

Prefacio

El presente texto desarrolla por completo la asignatura de Máquinas Eléctricas que se ofrece en el instituto universitario de tecnología informática IUTepi para la especialidad de Electrónica, pero su contenido es tal que puede ser perfectamente asimilado también por los alumnos de las especialidades de Eléctrica y Mecánica, que deseen obtener un buen conocimiento de las máquinas eléctricas.

Los primeros tres capítulos son introductorios al estudio de las máquinas eléctricas y en ellos se representan las características generales de las máquinas eléctricas estáticas y rotativas y los materiales empleados para su construcción.

En capítulos siguientes se ve en forma amplia la teoría y aplicaciones de los transformadores monofásicos, trifásicos y autotransformadores. El texto desarrolla la teoría de las máquinas eléctricas rotativas en régimen permanente, utilizando los métodos convencionales que han demostrado ser más didácticos para los estudiantes que se inician en el estudio de las máquinas eléctricas. Estos métodos permiten dar un conocimiento real de la máquina a partir del cual se obtienen fácilmente los circuitos equivalentes y las expresiones matemáticas que permiten el análisis riguroso en estado estable.

En los últimos capítulos se hace un resumen de los métodos de control de velocidad de las máquinas rotativas de corriente continua y corriente alterna que se están usando actualmente. Se complementa la elaboración de éste libro con la presentación de un software interactivo de simulación digital de obtención de curvas características internas y externas de los tipos de máquinas de corriente continua y alterna tratadas en el contenido del ebook.

Contenido del programa de estudios

- Principios Generales de Máquinas Eléctricas.
- El Transformador.
- Principios de Operación de las Máquinas Eléctricas.
- Máquinas de Corriente Continua.
- Máquinas de Corriente Alterna.
- Máquinas Síncrona
- Máquinas de Inducción.

Introducción

Hoy es difícil tener cierto interés en la electrónica sin que se esté interesado también, en una forma u otra, en el magnetismo o el electromagnetismo. Considérense, por ejemplo, las muchas aplicaciones del electromagnetismo en los receptores modernos de televisión con sus bocinas, imán de centrado, imanes de pureza y enfoque, yugo de reflexión y varios tipos de transformadores y reactores. En otras ramas de la electrónica, como por ejemplo en el campo de las computadoras o instrumentos de navegación (por mencionar solo dos) está bien establecida la importancia del magnetismo y del electromagnetismo. La

industria electrónica es dependiente del apoyo prestado por las compañías que se especializan en la fabricación de materiales magnéticos y electromagnéticos, y de otros componentes.

Principios Generales de las Maquinas Eléctricas.

Imanes naturales y artificiales

Los imanes naturales se encuentran en forma de depósitos de materiales conocidos como magnetitas, o con más frecuencia piedra imán. Esta forma de sustancia magnética se conoce desde el año 600 d.c. Cualquier otro tipo de imán es artificial. Los primeros imanes artificiales fueron hechos por contacto de piezas de hierro con magnetita. Incluso hoy, para aplicaciones menores, se pueden hacer ocasionalmente, imanes por medio del frotamiento suave de una pieza de hierro o acero con cualquier imán de que se disponga.

Si una pieza de hierro dulce se magnetiza por inducción a partir de una fuente magnética, pierde rápidamente la mayor parte de su magnetismo inducido después de que la fuente magnetizante se retira. Sin embargo, si una piedra de acero templado o hierro colado se magnetiza, el magnetismo inducido permanecerá durante un tiempo extremadamente largo

Los materiales magnetizados que pierden rápidamente la mayor parte de su magnetismo inducido se llaman imanes temporales. Los que retienen su magnetismo se denominan imanes permanentes

Los imanes permanentes se hacen de hierro forjado, acero templado o a partir de varios tipos de aleaciones de acero utilizados para imanes permanentes de altavoces y de medidores eléctricos.

En la figura a continuación se muestra una variedad de imanes permanentes que se utilizan para hacer motores eléctricos y otros tipos de componentes eléctricos y electrónicos.



Materiales Magnéticos

Cuándo se habla de materiales magnéticos, normalmente la referencia es a sustancias que son fuertemente atraídas por imanes o campos magnéticos. Sustancias de este tipo se denominan ferromagnéticas o ferrimagnéticas. Las sustancias ferromagnéticas son definidas de acuerdo con los diferentes tipos de hierros y aceros, incluyendo los materiales de núcleos de polvo de hierro, que se utilizan en la fabricación de algunas bobinas de radiofrecuencia

Las sustancias ferrimagnéticas son las ferritas y otros óxidos que se utilizan como materiales para los núcleos de bobinas que operan a la frecuencia de las microondas, en transformadores de pulsos de alta frecuencia de las microondas, en transformadores de pulsos de alta frecuencia como el transformador de salida horizontal del televisor, y en la memoria de las unidades de conmutación de las computadoras de alta velocidad

Los materiales magnéticos se pueden clasificar como si fueran magnéticamente blandos o magnéticamente duros. Los materiales magnéticamente blandos son los utilizados en los núcleos de potencia y en los transformadores y reactores de audiofrecuencia. Los materiales magnéticamente duros se utilizan para construir imanes permanentes.

Elementos como el aluminio, cromo, manganeso y el aire, que incluso durante la aplicación de campos magnéticos intensos tienen solamente un efecto de atracción muy débil y raramente detectable, se llaman paramagnéticos. Otros como el bismuto, antimonio, cobre, plata y algunos más, en los cuales la aplicación de campos magnéticos intensos tiene un efecto repulsivo difícilmente perceptible, se llaman diamagnéticos. La mayor parte de los materiales con excepción de aquellos que son ferromagnéticos o ferrimagnéticos, son comúnmente denominados no magnéticos. Los materiales no magnéticos permiten que el magnetismo pase a través de ellos, pero jamás llegan a magnetizarse intensamente.

Polos Magnéticos

Cuando el polo norte de un imán se coloca cerca del polo norte de otro imán, existe entre ellos una fuerza de repulsión. De la misma manera, existe una fuerza de repulsión entre dos polos magnéticos sur, pero un polo norte y un polo sur son fuertemente atraídos.

Esta característica del magnetismo está expresada en la ley de atracción y repulsión magnética, la cual establece que:

Cuando los polos magnéticos son iguales, se repelen entre sí, mientras que aquellos que son diferentes se atraerán mutuamente.

La ley de Coulomb define que la magnitud de atracción o repulsión puede establecerse como sigue

La fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los polos, y directamente proporcional al producto de las intensidades de los polos.

El Polo Magnético Unitario

Para utilizar la ley de Coulomb durante el cálculo, se debe tener algún método específico para designar con precisión la intensidad particular de un polo magnético, en términos de alguna unidad. Esta unidad es el polo unitario, derivado de la ley de Coulomb y basado en el concepto de que dos polos magnéticos de igual intensidad se pueden seleccionar para que cada uno de ellos se repela con respecto al otro con la fuerza de una dina, cuando la distancia entre los polos es exactamente de un centímetro. Por ello, a partir de este concepto, se obtiene la siguiente definición de polo magnético unitario:

De la ley de Coulomb se puede obtener la siguiente ecuación, para calcular la fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos:

$$F = \frac{M_1 * M_2}{d^2}$$

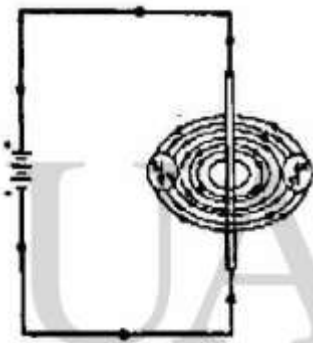
En donde: F = fuerza entre los polos, dinas M_1 = intensidad del primer polo, polos unitarios M_2 = intensidad del segundo polo, polos unitarios d = distancia entre los polos, cm

El Campo Magnético De La Tierra

Por lo que se conoce sobre polos magnéticos, es evidente que la única razón por la cual la brújula magnética funciona, como ya se sabe, es que la misma Tierra forma un imán muy grande con uno de sus polos en el norte, y con el otro precisamente opuesto a él, en el sur. El polo magnético de la Tierra que se encuentra localizado en el Norte geográfico, es realmente un polo sur magnético.

Electromagnetismo

Si una brújula se acerca a un conductor de corriente continua, como se muestra en la figura a continuación la aguja de la brújula en la dirección mostrada. Si la corriente a través del conductor se invierte, la aguja de la brújula girara y apuntara en la dirección opuesta.



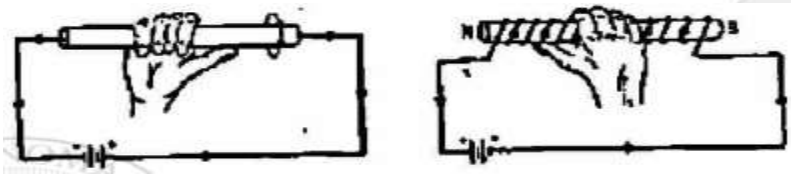
Por consiguiente, puede observarse que un conductor de corriente eléctrica está circundado por un campo magnético. Se dice que el campo magnético sale del imán a través de su polo norte, y entra al imán a través de su polo sur.

En realidad las líneas del campo no se mueven. En vez de ello su dirección está definida como la dirección en que un polo norte unitario se movería si se colocara en el campo. De hecho, no existe un polo norte unitario en la vida real, pero es un concepto imaginario útil para definir la dirección de los campos magnéticos.

La Regla De La Mano Derecha En Campos Magnéticos Alrededor De Alambres.

Para determinar la dirección de un campo magnético que circunda cualquier conductor que conduce corriente se deberá utilizar la siguiente regla:

REGLA: Tómese el alambre en la mano derecha y haga que el dedo pulgar apunte en la dirección convencional de la corriente (es decir, corriente de positivo a negativo) que está circulando a través del alambre. Los demás dedos, entonces, apuntarán en la dirección correspondiente al campo magnético o líneas de fuerza, que rodean al alambre.



Cualquier bobina o solenoide por la que circule una corriente presenta efectos magnéticos, y los efectos magnéticos son siempre de naturaleza bipolar. Cualquier bobina por la que circula una corriente deberá tener siempre dos polos, el norte y el sur. Para determinar la polaridad magnética de una bobina por la que circula una corriente, se utiliza la regla de la mano derecha para bobinas

Unidades De Medición En Magnetismo

Las unidades básicas de medición en electricidad son los amperios, los volts y los ohms. Sería muy conveniente que solamente fueran tres unidades básicas en magnetismo, pero desafortunadamente este no es el caso. Contrariamente, existen varios sistemas de medición, y no hay un sistema universal único. (Se ha sugerido que el sistema mks sea el sistema universal de medición lógico en magnetismo, pero hasta este momento la literatura de los fabricantes estadounidenses no define a sus productos en términos exclusivos del sistema mks.)

Una manera de entender la gran cantidad de unidades para mediciones magnéticas consistiría en describir todas las unidades en un sistema particular. Por ejemplo, el método para la medición del flujo, la densidad de flujo, la fuerza magnetomotriz, etc., en el sistema cgs podría describirse con cuidado, y posteriormente al finalizar la exposición, se podría incluir una tabla de conversión, para cambiar del sistema cgs a cualquier otro sistema

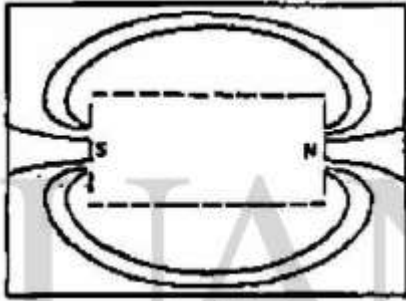
Otro método consiste en describir cada uno de los términos y su unidad de medición en el sistema que describe ese término en particular de la manera más sencilla. De esta manera, se medirá la unidad de

flujo en términos correspondientes al sistema cgs, y la unidad de la Figura 4. Regla de la mano derecha para determinar la polaridad magnética de una bobina. Fuerza magnetomotriz en términos correspondientes al sistema mks. Después se incluirá una tabla para convertir de un sistema a otro.

Flujo Magnético (Φ)

Los campos magnéticos existen en las líneas de fuerza, y se denomina flujo. En el sistema cgs, a cada línea individual del flujo se le denomina maxwell. Si hay tres líneas de flujo, se dice que la cantidad de flujo es de tres maxwell en el sistema cgs, mientras que en sistema inglés simplemente se define como tres líneas. Cuanto más grande sea el número de líneas de flujo, mas fuerte será el campo magnético.

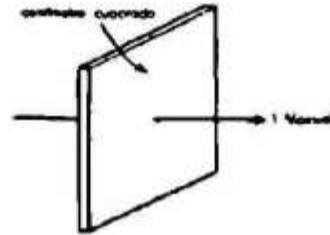
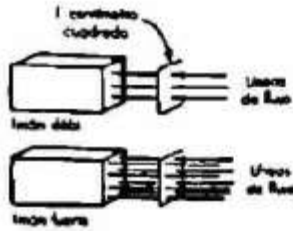
S de flujo, mas fuerte será el campo magnético. Las líneas son imaginarias, y el concepto de líneas de flujo probablemente viene desde la aparición del popular experimento en el que las partículas de hierro limado tienden a alinearse por si mismas en un grupo de líneas



Densidad de flujo (B)

Si una línea de flujo pasa perpendicularmente a través de un centímetro cuadrado de esta página, existirá por lo tanto cierta cantidad de fuerza del campo magnético. Si dos líneas de flujo pasan a través del mismo centímetro cuadrado, la fuerza del campo será por consiguiente, el doble del valor del flujo correspondiente a cuando se tenía solamente una línea. Si tres líneas de flujo pasan a través de ese mismo centímetro cuadrado, la fuerza del campo será tres veces mayor, y así sucesivamente.

Fácilmente se puede comprender que al pasar tres líneas de flujo sobre un centímetro cuadrado se producirá una concentración de campo magnético cuya fuerza será mayor que la producida por dos líneas de flujo que pasaran por el mismo centímetro cuadrado. Una forma importante para definir la fuerza de un campo magnético es, por consiguiente, en términos de número de líneas de flujo que pasan a través de un área de un centímetro cuadrado. Es obvio que un imán muy fuerte hará que más líneas de flujo pasen a través de un centímetro cuadrado de área, que las originadas por un imán débil



El número de líneas de flujo que pasan a través de un centímetro cuadrado de área se denomina densidad de flujo. En el sistema cgs, la unidad de la densidad de flujo es el gauss. Cuando un maxwell (es decir una línea de flujo) pasa a través de un área de sección transversal de un centímetro cuadrado, se dice que la densidad de flujo es igual a un gauss.

Fuerza Magnetomotriz (Fmm)

Las líneas de fuerza pueden establecerse de diferentes formas. Una de las más sencillas consiste en utilizar una corriente eléctrica. Todas las corrientes eléctricas tienen asociado un campo magnético. La fuerza que origina el establecimiento de un flujo magnético se denomina fuerza magnetomotriz. Esta puede compararse con el voltaje en electricidad, que en ocasiones se considera como la "fuerza" que produce una corriente eléctrica.

La unidad más fácil de comprender respecto a la fuerza magnetomotriz es el ampere-vuelta. Si una corriente de un ampere circula a través de una vuelta de alambre, se dice que la fuerza magnetomotriz es de un ampere-vuelta

La fuerza magnetomotriz siempre es igual al número de amperes de corriente multiplicado por el número de vueltas del alambre. El ampere-vuelta es una unidad de medición del sistema mks. (En el sistema cgs se utiliza el gilbert como unidad de la fmm. Un gilbert = 1.257 X ampere-vuelta).

Reluctancia (R)

Cuando una fuerza magnetomotriz se utiliza para establecer el flujo en un material, siempre hay una oposición al flujo. A esta oposición se le llama reluctancia. No hay unidades inglesas de medición para la reluctancia. Se ha propuesto al termino réi, pero no es de uso común. La reluctancia en el sistema cgs se mide gilberts por maxwell, pero no hay un nombre común para la unidad de la reluctancia, y no hay un nombre para ella en el sistema mks.

En circuitos magnéticos, algunas veces es más conveniente conocer la facilidad con que se establecen las líneas de flujo en un material, más que la oposición que el material ofrece al establecimiento del flujo. La facilidad con la cual las líneas de flujo pueden establecerse en un material se denomina permeabilidad del material y es el recíproco de la reluctancia.

