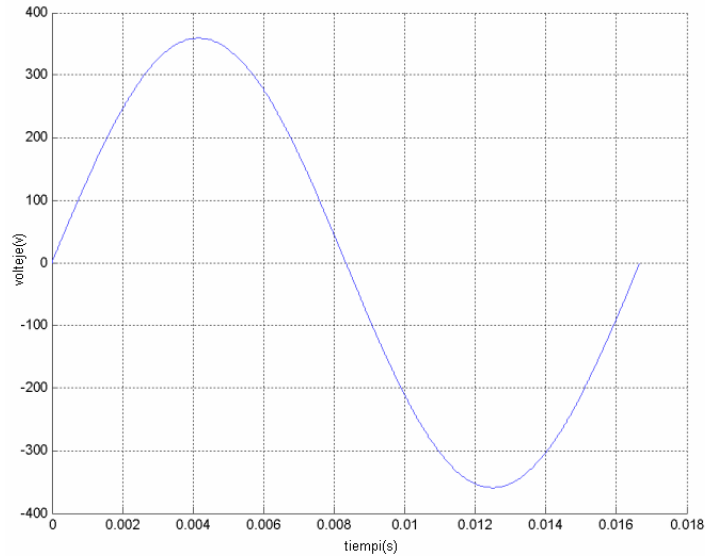


Fig.2.8. Gráfica de la forma de onda sinusoidal

Si se desea analizar una onda no sinusoidal por ejemplo la cuadrada asimétrica, es necesario aplicar la función `fft` (*fast furier transformer*) del *Matlab* para facilitar la descomposición de la onda en sus componentes armónicas. Se tiene que esta onda se construye estableciendo un módulo de amplitud máxima y mínima para cada ciclo, y se puede obtener a través de las sentencias siguientes:

```

ampmas = str2num(get(handles.edit1,'string')); %amplitud máxima + de la onda
ampneg = str2num(get(handles.edit2,'string')); %amplitud mínima - de la onda
f1 = str2num(get(handles.edit3,'string')); %frecuencia de la onda
y1=ampmas*[ones(1,1000)]; %confección de la onda
y2=ampneg*[-ones(1,1000)]; %confección de la onda
y=[y1 y2]; %confección de la onda
%----- Descomposición en armónicos -----
x=abs(fft(y)); %descomposición de la onda en series de Fourier
armonicos(3) = str2num(get(handles.edit4,'string')); %numero de armónico
for q=1:armonicos(3),
    volt(q)=x(q*2000/2000+1)/1000; %amplitud de cada armónico
    frecuencia(q)=f1*q; %frecuencia de cada armónico
end
%----- Grafica -----
t=[0:0.0000083333:0.016666];m=1;

```

```

figure
plot(t,y) %grafica de la onda cuadrada asimétrica
grid
for q=1:armonic(3),
    if m==7
        m=1;
    else
        m=m+1;
    end
    hold on
    z=volt(q)*sin(2*pi*frecuencia(q)*t);
    plot(t,z,color(m)) %grafica de los armónicos
end
a=(x(1)/1000)*[ones(1,2000)];
plot(t,a,'k') %grafica de los armónicos

```

Un ejemplo de una onda cuadrada asimétrica de amplitud 359.26 V en el semiciclo positivo y 179.7 V en el semiciclo negativo se muestra en la figura 2.9, esta onda está descompuesta hasta el séptimo armónico.

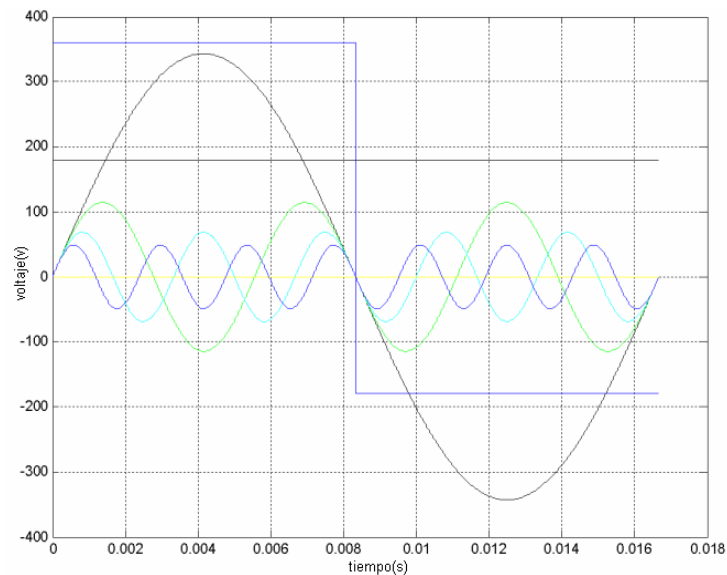


Fig. 2.9 Onda cuadrada asimétrica y su descomposición en armónicos

Como se puede apreciar este tipo de onda presenta un alto nivel de contaminación armónica.

Las sentencias utilizadas en la programación para la configuración de la onda escalonada y para su descomposición en series de Fourier son las siguientes:

```

color = char('b','k','r','g','m','c','y');m = 0;
armonicos(4) = str2num(get(handles.edit3,'string')); % número de armónicos
amp = str2num(get(handles.edit1,'string')); %amplitud maxima de la onda
n = str2num(get(handles.edit2,'string')); % cantidad de escalones
h = 2*n-1;
for q = 100:500
    puntos = q*2*(2*n-1); % número de muestreo de la onda
    if puntos > 2000
        break
    end
end
p = puntos*2*(2*n-1); % número de muestreo de la onda
for q = 1:n,
    amplitud(q) = amp*q/n;
end
y = [];
for q = 1:(2*n-1),
    if q <= n
        z = length(y);
        y(z+1:z+puntos) = amplitud(q);
    elseif q > n & q <= (2*n-1)
        z = length(y);
        y(z+1:z+puntos) = amplitud(h+1-q);
    end
end
xx = [0 y -y 0];
z = length(xx);
t1 = [0:0.0166666/z:0.0166666];
t = t1(1:z);

```

```

figure
plot(t,xx)
grid on
x=abs(fft(xx));
for q = 1:armonicos(4),
    volt(q) = x(q*z/z+1)/(z/2);
    frecuencia(q)=60*q;
end
for q=1:armonicos(4),
    if m == 7
        m = 1;
    else
        m = m+1;
    end
    hold on
    zz = volt(q)*sin(2*pi*frecuencia(q)*t);
    plot(t,zz,color(m))
end
grid on

```

En una sección de este procedimiento se efectúa el cálculo de la amplitud de cada uno de los escalones de la onda mediante un recurso que consiste en tomar como referencia la amplitud máxima dividida por el número de escalones, estableciéndose con ello la amplitud mínima, correspondiente al primer y último escalón. El resto de los escalones se determinan multiplicando esta amplitud mínima por los escalones siguientes mediante un ciclo. El resultado de esto puede observarse en la figura 2.10.

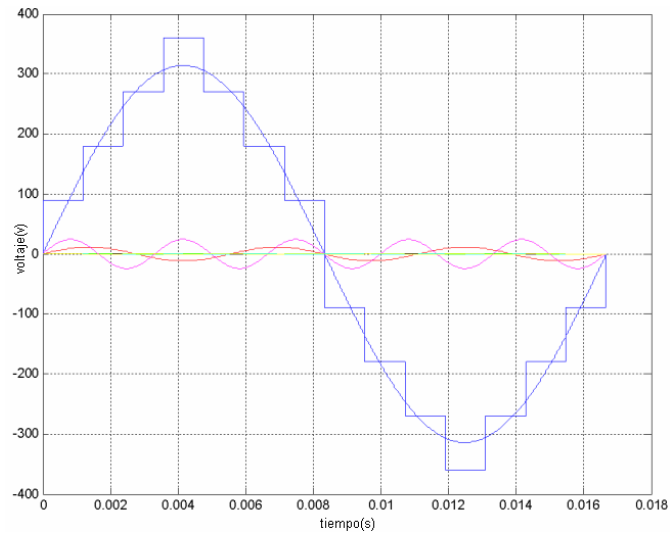


Fig. 2.10 Onda escalonada y su descomposición en armónicos

Al igual que en la onda cuadrada asimétrica se puede apreciar el contenido de armónicos en esta onda, notándose la disminución en la amplitud de sus armónicos superiores con respecto a los de la onda cuadrada asimétrica.

2.5 Procedimiento para obtener las características de comportamiento

Una vez procesada la información perteneciente a las ondas de alimentación al motor, se obtiene un vector con los valores eficaces de cada una de sus componentes armónicas. Luego con la amplitud del voltaje de cada armónico y los datos del motor se pueden obtener las corrientes por el estator y el rotor, con ello calcular el factor de potencia y la potencia de entrada al motor para cada armónico analizado. También se determinan las pérdidas de cobre de estator y rotor y la potencia desarrollada para cada componente armónica. Por último, aplicando el principio de superposición pueden determinarse las características de operación totales, o sea cuando están presentes todos los armónicos.

Puede afirmarse que en esencia el procedimiento utilizado para el cálculo de las características del motor contempla los pasos siguientes:

1-Cálculo de las variaciones provocadas por armónicos y el efecto pelicular.

Para obtener las características del comportamiento de cada motor se estableció un vector que contenía el rango de variación de velocidad. Este rango se tomó desde un valor igual a menos la velocidad sincrónica de cada motor ($-n_s$) hasta dos veces la velocidad sincrónica ($2n_s$). Esto se hizo con el objetivo de analizar la influencia de los armónicos y el efecto pelicular creado por estos en las tres zonas de trabajo de la máquina. El tratamiento a estas variaciones está explícito en el Capítulo 1.

