

65
2 gen.



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

Facultad de Ingeniería

**GUIA DE ESTUDIO PARA
TRANSFORMADORES Y
MOTORES DE INDUCCION**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P r e s e n t a n

Edmundo González Márquez
Miguel Tinoco Prieto



México, D. F.

1985



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PROLOGO DE TESIS

Dentro de los propósitos de la FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO por elevar el nivel académico de sus alumnos, está la noble tarea de elaborar una serie de apuntes que han sido, con mucho, de gran ayuda para el estudiantado en varias de las materias que se imparten en esta facultad. Nosotros hemos puesto nuestro mejor esfuerzo al elaborar este trabajo, que no pretende ser uno de los apuntes como los que edita la facultad y que requieren siempre de un grupo de profesores y pedagogos, sino mas bien, pretende ser una guía de estudio que en forma clara, ordenada y con elementos didácticos permitan el aprendizaje del material que conforma el programa de la asignatura TRANSFORMADORES Y MOTORES DE INDUCCION.

Se pretende que, esta guía contribuya, de alguna manera tal vez modesta, a la elaboración de un mejor material didáctico que cubra las necesidades de aprendizaje de los alumnos de esta facultad.

Una de las razones que nos hizo proponer este trabajo, es que revisando los libros que tratan sobre máquinas eléctricas y que se usan como texto en nuestra facultad, encontramos que ninguno cubre los temas de la asignatura conforme la secuencia propia del programa que se ha implantado en la facultad. De esa diversidad de literatura, decidimos basarnos en 5 libros: Uno para Antecedentes Teóricos, otro para Transformadores, uno más para Motores de Inducción, y dos para las pruebas que se les realizan a estas máquinas.

INDICE GENERAL

ELEMENTOS DIDACTICOS.

ADVERTENCIA

OBJETIVO GENERAL.

TEMA I; CARACTERÍSTICAS DE LOS CIRCUITOS MAGNÉTICOS.

Modulo 1.- Definiciones y conceptos básicos del circuito magnético.

Modulo 2.- Excitación de núcleos ferromagnéticos (sin y con entrehierro), con corriente directa.

Modulo 3.- Excitación de núcleos ferromagnéticos con corriente alterna,

TEMA II; TEORÍA DEL TRANSFORMADOR.

Modulo 4.- Transformador ideal.

Modulo 5.- Deducción del circuito equivalente.

Modulo 6.- Características de funcionamiento de los transformadores.

Modulo 7.- Transformadores de medición y nociones de diseño.

TEMA III; OPERACIÓN DEL TRANSFORMADOR EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Modulo 8.- Conexiones de transformadores monofásicos en sistemas monofásicos y trifásicos.

Modulo 9.- Transformadores trifásicos.

Modulo 10.- Descripción de elementos de una subestación.

TEMA IV: MOTORES POLIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

Modulo 11.- Estructura y funcionamiento del motor polifásico de inducción.

Modulo 12.- Circuito eléctrico equivalente, curvas por velocidad.

Modulo 13.- Clasificación, normas y especificación de los motores de inducción.

TEMA V: INSTALACIÓN DE MOTORES.

TEMA VI: MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

ELEMENTOS DIDACTICOS

El contenido temático de ésta guía de trabajo, esta dividido en temas que por su amplitud se dividieron en módulos, a fin de que al dosificar los contenidos se adquiriera el mayor conocimiento y comprensión de los mismos, para así lograr el aprendizaje propuesto.

Con el fin de que ésta guía de trabajo se utilice adecuadamente, a continuación se presentan los elementos didácticos que la conforman.

En cada tema se cuenta con:

- a) Introducción: Muestra un panorama general del contenido.
- b) Objetivos Generales: Indica los resultados que se espera se alcancen como producto final del proceso de estudio.

Los elementos didácticos con que cuentan los módulos son:

- a) Cuadro Sinóptico: Presenta los temas del módulo.

El signo  con un número dentro, en el cuadro de referencias bibliográficas, ubicará al lector en el capítulo y sección del libro recomendado, en el que debe profundizar el estudio del tema.

- b) Cuadro de Referencias Bibliográficas: Facilita la localización de los temas en la bibliografía.

- c) **Objetivos Específicos:** Se desglosan de los objetivos generales del tema.
- d) **Contenido:** Se hace un breve resumen de los temas del programa de la materia, incluye ejemplos resueltos de aplicaciones concretas.

El resumen aquí presentado no basta para obtener un conocimiento amplio y efectivo de cada tema, servirá únicamente de repaso a los conocimientos que deben adquirirse estudiando cada uno de los temas del programa de la materia en los libros especializados que se mencionan en el cuadro de referencia bibliográfica.

- e) **Cuestionario:** Son preguntas que el alumno debe responder para reafirmar la comprensión de los temas. Adicionalmente le permiten medir el grado en que logró los objetivos de aprendizaje propuestos.

Al final del trabajo se encuentran:

- a) **Examen de Autoevaluación:** Es un examen que permite al alumno verificar por sí mismo, si ha alcanzado el mínimo necesario de los objetivos de aprendizaje correspondientes a los seis temas.
- b) **Solución al Examen de Autoevaluación:** Es la referencia en la que el alumno puede comprobar sus respuestas.
- c) **Soluciones a los Ejercicios Propuestos:** Es el grupo de respuestas correctas a los ejercicios.
- d) **Bibliografía Básica:** Informa al alumno donde puede consultar y profundizar sobre los temas que requiera.

ADVERTENCIA

Se recomienda al estudiante que:

- 1^a Se ubique en el plan de estudios de su carrera y se de cabal cuenta de los antecedentes que debe tener para seguir fácilmente el curso; para ello le proporcionamos los planes de estudio que incluyen esta materia.

- 2^a Que visualice los conceptos que crea necesario haya que repasar y que se vayan a emplear durante el curso, para ello le proporcionamos el programa de la asignatura. Ambos, planes y programa se encuentran en los Anexos.

- 3^a Debe consultar los siguientes libros para la teoría:
 - a) Electricidad y Magnetismo : Antecedentes de Electricidad y Magnetismo.
Sears
Aguilar.

 - b) Conversión de Energía : Transformadores.
Electromecánica.
Gourishankar
Prepresentaciones y
Servicios de Ingeniería.

 - c) Máquinas Electromagnéticas : Motores de Inducción.
y Electromecánicas
Matsch L. W.
Representaciones y Servicios
de Ingeniería.

4ª Para las pruebas de laboratorio debe consultar los siguientes libros:

- a) Pruebas de Equipo : Transformadores.
Eléctrico I
Victor Pérez Amador
Barrón
Limusa.
- b) Pruebas de Equipo : Motores de Inducción.
Eléctrico II
Victor Pérez Amador
Barrón
Limusa.

5ª Esta guía está elaborada en base a los libros mencionados en el inciso anterior, por lo consiguiente se empleará el sistema de unidades que contenga el libro recomendado en el cuadro de referencias bibliográficas.

OBJETIVO GENERAL DEL CURSO

Analizar cualitativa y cuantitativamente el funcionamiento de transformadores y motores de inducción bajo diferentes condiciones de carga, apoyándose en fenómenos físicos que justifiquen dicho funcionamiento; efectuar las pruebas de laboratorio necesarias que permiten evaluar el buen o mal estado de dichas máquinas, obtener elementos para efectuar su correcta instalación eléctrica y lograr una operación adecuada.

TEMA I. CARACTERÍSTICAS DE LOS CIRCUITOS MAGNÉTICOS.

OBJETIVO GENERAL

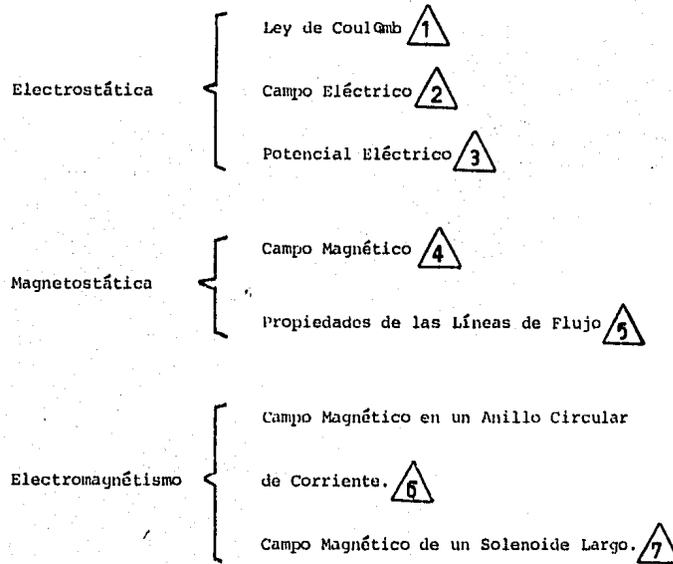
Analizar el comportamiento de las variables eléctricas y magnéticas en circuitos exitados con C. D. y C. A.

INTRODUCCION

En un motor de inducción la energía eléctrica se recibe en sus partes eléctricas y se transfiere a sus partes mecánicas a través de un encadenamiento de flujo magnético. En un transformador la energía se recibe en un embobinado, llamado primario, y se transfiere también a través de un encadenamiento de flujo magnético a otro embobinado - llamado secundario. Es de notar entonces, la gran importancia que tiene conocer la forma de este medio de acoplamiento magnético en estructuras lineales o no lineales y las relaciones que guardan con los parámetros eléctricos voltaje y corriente.

DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS
DEL CIRCUITO MAGNÉTICO

CUADRO SINÓPTICO:



CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

	1	2	3	4	5	6	7	8
Gourishankar, V: Conversión de Energía Electromecánica; Representaciones y Serv. de Ing. S.A. México 1965.	CAP. I Sec.1-2	CAP. I Sec.1-2-2	CAP. I Sec.1-2-3	CAP. I Sec.1-3		CAP. I Sec.1-3	CAP. I Sec.1-3	CAP. I Sec.1-5
Sears, F.W.: Electricidad y Magnetismo; Aguilar, España 1977.	CAP. I Sec.1-4 Sec.1-6	CAP. II Sec.2-1 Sec.2-2	CAP. III Sec.3-3	CAP. IX, XI Sec.9-1,2, 3,11-1,2, 3,4,5.		CAP. XI Sec.11-5	CAP. XI Sec.11-6	

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.- Establecer las diferencias entre campo eléctrico y campo magnético.
- 2.- Identificar los conceptos de:
 - a) Permitividad (ϵ)
 - b) Líneas de Flujo
 - c) Flujo Magnético (ϕ)
 - d) Intensidad de Flujo Magnético. (H)
 - e) Densidad de Flujo (B)
 - f) Fuerza Magnetomotriz (\mathcal{F})
 - g) Reluctancia (\mathcal{R})
 - h) Inductancia (L)
- 3.- Conocer la regla de la mano derecha
- 4.- Evaluaciones del campo magnético en conductores de formas geométricas conocidas que transportan una corriente eléctrica.
- 5.- Conocer el concepto de circuito magnético
- 6.- Conocer la ley de Ohm para circuitos magnéticos

I.1.1.- ELECTROSTATICA.

A continuación se dan algunos conceptos básicos sobre los que se desarrolla el circuito electromagnético:

- LEY DE COULOMB

La fuerza de atracción o repulsión que se ejerce entre dos cargas (q_1) y (q_2), es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (R) que las separa.

$$F = K \frac{q_1 q_2}{R^2} \quad \left[\frac{\text{New}}{\text{Coul}^2} \right] \quad (1.1)$$

Si las cargas son de igual signo, la fuerza que resulta es una repulsión, y si son de signo contrario una atracción.

La facilidad o dificultad para tener una fuerza de mayor o menor intensidad en cualquier medio, depende de las características del medio, dicha característica se denomina: permitividad. ()

La constante de proporcionalidad K en la ley de Coulomb depende de la permitividad :

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon} \quad \left[\frac{\text{New} \cdot \text{m}}{\text{Coul}^2} \right]$$

Por lo tanto:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{R^2} \quad \left[\frac{\text{New}}{\text{Coul}^2} \right] \quad (1.1 a)$$

Para el caso particular del vacío, su permitividad se conoce como ϵ_0 y su valor es:

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \left[\frac{\text{coul}^2}{\text{new-m}} \right]$$

Entonces para el vacío:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9 \left[\frac{\text{New-m}^2}{\text{coul}^2} \right]$$

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2} \quad [\text{New}] \quad (1.1 \text{ b})$$

- CAMPO ELECTRICO.

Es el espacio que rodea una partícula que contiene carga eléctrica, se representa por líneas de fuerza como se muestra en la figura (1.1)

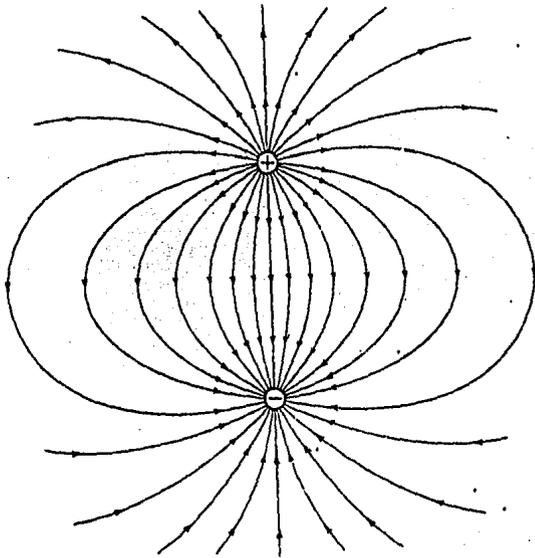


Figura 1.1.- Representación de un campo eléctrico mediante líneas de fuerza.

El campo eléctrico será mayor, entre mayor concentración de cargas se tenga y consecuentemente la fuerza de atracción o repulsión resulta mayor o menor.

La intensidad de campo (E) se obtiene mediante la relación de la intensidad de fuerza (F) entre la cantidad de carga (q) que la provoca, es decir:

$$E = \frac{F}{q} \left[\frac{\text{New}}{\text{coul}} \right]$$

Considerando las cargas distribuidas en la superficie de un conductor finito, la intensidad de campo está dada por:

$$E = \frac{1}{4 \pi \epsilon} \int \frac{dq}{R} \left[\frac{\text{New}}{\text{coul}} \right]$$

1.1.2.- MAGNETOSTATICA

En la electrostática se estudian las fuerzas sobre cargas colocadas en un campo eléctrico creado por otras cargas fijas. Si alguna o todas las cargas están en movimiento, ver fig.1.2, estas experimentarán fuerzas adicionales a las de Coulomb debido a la velocidad, estas fuerzas son llamadas fuerzas magnéticas.

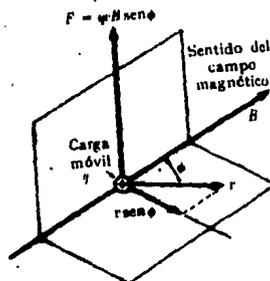


Fig.1.2.-La fuerza magnética F que actúa sobre una carga q, que se mueve con velocidad v, es perpendicular al campo magnético.

- CAMPO MAGNETICO.

La zona en la que existen fuerzas magnéticas es conocida como campo magnético; un campo magnético es entonces un campo de fuerza y por ello se representa por líneas de fuerza llamadas líneas de inducción o de flujo.