Fuerza Magnetizante (H=Intensidad De Campo Magnético)

La circulación de un ampere de corriente a través de una vuelta de alambre proporcionará una fuerza magnetomotriz de un ampere-vuelta (La fmm en ampere-vuelta = número de amperes por el número de vueltas de alambre). De igual forma, la circulación de una ampere de corriente a través de diez vueltas de alambre proporcionará una fuerza magnetomotriz de diez ampere-vuelta. Supóngase ahora que se devanan muy justamente las diez vueltas, de tal forma que cada una de las vueltas está muy apretada contra las vueltas adyacentes. En el sistema mks, la fuerza magnetizante se mide en ampere-vuelta por metro. En el sistema cgs se utiliza el oersted. Un gilbert por centímetro proporciona una fuerza magnetizante de un oersted

Permeabilidad Magnética (jx)

La permeabilidad relativa, que muy frecuente y sencillamente se llama permeabilidad, es la relación de la densidad de flujo en un material para una fuerza magnetizante determinada con respecto a la densidad de flujo que se producirá en el vacío para la misma cantidad de fuerza magnetizante. Matemáticamente, la permeabilidad relativa en el sistema cgs se expresa por la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

μ = permeabilidad relativa del material

B = densidad de flujo

H = intensidad de campo magnético

La permeabilidad relativa no tiene unidades. La permeabilidad relativa depende del tipo de material. En otras palabras, diferentes tipos de material tendrán un valor diferente de permeabilidad relativa. Por ejemplo, la permeabilidad relativa del aire, al igual que la del vacío es uno. Para todos los materiales paramagnéticos, la permeabilidad relativa es ligeramente mayor a uno. La permeabilidad relativa de los materiales diamagnéticos es menor que uno, mientras que la permeabilidad relativa de materiales ferromagnéticos es mucho mayor que uno (y también mucho mayor que la permeabilidad relativa de los materiales paramagnéticos)

Una permeabilidad relativa mayor que uno significa simplemente que es más fácil y accesible para establecer líneas de flujo en ese material, en comparación con el establecimiento de las líneas de flujo en el vacío. Un material que tiene una permeabilidad relativa menor que uno, significa que es más difícil establecer líneas de flujo en ese material que establecerlas en el vacío.

Saturación

Se dice que cualquier material magnético está saturado, cuando un mayor aumento en la fuerza magnetizante, o en la intensidad del campo, no puede ya ocasionar un aumento en la densidad de flujo

del material. El valor de la densidad de flujo en el material del núcleo de cualquier circuito electromagnético es de considerable importancia; este valor dependerá del uso del material magnético

Si el núcleo de un transformador en el circuito de placa de la salida de potencia de una válvula llega a saturarse magnéticamente, dará como resultado una distorsión intensa y una transferencia de energía escasa del primario al secundario, si la corriente de polarización en la cabeza reproductora de una grabadora de cinta es bastante alta o bastante baja, cualquier información reproducida se distorsionará en gran medida. Por otra parte, algunos dispositivos electromagnéticos operarán sólo de manera muy baja, o nula, si la densidad de flujo inicial en el material del núcleo no está a su valor máximo. El punto de saturación de cualquier hierro o acero magnético puede determinarse muy fácilmente a partir de su curva de magnetización B-H.

Retentividad

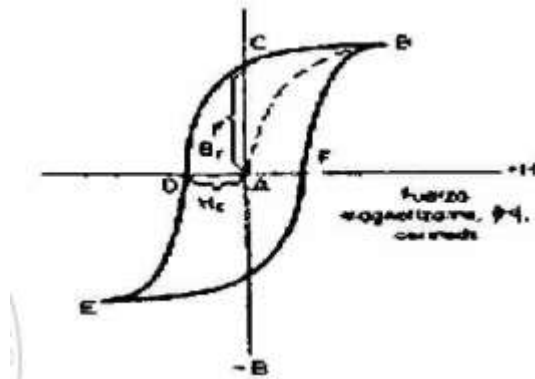
Una medida de la retentividad es la cantidad de magnetismo, o valor de B, que permanece en un material magnético después de que la fuerza magnetizante se ha elevado a un valor más que suficiente para saturar al material y después reducirse a cero; el valor de B que permanece en el material se llama magnetismo residual o remanente. Si dos imanes permanentes del mismo tamaño, de materiales distintos, son magnetizados hasta saturarlos, el que tenga una característica permanente más fuerte, tendrá por lo tanto, una retentividad más alta. Sin embargo, esto no significa necesariamente que el imán más fuerte será el más difícil de desmagnetizar, ya que esto depende de otros factores además del de retentividad

Coercitividad o Fuerza Coercitiva

La coercitividad es el valor de la fuerza magnetizante que se opone y que es necesaria para reducir el magnetismo residual o remanente, en una sustancia magnética, hasta un valor de cero. Un concepto claro de coercitividad puede obtenerse si se estudia la figura 11. Supóngase que el núcleo de hierro de la bobina no está magnetizado, y que el ajuste del potenciómetro esta en el punto medio, o cero. Cuando el ajuste del potenciómetro se mueve hacia el punto a, el material del núcleo llegará a magnetizarse hasta la saturación, a lo largo de la curva de magnetización A-B. Si después el ajuste del potenciómetro se regresa hacia el centro, o a la posición cero, la densidad de flujo B en el núcleo no regresará a cero por la línea A-B de la curva, si no que lo hará a través de la línea B-C-D, y cuando el ajuste del potenciómetro se encuentre nuevamente en cero, la densidad de flujo todavía estará en el punto c. Este será el magnetismo residual, o remanencia, indicado por el símbolo B_r . Para reducir la remanencia a cero, es necesario mover el ajuste del potenciómetro hacia el punto b para producir una fuerza de magnetización opuesta al campo residual en el núcleo. Esto ocasionará que el campo residual regrese a cero a lo largo de la línea desde C a D. El valor negativo de H necesario para reducir el magnetismo residual en el núcleo a un valor de cero es la coercitividad del material del núcleo. La coercitividad se representa por el símbolo H_c

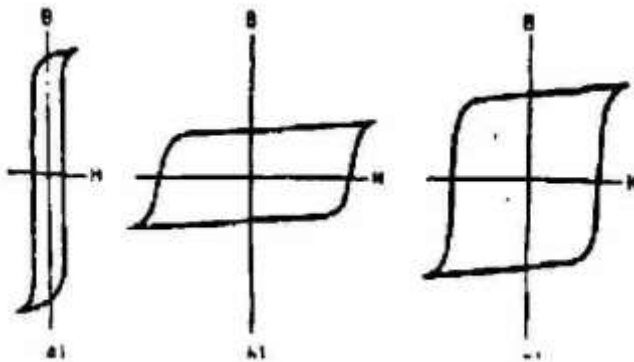
Si el ajuste del potenciómetro se mueve todavía más hacia la izquierda, de nuevo se magnetizará el núcleo, pero la magnetización será ahora en una dirección negativa.

(Esto se basa en la suposición de que la dirección original era positiva.) Enseguida ocurrirá la saturación en el punto E de la curva de magnetización. Si el valor negativo de H es ahora reducido a cero y después incrementado nuevamente a su valor positivo más alto, al mover el ajuste del potenciómetro hacia la derecha, la densidad de flujo en el núcleo, seguirá una nueva línea desde E hasta F, o cero, y después subirá de regreso al punto B



Histeresis

La trayectoria cerrada por las curvas de la figura 12 se conoce como lazo de histéresis, y el área que encierra este lazo es una medida de la energía utilizada en revertir las moléculas magnéticas del núcleo. A la energía que se pierde se le llama pérdida por histéresis. La pérdida por histéresis es de importancia sólo cuando el material del núcleo está sujeto a campos por pulsos de cc o de cae. Ya que el lazo de histéresis se repite una y otra vez para cada ciclo, las pérdidas del núcleo llegan a ser mayores cuando la frecuencia aumenta. Por esta razón, los materiales utilizados para el núcleo de transformadores deberán tener un lazo de histéresis muy estrecho.



Corrientes Parásitas

Las corrientes establecidas en los materiales de núcleos magnéticos, debido a los voltajes inducidos originados por la variación de los campos magnéticos, se conocen como corrientes parásitas. La energía perdida en forma de calor, como resultado de la circulación de la corriente parásita en el material del

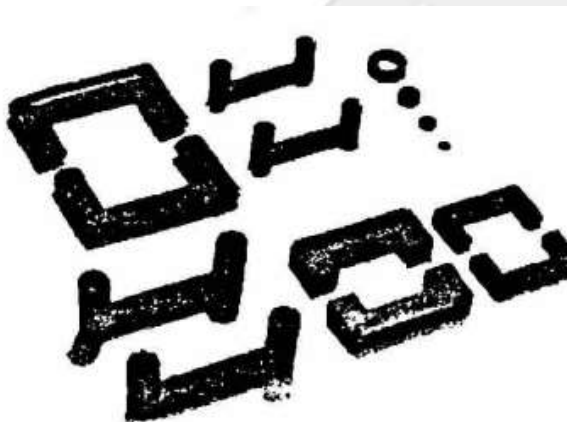
núcleo, se define como la pérdida de la corriente parásita. Ya que esta es proporcional al cuadrado de la frecuencia inducida, llega a ser de una magnitud bastante apreciable cuando se incrementa la frecuencia

Las corrientes parásitas se pueden reducir al apilar laminaciones en el núcleo, de tal forma que estén en paralelo con el flujo. La oxidación natural de las superficies laminadas también ayuda en gran parte en la reducción de estas corrientes, las laminaciones pueden recubrirse también con una capa delgada de barniz aislante. Pero aún con los núcleos laminados, existe todavía alguna circulación de estas corrientes en las laminaciones individuales. Por lo tanto, a radiofrecuencias, se utilizan ampliamente los materiales de núcleos de polvo de hierro. Cuando la frecuencia sigue aumentando, incluso los núcleos de polvo de hierro no logran ser lo suficiente eficaces para reducir estas pérdidas a un valor apropiado. Entonces se deberán utilizar los núcleos de materiales de ferrita. Las ferritas, a diferencia del hierro o del acero, no son conductores eléctricos

Núcleos de Polvo de Hierro

Los núcleos de polvo de hierro para bobinas de radio aparecieron por primera vez en el mercado hacia 1930, cuando se utilizaron en transformadores del f-i. Desde ese tiempo hasta la fecha se ha incrementado la demanda de núcleos de polvo de hierro, y también se ha notado una gran mejoría en las técnicas de producción.

Los núcleos de polvo de hierro se encuentran hoy disponibles para amplia variedad de ampliaciones, y para utilizarse en frecuencias tan altas como 250 MHz. Los receptores de televisión contienen varias bobinas con núcleos de polvo de hierro. Algunos de estos pueden ser de sintonía fija, pero otros pueden ser de sintonía de núcleo móvil, como las bobinas de control de frecuencia horizontal y control de ancho horizontal.



El polvo de hierro, utilizado para estos núcleos, se somete primero a un proceso químico que cubre cada una de las diminutas partículas de hierro con una capa aislante. Después se utiliza un aglutinante para agrupar todas las partículas de hierro sumadas a una capa de aislante adicional, sobre la capa de aislante formada por el proceso químico. De esta manera, en el terminado del núcleo las diminutas partículas individuales de hierro son eficazmente aisladas unas de otras, como resultado de esto, la corriente

parásita no puede circular en el núcleo. Todavía habrá una pérdida por esta corriente, pero las partículas individuales de hierro son conductores eléctricos y no aisladores y las corrientes parásitas todavía pueden circular en el interior de cada una de las partículas individuales.

La finura de las partículas individuales de hierro, y la cantidad de aglutinante utilizado en proporción con la cantidad de polvo de hierro, serán distintas para diferentes aplicaciones y escalas de frecuencia. El polvo de hierro puede también estar constituido por dos o tres grados diferentes de hierro, mezclado en varias proporciones.

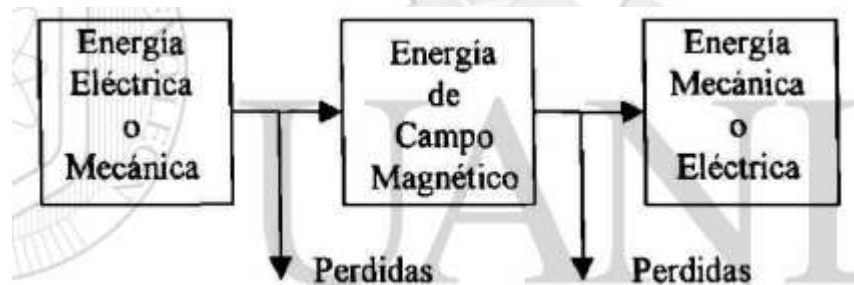
El Transformador

Introducción

Una maquina eléctrica es básicamente un convertidor de potencia que funciona transformando energía de campo magnético en energía de campo eléctrico y viceversa. Las maquinas rotatorias son convertidores dinámicos de potencia (es decir, entra también en juego la energía mecánica). Las maquinas que convierten energía mecánica en energía eléctrica se denominan Generadores, las que convierten energía eléctrica en energía mecánica se denominan Motores, y hay maquinas que convierten energía eléctrica en energía eléctrica, como los Convertidores Rotatorios o los Transformadores

Transformadores

Las maquinas eléctricas que se utilizan en la actualidad con el fin de convertir potencia siguen el esquema elementales.

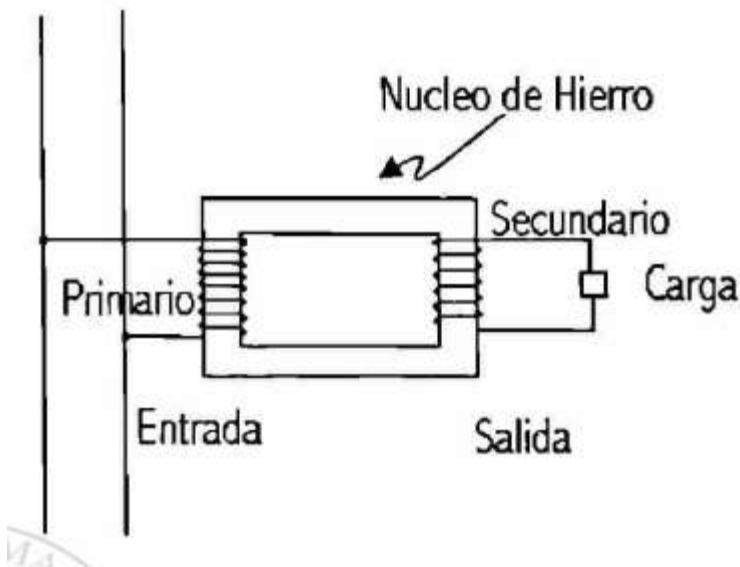


Existen maquinas que transforman directamente la energía mecánica en energía eléctrica, como la maquina electrostática de Whimshurst o el generador de Van der Graaf. Su principio de funcionamiento se comprende fácilmente del hecho de que al frotar dos materiales entre si, se desprenderán cargas eléctricas de signo opuesto, las cuales pueden ser recogidas por colectores y acumuladas en condensadores. Estas maquinas son imprácticas para funcionar como convertidores de potencia (poca eficiencia, gran volumen, etc.) y su aplicación principal está en la investigación científica

El estudio del transformador constituye una base para el estudio de las maquinas eléctricas de corriente alterna, ya que se demostrara más adelante que la mayoría de las maquinas de corriente alterna pueden considerarse como consistentes únicamente en dos circuitos eléctricos acoplados magnéticamente, cuya base es, entonces, el transformador monofásico.

El Instituto Americano de Ingenieros Electricistas da la siguiente definición para un transformador: " Un transformador es un dispositivo eléctrico, sin partes en movimiento continuamente, que por inducción electromagnética transforma la energía eléctrica de uno a mas circuitos a la misma frecuencia, generalmente con valores cambiados de tensión y corriente

Su función es cambiar las magnitudes de voltaje y corriente de lado primario al lado secundario Se enfocara este estudio al transformador de potencia de baja frecuencia, ya que las maquinas eléctricas de corriente alterna, se construyen generalmente para bajas frecuencias. La siguiente figura ilustra la función principal de un transformador



Dada la alta eficiencia que manifiestan los transformadores, en términos prácticos la potencia que entra al dispositivo es aproximadamente igual a la que sale. Siendo la potencia eléctrica igual al producto del voltaje (diferencia de potencial) por la corriente, entonces un transformador eleva (o disminuye) el voltaje en la misma proporción que disminuye (o eleva) la corriente. Cuando se desea transmitir potencia eléctrica a grandes distancias se trata de manejar siempre voltajes muy altos (del orden de 400,000 V) para disminuir la magnitud de la corriente y, por ende, las pérdidas por efecto Joule ($P = I^2 R$) a través de una línea de transmisión dada.

Transformador de distribución.

Es aquel transformador que tiene una capacidad hasta de 500 KVA, hasta 67,000 volts en alta tensión y hasta 15,000 volts en baja tensión. La presente norma se aplica a transformador de distribución.

También se aplica a los autotransformadores incluidos en los límites de capacidad y tensiones aplicadas en el inciso 1, pero considerando su capacidad equivalente como transformador.

Condiciones generales de servicio

Frecuencia. La frecuencia de operación debe de ser de 60 Hertz. Temperatura ambiente. Los transformadores sujetos a estas normas, deben ser apropiados para operar a su capacidad nominal, siempre que a temperatura del ambiente no exceda de 40°C y la temperatura promedio del ambiente durante cualquier periodo de 24 horas no exceda de 30°C (se recomienda que la temperatura promedio del aire refrigerante se calcule promediando las lecturas obtenidas durante 24 horas, ejecutando estas lecturas cada hora. Cuando el ambiente sea el medio refrigerante, se puede usar el promedio de la temperatura máxima y mínima durante el día, por lo general, el valor obtenido en esta forma es ligeramente mayor que el promedio real diario, pero no más de 25°C).