2-Cálculo de la impedancia de entrada

Si se aplica reducción de redes [7] la impedancia total de entrada bajo la influencia del armónico k se determina mediante la expresión siguiente:

$$Z_{ent_k} = R_{1k} + jX_{l1} + \left[\frac{k \cdot jX_m \left(k \cdot jX'_{2k} + \frac{R'_{2k}}{s_k} \right)}{k \cdot jX_m + k \cdot jX'_{2k} + \frac{R'_{2k}}{s_k}} \right] \quad (2.1)$$

Donde:

Z_{ent_k} : Impedancia equivalente de entrada (Ω)

Esta impedancia puede representarse como se muestra en la figura 2.11

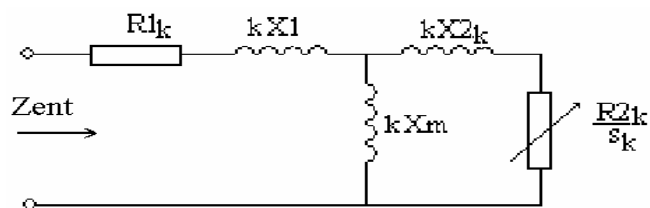


Fig. 2.11. Representación circuital de la impedancia de entrada.

3-Cálculo de la corriente por el estator

La corriente por fase del estator aplicando la ley de Ohm, se calcula por:

$$I_{1k} = \frac{V_{1k}}{Z_{ent_k}} \quad (2.2)$$

Donde V_{1k} es el voltaje de alimentación por fase del armónico k

4-Cálculo del factor de potencia

El factor de potencia del motor puede ser obtenido como el coseno del ángulo de la impedancia de entrada o del ángulo del fasor corriente. De modo que este ángulo es el defasaje que existe entre el voltaje y la corriente de entrada al motor:

$$fp_k = \cos \theta \quad (2.3)$$

Donde:

θ : Defasaje entre el voltaje y la corriente (grados)

5-Cálculo de la potencia de entrada al motor

La potencia de entrada al motor alimentado por la componente armónica k se calcula como:

$$P_{ent_k} = 3 \cdot U_{1k} \cdot I_{1k} \cdot fp_k \quad (2.4)$$

6-Cálculo de la corriente de magnetización

Aplicando la ley de *Kirchoff* de voltaje en la primera malla del circuito equivalente, se obtiene la corriente que circula por la rama de magnetización (I_{m_k}) como se describe a continuación:

$$I_{mk} = \frac{V_{1k} - I_{1k}(R_{1k} + k \cdot jX_1)}{k \cdot jX_m} \quad (2.5)$$

7-Cálculo de la corriente por el rotor

Mediante la ley de Kirchoff de corriente en cualquiera de los nodos del circuito se determina la corriente por el rotor (I_{2k}) en Amperes.

$$I_{2k} = I_{1k} - I_{mk} \quad (2.6)$$

8-Pérdidas de cobre de estator y rotor

Las pérdidas debidas al efecto Joule en el rotor y estator se determinan mediante las expresiones siguientes:

$$Pcu_{1k} = 3 \cdot I_{1k}^2 \cdot R_{1k} \quad (2.7)$$

$$Pcu_{2k} = 3 \cdot I_{2k}^2 \cdot R_{2k} \quad (2.8)$$

Siendo:

Pcu_{1k} : Pérdidas de cobre en el estator debidas al armónico k (W)

Pcu_{2k} : Pérdidas de cobre en el rotor debidas al armónico k (W)

9-Cálculo de la potencia transferida

Esta potencia es la que se transfiere del estator al rotor a través del entrehierro, mediante el principio de la inducción electromagnética [18]. Existen varias formas de calcular esta potencia transferida, en este caso se calcula como la potencia disipada en

la resistencia equivalente del circuito paralelo entre la impedancia del rotor y la de magnetización.

$$Z_{eq_k} = \frac{k \cdot jX_m \left(k \cdot jX'_{2k} + \frac{R'_{2k}}{s_k} \right)}{k \cdot jX_m + k \cdot jX'_{2k} + \frac{R'_{2k}}{s_k}} = \text{Re } q_k + jX_{eq_k} \quad (2.9)$$

$$P_{g_k} = 3 \cdot I_{1k}^2 \cdot \text{Re } q_k \quad (2.10)$$

Donde:

Z_{eq_k} : Impedancia equivalente del circuito paralelo existente entre la rama del rotor y la de magnetización (Ω).

$\text{Re } q_k$: Parte real de la impedancia equivalente (Ω).

X_{eq_k} : Parte imaginaria de la impedancia equivalente (Ω).

P_{g_k} : Potencia transferida a través del entrehierro (W).

10-Cálculo de la potencia desarrollada

Esta potencia es la que desarrolla el motor e incluye las pérdidas rotacionales, y puede calcularse de la forma siguiente:

$$P_{des_k} = (1 - s_k) \cdot P_{g_k} \quad (2.11)$$

11-Momento desarrollado

Con la potencia desarrollada calculada para un estado de carga dado puede obtenerse el momento desarrollado como:

$$M_{des_k} = \frac{P_{des_k}}{\omega_{sk}} \quad (2.12)$$

Siendo:

M_{des_k} : Momento desarrollado bajo la influencia del armónico k, en (N-m).

ω_{sk} : Velocidad sincrónica del campo para el armónico k (rad/seg)

Esta última se determina mediante la expresión siguiente:

$$\omega_{sk} = \frac{4 \cdot \pi \cdot f_{1k}}{p} \quad (2.13)$$

Donde:

f_{1k} : Frecuencia de la onda de alimentación del armónico k (Hz).

p : Número de polos de la máquina.

12-Indicadores generales

Para determinar indicadores generales del motor alimentado con diferentes formas de onda se hace necesario superponer los efectos individuales obtenidos para cada una de las componentes armónicas analizadas. El momento y la potencia desarrollados totales por el motor, cuando se considera la incidencia de los tres armónicos superiores principales, se calculan a través de las expresiones matemáticas siguientes:

$$M_{des} = M_{des1} - M_{des5} + M_{des7} \quad (2.14)$$

$$P_{des} = P_{des1} - P_{des5} + P_{des7} \quad (2.15)$$

Siendo:

M_{des} : Momento total desarrollado por el motor.

M_{des1} : Momento desarrollado por el primer armónico.

M_{des5} : Momento desarrollado por el quinto armónico.

M_{des7} : Momento desarrollado por el séptimo armónico.

P_{des} : Potencia total desarrollada por el motor.

P_{des1} : Potencia desarrollada por el primer armónico.

P_{des5} : Potencia desarrollada por el quinto armónico.

P_{des7} : Potencia desarrollada por el séptimo armónico

Las pérdidas de cobre se hallan como la suma de las pérdidas eléctricas producidas por cada componente armónica.

13-Cálculo de la eficiencia

Tal como se planteó en las consideraciones iniciales, las pérdidas rotacionales se desprecian para este trabajo, por tanto será considerada la potencia desarrollada como la potencia de salida del motor. Luego la eficiencia puede calcularse como:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{sal} + P_{érd}} \quad (2.16)$$

Siendo:

P_{sal} : Potencia de salida del motor.

$P_{érd}$: Pérdidas eléctricas totales del motor.

No se encontró sentido práctico al cálculo de la eficiencia del motor alimentado por cada armónico en particular, por lo que se evaluó este indicador cuando el motor se encontraba bajo la influencia de todos los armónicos en su operación.

2.6 Presentación de los resultados

La aplicación desarrollada posee la facilidad de mostrar la mayoría de los resultados obtenidos de forma gráfica, con esto se contribuye a una mejor comprensión de los

mismos por parte del usuario. Para ello se utiliza la ventana principal del programa, mostrada en la figura 2.12. Ella facilita la representación gráfica de las características de comportamiento del motor obtenidas a partir de los cálculos realizados por el programa ante las diferentes formas de ondas. Además ofrece la posibilidad de ver en un mismo gráfico características de comportamiento pertenecientes a un mismo orden de armónico proveniente de distintas ondas. Por otro lado, si se desea observar el comportamiento del motor cuando están incidiendo todos los armónicos de una misma onda, debe activarse el botón “Características generales” y a continuación seleccionar alguno de los botones situados en la parte inferior izquierda de la ventana.

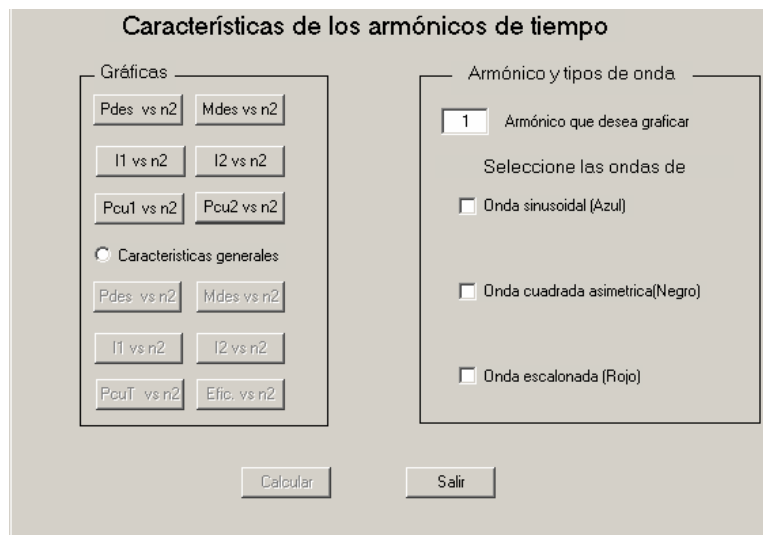


Fig. 2.12 Ventana principal del programa

Por ejemplo, para observar la característica de potencia desarrollada contra velocidad del motor de ranuras profundas cuando es energizado por una forma de onda sinusoidal, solo hay que marcar esta onda en el *checkbox* correspondiente y presionar el botón “Pdes vs n2” e inmediatamente aparece en pantalla la característica, tal como puede observarse en la figura 2.13.