A la cantidad de líneas de flujo que atraviesan una superficie (A) perpendicular a ellas se denomina Densidad de flujo:

$$B = \frac{\Phi}{A} \left[\frac{\text{webers}}{\text{m}^2} \right] \quad (1.4)$$

Donde B es la densidad de flujo, Φ es el flujo magnético y A es área perpendicular por la que atravieza el flujo.

- PROPIEDADES DE LAS LINEAS DE FLUJO.

- a) Afuera de un imán las líneas se dirigen del polo norte al polo sur magnético, dentro del imán se dirigen del polo sur al polo norte.
- b) Las líneas de inducción siempre forman trayectorias cerradas.
- c) Poseen una propiedad elástica en su longitud, que las hace que tiendan a acortarse en lo más posible, como si fueran ligas de hule.
- d) Se repelen entre sí.
- e) Nunca llegan a intersectarse.

Las figuras 1.3a y 1.3b, ilustran las propiedades mencionadas:

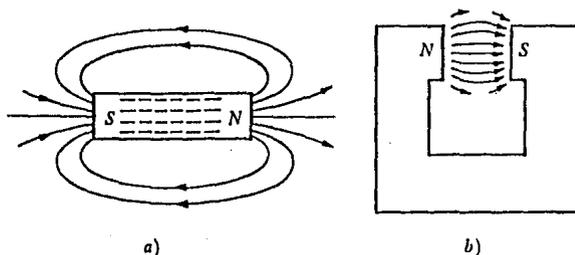


Figura 1.3.- Líneas de flujo.

I.1.3.- ELECTROMAGNETISMO.

En cualquier conductor por el que circula una corriente eléctrica, se genera sobre y alrededor de él, un campo magnético en forma de circunferencias concéntricas. Si es corriente directa la que circula, el campo magnético generado será fijo ó estacionario, si se trata de una corriente alterna la que circula por el conductor, el campo será variable. En ambos casos el campo está en función directa de la intensidad de la corriente.

Después de la generación de campos magnéticos a partir de corrientes eléctricas (Cargas en movimiento), se hizo necesario conocer el sentido del campo. Los experimentos de Fleming, permitieron establecer la regla de la mano derecha.

- REGLA DE LA MANO DERECHA.

Con el dedo pulgar de la mano derecha se indica la dirección de la corriente (i) y la curvatura de los demás dedos, alrededor del alambre indica la direc -

ción del campo magnético (B) como se muestra en la figura 1,4,

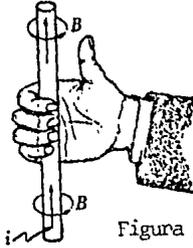


Figura 1,4.

- CAMPO MAGNETICO EN UN CONDUCTOR RECTO Y LARGO.

El campo magnético generado alrededor de un conductor recto y largo cuando circula una corriente eléctrica por el, está dado por:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} \quad (1.5)$$

Donde: B es la densidad de campo magnético, I es la corriente eléctrica, r es la distancia radial del centro del conductor al punto donde se desea calcular el campo y μ_0 es la constante de permeabilidad en el vacío y tiene un valor de :

$$\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \frac{\text{weber}}{\text{Amp} \cdot \text{m}}$$

La figura 1.5 muestra un conductor y el campo magnético que se crea en el al circular una corriente.

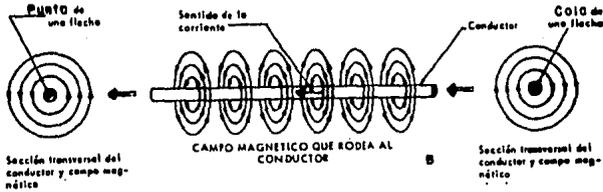


Figura 1.5.- Campo magnético en un conductor recto.

◀ CAMPO MAGNETICO EN UN CONDUCTOR EN FORMA DE ESPIRA CIRCULAR.

Si al conductor recto que esta conduciendo una corriente lo enrollamos a manera de obtener una espira, el campo magnético generado será como el mostrado en la figura 1.6.

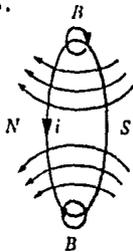


Figura 1.6.- Líneas de inducción magnética en una espira con corriente.

- CAMPO MAGNETICO EN UN SOLENOIDE

Si la misma corriente que se aplica a un conductor recto se hace circular en un solenoide (ó bobina) de N espiras del mismo radio, como el mostrado en la fig. 1.7, la densidad de flujo en el solenoide resulta considerablemente mayor que en el conductor recto.

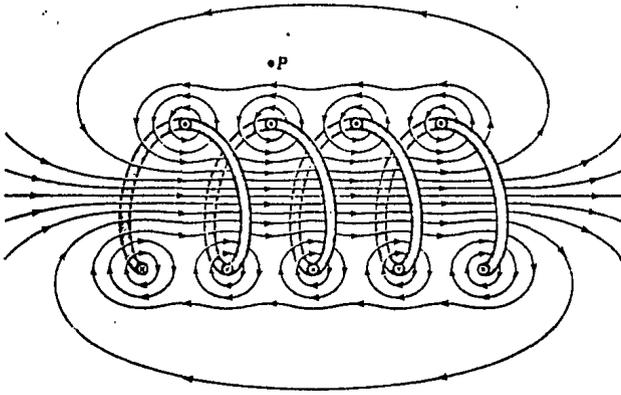


Figura 1.7.- Líneas de inducción magnética en un solenoide de espiras separadas

El valor de la densidad de flujo en el centro de las espiras esta dado por la siguiente expresión.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \quad (1.6)$$

Donde: B es la densidad de flujo, N es el número de espiras de la bobina, I es la corriente eléctrica, R es el radio de las espiras, μ_0 es la permeabilidad del vacío.

Si se considera que la longitud (L) de la bobina, es mucho mayor que el radio de curvatura (R) de las espiras, el valor de la densidad de flujo en el centro de la bobina es

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad (1.7)$$

- CAMPO MAGNETICO EN UN TOROIDE

La fig.1.8 muestra un toroide, con núcleo ferromagnético, obsérvese que la mayor parte del flujo es confinado y uniformemente distribuido en el núcleo.

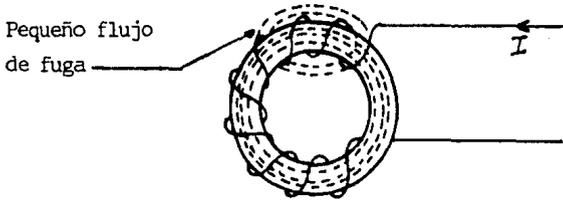


Figura 1.8.- Toroide con núcleo ferromagnético.

Si el núcleo en un toroide es el vacío, la densidad de flujo dentro de el es:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L}$$

Por lo tanto el flujo total es

$$\phi = \frac{\mu_0 NIA}{L} = \frac{NI}{L/\mu_0 A} \quad (1.8)$$

1.1.4.- CONCEPTO DE CIRCUITO MAGNETICO.

El concepto de circuito magnético es análogo al concepto de circuito eléctrico.

Entendemos por circuito eléctrico a la conexión fuente-conductor que establece un circuito o camino cerrado por donde circula una corriente eléctrica.

Análogamente, entendemos por circuito magnético a la conexión fuente-conduc-

tor que establece un circuito o trayectoria cerrada por donde circula un flujo magnético, donde la fuente de campo magnético es la corriente que genera el campo, y el medio conductor que permite establecer el circuito por donde circula el flujo es el vacío en el caso del solenoide ó el núcleo ferromagnético en el caso del toroide.

El campo magnético puede estar disperso (caso de un solenoide) ó confinado en un espacio bien definido (caso del Toroide). Cuando se encuentra disperso, los circuitos de las líneas de inducción son las que se dispersan y pueden tener formas distintas. En el caso del toroide todos los circuitos de las líneas de inducción, tienen la misma forma, y todo el conjunto de las líneas de inducción pueden considerarse como un circuito magnético.

El circuito eléctrico mostrado en la fig. 1.9 (a) es similar a la estructura mostrada en la fig. 1.9 (b). La corriente I en el circuito eléctrico es:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{L/\sigma A} \quad 1.8 (a)$$

donde;

$V = \text{fem}$

$R = \text{resistencia}$

$\sigma = \text{conductividad de la resistencia}$

$L = \text{longitud}$

$A = \text{area de sección transversal de la resistencia}$

La similitud entre las ecuaciones 1.8 y 1.8 (a) es evidente. La ecuación 1.8 (a) es la bien conocida Ley de Ohm para circuitos eléctricos y la ecuación 1.8 se conoce como la Ley de Ohm para circuitos magnéticos.

ANALOGIA ENTRE CIRCUITOS ELECTRICOS Y CIRCUITOS MAGNETICOS.

Analícemos un circuito eléctrico y un circuito magnético para ver la similitud que existe entre ellos:

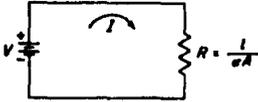


Fig. 1.9 (a) Circuito Eléctrico

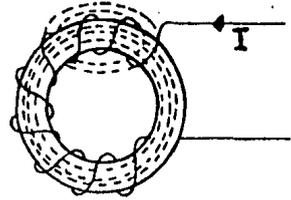


Fig.1.9 (b) Circuito Magnético.

Del circuito eléctrico:

Figura 1.9

Del circuito magnético:

$$I = \frac{\text{fem (V)}}{R} \quad (1.9 \text{ a})$$

$$\phi = \frac{\text{f mm (F)}}{\mathcal{R}} \quad (1.9 \text{ a}')$$

de donde la fuerza electromotriz ó fuente de voltaje es: $\text{fem (v)} = IR$ (1.9 b)

de donde la fuerza magnetomotriz es: $\text{fmm (F)} = \phi \mathcal{R}$ (1.9 b')

La resistancia en el circ.elec.esta dada por:

$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{L}{\sigma A} \quad (1.9 \text{ c})$$

La reluctancia en el circ. magnético está dada por:

$$\mathcal{R} = \frac{L}{\mu A} \quad (1.9 \text{ c}')$$

sustituyendo (1.9 c) en (1.9 a)

sustituyendo (1.9 c') en (1.9 a')

$$I = \frac{\text{fem}}{\frac{L}{\sigma A}} \quad (1.9 \text{ d})$$

$$\phi = \frac{\text{F}}{\frac{L}{\mu A}} \quad (1.9 \text{ d}')$$

puesto que $\text{F} = NI$:

$$\phi = \frac{NI}{\frac{L}{\mu A}} \quad (1.9 \text{ e}')$$

Al producto (NI) se le llama fuerza magnetomotriz (\mathcal{F}), y el cociente ($L/\mu_0 A$) reluctancia. se representa por (R), se entiende por reluctancia a la oposición que presenta un circuito magnético al establecimiento de un flujo.

$$\mathcal{F} = \phi R \quad (1.9)$$

De la definición de intensidad de campo magnético (H) se obtiene :

$$H = \frac{\mathcal{F}}{L} = \frac{NI}{L} \left[\frac{\text{Amp-Vuelta}}{m} \right] \quad (1.10)$$

Así

$$\mathcal{F} = NI = \phi R = HL \quad (1.11)$$

Tabla 1.1.-Analogías entre circuitos eléctricos y magnéticos.

Circuito Eléctrico	Circuito Magnético
Fuerza electromotriz fem (v)	Fuerza Magnetomotriz \mathcal{F}
Corriente I	Flujo ϕ
Resistencia R	Reluctancia R
Conductancia G	Permeancia P
Conductividad σ	Permeabilidad μ

C U E S T I O N A R I O

I.- Indique si es falsa o verdadera cada una de las siguientes expresiones:

- | | Verdadera | Falsa |
|--|-----------|-------|
| 1) La fuerza de atracción o repulsión entre dos cuerpos cargados, es directamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. | () | () |
| 2) La fuerza entre dos cargas es proporcional a la permitividad del medio que las separa. | () | () |

II.- Relacione la columna de la derecha con la columna de la izquierda, escribiendo dentro del paréntesis la letra que corresponda.

- | | | | |
|---|-----|-----|--------------------------------|
| a) Resulta de dividir la intensidad de fuerza (de atracción o repulsión) que existe entre las cargas, entre la cantidad de carga. | () | () | Líneas de flujo. |
| b) Son las fuerzas adicionales a las de Coulomb que experimentan las cargas en movimiento. | () | () | Densidad de flujo magnético. |
| c) Forman siempre trayectorias cerradas. | () | () | Fuerzas magnéticas. |
| d) Nunca llegan a intersectarse. | () | () | Intensidad de Campo eléctrico. |

- e) Es igual a la cantidad de fuerza magnetomotriz por unidad de longitud de un medio físico, que genera un flujo magnético. () () Intensidad de campo magnético.
- f) Se define como la cantidad de líneas de flujo que atraviesa una superficie de area A.

III.- Anote dentro del paréntesis la letra correcta que corresponda a cada una de las proposiciones

- 1) Se genera sobre y alrededor de un conductor que conduce corriente eléctrica alterna ()
- a. Campo magnético
 - b. Fuerza mecánica
 - c. Campo eléctrico variable
 - d. Campo magnético variable
- 2) El dedo pulgar indica la dirección de la corriente, y la curvatura de los demás nos indican la dirección de las líneas de inducción..... ()
- a. Regla de la mano derecha
 - b. Regla de la mano izquierda
- 3) Si se considera que la longitud de una bobina es mucho mayor que el radio de sus vueltas, su intensidad de flujo está dado por ()

a. -
$$E = \frac{\mu_0 NI}{L}$$

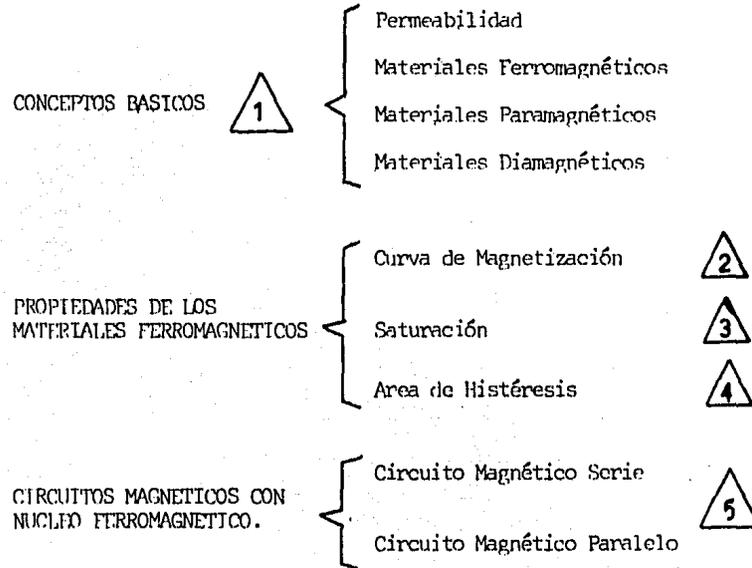
b.-
$$E = \frac{\mu_0 NI}{2R}$$

IV.- Defina los siguientes conceptos.

- 1.- Fuerza magnetomotriz
- 2.- Reluctancia
- 3.- Circuito Magnético

V.- Dé al menos dos expresiones con las que se puedan obtener la fuerza magnetomotriz.