Altitud de operación.

Los transformadores de distribución, deben de estar diseñados para una altitud mínima de 1000 metros sobre el nivel del mar.

Efecto de la altitud en la elevación de la temperatura.

El aumento de la altitud produce disminución en la densidad del aire, lo cual a su vez incrementa la elevación de la temperatura en los transformadores que dependen del aire para su disipación del calor

Efecto de la altitud en la rigidez dieléctica del aire.

El aumento en la altitud produce disminución en la densidad del aire, lo cual a su vez disminuye la tensión del flameo. La rigidez dieléctica de algunas partes de un transformador, que depende total o parcialmente del aire para su aislamiento, disminuye conforme la altitud, aumenta. Para una clase de aislamiento, dada la rigidez dieléctica a 100 metros de altitud, debe multiplicarse por el factor de corrección apropiado para la nueva altitud a fin de obtener la nueva rigidez dieléctica a la altitud especificada. La altitud de 4500 metros es considerada la máxima para transformadores normales.

Operaciones a tensiones superiores a la nominal Los transformadores deben ser capaces de operar

- Con 5% arriba de la tensión nominal del secundario a capacidad nominal en KVA, sin exceder los límites de sobre-elevación de temperatura. Este requisito se aplica cuando el factor de potencia de la carga es de 80% o mayor.
- Con 10% arriba de la tensión nominal del secundario en vacío, sin exceder los límites de sobre-elevación de temperatura.
- Para cualquier derivación se aplican los mismos requisitos anteriores.

Condiciones especiales de servicio.

Condiciones de servicio de las indicadas en los párrafos anteriores se deben especificar previamente al fabricante. Ejemplo de algunas de estas condiciones son las siguientes:

- Vapores o atmósferas dañinas, exceso de polvo, polvo abrasivo, mezclas explosivas de polvo o gases, vapor de agua, ambiente salino, humedad excesiva, etc.
- Vibraciones anormales, golpes o cambios de posición.
- Temperatura ambiente excesivamente bajas o altas.
- Condiciones de transporte o almacenaje poco usuales.
- Limitaciones de espacio.
- Otras condiciones de operación, dificultades de mantenimiento, tensión des balanceada, forma de onda

Clasificación.

Los transformadores se clasifican por su condición de servicio en:

- Para uso interior.
- Para uso exterior

Los transformadores se clasifican por su sistema de disipación de calor como sigue:

Transformadores secos enfriados por aire

- Auto-enfriado (Clase AA).
- Enfriados por aire forzado (Clase AFA).
- Auto-enfriados/enfriados por aire forzado (Clase AA/FA).

Transformadores sumergidos en líquidos aislantes enfriados por aire.

- Auto-enfriados (Clase OA).
- Auto-enfriados/enfriados por aire forzado (Clase OA/FA).

Los transformadores se clasifican por su lugar de instalación como sigue:

- Para instalarse en postes, (Tipo Poste).
- Para instalarse en subestaciones (Tipo Subestación).

Especificaciones Eléctricas.

Capacidad nominal en KVA.

La capacidad nominal de un transformador es la capacidad que el devanado secundario del mismo debe suministrar en un tiempo especificado (continuo o limitado) a su tensión y frecuencias nominales, sin exceder los límites de temperatura correspondencia dentro de las condiciones establecidas en esta forma.

Capacidades Nominales Preferentes En Kva De Transformadores Monofásicos 5, 10, 15, 25, 37.5, 50,75, 100, 167, 250, 333, 500

Capacidades Nominales Preferentes En Kva De Tansformadores Trifásicos 15, 20, 45, 75, 112.5, 150,225, 300, 500

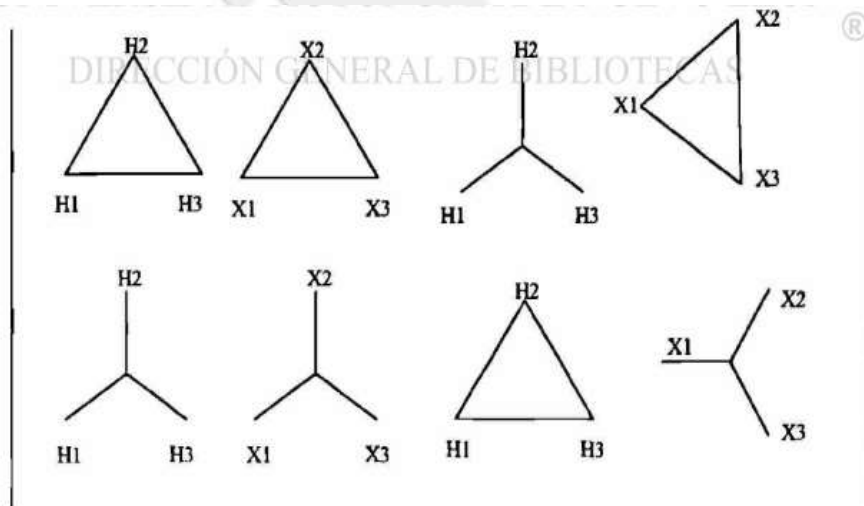
Especificaciones de nivel de ruido.

Los transformadores deben de estar contruidos para que el promedio del nivel de ruido no exceda los decibeles especificados en la siguiente tabla cuando el transformador sea excitado a tensión nominal, sin carga y sea medido en las condiciones indicadas en el método de prueba. Los valores en decibeles indicados en la tabla corresponden a los KVA nominales equivalentes a un transformador de dos devanados con la elevación de temperatura permitida por esta norma, para cualquier frecuencia hasta 60Hertz.

Equivalentes a dos devanados, KVA	Nivel de ruidos en decibeles			
	Tipo			
	AA	AFA	OA	FA
Hasta 300 -----	66	70	56	60
301 a 500 -----	68	71	58	61

Polaridad de los transformadores monofásicos. Todos los transformadores monofásicos son de polaridad substractiva. Desplazamiento angular de transformadores trifásicos

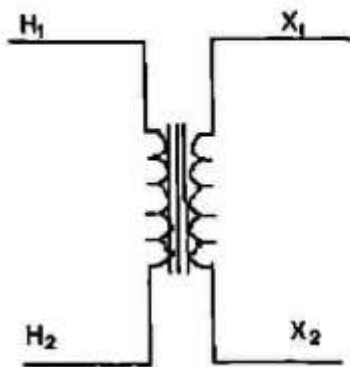
La secuencia de fases es el orden 1, 2, 3 y con el sentido indicado de la figura.



Designación De Terminales

Los devanados de un transformador se distinguen uno del otro como sigue: En los transformadores de dos devanados, el de alta tensión se designa con la letra H y el de baja y tensión con la letra X

Terminales de Alto y bajo Voltaje

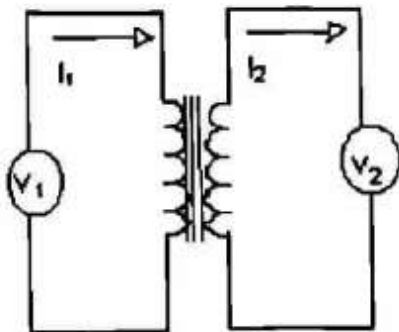


H₁ y H₂ = terminales de alto voltaje
X₁ y X₂ = terminales de bajo voltaje

En los transformadores de dos de más devanados, estos se designan con las letras H, X, Y, Z. La secuencia de esta designación se determina como sigue: El devanado de tensión más alta se designa con la letra H y los demás devanados con las letras X, Y, Z en orden decreciente de las tensiones. En el caso de que dos o más devanados tengan la misma tensión pero diferente capacidad en Kva, se asignan las letras en orden decreciente según la capacidad

Relación de transformación

Es la capacidad que presenta el transformador en variar el voltaje y la corriente del primario al secundario.



$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

a = relación de transformación

N_1 = numero de vueltas de la bobina del primario

N_2 = numero de vueltas de la bobina del secundario

I_1 = corriente del primario

I_2 = corriente del secundario

Bancos Estrella-Delta

Si el neutro del lado de alta tensión del banco de transformador se conecta al neutro del sistema, el banco puede quemarse por las siguientes razones:

- Se producirán corrientes circulantes en Delta que tratan de equilibrar cualquier carga desequilibrada conectada a la línea de primario.
- Actuará como un banco de puesta a tierra y suministra corriente de cortocircuito a cualquier cortocircuito en el sistema en el cual está conectado.
- El devanado en Delta forma un circuito cerrado por el que circularán las corrientes de la tercera armónica.
- Puede sobrecargarse si se quema un fusible en caso de cortocircuitos a tierra, dejando el banco con la capacidad de un banco conectado en Estrella abierta Delta abierta.

Resultado de todos estos efectos es que el banco se ve forzado a conducir corrientes adicionales a su corriente normal de carga. La suma de las corrientes es, en muchas ocasiones, suficientes para quemar el banco. Cuando se utilizan conexiones en Estrella-Delta y el neutro del lado de alta tensión del transformador no se conecta al neutro del circuito, un conductor desconectado en el circuito, del primer trefilar convierte el banco en un conjunto con entrada y salida monofásicas. Si el banco alimenta circuitos de motores, se producirán sobre corrientes peligrosas en cada uno de los circuitos de, motores trifásicos. La corriente que pasa por los dos de los conductores del circuito alimentador de motores será de igual magnitud, mientras que la del tercer conductor será igual a la suma de dichas corrientes

Bancos Delta-Delta

Para poder tener cargas equilibradas en los transformadores, todas las unidades deben:

- Estar conectadas en la misma posición de las derivaciones.
- Tener la misma relación de tensión.
- Tener la misma impedancia.

Un banco de tres transformadores puede hacerse funcionar a potencia reducida con una pequeña carga desequilibrada, si dos de las unidades tienen la misma impedancia y la tercera unidad tiene una impedancia comprendida entre $\pm 25\%$ de las unidades iguales.

En la tabla siguiente se indica la distribución de la carga según la relación de desequilibrio ($Z \setminus =$ impedancia de la unidad distinta, y $Z_2 =$ impedancia de las unidades iguales)

Relación Z1 / Z2	Porcentaje de carga* en	
	Unidad distinta	Unidades Iguales
0.75	109.0	96.0
0.8	107.0	96.5
0.85	105.2	97.3
0.9	103.3	98.3
1.1	96.7	102.0
1.15	95.2	102.2
1.2	93.8	103.1
1.25	92.3	103.9

Con cargas desequilibradas, debe compararse que ningún transformador quede sobrecargado.

Protección De Motores.

Referente bancos conectados en Estrella-Delta-Estrella, con neutro aislado. Por lo general, la protección contra sobrecargas utilizada en los circuitos de alimentación de motores, consiste en un dispositivo de protección en solo dos de los tres conductores. Si se desconecta un conductor del circuito de alimentación del primario, pueden producirse tensiones anormalmente elevadas, lo cual puede desequilibrar notablemente la corriente en el circuito del motor. Si ocurriera que la corriente más alta de las tres es la que pasa por el conductor sin proteger, las posibilidades de que el motor se quemara aumentarían considerablemente. El instalar un tercer dispositivo de protección contra sobrecargas en cada uno de los conductores de alimentación de motores, elimina la posibilidad de averías del motor por esta razón. El hecho de utilizar tres dispositivos de protección se justifica por la posibilidad existente de que se abra una línea del primario del transformador. Tal posibilidad queda afectada por el tipo y disposición de los dispositivos de protección y de maniobra utilizados en esa parte del sistema.

Motores de inducción monofásicos

Introducción

En el hogar y talleres pequeños, la mayoría de los aparatos que usamos diariamente se encuentran contruidos con motores de inducción monofásicos de c.a. como por ejemplo las lavadoras, refrigeradores, aires lavados, abanicos de pedestal, bombas, relojes etc. Es por esto la gran importancia que tienen estos motores en nuestra vida diaria

El Principio de Funcionamiento

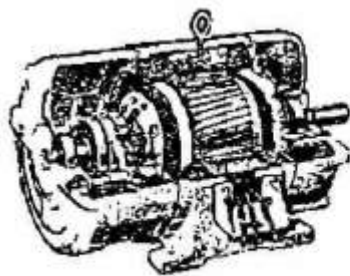
Toman el nombre de motores de inducción, las maquinas de corriente alterna que verifican su movimiento de rotación por la influencia de la corriente y voltaje que sé induce en el rotor. Un motor de inducción monofásico, como su nombre lo indica, tiene un embobinado monofásico en el estator. El principio en que se funda el motor monofásico de inducción es el de proveer al estator de dos devanados, que en la práctica se denominan devanado principal y devanado auxiliar de arranque. En donde el

devanado auxiliar solo se emplea para el arranque del motor y debe de ser desconectado cuando el motor alcance aproximadamente el 70% de la velocidad nominal

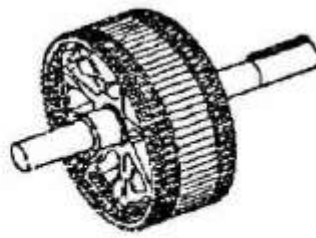
Elementos Mecánicos del Motor de Inducción Monofásico

Los motores de caballos de potencia fraccionarios son usualmente monofásicos, y hay muchos tipos de dichos motores monofásicos. No obstante, los elementos mecánicos del motor de inducción monofásico son los mismos que los de inducción trifásica, excepto que se usa un interruptor centrífugo en ciertos tipos de motores monofásicos, para desconectar el arrollamiento que se usa para el arranque., el rotor del motor monofásico de inducción es usualmente del tipo de jaula de ardilla

Partes Principales del Motor de Inducción



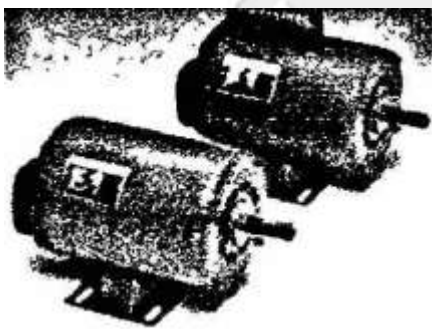
Estator



Rotor

Estator. Es la parte fija del motor y sirve de sustento, además de proporcionar el camino para el flujo magnético. Aquí se encuentran alojados los devanados de arranque y principal

Rotor Jaula de Ardilla. Es la parte móvil del motor y está compuesta una serie de barras conductoras colocadas dentro unas ranuras hechas en la superficie del rotor con los extremos puesto en corto circuito por medio de anillos. Toma este nombre ya que se asemeja a las jaulas para ardillas o ratas domesticas.



El Concepto de Deslizamiento del Rotor

El voltaje inducido en la barra de un motor de inducción depende de la velocidad del rotor con respecto al campo magnético el cual motor depende del voltaje y las corrientes del rotor, para definirlo más comúnmente "Velocidad de deslizamiento" el cual se define como diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor.

Los Devanados de Trabajo y de Arranque Auxiliar

Los cuales se encuentran dentro del estator defasados entre sí un ángulo de 90 grados con el objeto de que la corriente se desplace los mismos 90 grados con la relación de uno a otro devanado

Arranque de Los Motores Monofásicos de Inducción

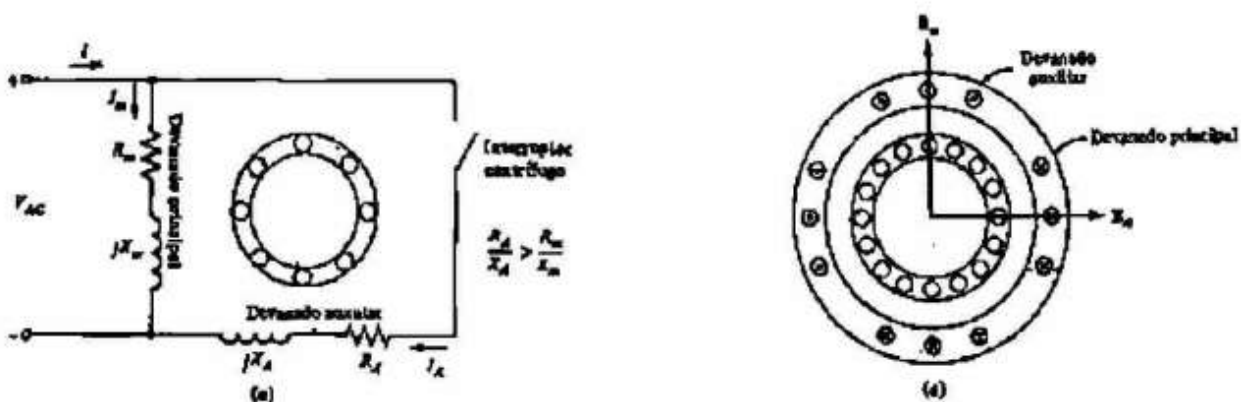
Con el rotor estacionario, si se aplica un voltaje monofásico al estator, se encuentra que el rotor no gira. Sin embargo, si recibe de algún modo un par inicial y se hace girar, empieza a caminar y continúa su giro. También se encuentra que el rotor puede girar en cualquier dirección tan solo cambiando la dirección del par inicial. De estas observaciones parecerá que el motor de inducción monofásico no desarrolla ningún par estando parado y consecuentemente no tiene un arranque propio, sin embargo, una vez que la rotación se ha iniciado desarrolla un par que lo mantiene girando.