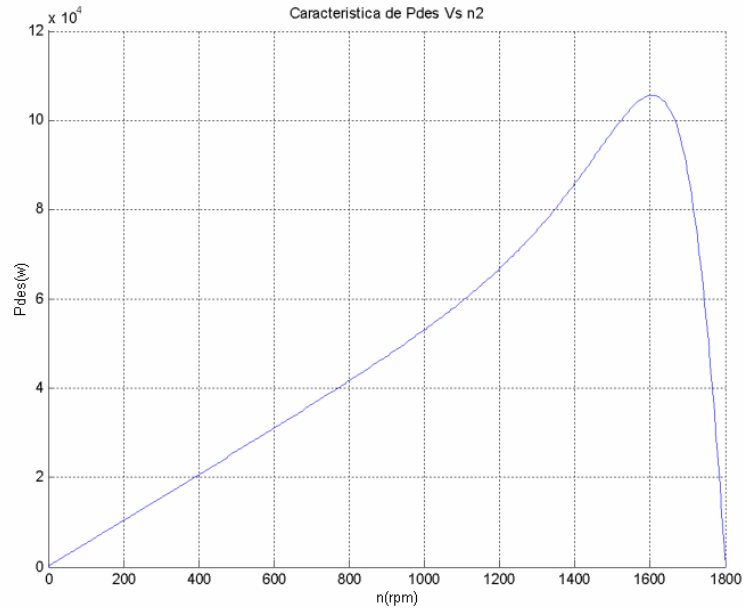


Fig. 2.13 Característica de potencia desarrollada contra velocidad (onda seno)

Si quisiera observarse el comportamiento del motor doble jaula alimentado con una onda armónica de quinto orden, debe marcarse cualquiera de las formas de onda no sinusoidales que aparecen en la parte inferior derecha de la ventana de resultados (figura 2.12) y escribir el número 5 en el cuadro: “Armónico que desea graficar”, seguidamente aparece en pantalla un gráfico como el mostrado en la figura 2.14 donde se representa la característica de momento desarrollado por el quinto armónico contra velocidad del motor para el caso de la onda cuadrada asimétrica.

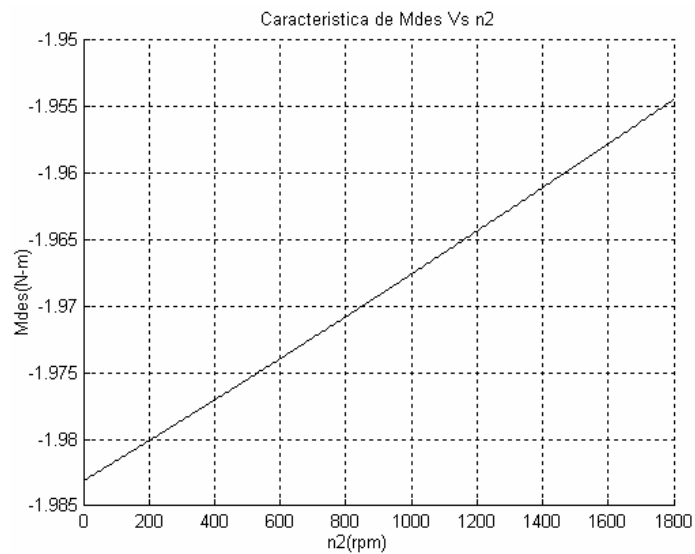


Fig. 2.14 Momento desarrollado por el quinto armónico (onda cuadrada asimétrica)

Otra ventaja del programa como ya se dijo es la de ofrecer la posibilidad de mostrar a la vez características procedentes de distintas formas de ondas. Esta facilidad la ofrece el *Matlab* con el comando *Hold on* . Esto puede constatarse en la figura 2.15 donde están representados las potencias desarrolladas por el primer armónico de las ondas seno, escalón y cuadrada asimétrica para el caso donde son igualados los valores máximos de cada una de estas ondas antes de ser descompuestas en la serie de *Fourier*, esto ocurre para el motor de ranura profunda.

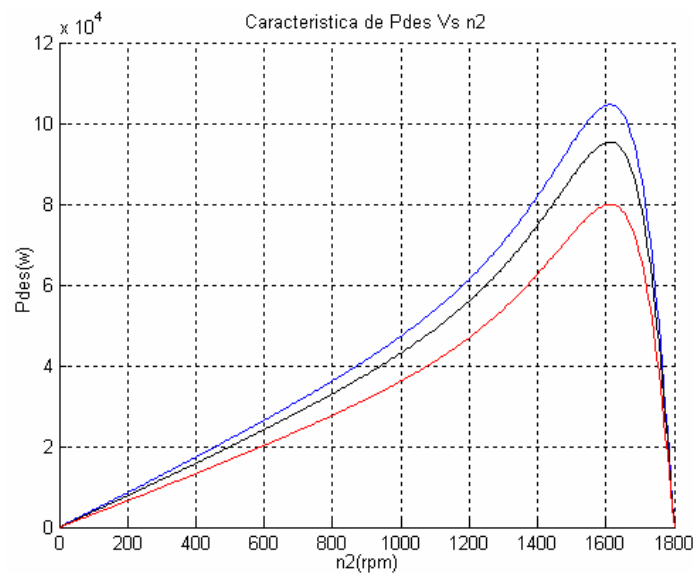


Fig.2.15 Característica de momento contra velocidad de las ondas: seno (azul), cuadrada (negra) y escalonada (roja)

2.3 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se abordó el algoritmo de cálculo utilizado para la confección del programa. La utilización del Matlab como herramienta de cálculo fue de gran ayuda por las facilidades que este software ofrece para los cálculos matemáticos engorrosos como son el cálculo con vectores y números complejos.

También se explican los procedimientos fundamentales implementados en la programación así como las ventanas que sirven de interfaces para el usuario y la muestra de los resultados obtenidos por el programa.

Capítulo 3. Valoración de los armónicos de tiempo en la operación de los motores de doble jaula y de ranuras profundas

3.1 Introducción

En este capítulo se muestran algunos ejemplos que han sido simulados con el objetivo de comprobar la incidencia de los armónicos de tiempo sobre las características de comportamiento de los motores de doble jaula y de ranuras profundas. Para ello se hicieron corridas del programa con motores alimentados desde diferentes formas de onda de alimentación cuyos valores máximos poseen igual amplitud. Los resultados obtenidos posibilitan constatar las variaciones que experimentan los parámetros del circuito equivalente y las características de comportamiento con el efecto pelicular y los armónicos de tiempo superiores.

3.2 Datos de los motores seleccionados

Para poder realizar las corridas del programa con los diferentes motores fue necesario conocer previamente una serie de datos relacionados con las características particulares de cada motor. Para ello se utilizaron los datos de dos motores asincrónicos trifásicos de marca MOTEURS LEROY SOMER de fabricación francesa, uno, con rotor de ranuras profundas, y el otro, con dos jaulas en el rotor.

Con el objetivo de facilitar la introducción de los datos al usuario se muestran también varios esquemas que identifican el tipo de ranura utilizada en el rotor con sus

especificidades, y que son necesarios para poder considerar el efecto pelicular que tiene lugar durante el arranque.

Se muestran a continuación los datos nominales de cada motor, los de su circuito equivalente, así como aquellos específicos que dependen del tipo de jaula que posea cada motor.

- Datos del motor de jaula profunda:

Voltaje: 440V

Conexión: estrella

4 polos

Frecuencia: 60 Hz

Potencia de salida: 50 kW

Resistencia del estator (R_1): 0.0876 Ω /fase

Reactancia del estator (X_1): 0.284 Ω /fase

Reactancia de magnetización (X_m): 16.175 Ω /fase

Resistencia total del rotor (R_2): 0.08264 Ω /fase

Reactancia total del rotor (X_2): 0.4329 Ω /fase

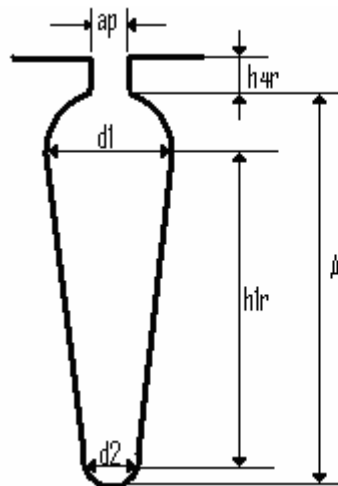
Resistencia de la barra del rotor: 0.04266 Ω /fase

Resistencia del anillo: 0.03998 Ω /fase

Reactancia de la barra: 0.2177 Ω /fase

Otros datos necesarios son:

- resistividad del material de las barras de cobre: 0.037 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$



$A = 34.059 \text{ mm}$
 $d1 = 6.2 \text{ mm}$
 $d2 = 2 \text{ mm}$
 $h1r = 29.959 \text{ mm}$
 $h4r = 0.8 \text{ mm}$

Fig.3.1 Ranura del rotor.

-Datos del motor doble jaula:

Voltaje: 440V

Conexión: estrella

4 polos

Frecuencia: 60 Hz

Potencia de salida: 30 kW

Resistencia del estator (R_1): 0.1285 Ω /fase

Reactancia del estator (X_1): 0.338 Ω /fase

Reactancia de magnetización (X_m): 15.2106 Ω /fase

Resistencia total del rotor (R_2): 0.1427 Ω /fase

Reactancia total del rotor (X_2): 0.83497 Ω /fase

Resistencia de la barra del rotor: 0.1288 Ω /fase

Resistencia del anillo: 0.0139 Ω /fase

Reactancia de la barra: 0.5113 Ω /fase

Otros datos necesarios son:

- resistividad del material de las barras de cobre: 0.037 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

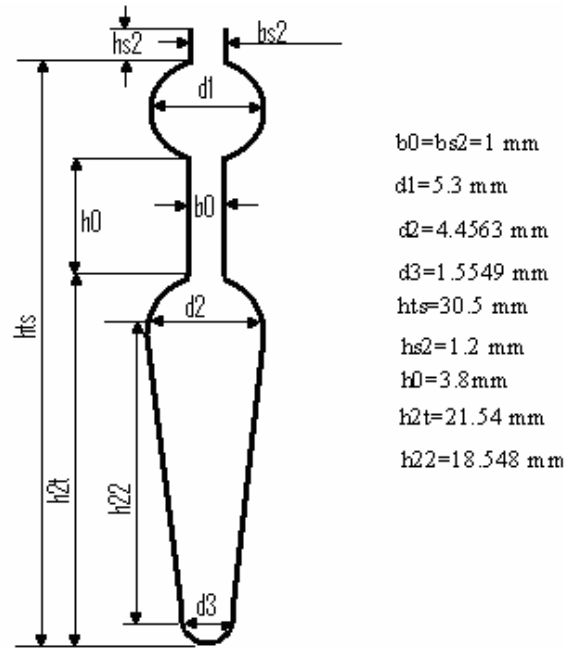


Fig.3.2 Ranura del rotor.