CUADRO SINÓPTICO:



CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

	1	2	3	4	5
Sears, P.W.: Electricidad y Magnetismo, Aguilar, España 1970.	CAP.XIV Sec.14-1-,2,4	CAP.XV Sec.15-1	CAP.XV Sec.15-1,3	CAP.XV Sec.15-3	
Gourishankar, V.: Conversión de Energía Electromecánica Representaciones y Serv. de Ingeniería, S.A., México 1965	CAP.II Sec.2-1,2	CAP.II Sec.2-2	CAP.II Sec.2-2	CAP.II Sec.2-2	CAP.II Sec.2-3

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Conocer las ventajas que se tienen al utilizar núcleos de material ferromagnético.
2. Conocer las propiedades de los materiales ferromagnéticos.
3. Identificar la curva de magnetización de los materiales ferromagnéticos.
4. Conocer el efecto de histéresis en materiales ferromagnéticos.
5. Resolver problemas de circuitos magnéticos serie y paralelo.

1.2.1.- GENERALIDADES.

Del módulo anterior se observa, que para lograr una pequeña cantidad de flujo magnético en un toroide en el cual el núcleo es el vacío se requiere de una gran fuerza magnetomotriz a menos que el área de sección transversal del núcleo sea extremadamente grande y que la longitud de la trayectoria magnética sea pequeña.

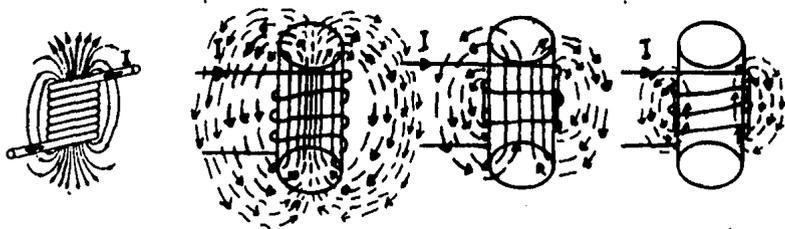
Con tales limitaciones, la construcción de múltiples aparatos que conocemos no hubiera sido posible, debido a lo grandes y por lo tanto costosos que hubieran resultado. Este problema se ha resuelto utilizando núcleos ferromagnéticos, los cuales se magnetizan fácilmente con una fuerza magnetomotriz pequeña.

1.2.2.- CONCEPTOS BASICOS.

Es conveniente recordar algunos conceptos básicos:

- Permeabilidad (μ),.- Se entiende como la capacidad que tiene un medio físico determinado, para que se encaucen por él las líneas de flujo.
- Materiales Ferromagnéticos,- Son aquellos con excelente permeabilidad magnética, como el hierro, el cobalto, el níquel, y algunas aleaciones como el acero al silicio.

- Materiales Paramagnéticos.- Son aquellos de pobre permeabilidad magnética pero superior a la del vacío, p.ej.: el aluminio y el plomo.
- Materiales Diamagnéticos.- Son los materiales que tienen pobre permeabilidad inferior a la del vacío, ejemplo de ellos son el cobre, el plástico y la madera.



BOBINA CON NUCLEO DE AIRE

BOBINA CON NUCLEO DE MATERIAL FERROMAGNETICO.

BOBINA CON NUCLEO DE MATERIAL PARAMAGNETICO.

BOBINA CON NUCLEO DE MATERIAL DIAMAGNETICO.

- La permeabilidad del vacío (μ_0) es una constante de valor: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

Henrys

m

- En materiales ferromagnéticos su permeabilidad (μ) es variable y frecuentemente mucho mayor que μ_0 .
- Llamamos autoinducción ó Inductancia Propia (L) a los enlazamientos de flujo establecidos en una bobina de (N) vueltas, por unidad de corriente (I)

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (\text{Henrys}) \quad (1-11)$$

- Cuando una bobina se devana sobre un núcleo ferromagnético, su inductancia es una función directa de la permeabilidad (μ) del material, y está dada por:

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (\text{Henrys}) \quad (1.12)$$

l = longitud del circuito magnético.

- Intensidad de campo magnético o excitación magnética es la fuerza necesaria para generar determinado flujo magnético sobre una unidad de longitud del medio físico. Esa fuerza se denomina fuerza magnetomotriz (\mathcal{F})

$$H = \frac{\mathcal{F}}{l} = \frac{NI}{l} \quad \left(\frac{\text{Amp.} \cdot \text{Vuelta}}{\text{m}} \right) \quad (1.13)$$

1.2.3.- PROPIEDADES DE LOS MATERIALES FERROMAGNETICOS.

A continuación se dan brevemente las propiedades que tienen los materiales ferromagnéticos:

- a).- Se magnetizan fuertemente en la misma dirección del campo magnético donde están colocados.
 - b).- La densidad de flujo (B) en los materiales ferromagnéticos, varía en forma no lineal con la intensidad magnética (H)
 - c).- Estos materiales presentan saturación, Histéresis y Retentividad.
- CURVA DE MAGNETIZACION.

En un toroide sin núcleo la densidad de flujo dentro de él es: $B = \mu_0 H$ como la permeabilidad del vacío (μ_0) es una constante, la característica

de magnetización que resulta de graficar la ecuación anterior es una línea recta.

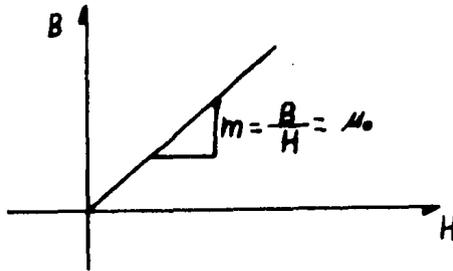


Figura 1.10.- Característica de magnetización para el vacío.

En un toroide con núcleo ferromagnético, la densidad de flujo en el núcleo es $B = \mu H$, donde μ es una cantidad variable para materiales ferromagnéticos y es frecuentemente mucho mayor que μ_0 . Graficando la ecuación anterior se obtiene la característica de magnetización de dichos materiales:

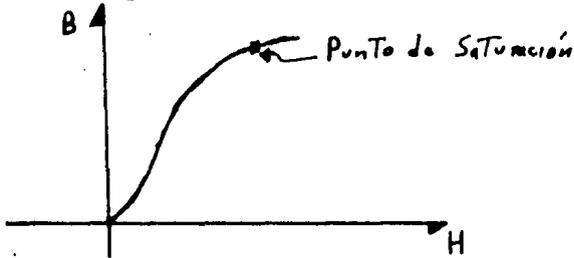


Figura 1.11.- Características de magnetización para materiales ferromagnéticos.

- SATURACION.

Se dice que un núcleo ferromagnético está saturado, cuando la densidad de campo deja de variar proporcionalmente con respecto a la intensidad magnética; aunque se continúe aumentando (H), en la curva de magnetización, la densidad de flujo (B) ya no aumenta.

- AREA DE HISTERESIS

Al aplicar al núcleo ferromagnético de un toroide campos magnéticos de distinta intensidad (se logra aumentando y disminuyendo la corriente directa en el embobinado) algunos bloques de átomos en el núcleo se resisten a cambiar su posición con las inversiones de flujo, lo que dá lugar al fenómeno de Histéresis:

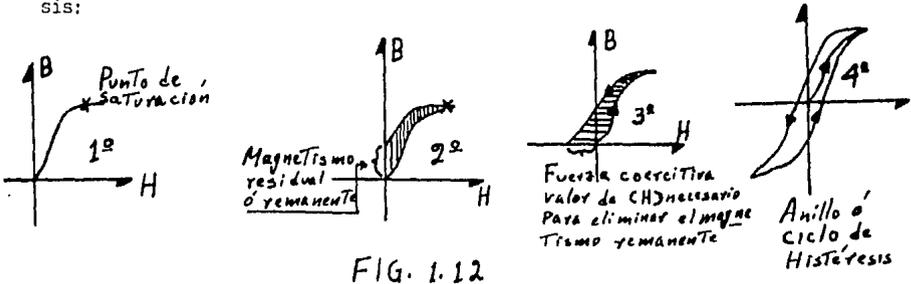


FIG. 1.12

Al aplicar campos magnéticos de distinta intensidad pero de igual frecuencia, como los producidos por una corriente alterna, se generará una familia de lazos de histéresis. Uniendo las puntas de los lazos con una línea continua se obtiene la CURVA NORMAL DE MAGNETIZACION del núcleo:

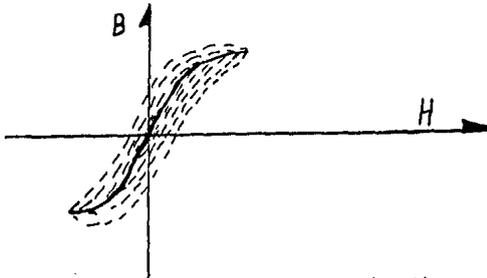


Figura 1.13.- Curva normal de magnetización.

1.2.4.- CIRCUITOS FERROMAGNETICOS.

Los núcleos ferromagnéticos, frecuentemente son reemplazados por circuitos magnéticos equivalentes, para determinar la densidad de flujo magnético en la estructura.

- CIRCUITO MAGNETICO SERIE

Por economía los núcleos son de forma cuadrangular, y a veces, por necesidades de construcción o diseño, alguna de sus partes tiene diferente sección transversal, diferente material ferromagnético, o bien, se encuentran espacios de aire intercalados en el circuito magnético. Si por esas diferentes partes del núcleo circula el mismo flujo, se dice que se tiene un circuito magnético serie.

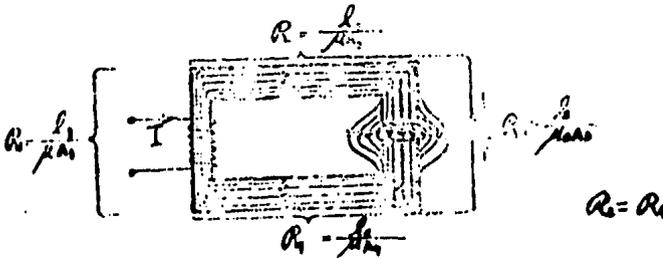


Figura 1.14.-

El núcleo mostrado recibe el nombre de NUCLEO tipo COLUMNAS (tenga o nó entrehierro). La reluctancia total de un circuito magnético serie, es igual a la suma de las reluctancias individuales, así la expresión 1.10 aplicada al circuito anterior queda:

$$\mathcal{F} = NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = \Phi (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \quad (1.14)$$

Como al llegar el flujo al entrehierro se dispersa y luego vuelve a concentrarse en la cara opuesta, determinar el área efectiva del entrehierro (A_3) resulta difícil. En la práctica se usan fórmulas empíricas para determinar esta área:

CASO 1 : Si los lados opuestos del entrehierro son paralelos y de la misma sección transversal.

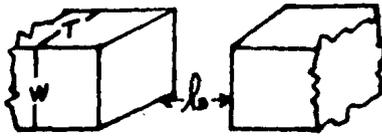


Figura 1.15

$$A_3 = (W + l_3) (T + l_3)$$

CASO 2 : Si los lados opuestos del entrehierro son paralelos pero de diferente sección transversal:

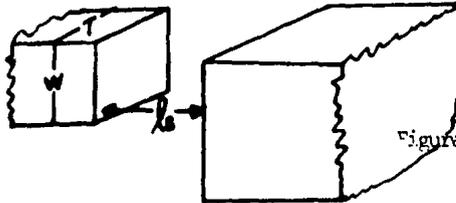


Figura 1.16

$$A_3 = (W + 2 l_3) (T + 2 l_3)$$

La expresión (1-14) es análoga a la ley de voltajes de Kirchhoff. Esta ley definida en términos de cantidades magnéticas es como sigue: EN UN CIRCUITO MAGNETICO LA SUMA ALGEBRAICA DE DOS POTENCIALES MAGNETICOS ALREDEDOR DE UNA TRAYECTORIA CERRADA, ES CERO.

Así, el circuito eléctrico equivalente al circuito magnético serie con entrehierro de la figura 7, es el que se muestra;

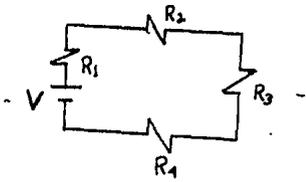


Figura 1.17

$$V = I (R_1 + R_2 + \dots + R_n)$$

- CIRCUITO MAGNETICO PARALELO

En el núcleo llamado ACOFAZADO que proporciona dos caminos de retorno al flujo magnético, el flujo circula en su totalidad por alguna de su ramas y en otras se divide de manera análoga a como se divide la corriente en un circuito eléctrico paralelo. La ley de corrientes de Kirchoff expresada en términos de cantidades magnéticas es: En un Circuito Magnético la Suma de los flujos dirigidos hacia un Punto (P), es igual A la suma de los flujos saliendo de ese punto (P):

Ver fig.1.18 C,

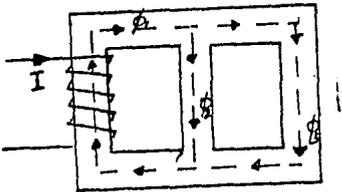


Fig.1.18 (a) Circuito Magnético Paralelo

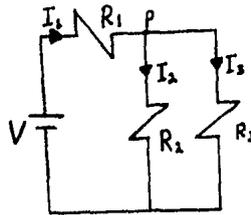


Fig. 1.18 (b) Circuito eléctrico Paralelo equivalente

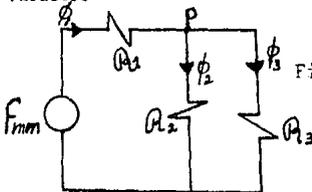


Fig.1.18 (c).-Circuito Magnético Paralelo equivalente.

Ahora bien, mientras la mayoría de los circuitos eléctricos son lineales, los circuitos ferromagnéticos no lo son, porque la permeabilidad del medio es una variable y es función de la densidad de flujo en la estructura. Aplicar la ley Ohm directamente resulta impráctico, porque la reluctancia es una función de la densidad de flujo, los métodos de análisis prácticos utilizan las curvas de magnetización normales de los materiales ferromagnéticos. En las figuras 1.19 (a) y 1.19 (b) se muestran algunas curvas de magnetización normal típicas para algunos materiales ferromagnéticos.

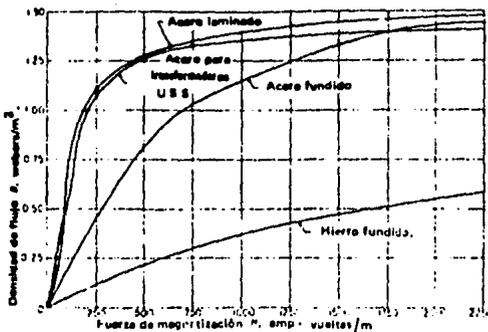


figura 1.19 (a) Curvas de magnetización para materiales ferromagnéticos.