Se tiene entendido que los motores monofásicos no cuentan con arranque intrínseco, los motores se califican según el arranque que tengan, los tipos de arranque son los siguientes

1. -Devanado de fase partida
2. -Devanado con condensador
3. -Estator con polos sombreados

El motor de fase de partida

El devanado de arranque cuenta con dos tipos de devanados el de trabajo y el de arranque auxiliar, los cuales están colocados a 90 grados eléctricos entre sí, el devanado de arranque auxiliar que se desconecta por medio de un interruptor centrífugo, el cual se desconectara a la velocidad especificada a que ha sido diseñado el dispositivo ver el circuito en la figura 44.

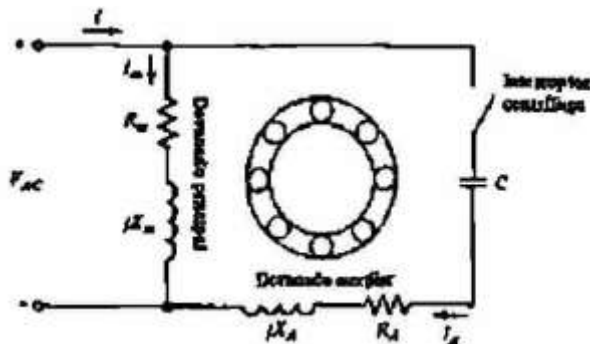


El devanado auxiliar de arranque se debe de diseñar con más resistencia que el de devanado de trabajo con el propósito de que la corriente del devanado auxiliar de arranque deba de estar adelantada con respecto al del devanado de trabajo, esto se logra usando un alambre de menos sección y de menor

calibre el cual se usa solo, para el arranque, el capacitor usado es electrolítico, que es relativamente barato.

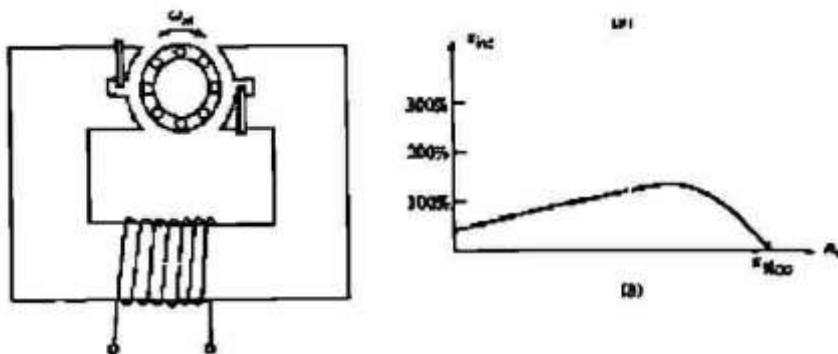
Motores con Condensadores de Arranque

El arranque con condensador se refiere a que se le coloca un condensador en el devanado auxiliar en serie con este ver la figura 9, el cual puede igualar el desarrollo de las fuerzas magnetomotriz de las corrientes en ambos devanados y con esto se puede adelantar al devanado auxiliar de arranque 90 grados del devanado de trabajo en sus corrientes el cual se genera un campo magnético simple uniforme y giratorio que se tendrá un comportamiento similar al de un motor que estuviera alimentado de una fuente trifásica, en el cual los pares de arranque son muy altos ver figura 10 y por lo mismo son muy costosos.



Motores de Polos Sombreados Los motores de los polos sombreados

Son muy diferentes a los motores que tienen un devanado auxiliar de arranque con condensador, este motor tiene un devanado principal que tiene dos polos salientes lo cual los rodea una bobina en cortocircuitada llamada bobina sombreada. El cual el devanado principal con su bobina sombreada cortocircuitada ver figura 13a, producen un flujo en los polos variante con el tiempo y cuando esto sucede induce en la bobina sombreada, un voltaje y una corriente que se opone al cambio del flujo original, el cual produce un ligero desbalance entre los dos campos magnéticos del estator que gira en dirección opuesta la cual la dirección va a lado del polo a que no está sombreada a la que esta sombreada, en cambio en par velocidad se muestra en la gráfica de polo sombreado en la figura 13b



Estos motores desarrollan muy poco caballaje y su sistema de arranque es muy bajo y en el intercambio de dirección del rotor al momento de girar es difícil solo poniendo dos bobinas sombreadas en cada cara polar. Clasificación de los motores monofásicos de inducción del mejor al peor en arranque

- 1 Motor de condensador de arranque, condensador de giro (permanente)
2. Motor de condensador de arranque
3. Motor de condensador permanente
4. Motor de fase partida
5. Motor de polos sombreados

Control de Velocidad en Los Motores Monofásicos de Inducción

En el control de velocidad de los motores monofásicos de inducción se dispone de las siguientes técnicas para jaula de ardilla

- 1 Variar la frecuencia de la corriente en el estator
2. -Aumentar o disminuir el número de
- 3.-Cambiar de voltaje aplicado en las terminales vt
 - En la variación de la frecuencia del voltaje se pueden implementar circuitos con scrs o triacs para reducir el control de la fase de la cual este método corta la onda de la corriente alterna. Los controles de estado sólido son más baratos que un autotransformador.
 - La inserción de resistencia en el estator del motor es de los métodos más baratos de control de voltaje, pero la desventaja es que pierde potencia considerable en la resistencia
 - El control de velocidad por medio del voltaje por medio de autotransformadores que ajustan el voltaje continuamente.

Motores de inducción trifásicos

Introducción

La relación entre el magnetismo y la electricidad fue descubierta en 1819 cuando, en la demostración de una clase, el científico danés Hans Oersted encontró que la corriente eléctrica que circula por un alambre desvía la aguja de una brújula cercana.

Poco tiempo después, André Ampere obtuvo las leyes cuantitativas de la fuerza magnética entre conductores que llevan corrientes eléctricas. En la década de 1820, se demostraron varias conexiones entre la electricidad y el magnetismo por Faraday e independientemente por Joseph Henry.

Ellos comprobaron que se podía producir una corriente eléctrica en un circuito al mover un imán cercano al circuito o bien variando la corriente de un circuito cercano al primero, estas observaciones demuestran que un cambio en el campo magnético produce un campo eléctrico.

Años después, el trabajo teórico realizado por Maxwell mostró que un campo eléctrico variable da lugar a un campo magnético. Como la mayor parte de la comente eléctrica producida hoy en día es alterna, los motores que se diseñan para c.a. son muchos. Los motores de c.a. son ideales para trabajar a velocidad constante, porque en ellos la velocidad está determinada por la frecuencia de la c.a. aplicada a las terminales de los mismos. También se hacen motores de c.a. de velocidad variable pero dentro de ciertos límites.

El motor de inducción es el más comúnmente empleado en corriente alterna debido a su sencillez, a su construcción sólida y a su bajo costo de mantenimiento. Estas características del motor de inducción se deben al hecho de que el rotor es independiente y no está conectado con la fuente externa de tensión. El motor de inducción se llama así por el hecho de que el campo magnético giratorio del estator induce corrientes alternas en el circuito del rotor. Un motor de inducción se distingue porque no necesita corriente de excitación de c.c. en el rotor para funcionar.

Leyes Fundamentales.

Ley de Ampere.

La ley de Ampere establece que la integral de línea de $B \cdot ds$ alrededor de cualquier trayectoria cerrada es igual a, donde I es la corriente estable total que pasa a través de cualquier superficie limitada por la trayectoria cerrada

$$\int B \cdot ds = \mu_0 I$$

Construcción del Motor de Inducción

Un motor de inducción tiene un estator igual al de una máquina sincrónica pero su rotor tiene una construcción diferente. En la figura 50 se muestra el estator de una máquina de dos polos. Hay dos tipos diferentes de rotores para motores de inducción. Uno se conoce como rotor de jaula de ardilla o simplemente rotor de jaula y el otro como rotor devanado



Un rotor de jaula de ardilla consiste en una serie de barras conductoras colocadas dentro de unas ranuras hechas en la superficie del rotor con sus extremos puestos en cortocircuito por medio de anillos. Este diseño se le conoce como rotor de jaula de ardilla porque sus conductores tienen la apariencia de las jaulas en donde juegan las ardillas o las marmotas.

El otro tipo de rotor es el denominado de rotor devanado, que tiene un arrollamiento trifásico completo que es una imagen reflejada del devanado del estator. Las tres fases del arrollamiento de este rotor usualmente se conectan en Y sus extremos se conectan a unos anillos rozantes montados en el eje. Los devanados del rotor se pueden poner en cortocircuito a través de un conjunto de escobillas que están en contacto con los anillos rozantes.

También se pueden insertar resistencias exteriores en el circuito del rotor, ya que los motores de inducción de rotor devanado se tienen acceso a las corrientes del rotor a través de las escobillas, este tipo de motor es muy utilizado donde se requiere control de velocidad.

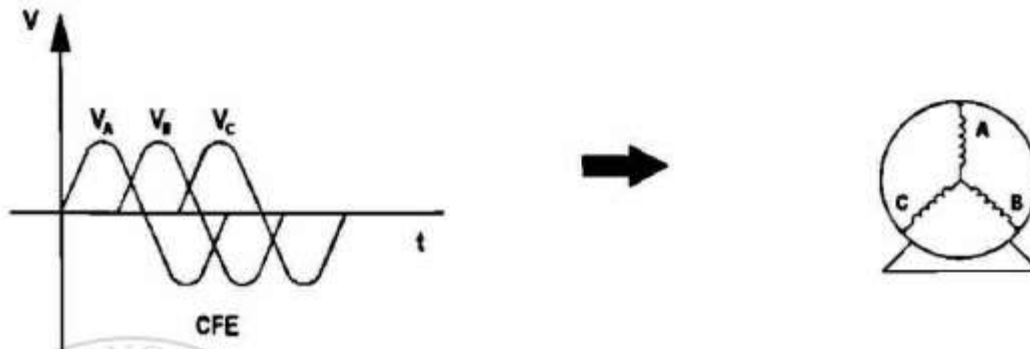
El Campo Magnético Giratorio.

Antes de aprender como el campo magnético rotatorio hace que el motor gire, primero se debe saber como se produce este campo. En el esquema aparece un estator trifásico al cual se le aplica una corriente alterna proveniente de una fuente trifásica. Los dos bobinados de cada fase están devanados en el mismo sentido.

En todo instante el campo magnético producido por una de las fases en particular depende de la intensidad de corriente en esa fase. Si la intensidad es cero, el campo magnético también será cero. Si la intensidad es máxima, el campo magnético tendrá una fuerza máxima. Como las intensidades Figura 50 Estator de un motor de inducción con sus devanados y rotor jaula de ardilla de los tres bobinados tienen una diferencia de fase de 120° .

Los tres campos magnéticos existentes en un instante dado se combinan para producir un solo campo que acciona sobre el rotor. En la figura que se muestra a continuación se verá que de un instante al siguiente, los campos magnéticos se combinan para producir un campo magnético resultante cuya posición varía un

cierto ángulo. Al completarse un ciclo de c.a. el campo magnético se habrá desplazado 360° , o sea una revolución



El Concepto de Deslizamiento del Rotor

El voltaje inducido en una barra del rotor de un motor de inducción depende de la velocidad relativa del rotor con respecto al campo magnético. Puesto que el comportamiento del motor de inducción depende de los voltajes y las corrientes del rotor, resulta más lógico hablar de esta velocidad relativa. Para definirla se utilizan comúnmente dos términos. Uno de ellos es la velocidad de deslizamiento, que se define como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor:

Circuito Equivalente del Motor Trifásico

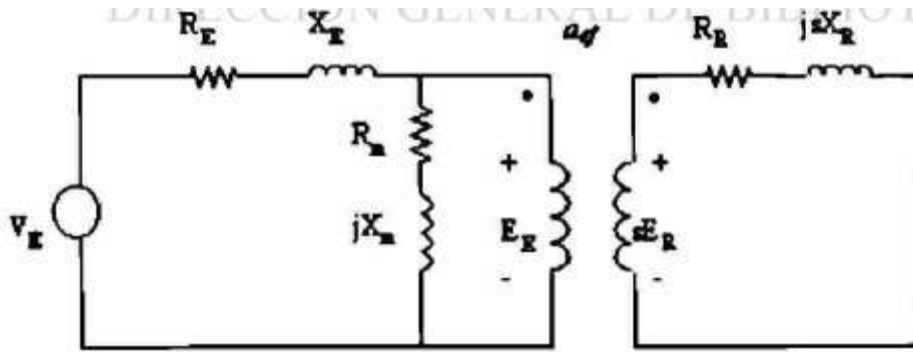
El motor de inducción necesita para su operación que el circuito del estator induzca voltajes en el circuito del rotor (acción transformadora) para que en éste haya corrientes, puesto que la inducción de voltajes en el circuito del rotor de un motor de inducción es, esencialmente, una operación de transformación, el circuito equivalente de un motor de inducción deberá ser muy similar al circuito equivalente de un transformador.

Se dice que un motor de inducción es una máquina sencillamente excitada (en oposición a los motores sincrónicos que son máquinas doblemente excitadas), ya que se le suministra potencia solamente por un punto. Debido a que el motor de inducción no tiene un circuito de excitación independiente, su modelo no tiene fuentes de voltaje interno como el voltaje generado EA de las máquinas sincrónicas.

Con base en el conocimiento de los transformadores y teniendo en cuenta que ya se sabe que la frecuencia del rotor varía con la velocidad del motor, es posible deducir el circuito equivalente de un motor de inducción. Se desarrollará el modelo del motor de inducción partiendo del modelo del transformador, y luego buscando la manera de tener en cuenta la frecuencia variable del rotor y otros efectos similares del motor de inducción.

El Motor de Inducción como Transformador

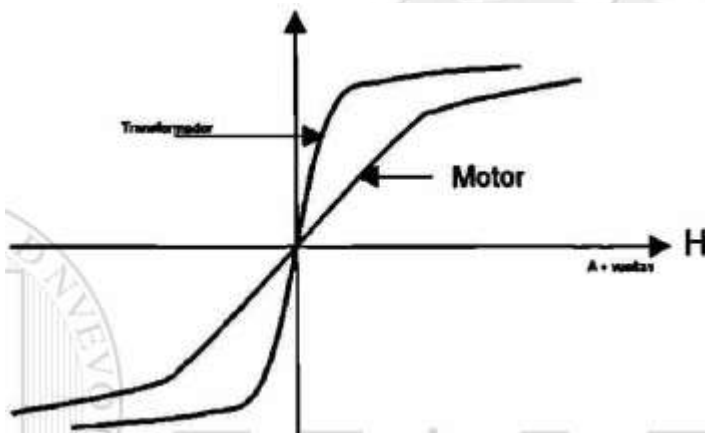
En la figura se muestra el circuito equivalente por fase de un transformador que representa la operación de un motor de inducción.



Como en cualquier transformador, existe una resistencia y una autoinductancia en el devanado primario (estator) que deben representarse en el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se llamará R_E y su reactancia se denominará X_E .

Estas dos componentes aparecen a la derecha de la entrada en el modelo de la máquina. Nuevamente, como en cualquier transformador con un núcleo de hierro, el flujo en la máquina está relacionado con la integral del voltaje aplicado E . La curva del flujo en función (curva de magnetización) de la máquina, se presenta., comparada con la curva similar de un transformador de potencia.

Se observa que la pendiente de la curva correspondiente al motor de inducción es mucho menos inclinada que la de un buen transformador. Esto se debe a la existencia del entrehierro en el motor de inducción que hace aumentar demasiado la reluctancia de la trayectoria del flujo con lo cual se debilita el acoplamiento en los devanados primario y secundario.



Con el aumento de la reluctancia a causa del entrehierro se necesita una mayor corriente de magnetización para obtener un determinado nivel de flujo. Entonces, en el circuito equivalente, la reactancia de magnetización X_a , tendrá un valor mucho menor que el correspondiente valor ordinario. El voltaje interno E_N , del primario (estator) está acoplado con el voltaje interno E_R del secundario (rotor), por un transformador ideal con una relación $a \ll f$ entre espiras efectivas.