3.3 Características de comportamiento bajo una señal sinusoidal pura

Con los datos del epígrafe anterior y alimentando los motores con una onda sinusoidal pura se obtienen las características siguientes:

- *Motor de ranuras profundas*

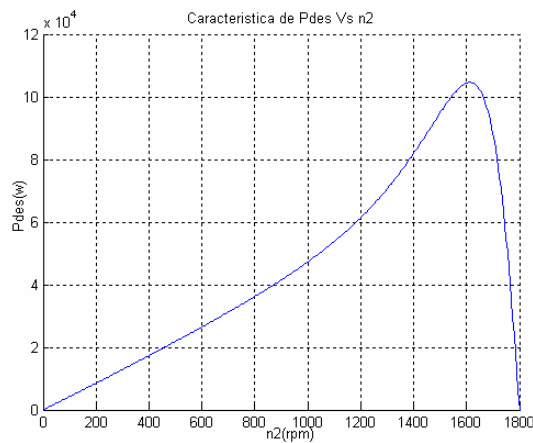


Fig.3.3 Potencia desarrollada por el motor alimentado con la onda seno

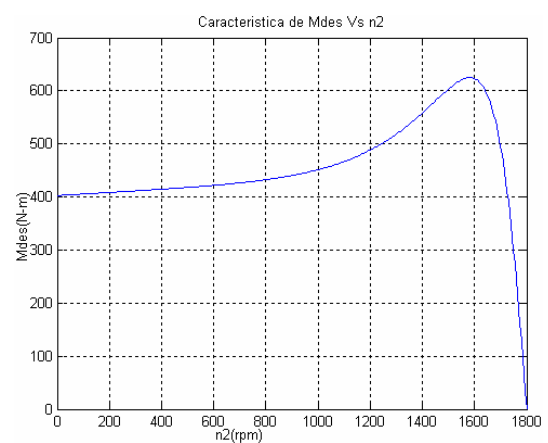


Fig.3.4 Momento desarrollado por el motor alimentado con la onda seno

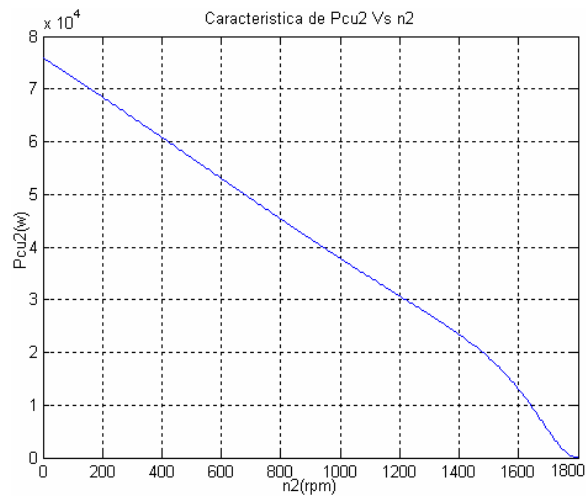


Fig.3.5. Pérdidas de cobre en el rotor del motor alimentado con la onda seno

- Motor de doble jaula

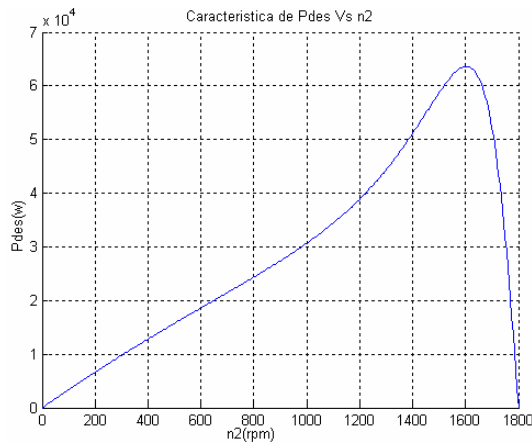


Fig.3.6 Potencia desarrollada por el motor alimentado con la onda seno

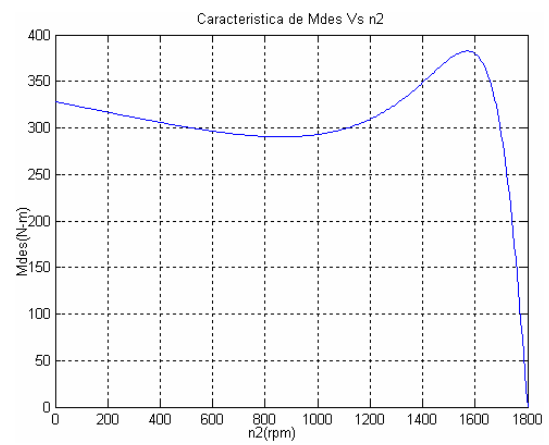


Fig.3.7 Momento desarrollado por el motor alimentado con la onda seno

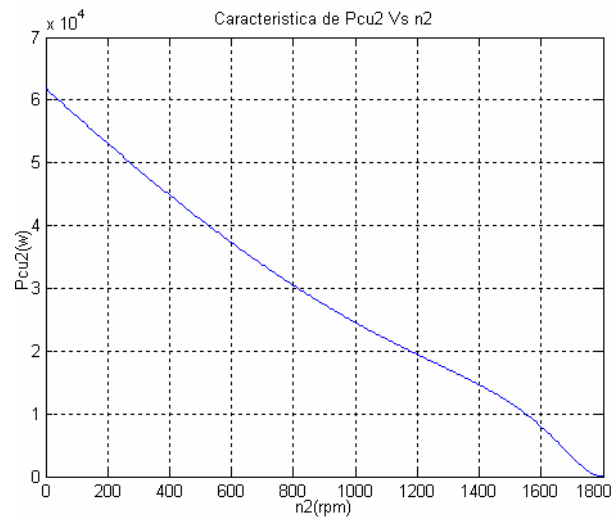


Fig.3.8. Pérdidas de cobre en el rotor alimentado con la onda seno

La carencia de armónicos de tiempo de orden superior en la onda sinusoidal, hace que el funcionamiento del motor esté determinado por el campo magnético creado por la fuerza magnetomotriz de la componente fundamental. En las figuras 3.3 y 3.6 aparecen las características de potencia contra velocidad que corresponden con los modelos establecidos para estos motores [9]. En el caso de las figuras 3.5 y 3.7 se tienen las características mecánicas correspondientes a los motores de ranuras profundas y de doble jaula respectivamente [9]. En ambos casos ocurre un aumento hasta el valor máximo y luego un descenso brusco en la zona de operación.

La tabla 3.1 muestra el momento desarrollado y la corriente de estator del motor de ranuras profundas para algunos puntos específicos de operación como son:

1. En el arranque ($n_2 = 0$).
2. Un punto de operación seleccionado ($n_2 = 1755$ rpm).

Tabla 3.1. Momento desarrollado y corriente de estator para el motor de ranuras profundas.

	Velocidad (rpm)			
	0		1755	
Forma de onda	I ₁ (A)	M _{des} (N-m)	I ₁ (A)	M _{des} (N-m)
Sinusoidal	450.3	402	76.3	273

Según los datos que ofrece la tabla 3.1 y las relaciones establecidas en el epígrafe 1.2 para un motor de ranuras profundas se tiene que: $K_a = 1.473$ y $K_{ai} = 5.9$. Observándose que estas relaciones de momento y corriente respectivamente se encuentran dentro de los límites establecidos, siendo esta la condición de operación nominal pues el motor es alimentado con una onda puramente sinusoidal. En la tabla 3.2 se muestran los valores del momento desarrollado y la corriente de estator del motor de doble jaula para los mismos puntos que fueron tomados en el caso anterior:

Tabla 3.2. Momento desarrollado y corriente de estator para el motor de jaula profunda

	Velocidad (rpm)			
	0		1755	
Forma de onda	I ₁ (A)	M _{des} (N-m)	I ₁ (A)	M _{des} (N-m)
Sinusoidal	269	328	47	159

En este caso las relaciones de momento y corriente respectivamente arrojaron los resultados siguientes: $K_a = 2.06$ y $K_{ai} = 5.72$, representando también valores dentro de los márgenes establecidos, debido a la forma de onda utilizada para la alimentación del motor.

3.4 Análisis de los motores alimentados con las ondas cuadrada asimétrica y escalonada

Los armónicos de tiempo, presentes en las formas de ondas de voltaje distorsionadas, provocan en los motores de jaulas especiales un incremento del efecto pelicular con el

aumento de la frecuencia. Esto a su vez, origina un incremento de las pérdidas y una disminución de la eficiencia y la potencia desarrollada por el motor en toda su zona de operación.

En este epígrafe se analizan independientemente la incidencia de los armónicos primero, quinto y séptimo procedentes de las formas de ondas: escalonada y cuadrada asimétrica. También se muestran los resultados globales para cuando están presentes estos tres armónicos y se establecen comparaciones entre los distintos tipos de ondas.