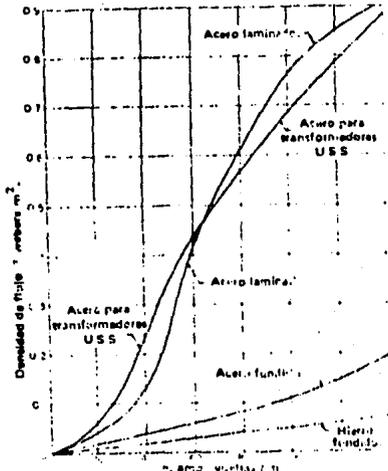


Figura 1.19 (b) Parte de la figura 1.19 (a) trazada a una escala más amplia,

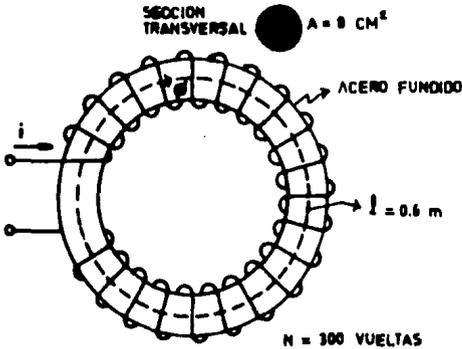
Quando en un problema se da a conocer el flujo en ciertas partes de la estructura magnética y se determina la fuerza magnetomotriz del embobinado de excitación, se obtiene una solución directa, no así cuando el problema es determinar el flujo en la estructura magnética debido a una fmm especificada. Problemas de este tipo se resuelven utilizando cualquiera de los siguientes métodos, " el método de prueba y error" y " el método gráfico", ambos descritos ampliamente en la sec. 2.8, cap. 2 del libro " Conversión de Energía Electromecánica", de V.Courishankar.

EJEMPLOS.

1.- Un toroide de acero fundido de una sección transversal uniforme de 8 cm^2 tiene una circunferencia media de 0.6 m . La bobina de excitación es enbobinada uniformemente alrededor del toroide y tiene 300 vueltas.

Encuentre el flujo en webers, cuando la corriente directa en la bobina de excitación es:

- a) 1 Amper
- b) 2 Amp.



DATOS :

$$A = 8 \text{ cm}^2 = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$l = 0.6 \text{ m}$$

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

Solución:

a) Para $i = 1 \text{ amp}$

La excitación magnética (H) esta dada por la expresión.

$$H = \frac{Ni}{l} = \frac{300 (1)}{0.6} = 500$$

$$H = 500 \frac{\text{Vuelta-amp.}}{\text{m}}$$

De la gráfica , fig. 1.19 (a), con el valor de H calculado obtenemos la densidad de flujo.

$$B = 0.84 \frac{\text{Webers}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Luego: } \Phi = B A = 0.84 (8 \times 10^{-4}) = 6.72 \times 10^{-4} \text{ webers}$$

$$\Phi = 6.72 \times 10^{-4} \text{ webers}$$

b).- Para $i = 2$ amp.

$$H = \frac{Ni}{l} = \frac{300(2)}{0.6} = 1000 \frac{\text{Vueltas} \cdot \text{amp}}{\text{m}}$$

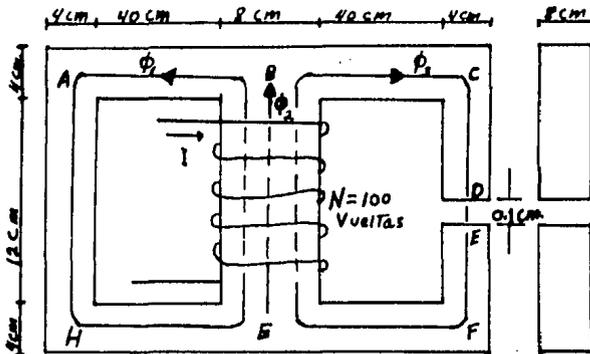
De la gráfica, fig. 1.19 (a), con el valor de H obtenemos:

$$B = 1.15 \frac{W}{m^2}$$

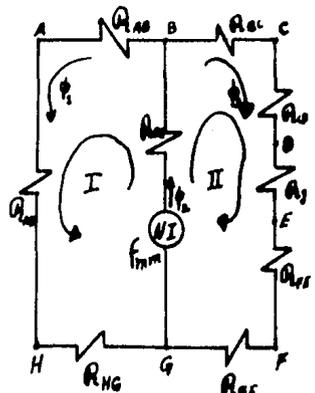
$$\Phi = BA = 1.15 (8 \times 10^{-4}) = 9.2 \times 10^{-4} \text{ webers.}$$

$$\Phi = 9.2 \times 10^{-4} \text{ webers.}$$

2.- En la estructura magnética mostrada en la figura siguiente, la densidad de flujo en el entrehierro es de $0.8 \frac{\text{weber}}{m^2}$. El núcleo está hecho de hojas de acero laminado con un factor m^2 de apilamiento de 0.9. Encuentre la fmm y la corriente de la bobina de excitación. Considere en el entrehierro el efecto marginal, pero desprecie los flujos de dispersión.



Núcleo Ferromagnético con entrehierro.



Circuito magnético equivalente

Solución por el método de las ecuaciones de malla y nodos.

RAMA 1 (B, A, H, G)

$$A_1 = B \times 4 \times 10^{-4} \times 0.9 = 28.8 \times 10^{-4} m^2$$

$$l_1 = l_{BC} + l_{AH} + l_{HG} = 46 + (12 + 2 + 2) + 46 = 1.08 m.$$

$$R_1 = R_{AB} + R_{AH} + R_{HG}$$

$$R_2 = R_{BC}$$

$$R_3 = R_{CD} + R_{DF}$$

RAMA 2.

$$A_2 = 8 \times 8 \times 0.9 \times 10^{-4} = 57.6 \times 10^{-4}$$

$$l_2 = l_{B3} = 16 \text{ cm} = 0.16 \text{ m}$$

$$A_3 = A_1 = 28.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$l_3 = l_{BC} + l_{CF} - l_g + l_{FG} = (4+4+2) + (12+2+2) - 0.1 + (4+4+2)$$

$$l_3 = 1.079 \text{ m.}$$

En el entrehierro se tiene

Longitud del entrehierro

$$l_g = 0.1 \text{ cm}$$

Area del entrehierro

$$A_g = (4 + 0.1) (8 + 0.1) = 33.21 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

El flujo en el entrehierro es:

$$\phi_g = B_g A_g = (0.8) (33.21 \times 10^{-4}) = 26.568 \times 10^{-4} \text{ webers.}$$

$$\text{Como } B_g = \mu_0 H_g$$

$$\therefore H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{0.8}{4\pi \times 10^{-7}} = \frac{0.8}{12.57 \times 10^{-7}}$$

$$H_g = 636435 \frac{\text{Amp} \cdot \text{Vuelta}}{\text{m}}$$

$$H_g = 6.36435 \times 10^5 \frac{\text{Amp} \cdot \text{Vuelta}}{\text{m}}$$

Si el flujo en el entrehierro es $\phi_g = 26.568 \times 10^{-4} \text{ w}$, este flujo es el de la rama 3.

$$\therefore \phi_3 = 26.568 \times 10^{-4} \text{ weber.}$$

$$B_3 = \frac{\phi_3}{A_3} = \frac{26.568 \times 10^{-4}}{28.8 \times 10^{-4}} = 0.9225 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Entrando a la gráfica para acero laminado de la fig.1.19 (a) con el valor de densidad B_3 , encontramos una H_3 de 150.

$$\therefore H_3 = 150 \frac{A \cdot v}{m}$$

Del circuito magnético se tiene:

Ecuaciones de malla I

$$NI - \mathcal{R}_2 \phi_2 - \mathcal{R}_1 \phi_1 = NI - H_1 l_1 - H_2 l_2$$

$$NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 \text{ ----- } \textcircled{1}$$

en la malla II

$$NI - \phi_2 \mathcal{R}_2 - \phi_3 \mathcal{R}_3 - \phi_g \mathcal{R}_g$$

$$NI - H_2 l_2 - H_3 l_3 - H_g l_g$$

$$NI = H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_g l_g \text{ ----- } \textcircled{2}$$

igualando 1 con 2

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 = H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_g l_g$$

$$H_1 l_1 = H_3 l_3 + H_g l_g$$

$$H_1 = \frac{H_3 l_3 + H_g l_g}{l_1} = \frac{(150)(1,079) + 636435 \times 10^{-3}}{1,08} = 739,5 \frac{A \cdot v}{m}$$

Para el acero laminado se tiene una B_1 de $1,33 \text{ W/m}^2$

\therefore El flujo en la rama 1 será :

$$\phi_1 = B_1 A_1 = 1,33 \times 28,8 \times 10^{-4} = 38,304 \times 10^{-4} \text{ webers,}$$

La ecuación de nodos en el punto B ó en G se tiene:

$$\phi_2 = \phi_1 + \phi_3 = (38,304 + 26,568) \times 10^{-4}$$

$$\phi_2 = 64,872 \times 10^{-4} \text{ webers.}$$

ϕ_2 es el flujo en la rama central.

Nuevamente de la gráfica para acero laminado se tiene.

$$H_2 = 250 \frac{A - V}{m.}$$

De la ecuación (1)

$$NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 = 739.15 \times 1.08 + 250 \times 0.16$$

$$NI = 838.285 \text{ Amp} - \text{Vuelta}$$

$$I = \frac{838.285}{100} = 8.38285 \text{ Amp.}$$

N O T A : Cuando se tienen núcleos ferromagnéticos laminados el área de su sección transversal debe ser corregida por un factor de apilamiento, para obtener una área efectiva A_p de acuerdo a lo que se establece en la página

CUESTIONARIO

I.- Indique si es falsa o verdadera cada una de las siguientes expresiones:

- | | VERDADERA | FALSA |
|---|-----------|-------|
| 1) Se requiere que el área de sección transversal del núcleo ferromagnético de un toroide sea extremadamente grande para producir un pequeño flujo magnético. | () | () |
| 2) Los materiales diamagnéticos son aquellos con excelente permeabilidad magnética como el hierro, el cobalto y el níquel. | () | () |
| 3) La permeabilidad del vacío es una constante. | () | () |
| 4) La permeabilidad de los materiales ferromagnéticos es una constante de valor $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Henrys/m. | () | () |

II.- Relacione la columna de la derecha con la columna de la izquierda, escribiendo en el parentesis la letra que corresponda.

- | | | |
|---|-----|--|
| a) La densidad de flujo en los materiales ferromagnéticos varía en forma no lineal con la intensidad magnética | () | Permeabilidad de los materiales ferromagnéticos. |
| b) Es la expresión que graficada nos da la característica de magnetización de los materiales ferromagnéticos. | () | Es una de las propiedades de los materiales ferromagnéticos. |
| c) Es una cantidad variable para materiales ferromagnéticos y es frecuentemente mucho mayor que la permeabilidad del vacío, | () | $B = \mu_0 H$ |
| | () | $B \propto H$ |

III.- Anote dentro del parentesis la letra que corresponda a cada una de las proposiciones.

1.- El magnetismo que queda en el nucleo al disminuir la intensidad magnetica a cero, después de que fué saturado el nucleo, recibe el nombre de ()

- a) Histéresis
- b) Fuerza coercitiva
- c) Magnetismo remanente

2.- Es el valor de la intensidad magnetica necesario para eliminar el magnetismo remanente..... ()

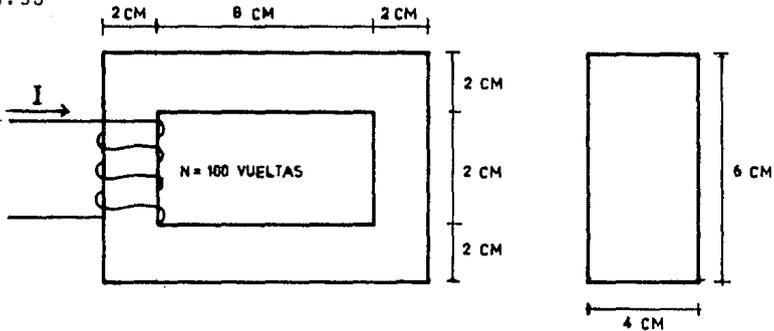
- a) Histéresis
- b) Fuerza coercitiva
- c) Magnetismo remanente

IV.- Defina los siguientes conceptos:

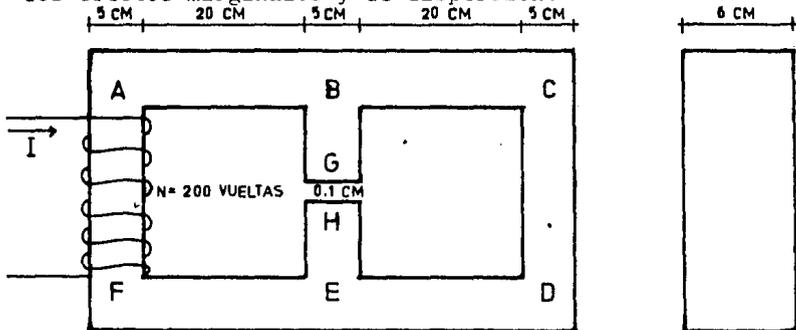
- 1.- Histéresis
- 2.- Excitación magnetica
- 3.- Saturación
- 4.- Material ferromagnetico
- 5.- Permeabilidad

PROBLEMAS

- 1.- Encuentre la corriente directa en amperes necesaria para establecer 7.6×10^{-4} webers en la estructura magnética mostrada en la figura. El núcleo está construido con hojas de acero laminado, con un factor de apilamiento de 0.95



- 2.- ¿ A que valor deberá ser incrementada la corriente en el problema 1, si un entrehierro de 0.1 cm es intercalado en el núcleo?, Considere en el entrehierro el efecto marginal, pero desprecie los flujos de dispersión.
- 3.- El núcleo magnético mostrado en la figura que se acompaña está hecho de laminaciones de acero para transformadores fabricado por la vss. El factor de apilamiento es 0.85. El flujo en el entrehierro es 6×10^{-4} webers, calcular la fmm y la corriente en el embobinado de excitación. Desprecie los efectos marginales y de dispersión.



MODULO 3.

EXCITACIÓN DE NÚCLEOS FERROMAGNÉTICOS CON
CORRIENTE ALTERNA.

CUADRO SINÓPTICO:

Ley de Faraday	△ ₁	
Características del Flujo en el Núcleo.	△ ₂	
Características de la Corriente de Excitación.	△ ₃	} Armónicas de la corriente de excitación.
Energía Magnética almacenada en el Núcleo.	△ ₄	
Pérdidas de Energía en Núcleos Ferromagnéticos.	△ ₅	} Pérdidas por histéresis } Pérdidas por corrientes parásitas. { Laminación } Factor de Pila
Circuito Equivalente Aprox. de un Reactor con Núcleo de Hierro.	△ ₆	

CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

	△ 1	△ 2	△ 3	△ 4	△ 5	△ 6
Courishankar, V .: Conversión de energía electromecánica; Representaciones y Serv. de Ingeniería, S A , México 1965.	CAP.III Sec.3-2	CAP.III Sec.3-3	CAP.III. Sec.3-4	CAP.III Sec.3-5	CAP.III Sec.3-6	CAP.III Sec.3-8

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Aplicar las leyes de Faraday y Lenz para el análisis de circuitos magnéticos.
2. Identificar la relación entre voltaje aplicado, voltaje inducido y flujo en un núcleo magnético.
3. Analizar la forma de onda de la corriente de excitación en un sistema ferromagnético.
4. Estudiar los conceptos de:
 - a) Energía magnética almacenada
 - b) Pérdidas magnéticas por histéresis y corrientes parásitas
5. Establecer el circuito eléctrico equivalente de un reactor con núcleo de hierro.
6. Determinar los parámetros del circuito equivalente de un reactor mediante pruebas de laboratorio.

GENERALIDADES.