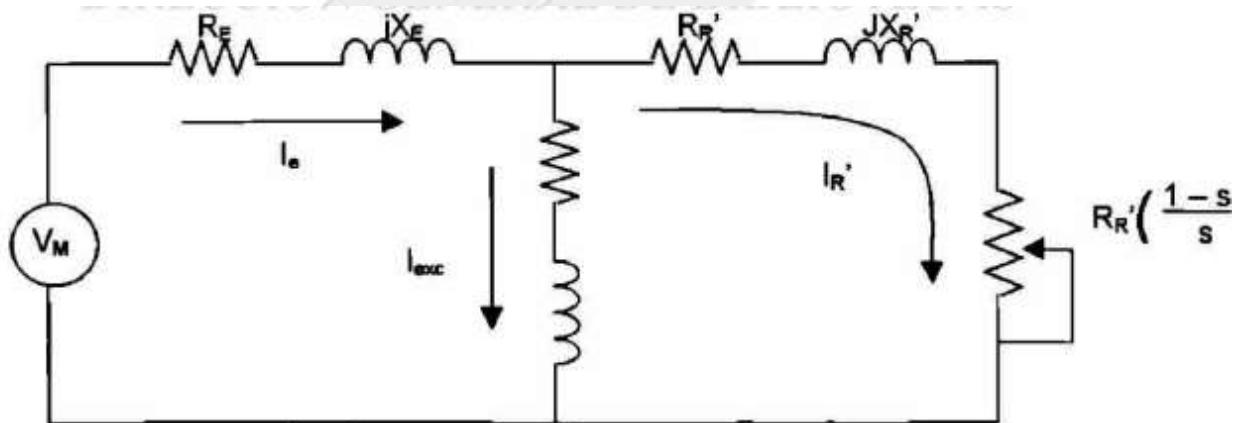
Es claro que esta relación se puede determinar fácilmente para un motor de rotor devanado, pues básicamente es la relación entre el número de conductores por fase en el estator y el número de conductores por fase en el rotor modificados ambos por sus correspondientes factores de paso y de distribución. Es mucho más difícil definir con exactitud k_f en el caso de un motor con rotor de jaula de ardilla, ya que en él no hay devanados tan perfectamente definidos.

De todas maneras, existe una relación de transformación para el motor. El voltaje E_R inducido en el rotor produce un flujo de corriente en el circuito del rotor (secundario) de la máquina, el cual se encuentra en corto circuito, la impedancia del primario y la corriente de magnetización del circuito equivalente de un motor de inducción son muy similares a los valores correspondientes del modelo de circuito equivalente de un transformador.

La diferencia fundamental entre los circuitos equivalentes de un motor de inducción y de un transformador se debe a los efectos que la frecuencia variable del rotor produce en el voltaje inducido E_R y en la impedancia R_R y JX_R del rotor.

Circuito Equivalente de Parámetros

En el circuito del motor de inducción se puede hacer algo similar a lo efectuado en el transformador: los voltajes corrientes e impedancias del lado del secundario se pueden referir al lado del primario por medio de la relación de espiras. De esta manera el modelo equivalente de un motor de inducción trifásico quedaría de la manera siguiente:



Determinación de Parámetros del Motor de Inducción.

Para calcular todos los parámetros del modelo del motor de inducción que se vio en la sección anterior se realizan dos tipos de pruebas:

- a) La prueba de vacío.
- b) La prueba de rotor bloqueado

Prueba de vacío. Con esta prueba se obtienen los valores de R_M y X_M (rama de excitación), la prueba se realiza aplicando el voltaje nominal al rotor y estando en vacío (la flecha deberá estar liberada de toda carga mecánica). Se miden los valores de corriente en vacío y de potencia en vacío

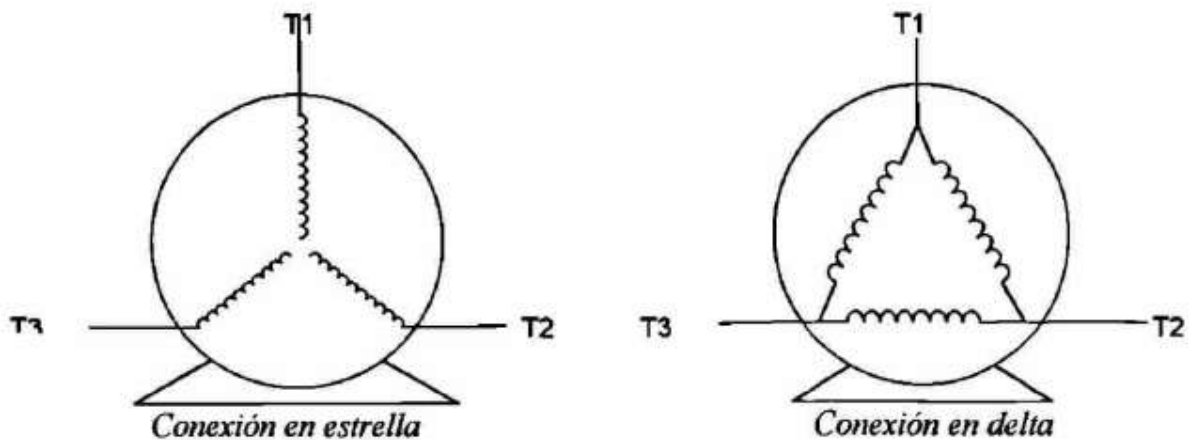
Prueba de rotor bloqueado. Para esta prueba existen dos modalidades. Una es la prueba de rotor bloqueado a tensión plena y la otra es la prueba de rotor bloqueado a tensión reducida.

Terminales y Devanados de Los Motores Trifásicos.

Los motores trifásicos se pueden diferenciar por el número de terminales que tienen; obviamente este número debe ser una potencia de 3 y los más usuales son los de 3, 6,9 y 12 terminales

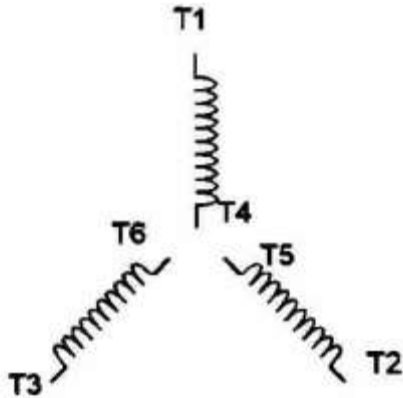
Motor de 3 terminales.

Este tipo de motores tiene como característica principal que sólo funciona a una tensión de servicio. A continuación se presentan los dos tipos de conexiones que pueden tener los motores trifásicos de tres terminales:

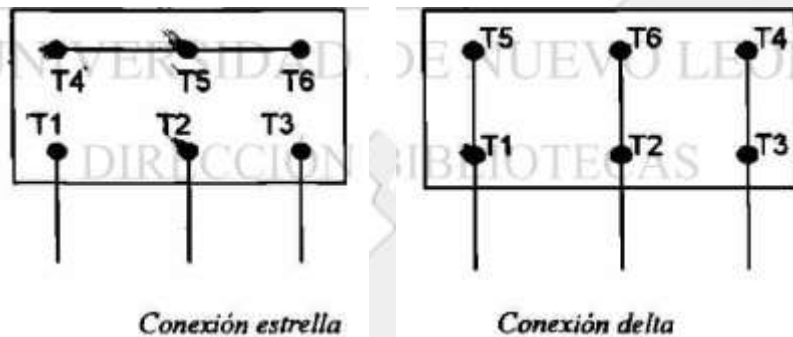


Motor de 6 terminales.

Este tipo de motores también opera con una sola tensión de servicio, pero ahora la ventaja es que se puede conectar ya sea en delta o en estrella, según las necesidades. La identificación de terminales es la siguiente:



Como se pudo observar en la figura, la numeración para las terminales se hace a favor de las manecillas del reloj, y partiendo de las terminales que están por la parte exterior hasta las que están en la parte interior; esta es una norma que se utiliza para estandarizar la identificación de terminales de los devanados. Las conexiones en la caja de terminales de cada una de las configuraciones (delta o estrella) quedarían de la siguiente manera:

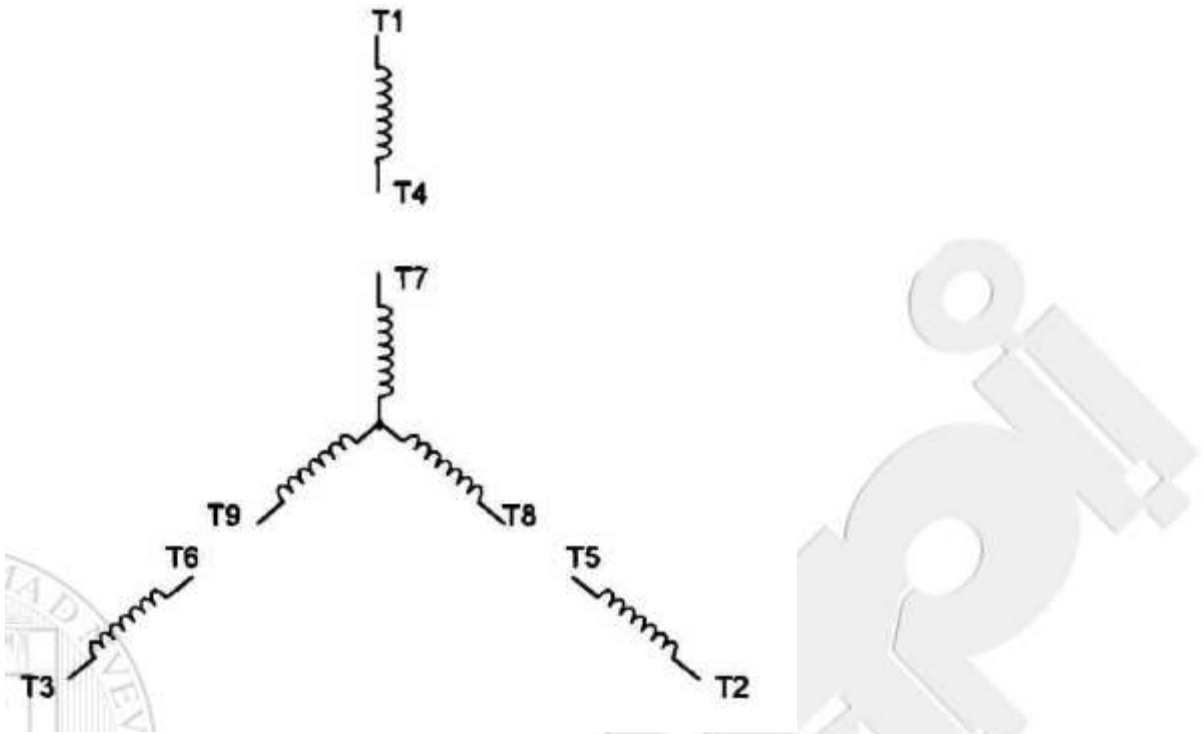


Motor de 9 terminales.

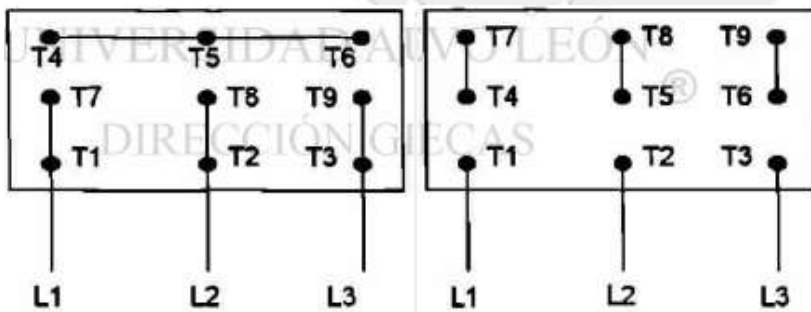
Este tipo de motor se puede conectar ya sea como una estrella gigante o como dos estrellas en paralelo; la conexión en delta no se utiliza. Puede trabajar con dos tensiones de servicio:

- Para 220 V se conecta como 2 Y en paralelo.
- Para 440 V se conecta como una estrella gigante.

Asación de las terminales de sus devanados quedaría así:



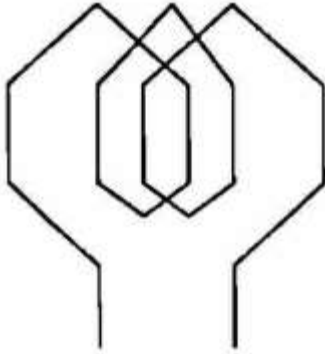
Las conexiones en la caja de terminales para trabajar con las distintas tensiones de servicio se presentan en la siguiente figura



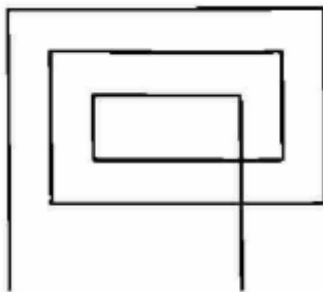
Existen también los motores de 12 terminales, los cuales se pueden conectar ya sea en delta o en estrella, y pueden trabajar también con dos voltajes de servicio; queda como práctica realizar los diagramas para este tipo de motores, y hacer la conexión de sus terminales para sus cuatro modos de operación (estrella a 220 V, delta a 220 V, estrella a 440 V y delta a 440 V).

Devanados trifásicos. En el embobinado tanto de motores como de generadores se pueden encontrar diversas formas de colocar las bobinas en las ranuras del estator; dichas formas son

Embobinado imbricado: Se utiliza en motores trifásicos.



Embobinado concéntrico: Se usa en motores monofásicos (principalmente) y trifásicos.



Ondulado: Se utiliza en generadores



Cuando en una ranura del estator se localizan dos lados de la bobina al devanado se le llama devanado en doble capa. Existen ciertos parámetros que se consideran al embobinar un motor trifásico. Dichos parámetros se refieren al número de polos, número de ranuras por polo, número de bobinas por grupo y grados por ranura, a continuación explicamos cada uno de ellos.

Clases de Diseño de Motores de Inducción

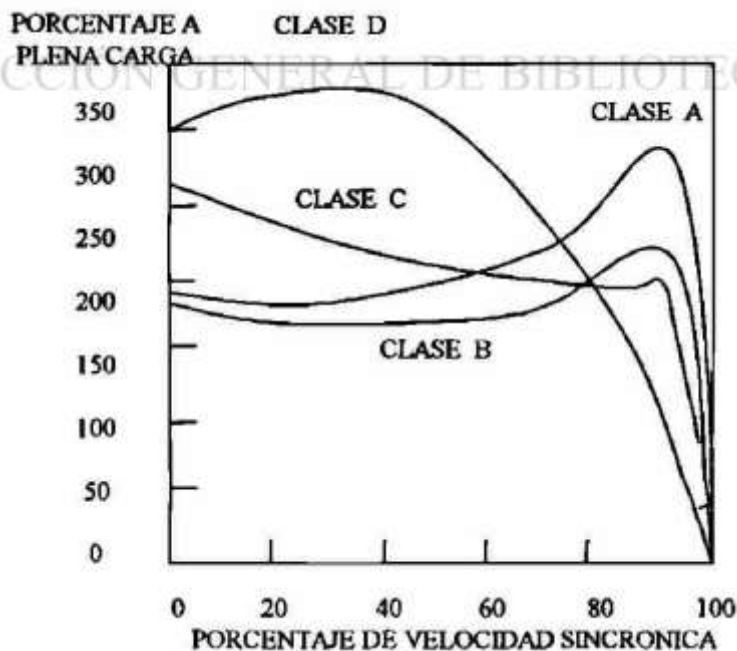
Modificando las características físicas de los rotores de los motores de inducción puede obtenerse una gran variedad de curvas par-velocidad, con el fin de ayudar a la industria en la selección apropiada de los motores para las variadas aplicaciones y para cualquier potencia. NEMA en los Estados Unidos y la

Internacional Electrical Commision (IEC) en Europa han definido una serie de diseños de normalizados con diferentes curvas par-velocidad.

Diseño clase A.- Los motores de clase A son los motores de diseño común, con un par de arranque normal, una corriente de arranque normal y un deslizamiento bajo. Las corrientes de arranque típicas de este motor pueden ser de aproximadamente 500 a 800 por ciento de la corriente nominal. Algunas aplicaciones típicas de estos motores son: impulso de ventiladores, bombas, tornos y otras maquinas herramientas.

Diseño clase B.- Los motores de clase B tienen un par de arranque normal, corriente de arranque pequeña y deslizamiento bajo. Estos motores producen el mismo par de arranque que los motores de clase A, con una corriente alrededor de 25 por ciento menor. El par máximo de salida es mayor o igual al 200 por ciento del par a carga nominal.

Diseño clase C.- Los motores de clase C tienen un alto par de arranque con corriente de arranque pequeña y operan con un deslizamiento bajo (menor que 5 por ciento) a plena carga. Diseño clase D.- Los motores de clase D tienen un par de arranque muy alto (275 por ciento o más que el nominal) y una corriente de arranque pequeña, pero a plena carga tienen un deslizamiento alto. Esencialmente son motores de clase A pero con las barras del rotor más pequeñas y hechas con material de mayor resistencia.



Tendencias de Los Motores de Inducción

El motor de inducción trifásico, ya completamente desarrollado estaba disponible comercialmente desde 1896, desde entonces y hasta la fecha se han logrado continuos progresos en la calidad de los aceros, las técnicas de fundición, los aislamientos y las características empleadas en la construcción de motores de inducción. Ahora, casi todos los grandes fabricantes están produciendo motores de inducción de alta eficiencia, cuya participación en el mercado de los motores de inducción aumenta continuamente. Se han utilizado varias técnicas para mejorar la eficiencia de estos motores comparada con la eficiencia de los motores de diseño tradicional. Entre estas técnicas están:

Utilizar más cobre en los devanados del estator para reducir las pérdidas en el cobre.