3.4.1 Incidencia del primer armónico sobre el comportamiento de los motores

El primer armónico es el de mayor amplitud y por tanto es el que más potencia y momento desarrolla, determinando en mayor medida el comportamiento del motor. Seguidamente se muestran algunas características significativas relacionadas con la componente fundamental procedentes de las ondas cuadrada asimétrica (negra) y escalonada (roja) respectivamente

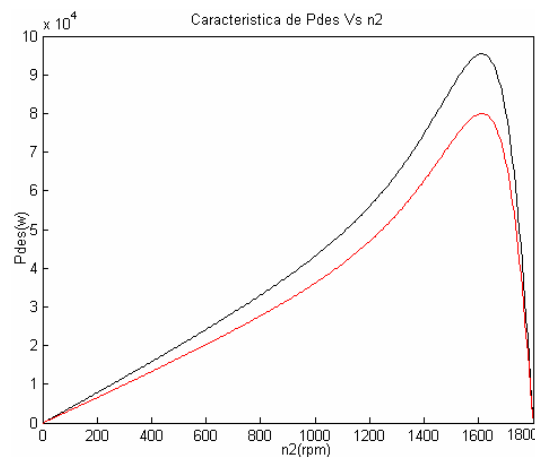


Fig.3.9 Potencia desarrollada por el motor de ranuras profundas

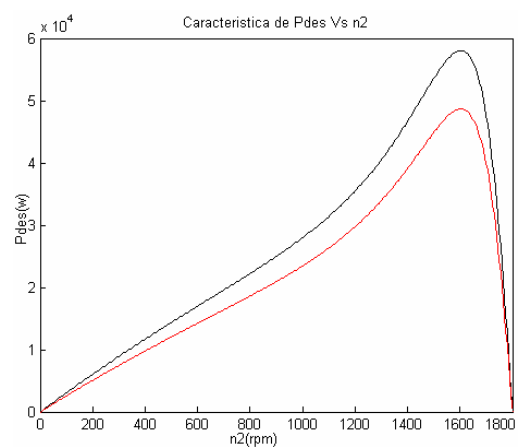


Fig.3.10 Potencia desarrollada por el motor de doble jaula

Como se puede apreciar, en ambos motores la onda cuadrada asimétrica desarrolla una mayor potencia, pues al ser descompuesta en series de Fourier resultó tener una componente de primer armónico de mayor amplitud que el de la onda escalonada.

Sin embargo, si se comparan estos resultados con los obtenidos en las figuras 3.3 y 3.5 se comprueba que la onda sinusoidal es la que más potencia desarrolla, esto se debe a que en esta onda no aparecen armónicos de orden superior y por tanto toda ella forma parte de la componente fundamental.

En las figuras 3.11 y 3.12 aparecen las características de momento desarrollado por cada motor para este primer armónico.

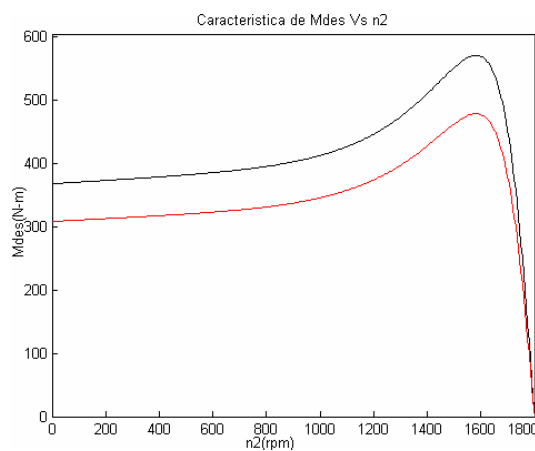


Fig.3.11 Momento desarrollado por el motor de ranuras profundas

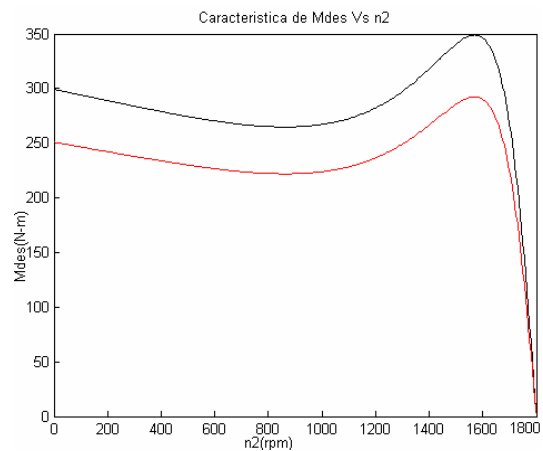


Fig.3.12 Momento desarrollado por el motor de doble jaula

Al igual que sucedió con la potencia desarrollada, la componente fundamental de la onda cuadrada es la que desarrolla mejor momento en toda la zona de operación por tener mayor amplitud que la de la escalonada. Pero si se comparan estos resultados con los obtenidos en las figuras 3.4 y 3.7 de la onda seno se puede corroborar que es esta la que mejor momento desarrolla cuando se encuentra alimentando a dichos motores.

En las figuras 3.13 y 3.14 se muestran el comportamiento de las pérdidas de cobre en ambos motores en toda su zona de trabajo. Se puede apreciar como estas son mayores

en la zona correspondiente al arranque debido al aumento de la corriente y además de la resistencia causado por el efecto pelicular propio de este tipo de motores. Si se establece una comparación de estas ondas con la onda seno se puede notar que esta última es la que mayores pérdidas de cobre posee debido a que la amplitud de la corriente de su componente fundamental es mayor.

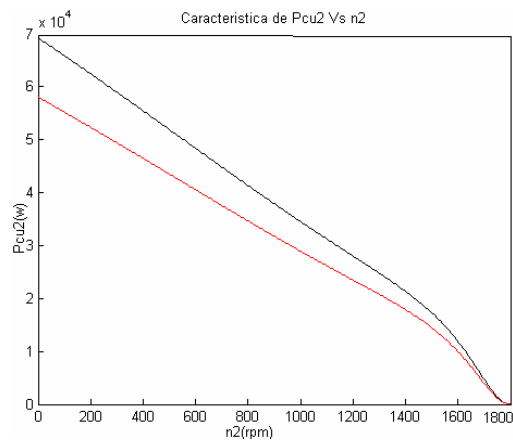


Fig.3.13. Pérdidas de cobre en el rotor para el motor de ranuras profundas

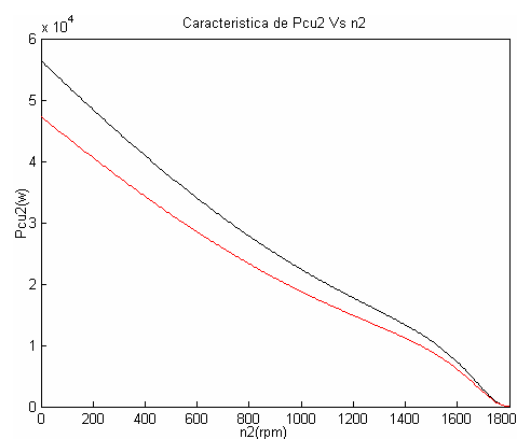


Fig.3.14. Pérdidas de cobre en el rotor para el motor doble jaula

La tabla 3.3 muestra el momento desarrollado y la corriente de estator del motor de ranuras profundas para algunos puntos específicos de operación como son:

1. En el arranque ($n_2 = 0$).
2. Un punto de operación seleccionado ($n_2 = 1755$ rpm).

Tabla 3.3. Momento desarrollado y corriente de estator para el motor de ranuras profundas.

	Velocidad (r/rpm)			
	0		1755	
Forma de onda	I ₁₁ (A)	M _{des1} (N-m)	I ₁₁ (A)	M _{des1} (N-m)
Cuadrada asimétrica	430	367	72	249
Escalonada	393	308	66	209

Los valores de la tabla 3.3 llevados a la relación del epígrafe 1.2 arrojan que $K_{a1} = 1.473$ y $K_{ai1} = 5.9$ para el caso de las dos formas de onda, por lo que demuestra que a pesar de que los valores de corriente y de momento no son los mismos el motor mantiene una misma relación para la componente fundamental de las diferentes formas de onda.

La tabla 3.4 muestra el momento desarrollado y la corriente de estator del motor de doble jaula para algunos puntos específicos de operación como son:

1. En el arranque ($n_2 = 0$).
2. Un punto de operación seleccionado ($n_2 = 1755$ rpm).

Tabla 3.4. Momento desarrollado y corriente de estator para el motor de jaula profunda

	Velocidad (r/rpm)			
	0		1755	
Forma de onda	I ₁₁ (A)	M _{des1} (N-m)	I ₁₁ (A)	M _{des1} (N-m)
Cuadrada asimétrica	257	299	45	145
Escalonada	235	250	41	121

En el caso del motor doble jaula sucede lo mismo que en el motor de ranuras profundas, por lo que también se tiene que $K_{a5} = K_a = 2.06$ y $K_{ai5} = K_{ai} = 5.72$.

3.4.2 Incidencia del quinto armónico sobre el comportamiento de los motores

La componente de quinto armónico de la corriente induce una fmm rotatoria. La velocidad de rotación es -5ω , y significa que la onda está girando a cinco veces la velocidad sincrónica en la dirección opuesta a la componente fundamental dando lugar a una disminución del momento y la potencia de salida de los motores.

Algunas características significativas relacionadas con el quinto armónico de las ondas de alimentación cuadrada asimétrica (negra) y escalonada (roja), se muestran a continuación.