Cuando una bobina con núcleo ferromagnético es excitada con corriente directa el flujo magnético en el núcleo es constante y no causa ningún efecto adicional. Pero cuando la corriente de excitación es alterna el flujo magnético también es alterno y presenta efectos adicionales muy importantes, como son la inducción de corrientes parásitas y el efecto de histéresis. Efectos que se traducen en la generación de calor en el núcleo apareciendo las pérdidas; además este flujo inducirá una fem. en la bobina que excita al núcleo. El análisis de estos efectos lo trataremos en esta parte.

1.3.1.- LEY DE FARADAY DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

La Ley de Faraday establece que la fuerza electromotriz inducida $e(t)$ en una espira, es igual al valor de la rapidez con la cual está cambiando el flujo que la atraviesa; $e(t) = \frac{d\phi}{dt}$. Si esta ley se aplica a una bobina de (N) vueltas, aparece una fem en cada vuelta y esas fems se tienen que sumar, por lo que para toroides y solenoides la Ley de Faraday queda expresada como:

$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.16)$$

La Ley de Lenz nos dá el sentido de la fem inducida: el sentido de una fem inducida por un flujo variable, es tal que desarrolla una corriente eléctrica capaz de generar un flujo magnético que se opone a cualquier CAMBIO del flujo variable en un instante dado. La Ley de Faraday queda expresada entonces en su forma mas conocida como:

$$e(t) = - N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.17)$$

NOTA: El flujo puede hacerse variar: 1º, por el movimiento de un conductor en un campo magnético (principio del generador); 2º por un cambio en el valor del flujo que atraviesa un circuito fijo (principio del transformador).

Se recomienda leer los artículos 35-1,2,3,4,5, del cap. 35 del Libro de Física parte II de Resnick-Halliday.

1.3.2.- CARACTERISTICAS DEL FLUJO EN EL NUCLEO FERROMAGNETICO EXCITADO CON CORRIENTE ALTERNA (C.A.)

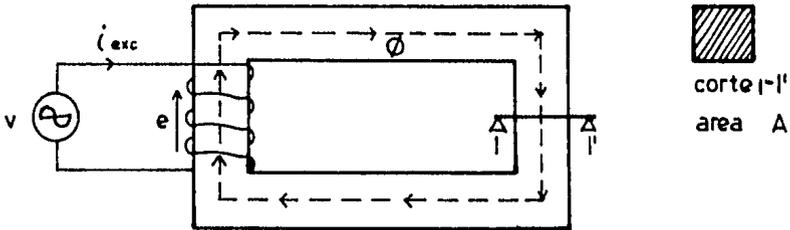


Figura 1.20

En la figura 1.20 la corriente en la bobina es alterna, por lo tanto el flujo magnético (Φ) en el núcleo también es periódica (no necesariamente senoidal)

¿El flujo dentro del núcleo varía en la misma forma que la corriente?

Para contestar esta pregunta es necesario considerar las características del núcleo, como son:

La permeabilidad no lineal del material del núcleo

La saturación

y los efectos de histéresis

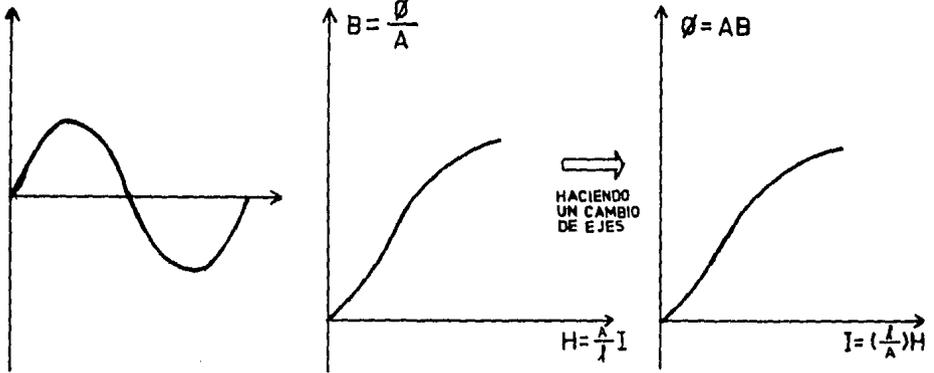


Fig.1.21 (a) Corriente de excitación

(La corriente empleada para crear un flujo se conoce como corriente de excitación).

Fig.1.21.(b) Características de magnetización en el núcleo en términos de densidad de flujo (B) y excitación magnética (H).

Fig.1.21 (c) Características de magnetización en el núcleo en términos de flujo (Φ) y corriente (I)

La figura 1.21 (c) únicamente muestra las características de permeabilidad no lineal y saturación del núcleo y observamos que no hay una relación lineal entre flujo y corriente. Por lo que para determinar la respuesta de flujo en el núcleo, tenemos que considerar la gráfica de la figura 1.21 (c), para un valor de corriente tendremos un valor de flujo. Obteniéndose la curva de flujo de la figura 1.22.

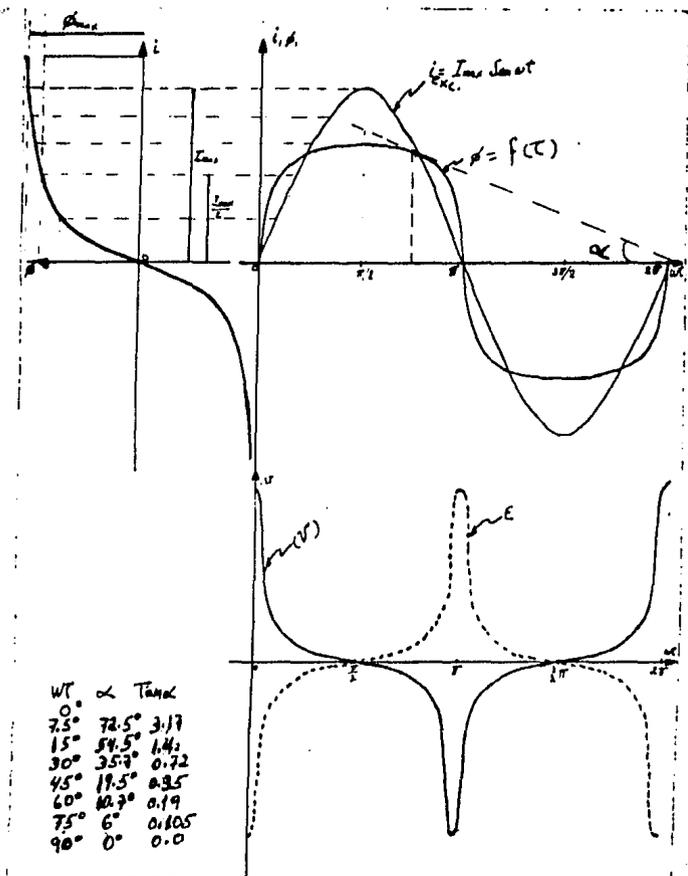


Figura 1.22

Formas de ondas de i_{exc} , ϕ , E , v , en una bobina (inductancia) con núcleo ferromagnético, excitado con una fuente de corriente senoidal.

Esta onda de flujo distorsionada se obtiene sin considerar el efecto de histéresis. Si se considera adicionalmente el efecto de histéresis, la onda de flujo se distorsionará aún mas.

De la figura 1.20, hablando en términos de excitación y respuesta, se tiene que la excitación es la corriente y como respuesta se obtiene flujo y voltaje inducido (fem). Hemos visto la respuesta del flujo, ahora veamos la respuesta del voltaje inducido, que está determinado por la Ley de Faraday, es decir:

$$\mathcal{E} = e = N \frac{d\phi}{dt}$$

De la figura 1.22 se observa que el flujo varía con respecto a (wt) por lo que la expresión anterior queda:

$$e = wN \left[\frac{d\phi}{dwt} \right] \quad (1-18)$$

El término $\left[\frac{d\phi}{dwt} \right]$ representa la pendiente a la curva de flujo, y se observa que de la variación de la pendiente se obtiene la variación de la fem inducida.

Cuando el flujo es cero su pendiente es máxima y va disminuyendo hasta que se hace cero cuando el flujo es máximo. Figura 1.22.

Aplicando las leyes de Kirchoff y Faraday en la figura 1.20:

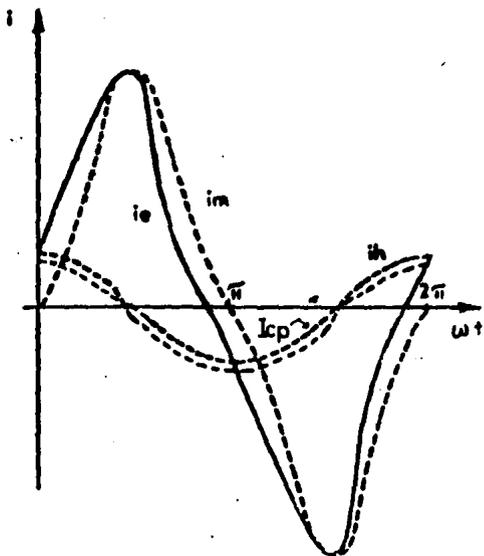
$$v = e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1-18)$$

Puesto que se aplica una fuente senoidal:

$$\phi = \phi_m \text{ Sen } wt \quad \Rightarrow \quad \frac{d\phi}{dt} = w\phi_m \text{ Cos } wt \quad (1-19)$$

Sustituyendo (1.19) en (1.18)

$$V = e = -N W \phi_m \text{ Cos } wt = N W \phi_m \text{ Sen } \left(wt - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1-20)$$



Componente de la corriente de excitación

fig. 1-23A

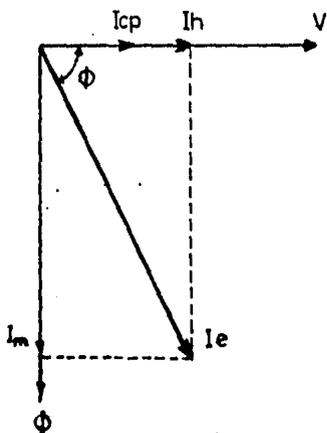


Diagrama fasorial de corrientes

fig. 1 23B

Se observa entonces, que el flujo senoidal induce una fem en fase con el, pero atrasada 90°. El voltaje aplicado, de forma igual a la de la fem inducida, tiene su valor máximo cuando $\cos \omega t = 1$, por lo que:

$$V_m = e_m = N \omega \Phi_m = N 2 \pi f \Phi_m \quad (1-21)$$

Como el valor eficaz de un voltaje senoidal es $1/\sqrt{2}$ veces su valor máximo.

$$V_{ef} = e_{ef} = 4.44 \pi f N \Phi_m \quad (1.22 a)$$

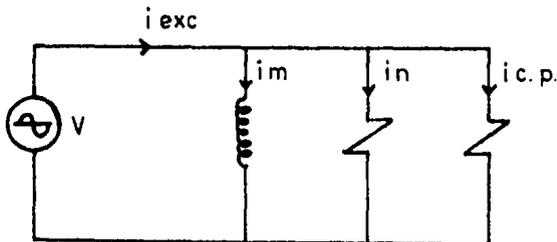
$$\delta \quad \Phi_m = \frac{V_{ef}}{4.44 \pi N f} \quad ; \quad \begin{array}{l} f = \text{frecuencia} \\ N = \# \text{ de vueltas} \end{array} \quad (1-22)$$

Así, vemos que el flujo en el núcleo (ferromagnético ó no) depende de la forma de onda, magnitud y frecuencia del voltaje aplicado y del número de vueltas de la bobina de excitación.

La figura 1.23 (a) muestra las curvas de: la corriente de excitación (i_e), la corriente de magnetización (i_m), la corriente por efecto de histéresis (i_h) y de las corrientes parasitas ($i_{c.p.}$) de un circuito como el de la figura 1.20. La figura 1.23b representa el diagrama fasorial de dichas corrientes, algebraicamente;

$$i_{exc} = i_m + i_h + i_{c.p.}$$

Cuya representación en un circuito eléctrico queda de la siguiente manera:



1.3.3.- CORRIENTE DE EXCITACIÓN.

Una corriente de excitación senoidal produce un flujo senoidal, solo si la curva característica de magnetización del núcleo es lineal (vease fig.1.24. Si el núcleo es ferromagnético la corriente de excitación se deforma debido al ciclo de histéresis, conociendo el ciclo de histéresis del material de que está hecho el núcleo y proyectando adecuadamente a un sistema de ejes Φ Vs. t e I Vs. t , se obtiene la forma de onda real de la corriente de excitación capaz de establecer un flujo senoidal en el núcleo ferromagnético:

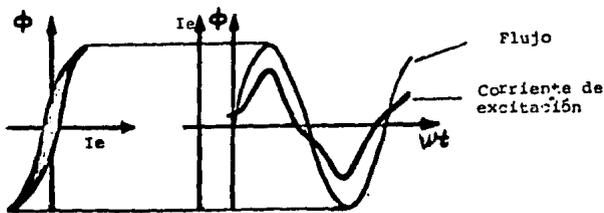


Figura 1.24

- ARMÓNICAS DE LA CORRIENTE DE EXCITACIÓN.

La forma de onda real de la corriente de excitación, según el análisis de Fourier, se puede descomponer en una componente senoidal fundamental y una serie de ondas senoidales armónicas impares. Considerando únicamente la componente senoidal fundamental y la 3a. armónica como segunda componente, se obtiene una buena aproximación de la onda de la corriente de excitación (ver fig.1.25). Las armónicas de la I_{exc} , producen vibraciones en el núcleo, o interferencias en los sistemas de comunicación.

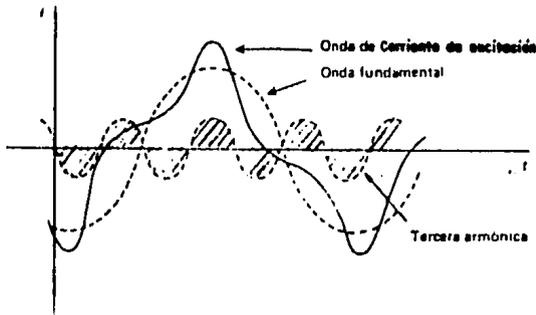


Fig. 1.25

1.3.4.- ENERGÍA MAGNÉTICA ALMACENADA.

Al conectar una fuente de C.A a una bobina con núcleo ferromagnético, (figura 1.20) circula una corriente "I", ésta establece un flujo magnético variable y se induce una fem en la bobina, de valor :

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1-16)$$

La energía eléctrica (W) suministrada por la fuente a la bobina en un tiempo dt es

$$dW = e I dt \quad (1-23)$$

Sustituyendo (1-23) en (1-16):

$$dW = N I d\phi = \mathcal{F} d\phi \quad (1-24)$$

integrando esta expresión, se obtiene la energía eléctrica total suministrada por la fuente, que corresponde a la energía magnética suministrada al núcleo por la bobina:

$$W = \int_0^{\phi} \mathcal{F} d\phi \quad (1-25)$$

Esta energía almacenada, expresada en términos de la densidad de flujo (B) y de la intensidad de campo magnético (H) queda como:

$$W = V \int_0^B H dB \quad (1-26)$$

V = volumen

$$6 \quad \frac{W}{V} = \int_0^B H dB \quad \text{además } H = \frac{B}{\mu}$$

Esta expresión permite obtener la energía almacenada en el núcleo por unidad de volumen, y de ella se demuestra que la energía almacenada en un entrehierro puede ser varias veces mayor que la energía almacenada en un volumen mayor de hierro.