- Aumentar la longitud de los núcleos del estator y del rotor para reducir a densidad de flujo magnético en el entrehierro de la máquina.
- Utilizar más acero en el estator de la máquina, permitiendo una mayor cantidad de transferencia de calor hacia el exterior de la misma, con lo que se reduce su temperatura de operación.
- El acero utilizado en el estator es un acero especial con alta graduación eléctrica, con muy pocas pérdidas por histéresis.
- Se utiliza acero de calibres especialmente delgados, es decir, las laminaciones son muy compactas y de una resistividad interna muy alta.
- Los rotores se maquilan cuidadosamente para reducir un entrehierro uniforme, con lo cual se logran reducir las pérdidas adicionales en el motor.

Máquinas de Corriente Continua.

Introducción Todas las maquinas eléctricas funcionan según los mismos principios básicos y su comportamiento está gobernado solamente por unas pocas leyes fundamentales. Estas leyes son las que relacionan la corriente, el campo magnético y el par; y la velocidad, el campo magnético y el voltaje desarrollado.

Los dos elementos indispensables de la maquina eléctrica son el flujo magnético y los conductores por los que circulan corrientes.

Los motores de corriente directa, generalmente se prefieren sobre cualquier otro tipo, en aquellas aplicaciones en donde se requiere una velocidad de operación variable. La razón primordial, proviene del hecho de que la velocidad en estos motores, pueden controlarse relativamente fácil, ajustando ya sea el voltaje de su armadura, de su campo o de ambas, dependiendo de las características de funcionamiento que se deseen.

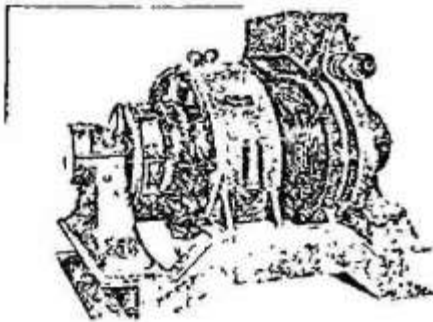
Constitución de Las Maquinas de Corriente Continua Conceptos Generales. La energía en forma de corriente continua y las máquinas para utilizarla se usan mucho para la tracción y en ciertas clases de transmisiones industriales.

Las principales ventajas de los motores de c.c. son su excelente par de arranque y la facilidad para controlar su velocidad entre límites muy apartados

Los motores de c.c. son ideales para impulsar ciertas clases de máquinas que son difíciles de poner en marcha en carga y que tienen que ser impulsadas a velocidades variables o tal vez invertirse con frecuencia el sentido de marcha. Su velocidad puede variarse entre límites muy amplios, por encima y por debajo de la normal.

Muchos miles de fábricas y plantas industriales utilizan exclusivamente motores eléctricos para impulsar diversas máquinas y, en ciertas clases de trabajo, se emplean muchísimo los motores de c.c. Estos motores se construyen en tamaños que van desde 1/10 HP hasta varios miles de caballos, y se emplean tanto para mover un grupo de máquinas como para máquinas individuales.

Para mover tranvías y trenes elevados en las ciudades, y también los trenes eléctricos que cruzan el país, se emplean muchísimo los motores serie de c.c., porque su elevado par de arranque les permite arrancar fácilmente un coche o un tren cargado desde la posición de reposo y llevarlo rápidamente a adquirir velocidades muy grandes. Los motores de c.c. se construyen por lo general para funcionar con voltajes de 110, 220 y 440 voltios, para los servicios industriales.



En el funcionamiento de las dinamos la velocidad a que deben moverse no es tan crítica como en el caso de los generadores de corriente alterna o alternadores. Las dinamos se construyen en tamaños que varían entre 60 Watts, para usos automotrices, hasta los de varios miles de kilowatts para las centrales eléctricas industriales y de ferrocarriles.

Sus voltajes varían entre 6 volts, en los generadores para automóviles, hasta 440 voltios para los usos industriales, y hasta 600 y 750 voltios para las aplicaciones ferroviarias, tales como las centrales de ferrocarriles eléctricos, los tranvías y los trolebuses.

Las de tamaños más pequeños impulsadas por correa funcionan a velocidades de 300 a 1800 r.p.m., en tanto que las de tamaños mayores que están directamente conectadas a máquinas de vapor o motores de gas o de aceites pesados marchan a velocidades que oscilan entre 60 y 250 r.p.m. La corriente continua no se emplea mucho cuando la energía tiene que transmitirse a distancias superiores a 800 ó 1600 m, ya que para transmitir grandes cantidades de energía a distancias considerables es necesario emplear un voltaje elevado y, por lo general, no es práctico que funcionen las grandes máquinas a voltajes superiores a 750 voltios.

Partes y Principio de Funcionamiento de Las Maquinas de Corriente Continua.

Partes de una maquina de corriente continua.

- Carcasa o Estator que es la que sustenta a la maquina y aquí se encuentra alojado el devanado de campo
- Rotor que es la parte móvil y aquí se encuentra alojado el devanado de armadura.
- Conmutador que cambia la c.c. a c.a en un motor y de c.a. a c.c. en un generador.
- Escobillas que recogen o entregan la corriente al devanado de armadura.



El flujo magnético y los conductores por los que circulan corrientes constituyen los dos elementos indispensables de la máquina eléctrica.

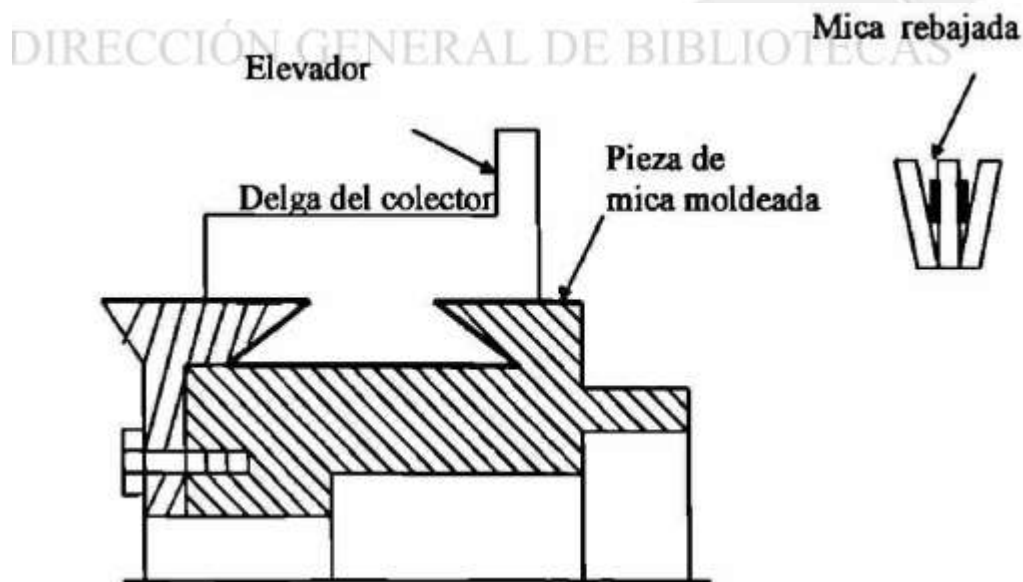
La parte de la maquina sobre la cual se hallan situados los conductores que producen las fuerzas tangenciales se denomina inducido aquí se encuentra alojado el devanado de armadura. En las maquinas de c.c. este constituye la parte interior giratoria (rotor) de la maquina. Los electroimanes (polos) son estacionarios y están conectados con la carcasa o parte exterior de la maquina a este devanado se le llama devanado de campo.

El inductor (Devanado de Campo) en las maquinas de corriente continua es también el estator o parte fija de la maquina. El sistema inductor produce el campo magnético necesario para crear la corriente inducida. Este campo magnético puede ser producido por imanes permanentes o por electroimanes. Las bobinas que constituyen los arrollamientos de excitación de los diferentes polos, están conectadas entre si de manera que formen, alternativamente, un polo norte y un polo sur.

La nulidad del conmutador es cambiar la forma del voltaje de c.a. a c.d y viceversa, la corriente se conduce de la escobilla a la porta escobillas mediante una trenza flexible de cobre. A fin de producir la presión necesaria para el deslizamiento suave de la escobilla sobre el colector, un muelle ajustable actúa sobre la parte superior de la escobilla.

Las escobillas son unos contactos a presión. Estas generalmente son de carbón y se fabrican en gran número de grados, que van desde el carbón duro de retorta, que tiene propiedades abrasivas, hasta el grafito muy blando, que posee cualidades lubricantes. Los elementos constructivos de las maquinas de corriente continua, son idénticos para el motor que para el generador.

De forma, que una misma máquina puede producir corriente continua si se aplica a su inducido un movimiento giratorio (caso del generador) o, por el contrario, se producirá un movimiento giratorio en la maquina si alimentamos su inducido con la corriente continua procedente de la red (caso del motor). El colector consiste en segmentos de cobre duro en forma de cuña, llamados delgas o laminas, completamente aislados unos de otros, así como del eje de apoyo, por medio de piezas de mica moldeadas, constituyendo, de esta forma, un arco circular.



Potencia y Elevaciones de Temperatura en Las Maquinas De Corriente Continua

Las dínamos y los motores de c.c. son casi exactamente idénticos en su construcción mecánica y que, en muchos casos, puede usarse la misma máquina como motor o generador, con sólo ligeros cambios en las conexiones del inductor, un ajuste de las escobillas, etc. Este es un detalle que deberá tenerse presente, ya que muchos de los puntos cubiertos sobre la construcción, el funcionamiento, las cargas, las temperaturas, etc., son aplicables a los motores y las dínamos.

La potencia nominal de las maquinas se indica siempre en kilowatts, que es una unidad de energía eléctrica. Será conveniente, sin embargo, recordar aquí que 1 kilowatts es igual a 1000 lats y

aproximadamente a 1,36 HP (caballos de potencia) o 1,34 hp (caballos ingleses), los watts consumidos en un circuito cualquiera son iguales al producto del voltaje por la corriente. La potencia nominal en Kw de una máquina, es la carga que podrá soportar continuamente sin un calentamiento excesivo, sin que se produzcan demasiadas chispas en el conmutador o sin que la caída de voltaje interno sea excesiva.

Casi todas las máquinas se construyen para poder soportar alguna sobrecarga durante periodos cortos sin que se perjudique la máquina. Esta sobrecarga suele ser del 15 al 25 por ciento durante periodos no mayores de una hora poco más o menos.

Las elevaciones de temperatura que no ofrecen riesgo en la maquinaria eléctrica dependen de las temperaturas que pueden soportar sin estropearse sus materiales aislantes. Todos los demás materiales de la máquina son metales que pueden someterse a temperaturas bastante elevadas sin sufrir mucho daño.

Claro está que cuanto más elevada sea la temperatura de los arrollamientos de cobre tanto mayor será su resistencia; y tanto más elevadas han de ser también las pérdidas debidas a la caída de voltaje en la máquina. Los aislamientos combustibles ordinarios como la seda, el algodón y el papel no deben someterse nunca a temperaturas superiores a 100°C (212°F.).

La mica, el asbesto (o amianto) y otros materiales aislantes no combustibles pueden someterse a temperaturas de hasta 125°C (257°F.). Al fijar las elevaciones de temperatura que puede soportar la maquinaria eléctrica, se parte del supuesto de que la temperatura en las habitaciones en las que se instalan las máquinas no excederá nunca de 40°C. (104°F.). Esto da, para los materiales aislantes ordinarios, una elevación admisible de 100°C - 40°C, o sea, 60°C. (108° F.). Para los materiales aislantes no combustibles, la elevación de temperatura admisible es 125°C - 40°C, o sea, 85° C. (153° F.).

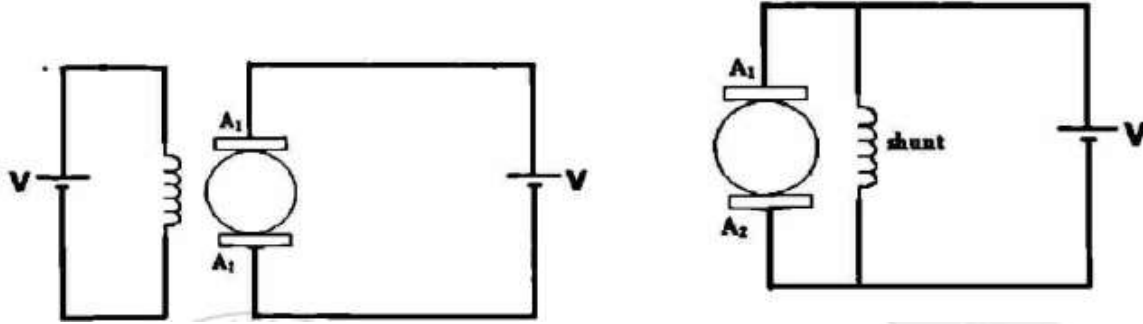
Los generadores y los motores ordinarios suelen estar garantizados por los fabricantes para funcionar continuamente a plena carga, sin sobrepasar una elevación de temperatura de 35° C., 40° C. o 50° C., según sea el caso.

Las temperaturas de las máquinas pueden comprobarse poniendo pequeños termómetros entre los extremos de sus arrollamientos o muy cerca de ellos. Una regla general que conviene recordar es que si puede mantenerse la mano sobre la armazón o culata de la máquina cerca de los devanados sin que el calor moleste mucho, éstos no se han calentado peligrosamente.

Clasificación de Las Maquinas de Corriente Continua

Según su excitación las máquinas de c.c. se clasifican en:

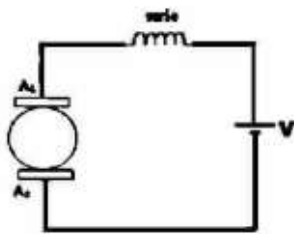
- Excitadas por separado
- Auto excitado



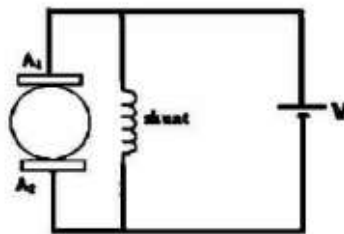
Las maquinas de c.c. pueden dividirse en varias clases, según la construcción de su inductor y sus conexiones.

Estos tipos se llaman respectivamente:

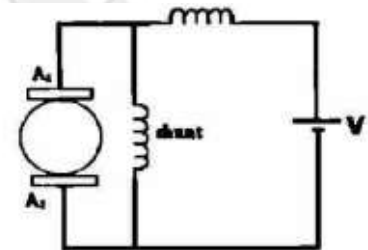
- maquinas shunt o excitadas en paralelo
- maquinas serie o excitadas en serie
- maquinas compound o de excitación compuesta



Maquina Serie



Maquina Shunt

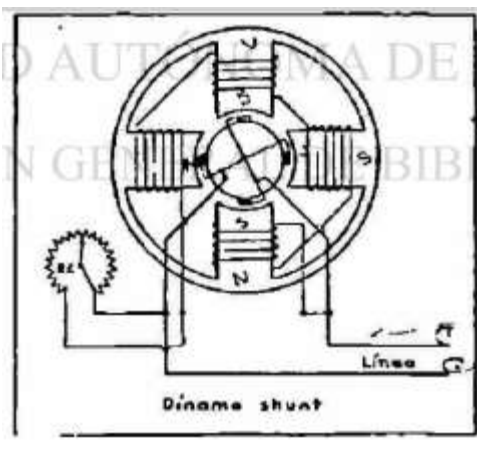


Maquina Compound

La maquina shunt tiene sus bobinas inductoras conectadas en paralelo con el inducido. Las bobinas inductoras shunt se componen de un gran número de vueltas de alambre de pequeño diámetro y con una resistencia suficiente para que puedan estar permanentemente conectadas a través de las escobillas y soportar todo el voltaje del inducido constantemente durante el funcionamiento. Por consiguiente, la comente que circula por esas bobinas depende de su resistencia y del voltaje del inducido y es pequeña. Las maquinas serie tienen sus bobinas inductoras conectadas en serie con el inducido, de modo que circula por ellas toda la corriente de la carga. Esas bobinas tienen que hacerse, naturalmente, con alambre grueso para que puedan soportar la corriente de la línea y se componen, por lo general, de sólo muy pocas vueltas. Las maquinas compound son las que tienen a la vez arrollamientos inductores en serie y en derivación

Dinamos Shunt

Siendo la dínamo shunt una máquina autoexcitada, empezará a desarrollar su voltaje partiendo del magnetismo residual tan pronto como el inducido empiece a girar. Después, a medida que el inducido va desarrollando voltaje, éste envía corriente a través del inductor, aumentando el número de líneas de fuerza y desarrollando el voltaje hasta su valor nominal. Puesto que el circuito inductor y el circuito de la carga están ambos conectados a través de los terminales de la dínamo, cualquier corriente engendrada en el inducido tiene que dividirse entre esas dos trayectorias en proporción inversa a sus resistencias y puesto que la resistencia del circuito inductor es relativamente elevada, la mayor parte de la corriente pasa por el circuito de la carga, impidiendo así el aumento en la intensidad del campo magnético esencial para producir el voltaje normal entre las terminales



Características de voltaje de las dínamos shunt

El voltaje de una dínamo shunt variará en razón inversa de la carga, el aumento de la carga hace que aumente la caída de voltaje en el circuito de inducido, reduciendo así el voltaje aplicado al inductor. Esto reduce la intensidad del campo magnético y, por consiguiente, el voltaje del generador

Si se aumenta bruscamente la carga aplicada a una dínamo shunt la caída de voltaje puede ser bastante apreciable, mientras que si se suprime casi por entero la carga, la regulación de voltaje de una dínamo shunt es muy defectuosa debido a que su regulación no es inherente ni mantiene su voltaje en un valor constante. Por consiguiente, las dínamos shunt no se adaptan bien a los trabajos fuertes, pero pueden emplearse para el alumbrado por medio de lámparas incandescentes o para alimentar otros aparatos de potencial constante en los que las variaciones de carga no sean demasiado pronunciadas.