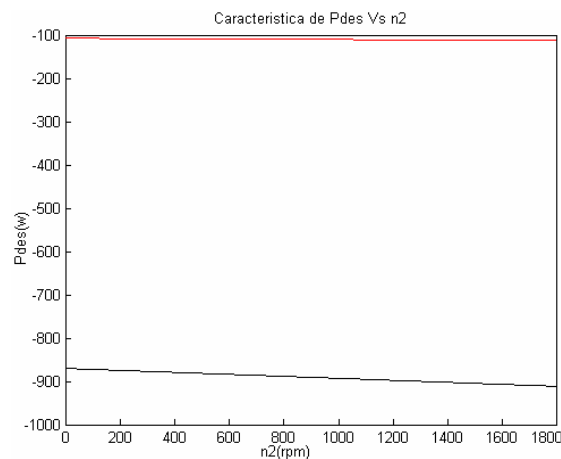


Fig.3.15 Potencia desarrollada por el motor de ranuras profundas

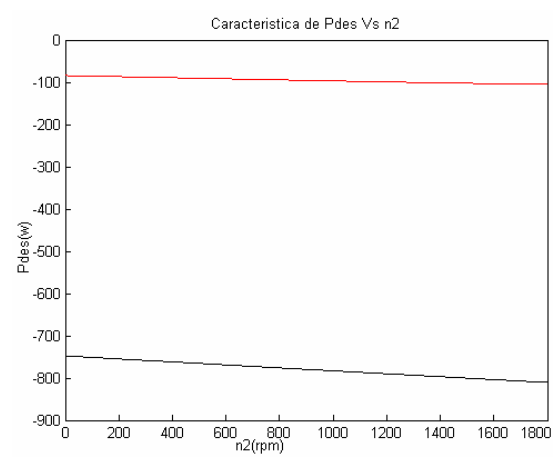


Fig.3.16 Potencia desarrollada por el motor de doble jaula

Como se observa en las figuras 3.15 y 3.16 este armónico desarrolla una potencia negativa, por tanto se le resta a la potencia desarrollada por los demás armónicos

causando así una disminución de la potencia de salida del motor. Según se observa de las características representadas en estas figuras, la potencia desarrollada por el quinto armónico es la mayor negativamente. Esto se debe a que la amplitud de los armónicos de esta onda son de mayor magnitud que los de la onda escalonada.

Esta situación además de suceder en la potencia desarrollada, también esta presente en las características de momento desarrollado que se muestran en las figuras 3.17 y 3.18 respectivamente.

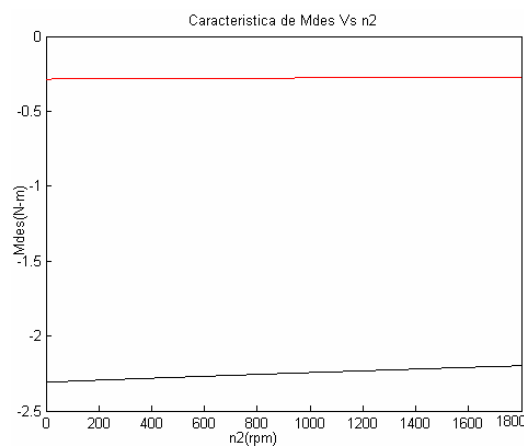


Fig.3.18 Momento desarrollado por el motor de ranuras profundas

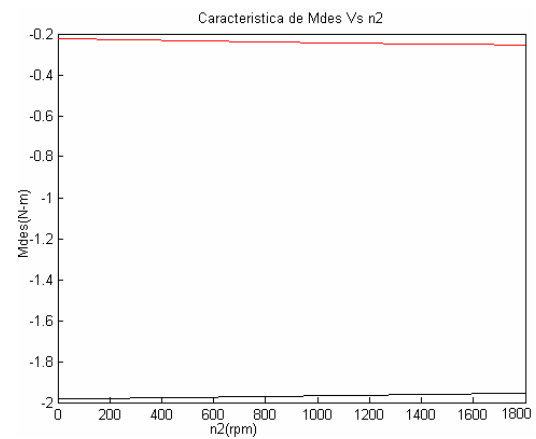


Fig.3.17 Momento desarrollado por el motor jaula profunda

En las características expuestas en las figura 3.17 y 3.18 se observa que el momento desarrollado por el quinto armónico tiene un valor negativo al igual que la potencia desarrollada, llegándose a la conclusión de que este armónico produce un momento de frenaje en toda la zona de trabajo del motor de inducción. En las figuras 3.19 y 3.20 se tienen las características de lo que sucede con las pérdidas de cobre en el rotor bajo la influencia del quinto armónico.

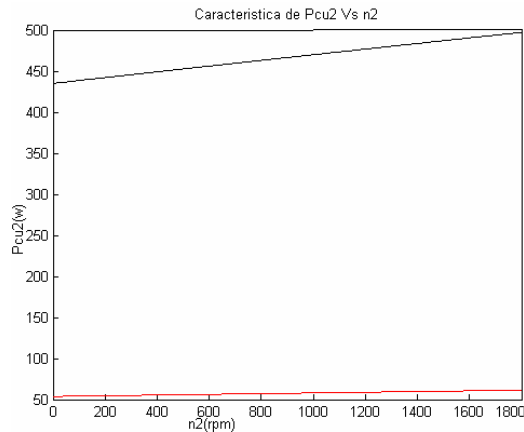


Fig.3.19 Pérdidas de cobre en el rotor para el motor de ranuras profundas

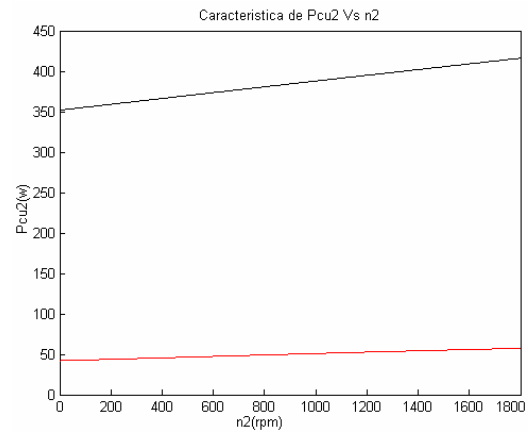


Fig.3.20 Pérdidas de cobre en el rotor para el motor doble jaula

Como se aprecia en las figuras 3.19 y 3.20 en ambos motores existe un incremento en la magnitud de las pérdidas de cobre producidas por el quinto armónico en el rotor, principalmente de la onda cuadrada asimétrica. Esto se debe, tal como se expresó anteriormente; a que la corriente debida al quinto armónico es mayor en la onda cuadrada por tener este armónico mayor amplitud con respecto al de la onda escalonada.

Este incremento está dado por la especial incidencia del efecto pelicular creado por el quinto armónico sobre los parámetros del rotor. Puesto que en la medida que incrementa la velocidad, el deslizamiento del quinto armónico aumenta, trayendo consigo una variación inversa de estos parámetros a como lo hacen en presencia de armónicos que giran en sentido positivo [lucy]. En general, puede afirmarse que las pérdidas de cobre en el rotor constituyen una componente importante en las pérdidas del motor debido al quinto armónico.

La tabla 3.5 muestra el momento desarrollado y la corriente de estator del motor de ranuras profundas para algunos puntos específicos de operación como son:

1. En el arranque ($n_2 = 0$).
2. Un punto de operación seleccionado ($n_2 = 1755$ rpm).

Tabla 3.5. Momento desarrollado y corriente de estator para el motor de ranuras profundas.

	Velocidad (r/rpm)			
	0		1755	
Forma de onda	I ₁₅ (A)	M _{des5} (N-m)	I ₁₅ (A)	M _{des5} (N-m)
Cuadrada asimétrica	24.85	-2.31	25.45	-2.201
Escalonada	8.74	-0.286	8.95	-0.26

Según los valores expuestos en la tabla 3.5 el quinto armónico no desarrolla grandes momentos y mucho menores son para el caso de la onda escalonada, no obstante su valor negativo provoca un momento de frenado que en cierto modo afecta las características de operación del motor. Además como este tiene una frecuencia alta, provoca junto al efecto pelicular el desarrollo de pérdidas en los devanados del motor. Este, sin dudas es el armónico que más daños causa en el rendimiento energético de este tipo de motores.

La tabla 3.6 muestra el momento desarrollado y la corriente de estator del motor de doble jaula para algunos puntos específicos de operación como son:

1. En el arranque ($n_2 = 0$).
2. Un punto de operación seleccionado ($n_2 = 1755$ rpm).

Tabla 3.6. Momento desarrollado y corriente de estator para el motor de ranuras profundas.

	Velocidad (r/rpm)			
	0		1755	
Forma de onda	I ₁₅ (A)	M _{des5} (N-m)	I ₁₅ (A)	M _{des5} (N-m)
Cuadrada asimétrica	16.93	-1.983	17.56	-1.955
Escalonada	5.952	-0.1122	6.17	-0.1106

Muy semejante al motor de ranuras profundas el motor de doble jaula no desarrolla elevados momentos para el quinto armónico pero si son afectadas sus características al igual que su rendimiento energético por el carácter negativo de este armónico.

Se destaca que los valores obtenidos en las tablas 3.5 y 3.6 para el arranque sufren pequeñas variaciones hasta la zona de operación del motor ya que se tomó como referencia la velocidad sincrónica del primer armónico y en ese rango el deslizamiento para el quinto armónico varía poco.

3.4.3 Incidencia del séptimo armónico sobre el comportamiento de los motores

Estos armónicos actúan en el mismo sentido que el armónico fundamental, pero no son del todo beneficiosos ya que provocan pérdidas de cobre tanto en el estator como en el rotor y pérdidas de núcleo. Estos armónicos ayudan a contrarrestar el efecto de frenaje producido por el quinto armónico.

Las figuras 3.21 y 3.22 muestran las características de potencia desarrollada por el séptimo armónico de los motores de ranuras profundas y de doble jaula respectivamente.