La integral $(\int H dB)$ de la expresión anterior representa el área bajo la curva B-H. La integral cíclica $(\oint H dB)$ en un ciclo de histéresis representa el área del ciclo de histéresis.

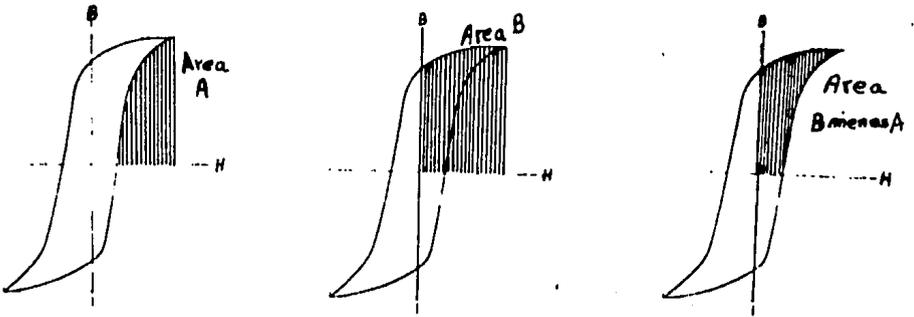


FIG. 1.26

1.3.5.- PÉRDIDA DE ENERGÍA EN NÚCLEOS FERROMAGNÉTICOS.

Cuando un núcleo ferromagnético está magnetizado, almacena energía magnética y posteriormente el flujo va disminuyendo, parte de la energía almacenada es regresada a la fuente o convertida en alguna otra forma útil de energía, otra parte se pierde irremediabilmente en el núcleo en forma de calor. Esta pérdida de energía es debida a : a) las características de histéresis del material y b) las corrientes inducidas en el núcleo (corrientes parásitas).

- PÉRDIDAS DE HISTÉRESIS.

En la frecuencia eléctrica usual de 60 HZ., el campo magnético sobre el núcleo se invierte 120 veces en un segundo, cambiando los dominios magnéticos su orientación igual número de veces, por fricción interna desarrollan entonces cierta cantidad de calor que representa una pérdida de energía.

La pérdida de energía por efecto de histéresis se reduce al utilizar materiales con ciclo de histéresis estrecho (p.ej.acero al 4% de silicio) en el núcleo, y diseñando el núcleo para que el punto de inversión de los dominios sea antes de la rodilla de saturación de la curva de magnetización, lo cual hace aún mas estrecho al ciclo de histéresis.

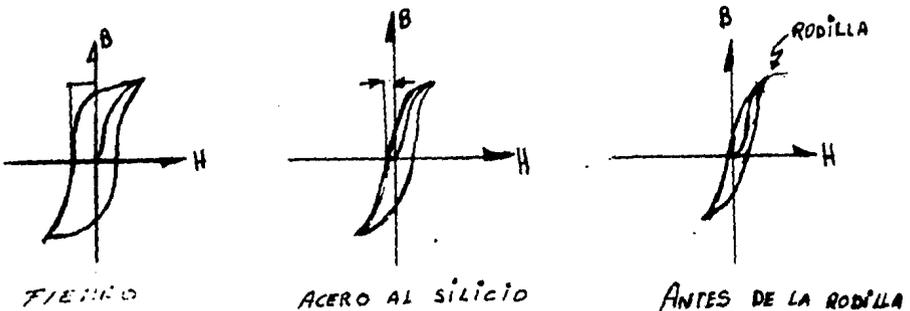


Fig.1.27

No siempre es fácil obtener el ciclo de histéresis de los materiales ferromagnéticos y evaluar el area para obtener las perdidas por histéresis, por unidad de volumen. Sin embargo es fácil medir el volumen de un núcleo, proponer su grado de saturación y conocer la frecuencia con la que se presentan los ciclos de histéresis, en base a esto Charles P. Steirmitz propuso la siguiente fórmula empirica para la evaluación de las pérdidas por efecto de histéresis.

$$P_h = \text{Vol } \eta f (B_{\text{max}})^n \quad (\text{Watts}) \quad (1-27)$$

P_h = Pérdida por histéresis en watts

η = Constante de proporcionalidad característica del material del núcleo.

f = frecuencia (Hertz.)

B_{max} = Densidad máxima de flujo en Wb/m^2

n = Valor comprendido entre 1.5 y 2.5 para el acero al silicio utilizado normalmente.

Vol = Volumen (m^3)

- PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARÁSITAS.

La sección transversal de un núcleo ferromagnético podemos imaginarla que está formada por un número infinito de anillos de fierro unidos entre si y encerrados uno dentro de otro; cuando fluye por entre ellos un flujo magnético variable se induce una fem por Ley de Faraday y se produce una circulación de corrientes por los anillos de fierro, ya que el núcleo es también un conductor eléctrico aunque de baja conductividad. Estas corrientes se conocen como corrientes parásitas.

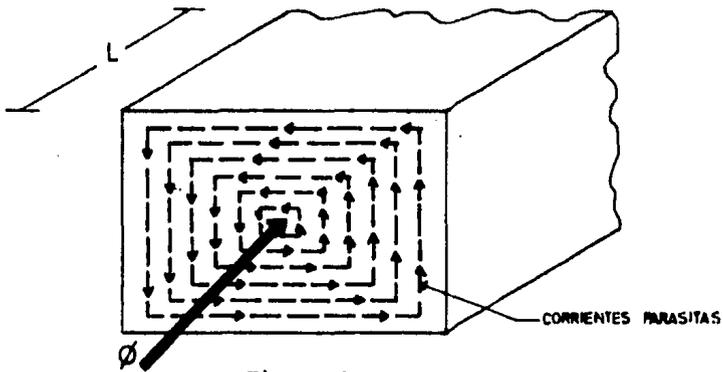


Fig. 1.28

Las corrientes parásitas ó de remolino ó de Eddy ó de Foucault como también se les conoce, tienen una dirección tal que se oponen a los cambios de flujo (por Leyde Lenz), al oponerse empujar a las líneas de flujo hacia las orillas de la sección transversal del núcleo, ocasionando que la densidad de flujo sea mínima en el centro y máxima en las orillas, a éste fenómeno se le conoce como EFECTO SUPERFICIAL (muy notable en altas frecuencias).

Puesto que el núcleo tiene una resistencia finita, cuando circulan las corrientes parásitas se produce una pérdida de energía por efecto Joule, ésta pérdida se reduce al disminuir la magnitud de las corrientes parásitas, y para ello, se aumenta la resistencia del medio donde circulan, lo cual se logra laminando el núcleo y aislando con barniz dieléctrico sus laminaciones:

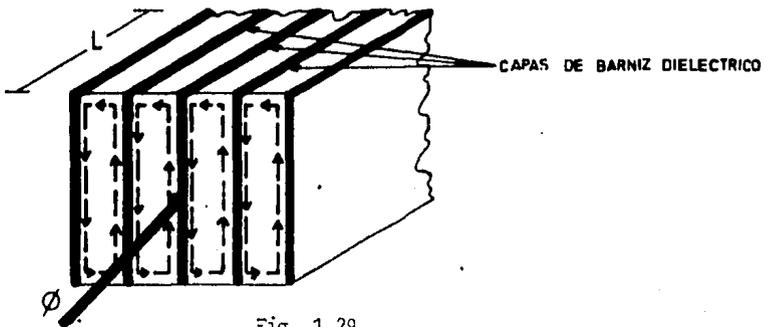


Fig. 1.29

FACTOR DE APILAMIENTO,

El area (A) de sección transversal de un núcleo sin laminar se ve afectada al laminar el núcleo, el espesor de las capas de barniz reducirán el área efectiva ferromagnética, teniéndose ahora una área efectiva de material laminada (A_e). La relación del área (A_e) al área total de la sección transversal (A), se denomina factor de apilamiento (f_a)

$$f_a = \frac{A_e}{A}$$

$$A_e = f_a \cdot A$$

Esta área efectiva de sección transversal de material laminado es la que se debe considerar para el cálculo de pérdidas y densidades de flujo en núcleos laminados.

$$\text{En un núcleo real: } B = \frac{\emptyset}{A \times \text{factor de Apilamiento } (f_a)} \quad (1-28)$$

Las pérdidas por corrientes parásitas, en el caso especial en que se considera la fuente excitadora de forma senoidal, están dadas por:

$$P_e = \frac{\text{Vol.} \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot \delta^2 \cdot B_{\max}^2}{6 \rho} = \text{Vol.} \cdot K_e \cdot f^2 \cdot \delta^2 \cdot B_{\max}^2 \quad (\text{Watts}) \quad (1-29)$$

Vol. = Volumen de una laminación (m^3)

K_e = Constante igual a $\pi^2 / 6\rho$

f = Frecuencia (HZ)

δ = Espesor de una laminación (m)

B_{\max} = Densidad máxima de flujo (wb/m²)

Expresando las pérdidas en función del voltaje aplicado:

$$P_e = \frac{\text{Vol. } V^2 \tau^2}{12 (NA)^2 \rho} = K V^2 \text{ (Watts)} \quad (1-30)$$

$$K = \frac{\text{Vol. } \tau^2}{12 N^2 A^2}$$

N = Número de vueltas de la bobina

A = Area de sección transversal del núcleo

V = Voltaje aplicado

Las pérdidas por corrientes parásitas serán menores entre menor sea el espesor de las láminas (τ)

La suma de las pérdidas debidas a la histéresis y a las corrientes parásitas, forman el total de pérdidas en el núcleo (P_n). También son llamadas pérdidas en el hierro ó pérdidas de excitación.

$$P_n = P_h + P_e \quad (1-31)$$

1.3.6.- CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO DE UN REACTOR CON NUCLEO DE HIERRO.

Un reactor como el mostrado en la fig.1.30 (a) constituye un sistema electro-magnético, en el cual la bobina establece un circuito eléctrico y el núcleo un circuito magnético.

El análisis cuantitativo de un sistema electromagnético utilizando variables eléctricas y magnéticas, puede resultar complejo si no se analiza el sistema como un sistema puramente eléctrico ó puramente magnético, es por ello que el sistema electromagnético del reactor de la fig.1.30 (a) se traduce en un circuito eléctrico como el mostrado en la fig.1.30 (b).

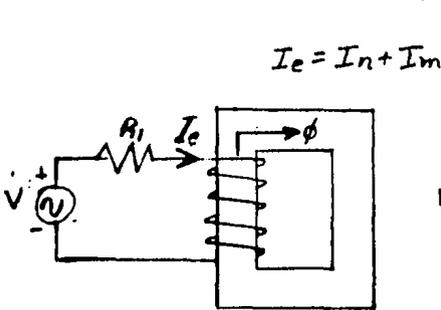


Fig.1.30 (a)

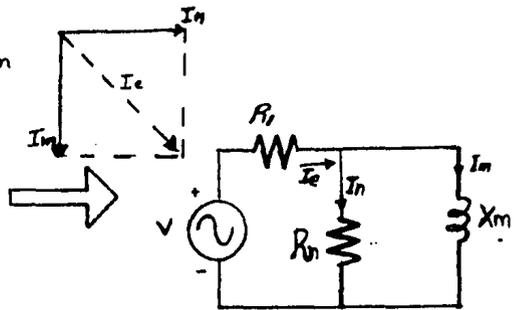


Fig. 1.30 (b)

De la fig.1.30 (a) se observa que al aplicar un voltaje (v) a la bobina de excitación, circula una corriente I_e (denominada corriente de excitación) capaz de establecer un flujo magnético ϕ . Esta corriente como se vió en las secciones 1.3.2 y 1.3.3. tiene dos componentes fundamentales:

- 1) Una componente que contribuye a la potencia entregada a la bobina de excitación, como ésta potencia es disipada en el mismo núcleo, la compo -

nente de la corriente de excitación es llamada COMPONENTE DE PERDIDAS EN EL NUCLEO (I_n), esta componente esta en fase con el voltaje aplicado y tiene la misma frecuencia.

2) La otra componente de la corriente de excitación es la COMPONENTE DE MAGNETIZACION (I_m) y es la que establece el flujo, esta componente se encuentra en fase con el flujo (ϕ).

Estas dos componentes fundamentales de la corriente de excitación se muestran en la fig.1.30 (c).

$$I_e = I_m + I_n \text{ - - - - - } \quad (1-32)$$

Debemos recordar que la corriente de excitación I_e no es senoidal y está atrasada en el tiempo respecto a la onda senoidal de voltaje. El ángulo de desfase entre la corriente de excitación y el voltaje aplicado depende de las características del material del núcleo, de las dimensiones del propio núcleo y de la frecuencia del voltaje aplicado.

La relación entre la corriente de excitación y el voltaje aplicado, en la fig. 1.30 (a) y la descomposición de la corriente de excitación en sus componentes fundamentales, se pueden representar en un circuito eléctrico como el mostrado en la fig. 1.30 (b), este circuito recibe el nombre de CIRCUITO ELECTRIC EQUIVALENTE DE UN REACTOR CON NUCLEO DE HIERRO.

CUESTIONARIO

I.- Indique si es falsa o verdadera cada una de las siguientes expresiones:

- | | VERDADERA | FALSA |
|---|-----------|-------|
| 1) La Ley de Faraday dice que la fuerza electromotriz inducida en una espira es igual al valor de la rapidez con la cual está cambiando el flujo que la atraviesa. | () | () |
| 2) La Ley de Lenz se expresa como $E(t) = N \frac{d\phi}{dt}$ | () | () |
| 3) La Ley de Lenz establece el sentido de la fem inducida. | () | () |
| 4) La Ley de Faraday está expresada algebraicamente como $\mathcal{E}(t) = - N \frac{d\phi}{dt}$ | () | () |
| 5) El valor eficaz del voltaje inducido en una bobina, de núcleo ferromagnético o no ferromagnético, cuando se aplica un voltaje senoidal, está dado por $V_{ef} = 4.44 f N \phi_m$ | () | () |
| 7) En una bobina, una corriente de excitación senoidal produce un flujo senoidal, solo si la curva característica de magnetización B Vs H. es una recta ($\mu = cte.$). | () | () |
| 8) Si el núcleo de una bobina es ferromagnético la corriente de excitación se deforma debido al ciclo de Histéresis y a la permeabilidad no lineal del material del núcleo. | () | () |
| 9) La corriente de excitación deformada por el fenómeno de histéresis, se puede descomponer (según el análisis de Fourier) en una onda senoidal fundamental y la tercera armónica. | () | () |
| 10) La energía almacenada en un entrehierro puede ser varias veces mayor que la energía almacenada en un volumen mayor de hierro. | () | () |

II.- Relacione la columna de la derecha con la columna de la izquierda, escribiendo en el paréntesis la letra que corresponda.

- | | | |
|--|---------|--|
| a) Estas pérdidas se reducen al utilizar en el núcleo materiales con ciclo de histéresis estrecho y diseñando el núcleo para que el punto de inversión de los dominios sea antes de la rodilla de saturación de la curva de magnetización. | () () | Pérdidas por corrientes parásitas ó de Eddy. |
| b) Estas pérdidas se presentan al haber fricción interna en el núcleo, debido a que cambian los dominios magnéticos su orientación tantas veces como se invierte el campo magnético. | () () | Pérdidas de Histéresis. |
| c) Estas pérdidas se producen por efecto Joule, cuando circulan corrientes parásitas por los anillos de hierro que en número infinito forman el núcleo. | () () | Pérdidas en el núcleo. |
| d) Estas pérdidas se reducen laminando el núcleo y aislando con barniz dieléctrico sus laminaciones. | () () | Corriente de excitación. |
| e) Estas pérdidas se definen como el total de pérdidas en un núcleo. Son la suma de las pérdidas debidas a la histéresis y a las corrientes parásitas. | | |
| f) En el circuito equivalente de un reactor con núcleo de hierro, esta corriente tiene dos componentes ficticias: La corriente que produce las pérdidas de magnetización y la que produce las pérdidas en el núcleo. | | |

III.- Defina los siguientes conceptos,

- 1.- Efecto superficial
- 2.- Factor de apilamiento

TEMA II.