Funcionamiento de Los Motores de Corriente Continua

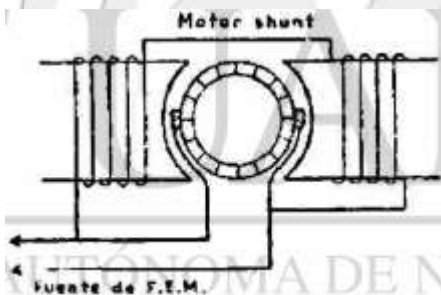
El motor de C.C. funciona basándose en la primera ley del magnetismo que dice que los polos del mismo nombre se repelen y los de nombre contrario se atraen, la corriente que circula por las bobinas del inductor produce los polos inductores y la corriente que circula por las bobinas del inducido desarrolla polos en él a media distancia entre los polos inductores.

La atracción y la repulsión entre esas dos serie de produce la rotación. Para que las fuerzas atractivas y repulsivas entre los polos del inducido y los polos inductores se mantengan, a medida que avancen los polos del inducido, tienen que renovarse, reproduciéndolos en el mismo punto del espacio, lo que puede expresarse, algo incorrectamente, pero más gráficamente, diciendo que deben permanecer estacionarios en el espacio.

Esta condición es posible por la acción del conmutador y de las escobillas, pues a medida que el inducido avanza caen debajo de las escobillas un grupo diferente de delgas del conmutador y, en consecuencia, se vuelve el suministro de corriente al inducido al mismo punto de este, con relación al espacio en todos los momentos, por consiguiente, los polos del inducido puede decirse que permanecen estacionarios en el espacio, a Es esta acción magnética entre los polos del inducido y los inductores la que desarrolla las fuerzas de rotación en el eje del motor que le permiten hacer girar las cargas mecánicamente conectadas a él. Este esfuerzo rotativo se denomina par de fuerzas o par motor, de un motor que puede ejercer un esfuerzo rotativo relativamente elevado por amper cuando se pone en marcha, se dice que tiene un par de arranque relativamente elevado, y de otro que produce un esfuerzo de rotación relativamente pequeño por ampere al arrancar, se dice que tiene un par de arranque relativamente bajo. El par motor por amper como cualquier motor dado depende del tipo de motor: en serie, shunt o compound, y del diseño de la maquina. En general, el par de arranque por amperio será mayor en el motor en serie, algo menor para el motor compound y menor aun para el motor shuntunque el inducido propiamente dicho gire.

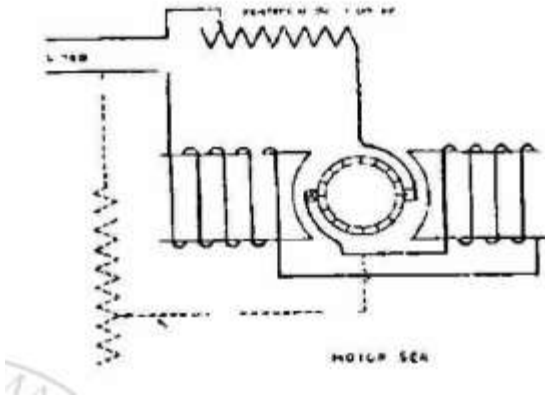
Motores Shunt.

El arrollamiento inductor de un motor shunt está conectado directamente a la línea o la fuente que suministra la corriente, en paralelo con su inducido. Este arrollamiento inductor shunt se compone de muchas vueltas de alambre fino y tiene una resistencia suficiente en ohms para limitar la corriente que pasa por las bobinas a la capacidad sin riesgo de los conductores que las forman. Como la resistencia del arrollamiento inductor shunt de un motor resulta prácticamente constante, esta corriente y la intensidad del campo inductor que crea dependerán indudablemente del voltaje de línea aplicado al motor.



Motores Serie.

Los motores serie tienen sus bobinas inductoras conectadas en serie con el inducido y la línea, como se indica en la Figura, Los devanados de los inductores de los motores serie se hacen con alambres gruesos o llantas de cobre y pueden consistir en unas cuantas docenas o en varios cientos de vueltas.



Maquinas Síncronas

Introducción

Ahora toca el turno a las maquinas de corriente alterna llamadas sincrónicas y toman ese nombre porque su velocidad está asociada directamente con la frecuencia del voltaje de la línea de c.a.

$$\omega_s = \frac{\omega_e}{P/2} = \frac{2\pi f}{p/2} \text{ rad / s}$$

$$ns = \frac{120 f}{p} \text{ r.p.m}$$

En donde:

ω_s Es la velocidad angular sincrónica

ω_e De es la velocidad angular del voltaje de la línea de c.a.

f Es la frecuencia del voltaje de la línea de c.a.

ns es la velocidad sincrónica en r.p.m.

Como otras maquinas eléctricas las maquinas sincrónicas operan ya sea como motores o como generadores.

A una maquina sincrónica polifásica que actúa como generador se le llama alternador, las maquinas eléctricas más grandes del mundo son alternadores sincrónicos como por ejemplo las usadas por la C.F.E. para generar la electricidad en el país.

Algunas tienen potencias específicas de tanto como 1700 millones de watts (1700 Mwatts), aunque están diseñadas para trabajar como generadores algunas veces las hacen de motores si se presentan condiciones anormales en el sistema.

Muchas máquinas sincrónicas polifásicas se diseñan para trabajar como motores. Una armadura de motor síncrono no solo necesita y recibe corriente alterna de la barra de distribución, sino también, como cualquier dinamo de c.c. necesita una excitación de c.c. para su campo.

Debido a la posibilidad de variación de excitación de campo, el motor síncrono de c.a. posee una característica que ningún otro motor de c.a. tiene, que el factor de potencia al cual funciona se puede variar a voluntad. Los motores sincrónicos son muy usados como capacitores para la corrección del factor de potencia en las grandes industrias.

Una segunda característica de los motores polifásicos y monofásicos sincrónicos es que no tienen arranque propio de inherente.

Como el alternador de c.a. se los debe acelerar hasta su velocidad mediante algún método auxiliar y conectar entonces a la línea.

Otra peculiaridad de los motores sincrónicos es su susceptibilidad a la fluctuación de penduleo u oscilación, en especial cuando las cargas están sujetas a troquelados, cizallas, compresoras o bombas reciprocantes.

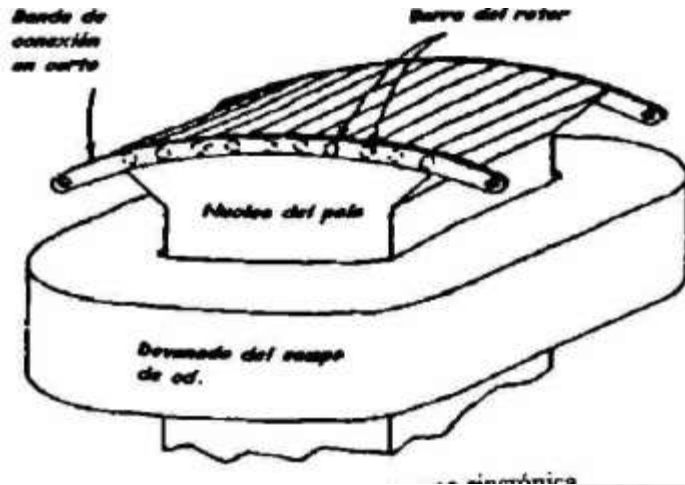
El empleo de devanados amortiguadores en la fabricación de los rotores ha puesto término a este problema, ha hecho posible que el motor síncrono tenga arranque propio, durante el período del arranque.

En la actualidad se emplea ampliamente el motor síncrono y su popularidad nunca ha sido mayor, los motores polifásicos sincrónicos tienen las siguientes ventajas específicas sobre los polifásicos de inducción:

- Los motores sincrónicos se pueden emplear para la corrección del factor de potencia. Además de suministrar el par necesario para impulsar sus cargas.
- Son más eficientes, cuando se trabajan a factor de potencia unidad, que los motores de inducción de potencia y voltaje nominales correspondientes.
- Los rotores de polos de campo de los motores sincrónicos pueden permitir el empleo de entrehierro más anchos que los diseños de jaulas de ardillas que usan en los motores de inducción.
- Pueden ser más baratos para la misma potencia, velocidad y voltaje nominales.

Construcción de la Maquina Sincrónicas.

La construcción de una maquina sincrónica de c.a. es la misma para el motor que para el generador. El estator tiene un devanado monofásico o polifásico. El rotor se puede construir de polos salientes o de rotor cilíndrico. La mayor parte de los rotores son de polos salientes con es de polos salientes, excepto en los motores de muy alta velocidad, que emplean el rotor cilíndrico.



Para eliminar la oscilación y desarrollar el par necesario de arranque, los polos del rotor contienen conductores de caras polares que se conectan en cortocircuito en sus extremos, como se muestra en la figura. Este devanado amortiguador consiste en barras macizas de cobre embebidas en la superficie de la cara polar y conectadas en cortocircuito mediante una banda, asemejando el devanado jaula de ardilla que se utiliza en los motores de inducción.

Funcionamiento del Generador Sincrónico

En un generador sincrónico debe de alimentarse el devanado del rotor con corriente continua, la cual produce un campo magnético giratorio dentro del generador, el cual a su vez induce un sistema de voltajes trifásicos en los arrollamientos del estator.

Esencialmente el rotor de un generador es un gran electroimán, los polos como se dijo anteriormente pueden ser salientes o no salientes (rotor cilíndrico), el termino saliente significa protuberante y significa que sobresale de la superficie del rotor.

Por otra parte el polo no saliente es uno construido al ras de la superficie del rotor. Los rotores cilíndricos se emplean para dos o cuatro polos, mientras que los de polos salientes se emplean para más de cuatro polos. Como el rotor está sujeto a campos magnéticos variables deberá de construirse con laminaciones para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

Debe de suministrarse alimentación de c.c. al circuito de campo del rotor. Como el rotor esta en movimiento, es necesario adoptar construcciones especiales, con el fin de suministrar la energía al campo.

Las dos soluciones más comunes son:

- Suministrar la energía de c.c. al rotor desde la fuente extrema, por medio de anillos rozantes y escobillas.
- Proveer la energía de c.c. por medio de una fuente especial llamada excitatriz, que es un generador de c.c. montado sobre el mismo eje de la maquina sincrónica y que aprovecha el movimiento de esta para generar la energía de c.c

Los anillos rozantes son aros metálicos que rodean al eje de la maquina, pero aislados del mismo eje. Cada extremo del arrollamiento del motor está conectado a un anillo y sobre cada anillo hace contacto una escobilla.

Si a las escobillas se conectan las terminales positiva y negativa de la fuente, en todo momento quedara aplicado el mismo voltaje al arrollamiento del campo, sin importar la velocidad angular ni la posición del rotor. La combinación de anillos rozantes y escobillas causa algún problema en las maquinas sincrónicas debido a que aumentan las exigencias de mantenimiento de la maquina por la periodicidad con que debe de revisarse el estado de desgaste de las escobillas.

Adicionalmente, la caída de voltaje en las escobillas puede ser causa de considerables pérdidas de potencia en maquinas con altas corrientes de campo. A pesar de esto se emplean los anillos rozantes con escobillas debido a que es el método funcional menos costoso de suministrar corriente de campo. El voltaje generado interno en esta máquina depende de la velocidad de rotación de su eje y de la magnitud del flujo de campo.

El voltaje de fase de la maquina difiere d

el voltaje generado debido a los efectos de resistencia de armadura y a las resistencia y reactancia interna del devanado de armadura, el voltaje terminal del generador podrá ser igual al voltaje de fase o podrá estar relacionado con este dependiendo como este conectada la maquina en delta o en estrella.

Actividades de Aprendizaje

Guía de Ejercicios

Esta colección de problemas resueltos está estructurada de forma que ayude al alumno a resolver por sí mismo los problemas propuestos. Se sugiere al alumno que sólo lea el enunciado del problema y que trate de resolverlo por su cuenta. Si lo necesita, puede utilizar las sugerencias que se incluyen en cada problema, el estudiante tendrá todo el modulo para resolverlas y se entregará después de la prueba parcial, para que de alguna manera le sirva como practica.

a. ¿Qué entiende por intensidad de campo magnético?

b. ¿Qué es la densidad de flujo magnético, ó inducción magnética?

a. Intensidad de campo, H: Causa imanadora o excitación magnética por unidad de longitud del circuito magnético. Su unidad es el Av/m.

b. Inducción magnética, B: Número de líneas de flujo por unidad de superficie que existen en el circuito magnético perpendiculares a la dirección del campo. Su unidad es el Tesla (T).

c. ¿Que se entiende por reluctancia de un circuito magnético?

d. ¿Que es la permeabilidad relativa?

c. Reluctancia magnética, Rm: Es la oposición que ofrece el circuito magnético al establecimiento del flujo. Depende de la naturaleza del material y de sus dimensiones. Su unidad es Henrio a la menos uno (H^{-1}) o Av/Wb.

d. La permeabilidad es la capacidad que tiene una sustancia para atraer y dejar pasar a las líneas de fuerza o el campo magnético.

Existen tres tipos de permeabilidad: la permeabilidad relativa, la permeabilidad absoluta y la permeabilidad del vacío.

1. La permeabilidad relativa. Se designa por las letras o símbolo μ_r . La permeabilidad relativa está definida en función de la capacidad que tiene un material o sustancia de aumentar la n° de las líneas de fuerza.

$$B = \mu_r \cdot B_0$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

2. La permeabilidad absoluta. Es la que se utiliza en realidad, porque relaciona la intensidad de campo magnético producido por una bobina con la inducción magnética. Se designa con la letra o símbolo μ . La unidad en el sistema internacional es el **henrios/metro (H/m)** y la fórmula para calcularla es:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

3. La permeabilidad de vacío. También conocida como permeabilidad del aire. Se designa con las letras o símbolo μ_0 . Su fórmula es:

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$$

e. **¿Cómo varía la permeabilidad de un material ferromagnético ante la fuerza magnetomotriz?**

Relación B-H de un material

La intensidad de campo magnético y la inducción magnética en cualquier material están relacionadas a través de la permeabilidad magnética del mismo, μ ,

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad , \quad \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$$

donde: μ = permeabilidad magnética (Wb/A·v·m),

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío (Wb/A·v·m),

μ_r = permeabilidad relativa (sin dimensiones), siendo:

- materiales no magnéticos $\mu_r = 1$,
- materiales ferromagnéticos $2000 < \mu_r < 6000$ (valores usuales en la zona lineal).

La intensidad de campo magnético depende de la fuerza magnetomotriz, por lo cual hay una relación directa entre permeabilidad de un material ferromagnético y la fuerza magnetomotriz

f. ¿Qué entiende por histéresis magnética?