-Onda cuadrada asimétrica (negra)

-Onda escalonada (roja)

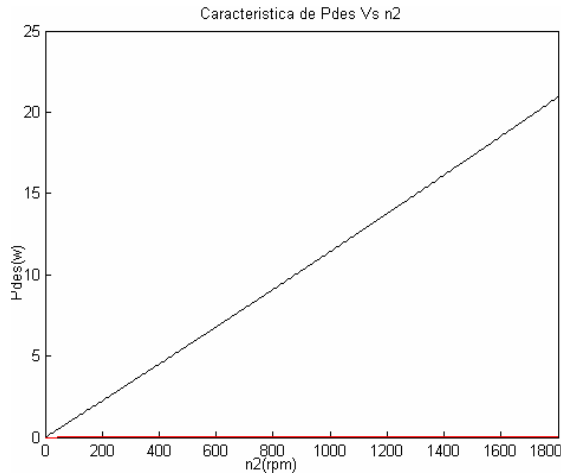


Fig.3.21 Potencia desarrollada por el motor de ranuras profundas

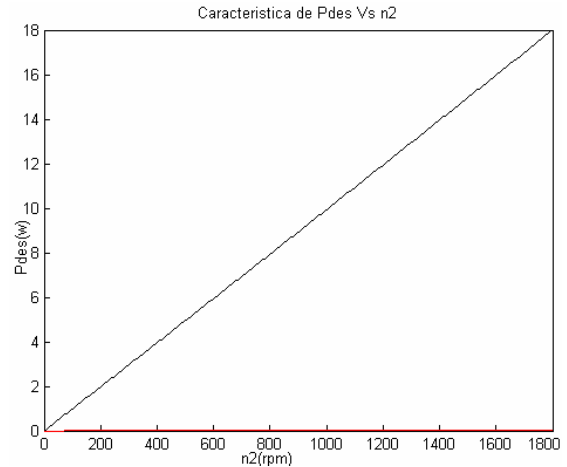


Fig.3.22 Potencia desarrollada por el motor de doble jaula

Como se muestra en las figuras 3.21 y 3.22 el séptimo armónico desarrolla una potencia positiva en toda la zona de trabajo de estos motores. En estos casos los valores de la onda escalonada tienen magnitudes muy pequeñas por lo que son casi despreciables. Esto se debe a que en la descomposición en series de Fourier el valor de la componente del séptimo armónico de la onda escalonada es muy pequeño, ya que esta se asemeja más a la onda sinusoidal que la cuadrada asimétrica.

En el caso de los momentos desarrollados ocurre lo mismo que en las potencias desarrolladas, esto se puede constatar en las figuras 3.23 y 3.24 respectivamente.

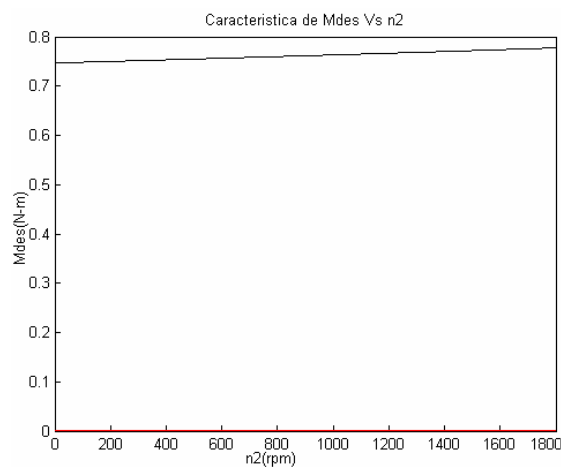


Fig.3.23 Momento desarrollado por el motor de ranuras profundas

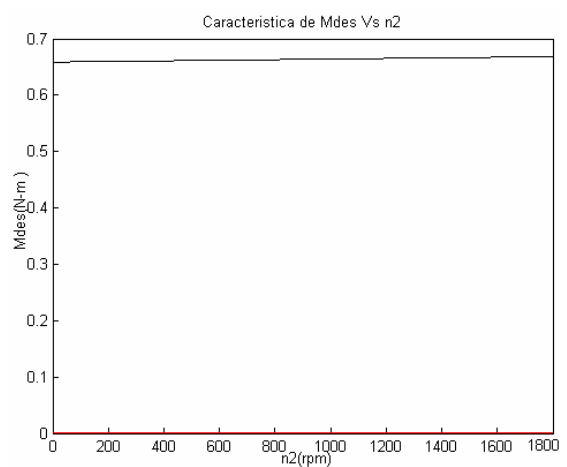


Fig.3.24 Momento desarrollado por el motor de doble jaula

El comportamiento de las pérdidas de cobre debidas a este armónico es mostrado en las figuras 3.25 y 3.26 para los motores de jaula profunda y doble jaula respectivamente.

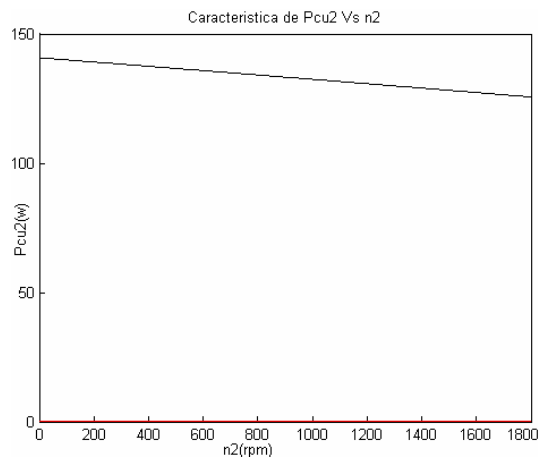


Fig.3.25 Pérdidas de cobre en el rotor para el motor de ranuras profundas

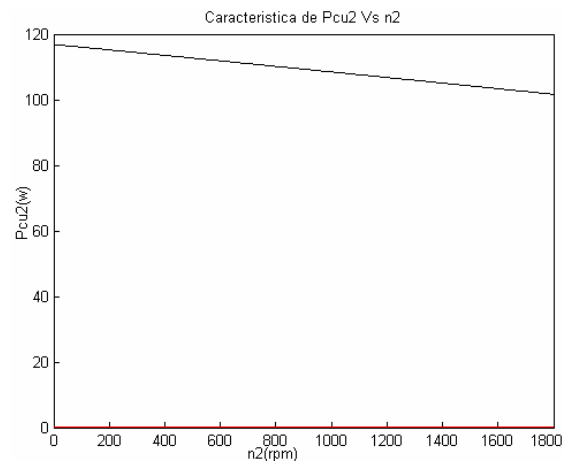


Fig.3.26 Pérdidas de cobre en el rotor para el motor de doble jaula

Como se puede apreciar los valores correspondientes a las pérdidas provocadas por el séptimo armónico procedente de la onda escalonada son prácticamente insignificantes. Sin embargo, los de la onda cuadrada asimétrica producen pérdidas mayores debido primeramente, a que la amplitud de este armónico es mayor que el de la onda escalonada y por tanto provoca la circulación de corrientes mayores por el rotor de la máquina. Y en segundo lugar al incremento de la resistencia del rotor debido al efecto pelicular creado por la alta frecuencia de este armónico.

En las tablas 3.7 y 3.8 se pueden observar los valores de corriente por el estator y del momento desarrollado para el séptimo armónico de ambas ondas cuando alimentan a los motores de jaula profunda y doble jaula respectivamente.

Tabla 3.7. Momento desarrollado y corriente de estator para el motor de ranuras profundas.

	Velocidad (r/rpm)			
	0		1755	
Forma de onda	I ₁₇ (A)	M _{des7} (N-m)	I ₁₇ (A)	M _{des7} (N-m)
Cuadrada asimétrica	13.1	0.746	12.81	0.77
Escalonada	$8.75 \cdot 10^{-7}$	$3.36 \cdot 10^{-15}$	$8.6 \cdot 10^{-7}$	$3.48 \cdot 10^{-15}$

Para el caso de este séptimo armónico los valores de corriente y momento son más pequeños que los del quinto armónico pero como estos giran en sentido positivo ayudan a contrarrestar en cierta medida el efecto negativo del quinto armónico. Sin embargo, es importante señalar que debido a su alta frecuencia este armónico es capaz de producir pérdidas que afectan el rendimiento energético del motor.

Tabla 3.8. Momento desarrollado y corriente de estator para el motor de doble jaula.

	Velocidad (r/rpm)			
	0		1755	
Forma de onda	I ₁₇ (A)	M _{des7} (N-m)	I ₁₇ (A)	M _{des7} (N-m)
Cuadrada asimétrica	8.96	0.658	8.68	0.668
Escalonada	$6 \cdot 10^{-7}$	$1.35 \cdot 10^{-15}$	$5.8 \cdot 10^{-7}$	$1.37 \cdot 10^{-15}$

Puede apreciarse también en las tablas 3.7 y 3.8 que los valores obtenidos para el arranque permanecen prácticamente constantes hasta la zona de operación del motor ya que se tomó como referencia al igual que en el quinto armónico la velocidad sincrónica del primer armónico y en ese rango el deslizamiento para el séptimo armónico casi no varía.

3.5 Resultados generales de los motores energizados con los diferentes tipos de ondas

Del análisis realizado anteriormente para cada una de las ondas utilizadas se puede notar la diferencia que existe en la magnitud e incidencia de cada armónico en particular procedente de distintas formas de ondas. Si se quisiera apreciar la repercusión general de estos armónicos en el comportamiento del motor podría utilizarse el método de la superposición. Este consiste en superponer los efectos individuales obtenidos de las características de operación para cada una de las componentes armónicas analizadas.

A continuación son mostrados una serie de resultados tabulados que permiten apreciar el comportamiento de los motores analizados cuando están presentes los armónicos de primer, quinto, y séptimo orden. Para ello se tomaron los valores obtenidos para una velocidad de operación cercana a la nominal cuando son alimentados estos motores por las ondas: seno, cuadrada asimétrica y escalonada.

Al analizar los resultados de las tablas 3.9 y 3.10 se comprueba que para ambas variantes de motor, la onda sinusoidal es la que le permite desarrollar los mayores valores de potencia, momento, eficiencia y factor de potencia, lo cual es lógico, pues al no tener armónicos de orden superior se eliminan los efectos perjudiciales que estos provocan en los parámetros de estos motores. Estos efectos pueden apreciarse en los resultados obtenidos cuando el motor es alimentado con la onda cuadrada asimétrica, la cual presenta las mayores pérdidas y los menores valores de eficiencia y factor de potencia. Esto, como se sabe, es debido al fuerte contenido de armónicos que presenta este tipo de onda y perjudica su rendimiento energético. Otros resultados se muestran en las tablas 3.11 y 3.12 donde se expresan los valores en por ciento tomando como referencia la onda sinusoidal. También de estas tablas se puede tener una noción a modo comparativo de la influencia del tipo de onda para cada motor, es válido aclarar que esta sería una comparación superficial puesto que la potencia de salida no es la misma en ambos casos.