TEORIA DEL TRANSFORMADOR.

OBJETIVO GENERAL

Conocer las características de operación de los transformadores y analizar su comportamiento bajo diversas condiciones de carga.

INTRODUCCION.

En el proceso generación-consumo de energía eléctrica, son los transformadores los encargados de hacer variar las tensiones a los diferentes valores requeridos de generación, transmisión, distribución urbana y de consumo. Así, para que la energía eléctrica se pueda emplear en centros de consumo industriales ó residenciales, se requieren por lo menos cuatro transformadores, como se muestra en la figura siguiente:

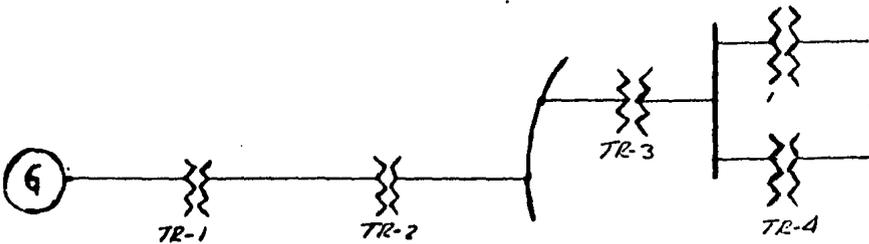


Fig.2.1.

En la figura:

TR-1, transformador elevador de tensión

TR-2, transformador reductor de tensión

TR-3, transformador reductor de tensión, a tensión de distribución urbana.

TR-4, transformador que distribuye la energía a tensiones usuales en centros industriales ó residenciales.

Según el empleo que se les de los transformadores se clasifican en transformadores de POTENCIA y de DISTRIBUCION, y pueden ser elevadores, reductores, o de enlace. Los transformadores empleados para protección control y medición reciben el nombre de transformadores de instrumentos.

MODULO 4:

TRANSFORMADOR IDEAL

CUADRO SINÓPTICO:

Relaciones Básicas de un transformador ideal.



Relación de transformación
Relación de corriente.
Relación de energía

Impedancia de carga referida al primario.

Polaridad



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

	1	2
Gourishankar V.: Conversión de Energía Electromecánica; Representaciones y Serv. de Ing.S.A.; Méx. 1965.	CAP.4 SEC.4-2	
Siskind,CH.: Electrical Machines: Direct-Alternating Current; MC.Graw-Hill Kogarusha; Japón 1959.	CAP. 8	CAP.8
Pérez,V.: Pruebas de Equipo Eléctrico; Edit.Limusa; México,1981.		CAP,1 PRUEBA 4

OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- 1) Estudiar los conceptos de:
 - a) Transformador Ideal
 - b) Relación de Transformación
 - c) Impedancia de carga referida al primario.
 - d) Polaridad.

- 2) Diferenciar los conceptos de:
 - a) Relación de voltaje y relación de corriente en un transformador
 - b) Polaridad aditiva y polaridad sustractiva

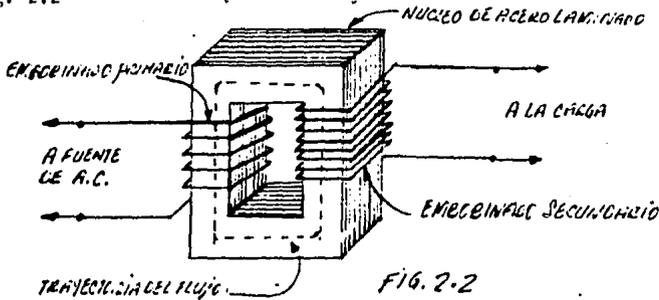
- 3) Describir algún método para determinar la polaridad de un transformador.

II.4.1.- GENERALIDADES .

Un transformador es un dispositivo que:

1. Transfiere energía eléctrica de un circuito eléctrico a otro.
2. Lo hace sin cambiar la frecuencia.
3. Lo hace por el principio de inducción electromagnética, y
4. tiene circuitos eléctricos que son encadenados por un circuito magnético común.

Un transformador en su expresión mas simple se constituye de 3 elementos, un núcleo ferromagnético laminado y 2 devanados independientes, como se muestra en la fig. 2.2



La bobina que está conectada a la fuente de suministro es llamado embobinado PRIMARIO, mientras que la bobina en la cual el voltaje es inducido y que provee de energía a la carga es llamado embobinado SECUNDARIO.

Existen dos tipos generales de transformadores, distinguido uno de otro por la manera en que los embobinados primario y secundario son devanados en el núcleo. En el llamado TIPO NUCLEO, las bobinas rodean una parte considerable del circuito magnético, veáse la fig.2-3. Otro tipo de transformador es el llamado TIPO ACORAZADO, en el que el circuito magnético rodea una porción considerable del embobinado, veáse la fig. 2-4.

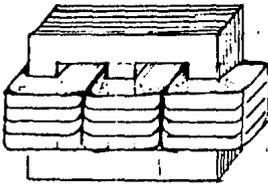


Fig. (2.3).- Transformador Trifásico tipo núcleo (o tipo columnar)

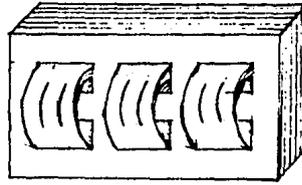


Fig. (2.4).- Transformador Trifásico tipo acorazado.

Nótese que los embobinados primarios y secundarios están aislados entre sí y con respecto al núcleo.

El arreglo más utilizado es el tipo acorazado.

II.4.2.- TRANSFORMADOR IDEAL.

Para comprender los principios de operación de un transformador real, es conveniente analizar un modelo ideal y obtener primero sus características. Después, se toman en cuenta las diferencias de un transformador real y uno ideal, y las relaciones obtenidas para el modelo ideal se modifican convenientemente.

El diagrama esquemático de un transformador ideal se muestra en la figura 2.5 siguiente.

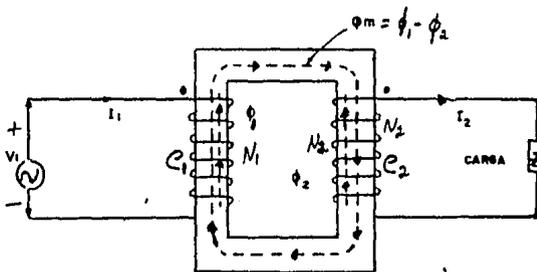


Fig.2.5 Un Transformador Ideal.

Se hacen las siguientes consideraciones para un transformador ideal:

- 1) La curva B-H del material del núcleo es lineal y de un solo valor. La permeabilidad del núcleo es muy grande, (tiende a infinito). El núcleo no tiene pérdidas.
- 2) Los flujos establecidos por las corrientes de los embobinados son contenidos enteramente en el núcleo.
- 3) Los embobinados no tienen resistencia ohmica.
- 4) Son despreciables las capacitancias entre los embobinados aislados y el núcleo, así como entre las vueltas.

II.4.3.- RELACIONES BASICAS DE UN TRANSFORMADOR IDEAL

RELACION DE VOLTAJE.

Basándonos en la figura 2,5 del transformador ideal, al aplicar un voltaje de corriente alterna al primario, la corriente I_1 generará un campo magnético variable (Φ_1) que es conducido totalmente a través del circuito magnético hasta la 2a. bobina, al cortar a este embobinado se induce una fem que hace circular I_2 cuando se conecta la carga, a su vez, esta corriente produce un flujo Φ_2 cuyo sentido queda determinado por la Ley de Lenz.

El flujo neto en el núcleo es entonces:

$$\Phi_m = \Phi_1 + \Phi_2$$

Este flujo resultante es el que induce las fems, e_1 y e_2

De acuerdo con la Ley de Faraday, las fems inducidas serán:

$$e_1 = N_1 \frac{d \Phi_m}{dt} \qquad e_2 = N_2 \frac{d \Phi_m}{dt}$$

Dividiendo e_1 entre e_2 :

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.1 a)$$

De donde se observa que la relación de las fems inducidas es directamente proporcional a la relación del número de vueltas.

Si la resistencia de los devanados es despreciable:

$$V_1 = e_1, \quad V_2 = e_2$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{----- (2.1)}$$

que es la relación buscada.

RELACION DE CORRIENTE. De la fig.2.6 obtenemos el circuito magnético del transformador ideal.

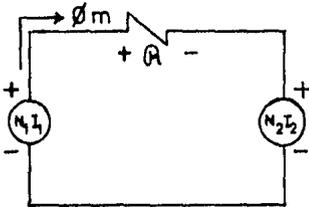


Figura 2.6

Circuito Magnético equivalente de un transformador ideal.

Aplicando la ecuación de malla al circuito magnético equivalente de un transformador ideal fig. 2.6 se obtiene:

$$N_1 I_1 - \phi_m R - N_2 I_2 = 0$$

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \phi_m R$$

Como $\mathcal{M} \rightarrow \infty \Rightarrow R \rightarrow 0$

$$\therefore N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (2.2)$$

Esta expresión indica que la fmm del embobinado uno es equilibrada por la fmm del embobinado dos.

De la expresión (2.2) obtenemos la relación de corriente.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.3)$$

RELACION DE TRANSFORMACIÓN.

Al cociente N_1/N_2 se denomina RELACION DE TRANSFORMACION y se representa por la letra "a" :

$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

De la expresión 2.1a se observa que si se elige adecuadamente la relación del número de vueltas N_1/N_2 en los devanados, puede obtenerse en el secundario cualquier voltaje deseado a partir de un voltaje dado en el primario.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad N_1 I_1 = - N_2 I_2 \quad (2.4a)$$

El signo (-) indica que para un mismo instante la fmm del embobinado do uno es cancelada por la fmm del embobinado 2.

RELACION DE ENERGÍA.

Es interesante analizar la relación que tiene la energía que recibe un transformador ideal con la energía que entrega.

Multiplicando entre si los lados correspondientes a las ecuaciones (2.1) y (2.2) obtenemos:

$$V_1 I_1 = - V_2 I_2 \quad (2.5)$$

Así, si un embobinado recibe una cierta cantidad de energía de la fuente a la que está conectado, el otro embobinado entregará la misma cantidad de energía (Un transformador ideal no almacena energía).

IMPEDANCIA DE CARGA REFERIDA AL PRIMARIO.

Conectemos al transformador anterior, una carga en su secundario.

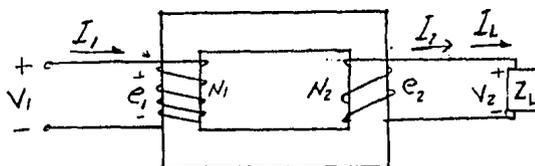


Fig. 2.6(a)

de donde:

$$Z_L = \frac{V_2}{I_2} = \frac{V_1}{I_1} \quad (2.6)$$

de (2.1) :

$$V_2 = V_1 (N_2/N_1)$$

de (2.2) :

$$I_2 = I_1 (N_1/N_2)$$

Sustituyendo estas dos relaciones en (2.6) :

$$\frac{V_1}{I_1} = Z_L \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = Z'_L \quad (2.5)$$

Una resistencia Z_L conectada al embobinado 2 parece tener un valor Z'_L cuando se ve del lado 1. En general, para una impedancia Z_L , tenemos :

$$Z'_L = Z_L (N_1/N_2)^2$$

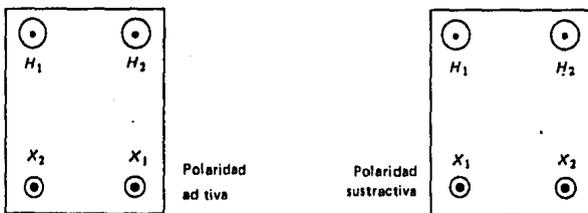
El término Z'_L es llamado el valor de Z_L referido al lado 1 del transformador.

II,4,4.- POLARIDAD.

La polaridad de voltajes de un transformador se refiere a las direcciones relativas del voltaje inducido en los enbobinados primario y secundario depende del sentido del arrollamiento de los devanados. Al tratar de conectar un transformador a un sistema eléctrico es de suma importancia conocer primero su polaridad, por ello, las normas de cada país obligan a los fabricantes a que indiquen dicha polaridad con marcas ó índices en las terminales de entrada y salida.

La American Standards Association (ASA) ha determinado que las terminales de alto voltaje se marquen con H y las de bajo voltaje con X, debiendo utilizar un mismo subíndice numérico en ambas letras cuando las terminales correspondientes sean de igual polaridad.

De la fig. 2.7 (a), puesto que los voltajes inducidos en ambos enbobinados son producidos por el mismo flujo alterno, la dirección en ambos será siempre la misma. Así, la corriente tiende a fluir de (H_1) a (H_2) en el primario, al mismo tiempo que la corriente tiende a fluir de (X_2) a (X_1) en el secundario. Sin embargo;



Nomenclatura empleada de acuerdo a las normas, para la identificación de las terminales de un transformador con polaridad aditiva y sustractiva.

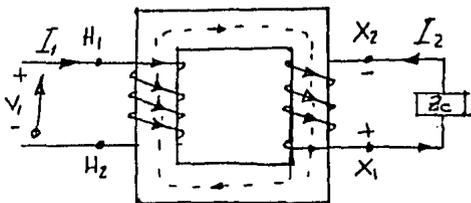
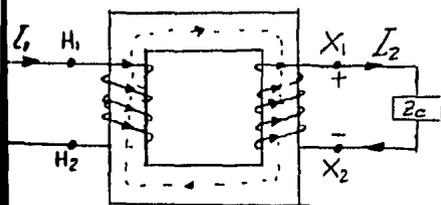
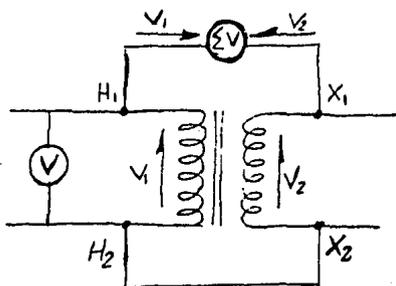


Fig.2.7 (a).-Polaridad Aditiva

Fig.2.7 (b).-Polaridad Su-
stractiva.

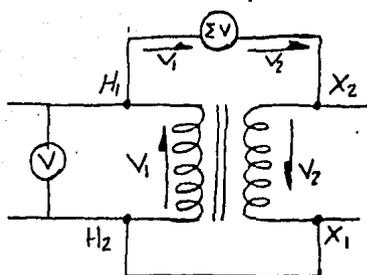
Cuando las terminales en el secundario se encuentran como se muestra en la fig.2.7 (b), el devanado desde (X_1) hasta (X_2) se efectúa de izquierda a derecha mientras que el devanado desde (X_1) hasta (X_2) se efectúa de derecha a izquierda cuando las terminales se encuentran como en la fig. 2.7 (a). Esto quiere decir que la polaridad de las terminales del secundario puede ser diferente en dos transformadores idénticos,DEPENDIENDO DEL SENTIDO EN QUE SE DEVANA EL EMOBINADO SECUNDARIO.