Es la relación entre la densidad de campo magnético (B) y la intensidad de campo magnético (H)

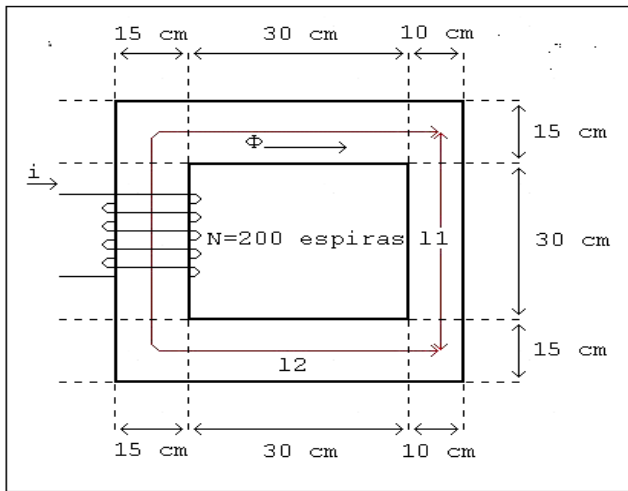
Fuerza electromotriz (E)	Fuerza magnetomotriz (F_m)
Intensidad (I)	Flujo magnético (Φ)
Resistencia eléctrica (R)	Reluctancia magnética (R_m)
Ley de Ohm ($E = I * R$)	Ley de Hopkins ($F_m = \Phi * R_m$)

La fuerza electromotriz es la encargada de generar la corriente eléctrica a través de un circuito eléctrico y la fuerza magnetomotriz es la encargada de generar el flujo de campo magnético a través de un circuito magnético

La fuerza electromotriz es igual al producto de la resistencia eléctrica del circuito por la corriente que circula por él, la fuerza magnetomotriz es igual al producto de la reluctancia eléctrica del circuito por el flujo de magnético que circula por el

Problema 1

La figura muestra un núcleo ferromagnético. Tres lados de este núcleo son de ancho uniforme, mientras que el cuarto lado es algo más delgado. La profundidad del núcleo (perpendicular a la página) es de 10 cm y las otras dimensiones se muestran en la figura. Hay una bobina de 200 vueltas alrededor del lado izquierdo del núcleo. Suponga una permeabilidad μ_r de 2500, ¿cuánto flujo producirá una corriente de alimentación de 1 A?



$$L_a = 2(15/2 + 30 + 10/2) + (15/2 + 30 + 15/2) = 130 \text{ cm}$$

$$L_b = (15/2 + 30 + 15/2) = 45 \text{ cm}$$

$$S_i = 15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 150 \text{ cm}^2$$

$$S_b = 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2$$

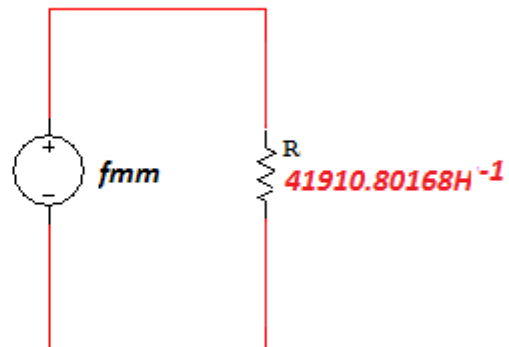
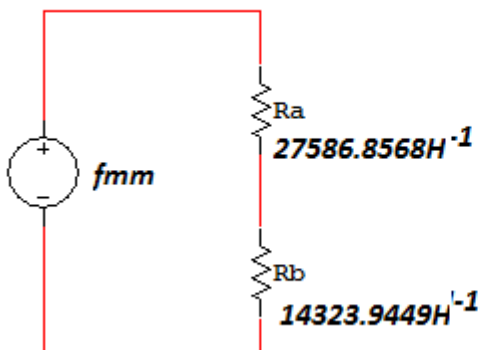
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{mt}}$$

$$\mu_r = 2500$$

$$I = 1 \text{ A}$$

$$N = 200$$

$$\Phi = ?$$



$$\mathfrak{R}_a = \frac{l_a}{\mu_r \times \mu_0 \times S_a} = \frac{130 \times 10^{-2} \text{ mt}}{2500 \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{mt}} \times 150 \times 10^{-4} \text{ mt}^2} = 27586.8568 \text{ H}^{-1}$$

$$\mathfrak{R}_b = \frac{l_b}{\mu_r \times \mu_0 \times S_b} = \frac{45 \times 10^{-2} \text{ mt}}{2500 \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{mt}} \times 100 \times 10^{-4} \text{ mt}^2} = 14323.94488 \text{ H}^{-1}$$

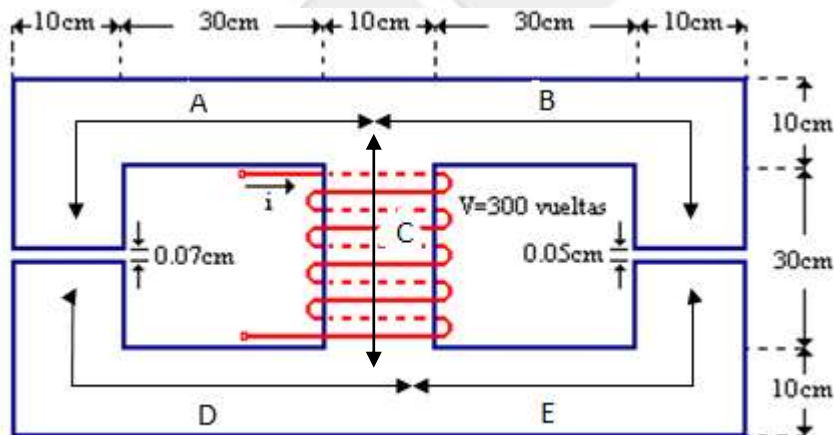
$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_b = 27586.8568 \text{ H}^{-1} + 14323.94488 \text{ H}^{-1} = 41910.80168 \text{ H}^{-1}$$

$$\mathfrak{F}_{\text{mm}} = N \cdot i = \phi \times \mathfrak{R} \rightarrow$$

$$\phi = \frac{Nxi}{\mathfrak{R}} = \frac{200 \text{ v} \times 1 \text{ A}}{41910.80168 \frac{\text{AV}}{\text{Wb}}} = 0.00477203947 \text{ Wb} = 4.772 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

Problema 2

La figura muestra un núcleo de material ferromagnético cuya permeabilidad relativa es 2000. Las dimensiones están en la figura, excepto su profundidad que es de 7cm. Los entrehierros de las columnas de la izquierda y de la derecha tienen entre 0.050 y 0.070 cm. respectivamente. Debido al efecto de refringencia, el área efectiva de los entrehierros es 5 por ciento mayor que su tamaño físico. Si la bobina devanada sobre la columna central tiene 300 espiras y por ella circula una corriente de 1.0 (A) ¿Cuál es el flujo en cada una de las columnas? ¿Cuál es la densidad de flujo en cada uno de los entrehierros?



$$L_a = L_b = L_d = L_e = (15 + 10/2 + 10/2 + 30 + 10/2) = 60 \text{ cm}$$

$$L_c = (10/2 + 30 + 10/2) = 40 \text{ cm}$$

$$S_a = S_b = S_d = S_e = 10 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} = 70 \text{ cm}^2$$

$$d_{ga} = d_{gb} = 10 \text{ cm}$$

$$g_a = 0.07 \text{ cm}$$

$$g_b = 0.05 \text{ cm}$$

$$p = 7 \text{ cm}$$

$$S_c = 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2$$

$$S_{gha} = (d_a + g_a) \times (p \times 5\% + g_a) = (10 \times 10^{-2} \text{ m} + 0.07 \times 10^{-2} \text{ m}) \times (7 \times 10^{-2} \times 5\% + 0.07 \times 10^{-2} \text{ m}) = 0.00042294 \text{ m}^2 = 422.94 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$S_{ghb} = (d_b + g_b) \times (p \times 5\% + g_b) = (10 \times 10^{-2} \text{ m} + 0.05 \times 10^{-2} \text{ m}) \times (7 \times 10^{-2} \times 5\% + 0.05 \times 10^{-2} \text{ m}) = 0.000402 \text{ m}^2 = 402 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

$$\mu_r = 2000$$

$$I = 1 \text{ A}$$

$$N = 300 \text{ V}$$

$$\Phi_c = ?$$

$$B_{gh} = ?$$

$$\mathfrak{R}_a = \mathfrak{R}_b = \mathfrak{R}_d = \mathfrak{R}_e = \frac{l_a}{\mu_r \times \mu_0 \times S_a} = \frac{60 \times 10^{-2} \text{ m}}{2000 \times 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \times 70 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 34104.63066 \text{ H}^{-1} \text{ o } \left(\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right)$$

$$\mathfrak{R}_{gha} = \frac{g_a}{\mu_0 \times S_{gha}} = \frac{0.07 \times 10^{-2} \text{ m}}{4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \times 422.94 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 1317071.691 \text{ H}^{-1} \text{ o } \left(\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right)$$

$$\mathfrak{R}_{ghb} = \frac{g_b}{\mu_0 \times S_{ghb}} = \frac{0.05 \times 10^{-2} \text{ m}}{4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \times 402 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 989769.5466 \text{ H}^{-1} \text{ o } \left(\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right)$$

$$\mathfrak{R}_c = \frac{l_c}{\mu_r \times \mu_0 \times S_c} = \frac{40 \times 10^{-2} \text{ m}}{2000 \times 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \times 100 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1591549.431 \text{ H}^{-1} \text{ o } \left(\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right)$$

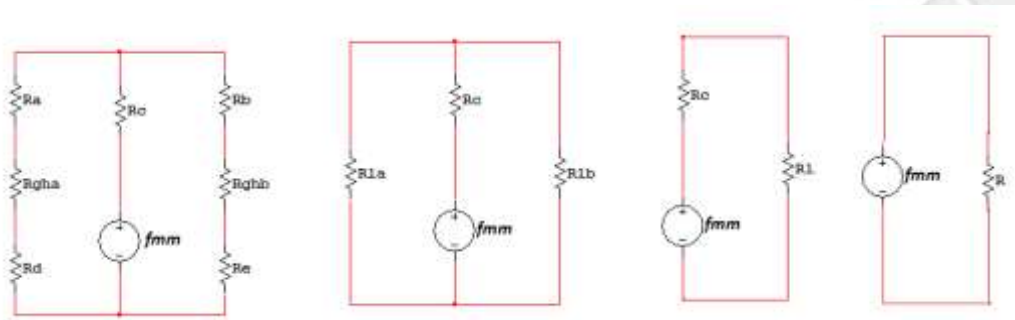
$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_{1a} &= \mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_{gha} + \mathfrak{R}_d = 34104.63066 \text{ H}^{-1} + 1317071.691 \text{ H}^{-1} + 34104.63066 \\ &= 1385280.952 \text{ H}^{-1} \text{ o } \left(\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right) \end{aligned}$$

$$\mathfrak{R}_{lb} = \mathfrak{R}_b + \mathfrak{R}_{ghb} + \mathfrak{R}_e = 34104.63066H^{-1} + 989769.5466H^{-1} + 34104.63066$$

$$= 1057978.808H^{-1} o \left(\frac{Av}{Wb} \right)$$

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{\mathfrak{R}_{la} \times \mathfrak{R}_{lb}}{\mathfrak{R}_{la} + \mathfrak{R}_{lb}} = \frac{1.465597891 \times 10^{12}}{2443259.76} = 599853.4885H^{-1} o \left(\frac{Av}{Wb} \right)$$

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_1 = 1591549.431H^{-1} + 599853.4885H^{-1} = 2191402.92H^{-1} o \left(\frac{Av}{Wb} \right)$$



Flujo por cada una de las columnas

$(R_{la} + R_c) \phi_{la} + R_c \phi_{lb} = fmm$ $R_c \phi_{la} + (R_{la} + R_c) \phi_{lb} = fmm$ $\begin{cases} 2976830.383 \phi_{la} + 1591549.431 \phi_{lb} = 300 \\ 1591549.431 \phi_{la} + 2649528.239 \phi_{lb} = 300 \end{cases}$ $\phi_{la} = 59.27974 \times 10^{-6} Wb$ $\phi_{lb} = 77.61885 \times 10^{-6} Wb$ $\phi_c = \phi_{la} + \phi_{lb} = 136.89859 \times 10^{-6} Wb$	
---	--

Densidad de flujo en cada entrehierro

$$B = \frac{\phi}{s}$$

$$B_{gha} = \frac{\Phi_{la}}{s_{gha}} = \frac{59.27974 \times 10^{-6} \text{ Wb}}{422.94 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = \mathbf{0.140161T}$$

$$B_{ghb} = \frac{\Phi_{lb}}{s_{ghb}} = \frac{77.61885 \times 10^{-6} \text{ Wb}}{402 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = \mathbf{0.193082T}$$

Evaluación 1

Generalidades parámetros y ensayos

Los ensayos de un transformador monofásico de 10 kVA, 230/2300 V han dado los siguientes resultados:

Vacío (medidas en el lado de B.T.)

230 V 0,45 A 70 W

Cortocircuito (medidas en el lado de A.T.):

120 V 4,5 A 240 W

A) Calcular los parámetros del circuito equivalente.

b) Calcular las tensiones relativas

Se ha ensayado un transformador monofásico de 500 kVA, 15000/3000 V y 50 Hz, obteniéndose los siguientes resultados:

Vacío: 15000 V 1,67 A 4000 W

Cortocircuito: 126 V 140 A 7056 W

a) Obtener los parámetros del circuito equivalente del transformador reducido al primario.

b) Determinar las caídas relativas de tensión

Rendimientos, cortocircuitos y caídas de tensión

Del transformador anterior calcular:

a) Tensión con que hay que alimentar este transformador por el primario para que proporcione la tensión asignada en el secundario cuando suministra 800 kVA con factor de potencia 0,8 inductivo.

- b) Potencia aparente de máximo rendimiento y el mayor de los rendimientos máximos.
- c) Intensidad permanente de cortocircuito en el primario y en el secundario y la corriente de choque.

Transformadores

1. Un ingeniero quiere analizar una instalación que está alimentada por un viejo transformador monofásico del que carece de información y cuya placa de características está casi ilegible, de modo que sólo ha podido averiguar que la relación de transformación es 10000/1000 V, que la potencia asignada vale 400 kVA y la frecuencia asignada es 50 Hz.

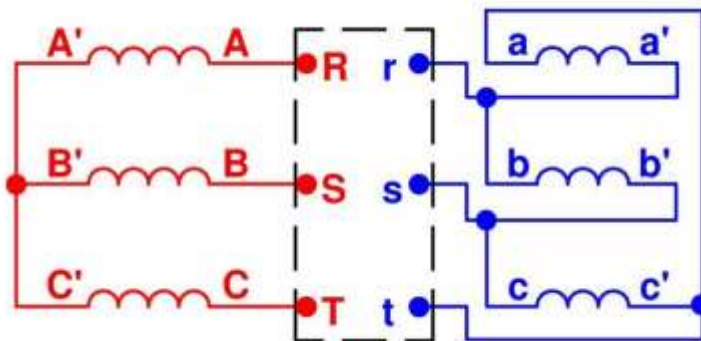
De los datos de funcionamiento de la instalación sabe que cuando el transformador está en vacío a la tensión asignada circula una corriente de 0,6 A por él primario y consume 1000 W. También obtiene que cuando el transformador está a media carga, con factor de potencia unidad y con la tensión asignada en el primario, la tensión secundaria es 991,9 V y a plena carga con factor de potencia 0,8 inductivo, la tensión en el secundario vale 955,5 V.

Calcular:

- a) Las medidas que se hubieran obtenido de haber realizado el ensayo de cortocircuito a la intensidad asignada y alimentando el transformador por el primario.
- b) La intensidad de cortocircuito en régimen permanente en el primario y la corriente de choque.

2. De un transformador monofásico de 0,5 MVA, 10000/1000 V y 50 Hz se sabe que cuando su primario está a la tensión asignada V_{1N} y se produce un cortocircuito en el secundario por el primario circula una corriente de régimen permanente 625 A y el factor de potencia vale entonces 0,313. También se sabe que el máximo rendimiento de este transformador se produce cuando el índice de carga es 0,8 y que cuando está en vacío la corriente en el primario vale 2 A. Calcular los μ FCC, PC, P0, Rafe y X_{ϵ} FCC, ϵ cc, ϵ parámetros

3. En el transformador trifásico de la figura adjunta:



- a) determine el índice horario.

- b) Indique la forma de conexión según la nomenclatura normalizada.
- c) Calcule el cociente entre las relaciones de transformación de tensiones m_i y la relación de transformación m (suponga que el primario es el lado de alta tensión (A.T.)).

Conclusiones y Recomendaciones

Es por demás conocido que con la revolución de la tecnología en cuanto a nuevos equipos electrónicos para el control de velocidad de los motores eléctricos es necesario contar con ingenieros y técnicos que conozcan tanto de motores eléctricos como de la electrónica asociada a los controles de velocidad, es por eso que este trabajo trata de dar un panorama general al ingeniero y técnico en electrónica de los principios básicos de las maquinas eléctricas, así como de la aplicación de estas en la industria, también algo que es poco tratado en los libros que tratan de maquinas eléctricas son las nuevas tecnologías en cuanto a la construcción de motores, tecnologías que ya se están aplicando en la industria de la localidad como son por ejemplo los motores de corriente directa sin escobillas.

En cuanto a las recomendaciones que hago, recuerden que la tecnología cambia minuto a minuto estoy casi seguro que vendrán mejoras en cuanto a la construcción de núcleos de transformadores, motores de alta eficiencia y el mejoramiento de los controles de velocidad de motores es por eso que exhorto al lector para que esta obra sirva como una referencia o un buen principio para cualquier trabajo de investigación que desee realizar.

Por último aclaro que muchos de los temas que se tocan en esta tesis son vistos sin el suficiente soporte matemático que ameritan pero, se pueden profundizar en cada uno de los temas ayudados con la bibliografía que se recomienda.

Bibliografía

1. FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles Jr.; UMANS, Stephen D. "Máquinas Eléctricas". Editorial McGrawHill. Sexta Edición. México. 2004.
2. CHAPMAN, Stephen J. "Máquinas Eléctricas". Editorial McGrawHill. Cuarta Edición. México. 2005.