Tabla 3.9 Influencia de la forma de onda del voltaje en magnitudes del motor de ranuras profundas para velocidad (1755 r/min)

Forma de onda	I_1 (A)	I_2 (A)	P_{des} (kW)	M_{des} (N-m)	P_{CUT} (kW)	η (%)	$\cos\theta$
Sinusoidal	75.44	72.2	50.2	273	2.78	94.75	0.92
Cuadrada.asimétrica	94.64	86.01	44.9	247.7	3.54	92	0.717
Escalonada	67.01	65.08	38.27	208.6	2.22	94	0.868

Tabla 3.10 Influencia de la forma de onda del voltaje en magnitudes del motor doble jaula para velocidad (1755 r/min)

Forma de onda	I_1 (A)	I_2 (A)	P_{des} (kW)	M_{des} (N-m)	P_{CUT} (kW)	η (%)	$\cos\theta$
Sinusoidal	46.79	41.79	29.15	158.6	1.59	94.8	0.862
Cuadrada.asimétrica	58.82	49.99	25.8	143.42	2.23	91.8	0.632
Escalonada	42.5	37.89	22.246	121.18	1.36	94.6	0.79

Tabla 3.11 Influencia de la forma de onda del voltaje en por ciento del motor de ranuras profundas para velocidad (1755 r/min)

Forma de onda	I₁ (%)	I₂ (%)	P_{des}(%)	M_{des} (%)	P_{CUT} (%)	η(%)	cosθ(%)
Sinusoidal	100	100	100	100	100	100	100
Cuadrada.asimétrica	125.5	119.1	89.44	90.47	127.3	97.09	77.93
Escalonada	88.82	90.14	76.23	76.41	79.85	99.20	94.34

Tabla 3.12 Influencia de la forma de onda del voltaje en por ciento del motor doble jaulas para velocidad (1755 r/min)

Forma de onda	I₁ (%)	I₂ (%)	P_{des} (%)	M_{des} (%)	P_{CUT} (%)	η(%)	cosθ(%)
Sinusoidal	100	100	100	100	100	100	100
Cuadrada.asimétrica	125.7	119.62	88.50	90.39	140.2	96.83	73.31
Escalonada	90.83	90.66	76.50	76.38	85.53	99.78	91.64

Tal como se ha visto hasta el momento los armónicos de orden superior inciden desfavorablemente en los indicadores energéticos de los motores que operan con carga.

Por otra parte se tiene que el efecto de la alimentación con los diferentes tipos de onda causan efectos muy similares para ambas variantes de motores puesto que los porcentajes de variación expresados en las tablas 3.10 y 3.12 tienen una gran similitud entre ellos.

3.6 Consideraciones finales del capítulo

Después de realizar diferentes corridas por la aplicación se obtienen características que describen el comportamiento de los motores doble jaula y de ranuras profundas. Los valores expresados en gráficas y de forma tabular. Se comprobó que la forma de onda de la señal determina la magnitud de los armónicos superiores, en este caso la onda cuadrada asimétrica presenta las componentes armónicas de mayor amplitud. Esto a su vez determina que presente las mayores pérdidas eléctricas y por tanto una menor eficiencia. Se apreció además, que en ambos motores el efecto de las diferentes ondas de alimentación es muy similar solo con pequeñas diferencias en las pérdidas de cobre totales y en el factor de potencia. En general cuando el motor es alimentado por una señal no sinusoidal existe una degradación de los indicadores energéticos.

Conclusiones

En el trabajo desarrollado, se ha analizado la influencia de los armónicos de tiempo en el comportamiento de los motores asincrónicos trifásicos de ranuras profundas y doble jaula a través de un modelo circuital común a ambos y considerando el efecto pelicular sobre los parámetros del rotor como una función del deslizamiento, su geometría y el orden del armónico de tiempo, en toda la zona de operación motora.

Se implementó el algoritmo en Matlab capaz de graficar señales no sinusoidales y descomponerlas en series de Fourier para determinar la amplitud de cada armónico de tiempo en el voltaje y obtener el efecto de cada armónico de tiempo para determinar las características de comportamiento en los motores asincrónicos de rotores especiales.

De los resultados obtenidos se tiene que:

- La relación entre los valores obtenidos en el arranque y a la velocidad de operación de la corriente y el momento desarrollado por estos motores permanece prácticamente invariable, cuando son analizados los primeros armónicos procedentes de las distintas señales de alimentación utilizadas.

- Muy semejante al motor de ranuras profundas el motor de doble jaula no desarrolla elevados momentos para el quinto armónico pero sí son afectadas sus características al igual que su rendimiento energético por el carácter negativo de este armónico.
- Se pudo comprobar que los valores correspondientes a las pérdidas provocadas por el séptimo armónico procedente de la onda escalonada son prácticamente insignificantes. Sin embargo, las de la onda cuadrada asimétrica producen pérdidas mayores debiéndose principalmente a la amplitud de la corriente de este armónico procedente de este tipo de onda.

Recomendaciones

- Incorporar a la aplicación opciones que determinen el comportamiento para las diferentes geometrías de ranuras que aparecen tanto en el motor de doble jaula como en el de ranuras profundas.
- Debe incorporarse a la aplicación un procedimiento capaz de descomponer las señales reales de salida de los convertidores electrónicos.
- Incluir en la modelación matemática el efecto de la saturación magnética, la cual tiene una alta incidencia en la zona de alto resbalamiento.
- Dar respuesta al tratamiento de las pérdidas rotacionales en toda la zona de velocidad establecida en la aplicación.
- Valorar la factibilidad de modelar el efecto de los armónicos superiores de tiempo sobre las pérdidas magnéticas de estos motores.

Referencias Bibliográficas

- [1]. Ramos Martínez, Arian. Incidencia de Armónicos de Tiempo en el Comportamiento del Motor Asincrónico Trifásico. Trabajo de Diploma. Dpto. Electroenergética, Fac. Ing. Eléctrica, UCLV, Cuba, 2004.
- [2]. García M. et al (2003) Influencia de los Armónicos de Tiempo en la Eficiencia de las Máquinas Asincrónicas Trifásicas. Memorias Digitales del XI Simposio de Ingeniería Eléctrica. Noviembre 2003.
- [3]. Noriega Stefanova E. Generalidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía. [en línea] Accesible en <http://www.monografias.com/trabajos21/armonicos/armonicos.shtml> Consultado (15-3-05).
- [4]. Hernández Izquierdo Darío. Motores asincrónicos trifásicos de doble jaula. Trabajo de Diploma. Dpto. Electroenergética, Fac. Ing. Eléctrica, UCLV, Cuba, 1968
- [5]. Arrillaga J. L. I. Eguíluz. Armónicos en Sistemas de Potencia. Servicio de publicaciones de la Universidad de Cantabria, Santander. (1994).
- [6]. Murphy J. M. D., Turnbull F. G. Power Electronic Control of AC Motors, Pergamon Press. (1998).
- [7]. McPherson George, Laramore Robert D. An Introduction to Electrical Machines and Transformers. Second Edition. Reimpreso en Cuba. 571 pp.

- [8]. Corrales Martín J. Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas Tomo II. Ediciones Técnicas DANAE. 561 pp.
- [9]. Voldek A. I. Máquinas Eléctricas. Tomo I y II. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, (1985): 431 pp.
- [10]. Rashid Muhammad H. Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones. Prentice-Hall Hispanoamericana, SA. (1993).
- [11]. Baur, A.K. A New Equivalent Circuit for Double-Cage INduction Motor. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. (New York), Vol PAS-89, No 7. Septiembre-October 1970. p1540-1545.
- [12]. Chapman Stephen J. Máquinas Eléctricas. Segunda Edición. Mc Graw-Hill. 740 pp.
- [13]. Aplicación en *Matlab* para el Motor de Inducción. [en línea]. Accesible en http://64.233.187.104/search?q=cache:jDCRX9JnadoJ:zeus.dci.ubiobio.cl/electricidad/cuba/aplic_matlab_motor_induccion.pdf+efecto+pelicular+en+motores&hl=en&ie=UTF-8
- [14]. Kostenko M., Piotrovsky L. Máquinas Eléctricas. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, (1968): 713 pp.
- [15]. Slemon G., Straughen A. Electric Machines. Addison-Wesley Publishing Co. Canadá, (1982): 575 pp.
- [16]. Ivanov - Smolenski, A. V. Máquinas Eléctricas. En 3 tomos. Editorial MIR Moscú, (1984): 1200 pp.
- [17]. Rovira Carralero, Lucy. Aplicación Computacional para el Analisis del Efecto Pelicular y los Armonicos de Tiempo en los Motores Trifasicos Asimetricos. Trabajo de Diploma. Dpto. Electroenergética, Fac. Ing. Eléctrica, UCLV, Cuba, 2005
- [18]. Langsdorf Alexander. Principios de las Máquinas de Corriente Alterna. Sexta edición. Ediciones del Castillo S.A. España, (1968): 371 pp.

- [19]. Fitzgerald, A. E. *Electric Machinery; The Dynamics and Statics of Electromechanical Energy Conversion.* / A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley.—2 ed. —La Habana: Edición Revolucionaria, 1970.—568p
- [20]. Ananías J. L. *Armónicas.* [en línea] Accesible en <http://internal.dstm.com.ar/sites/mm/articulos/9armonicas.asp>. Consultado 23-2-05
- [21]. Eguíluz L.I *Circuitos en Régimen No-Sinusoidal.* Artículo. Dpto de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. (2001). pp55
- [22]. Argel, Philip. *The Nature of Induction Machines.* Philip Argel. New York: Gordon and Breach, 1965.—516p
- [23]. Petrov, V.M. *Motores Asíncronos de Propósitos Generales.* V.M. Petrov, A.E. Krovchik.—Moscú: Energía, 1980.—488p