Si las marcas de polaridad están borradas, que sucede frecuentemente, ó estan equivocadas o no se tienen, se pueden determinar facilmente por medio de cualquiera de los métodos descritos en el libro "Pruebas de Equipo Eléctrico" del Ing.Victor Pérez Amador; uno de tales métodos se describe brevemente: de la fig. 2.8 (a), si



Representación simbólica de un transformador.

Fig.2.8 (a)



Representación simbólica del transformador para la determinación de la polaridad.

Fig. 2.8 (b)

un alambre es conectado a las dos terminales (H_2) y (X_2), un volmetro a través de las terminales (H_1) y (X_1) registrará la diferencia entre los voltajes inducidos en el primario y secundario; la lectura en el volmetro ΣV será menor que la del volmetro V . El hecho de que se resten los voltajes inducidos le da el nombre de "polaridad sustractiva" a este arreglo. En la fig. 2.8 (b), si un alambre se conecta a (H_2) y (X_1), un volmetro conectado entre (H_1) y (X_2) registrará la suma de los voltajes inducidos en el primario y secundario y la lectura en ΣV será mayor que la del volmetro V . El hecho de que se sumen los voltajes inducidos le da el nombre de "Polaridad Aditiva"

CUESTIONARIO

I). Indique si es falsa ó verdadera cada una de las aseveraciones siguientes:

VERDAD FALSO

1) Un transformador es un dispositivo que tiene embobinados estacionarios que son encadenados por un circuito magnético - común, que transfiere energía eléctrica de un embobinado llamado primario a otro llamado secundario por el principio de inducción electromagnética sin que haya un cambio en la frecuencia, y que no requiere de ninguna parte móvil para hacerlo. () ()

2) En un transformador ideal se considera que el material del núcleo es de permeabilidad lineal é infinita. () ()

3) Si se elige adecuadamente la relación de transformación, se puede obtener cualquier voltaje deseado en el secundario a partir de un voltaje dado en el primario. () ()

4) La polaridad de un transformador, se refiere a las direcciones relativas del voltaje inducido en los embobinados primario y secundario con respecto a la manera en que han sido devanados y marcadas sus terminales en el transformador. () ()

II) Relacione la columna de la derecha con la de la izquierda, escribiendo dentro del paréntesis el número que corresponda.

1) En este tipo de transformador, las bobinas rodean una parte considerable del circuito magnético. () $Z'_L = Z_L (N_1/N_2)^2$

2) En este tipo de transformador, el cir-

cuito magnético rodea una porción considerable del embobinado.

() $V_1 i_1 = V_2 i_2$

3) Es la relación del número de vueltas en el primario entre el número de vueltas en el secundario.

() $\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1}$

4) Relación de energía en un transf.ideal

() Transf.tipo acorazado.

5) Relación de corrientes en un transf.ideal

() Relación de transformación.

6) Valor de la impedancia de carga referida al primario.

() Transf.tipo núcleo.

III) Mencione 3 métodos recomendables para verificar la polaridad de los transformadores y describa alguno de ellos brevemente:

IV) Investigar en las normas Mexicanas (CONNIE), como se establece las marcas de polaridad en el transformador.

Problemas de Transformador ideal:

DEDUCCION DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

MODULO 5.

CUADRO SINOPTICO

Pérdidas de Energía en un Transformador Real



Ecuaciones de voltaje de un transformador de núcleo lineal.



Circuito equivalente exacto de un transformador lineal.



Circuitos equivalentes de transformadores de núcleos ferromagnéticos.



Circuitos equivalentes aproximados



Diagramas de fasores



Determinación de los parámetros del circuito equivalente de un transformador de núcleo de hierro.



[Prueba de circuito corto
Prueba de circuito abierto.
to.

CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

	1	2	3	4	5	6	7
Gourishankar V.; Conversión de Energía Electromecánica; Representaciones y Serv.de Ing.S.A.; Méx.1975.	CAP.4 Sec.4-3,4	CAP.4 Sec.4-3,4	CAP.4 Sec.4-5,6,7 8	CAP.4 Sec.4-9	CAP.4 Sec.4-11	CAP.4 Sec.4-10	CAP.4 Sec.4-12
Siskind,CH.:Electrical Machines: Direct-Alternating Current; Mc.Graw-Hill Kogakusha; Japón 1959.	CAP.8	CAP.8	CAP.8	CAP.8	CAP.8	CAP.8	CAP.8
Pérez,V.: Pruebas de Equipo Eléctrico; Edit.Limusa; México;1981	CAP. Antecedentes teóricos.		CAP.1 Comp.de las Pruebas 6 y 7	CAP.1 Comp.de las Pruebas 6 y 7	CAP.1 Comp.de las Pruebas 6 y 7		CAP.1 Pruebas 6 y 7

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1).- Conocer como son reducidas las pérdidas en un transformador real.
- 2).- Establecer:
 - a) Circuito equivalente exacto de un transformador lineal.
 - b) Circuito equivalente de un transformador con núcleo ferromagnético.
 - c) Circuito equivalente aproximado de un transformador
 - d) Diagrama fasorial de un transformador
- 3).- Diferenciar los circuitos equivalentes aproximados con los parámetros referidos al primario ó al secundario.
- 4).- Explicar, en que consisten las pruebas de circuito corto y circuito abierto en un transformador.
- 5).- Determinar las pérdidas magnéticas y las pérdidas eléctricas en un transformador.
- 6).- Determinar los parámetros del circuito equivalente de un transformador
- 7).- Resolver problemas utilizando el circuito equivalente de un transformador.

II.5.1.- PERDIDAS DE ENERGIA EN UN TRANSFORMADOR REAL.

Un transformador real cuenta con las siguientes pérdidas:

- a).- Pérdidas de voltaje por flujos de fuga
 - b).- Pérdidas de potencia por corrientes parásitas
 - c).- Pérdidas de potencia por histéresis
 - d).- Pérdidas Potencia por efecto Joule en los devanados
- } Pérdidas en el núcleo.

Las pérdidas en el núcleo (compuestas por las pérdidas por corrientes parásitas y por las pérdidas por histéresis) y la manera como pueden ser disminuidas, fueron vistas en la sección I.3.5. de este trabajo. Así pues, analicemos aquí las pérdidas de los incisos a) y d) restantes.

- PERDIDAS DE VOLTAJE POR FLUJOS DE FUGA.

Debido a la reluctancia del material de los núcleos reales, la forma geométrica economizada de los mismos y a la presencia de entrehierro, algunas líneas de flujo generado por la corriente de magnetización en el embobinado primario no llegan al secundario. Este pequeño flujo que no alcanza a enlazar al secundario se denomina " Flujo de Fuga".

La manera de reducir éstos flujos indeseables es devanando los embobinados primario y secundario lo más adherido posible al núcleo y muy juntos entre si, y utilizando material de alta permeabilidad magnética en el núcleo, con amplia sección transversal del mismo y un diseño geométrico concienzudo.

- PERDIDAS DE POTENCIA POR EFECTO JOULE EN LOS DEVANADOS.

Las pérdidas por calor dependen del calibre y tipo de material usado en los embobinados. El cobre, que es de buena conductividad y bajo costo, nos dá una pérdida por efecto Joule relativamente baja respecto a otros conductores, y se pueden reducir más éstas pérdidas aumentando la sección transversal del conductor.

Con las soluciones vistas para disminuir las pérdidas, la potencia eléctrica de entrada al transformador es casi igual a la de salida (0.2 a 5% de diferencia). Por esta razón y para sencillez de cálculos, en problemas prácticos se considera al transformador real como si fuera ideal, suponiendo que la potencia de entrada es idéntica a la de salida, y que $a = V_1/V_2 = I_2/I_1 = N_1/N_2$.

II.5.2.- ECUACIONES DE VOLTAJE DE UN TRANSFORMADOR DE NUCLEO LINEAL.

La figura siguiente representa un transformador real con núcleo de característica B-H lineal; condición que facilita el análisis y que nos dará resultados aplicables, con buena aproximación, a los núcleos no-lineales como es el caso de los ferromagnéticos.

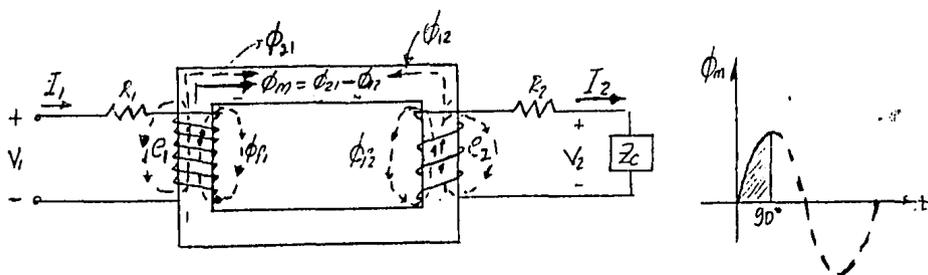


Fig.2.9

Suponiendo flujos de fuga en ambos embobinados y considerando flujos positivos los que se dirigen en sentido de las manecillas del reloj:

-EN EL EMBOBINADO PRIMARIO:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Flujo Total en} \\ \text{Emb.1 } (\phi_1) \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de Fuga en} \\ \text{Emb.1 } (\phi_{f1}) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Flujo Producido por} \\ \text{I}_1 \text{ que corta} \\ \text{al Emb.} \\ \text{2 } (\phi_{21}) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Flujo Producido por} \\ \text{corriente de Magne-} \\ \text{tizaci3n} \\ (\phi_m) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Flujo Producido por} \\ \text{I}_2 \text{ que corta al emb.} \\ \text{1 } (\phi_{12}) \end{array} \right]$$

Es decir:

$$\phi_1 = \phi_{f1} + \phi_{21} + \phi_m - \phi_{12}$$

como $\mathcal{F}_1 = \phi_{21} R_1$ y $\mathcal{F}_2 = \phi_{12} R_2$

si todo el n3cleo es del mismo material $R_1 = R_2$, y como vimos $\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_2$; por tanto $\phi_{21} = \phi_{12}$

entonces $\phi_1 = \phi_{f1} + \phi_m$ (2.6)

EN EL EMBOBINADO SECUNDARIO Y EN EL MISMO INSTANTE.

$$\left[\begin{array}{l} \text{Flujo Total en} \\ \text{Emb.2} \end{array} \right] = - \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de Fuga} \\ \text{en Emb.2} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Flujo Producido por} \\ I_2 \text{ que corta al} \\ \text{Emb.1} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Flujo Producido por } I_1 \\ \text{que corta al Emb.2} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Flujo Producido por} \\ \text{corriente de Magnetización} \end{array} \right]$$

por un razonamiento análogo al anterior:

$$\phi_2 = -\phi_{f2} + \phi_m \quad (2.7)$$

En cualquier instante, las ecuaciones de voltaje según la ley de Kirchohoff y considerando (2-6) y (2-7) son:

$$V_1 = R_1 I_1 + N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = R_1 I_1 + N_1 \frac{d\phi_{f1}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.8)$$

$$V_2 = -R_2 I_2 + N_2 \frac{d\phi_2}{dt} = R_2 I_2 + \left(-N_2 \frac{d\phi_{f2}}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \right) \quad (2.9)$$

De (1-11), $LI=N\phi$, y las ecuaciones de voltaje se transforman en:

$$V_1 = R_1 I_1 + L_{f1} \frac{dI_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} = R_1 I_1 + L_{f1} \frac{dI_1}{dt} + e_1 \quad (2.8a)$$

$$V_2 = -R_2 I_2 - L_{f2} \frac{dI_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt} = -R_2 I_2 - L_{f2} \frac{dI_2}{dt} + e_2 \quad (2.9a)$$

(Se notará aquí que $V_1 / V_2 \neq N_1 / N_2$ condición distinta a las de un transformador ideal).

Sabemos que derivar un fasor respecto al tiempo equivale a multiplicarlo por $j\omega$:

$$\frac{dI_1}{dt} = j\omega I_1$$

por lo tanto : $L_{f1} \frac{dI_1}{dt} = j\omega L_{f1} I_1$

y como $X_{f1} = \omega L_{f1}$

entonces $L_{f1} \frac{dI_1}{dt} = j X_{f1} I_1$

analogamente: $L_{f2} \frac{dI_2}{dt} = j X_{f2} I_2$

Así, las ecuaciones de voltaje (2-8 a) y (2-9a) quedan re - presentadas fasorialmente por:

$$V_1 = (R_1 + j \omega L_{f1}) I_1 + e_1 = (R_1 + j X_{f1}) I_1 + e_1 \quad (2-8b)$$

$$V_2 = (R_2 + j \omega L_{f2}) I_2 + e_2 = - (R_2 + j X_{f2}) I_2 + e_2 \quad (2-9b)$$

11.5.3.- CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE NUCLEO LINEAL.

Reordenando las expresiones (2-8b) y (2-9b)

$$V_1 = R_1 I_1 + j X_{f1} I_1 + e_1 \quad (2-8 b')$$

$$e_2 = j X_{f2} I_2 + R_2 I_2 + V_2 \quad (2-9 b')$$

La expresión (2-8 b') se puede representar por el siguiente circuito:

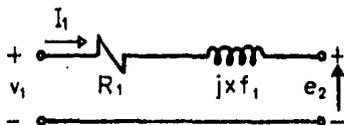


FIG. - 2-9a

y la expresión (2-9 b') también queda representada por el siguiente circuito.

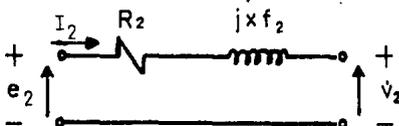


FIG. - 2-9b

Los circuitos de la figura 2.9 a y 2.9 b corresponden al lado primario y lado secundario respectivamente, y se denominan circuitos equivalentes.

Ahora bien, puesto que e_1 y e_2 , en un transformador ideal, están relacionadas por la relación del número de vueltas en el primario al número de vueltas en el secundario, esto es:

$$e_1 = \frac{N_1}{N_2} e_2$$

entonces los circuitos de las figs. 2.9a y 2.9b, se pueden ligar de la siguiente manera.

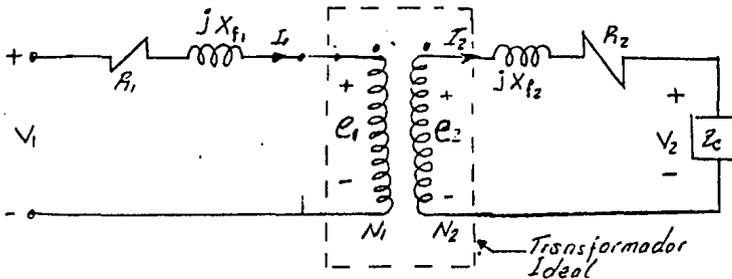


Fig.2.10

Que es el circuito eléctrico equivalente de un transformador de núcleo lineal.

Los términos que aparecen en el circuito anterior son:

a = Relación de transformación

V_1 = Voltaje aplicado al primario

V_2 = Voltaje obtenido en el secundario

R_1 = Resistencia Eléctrica del devanado primario

- R_2 = Resistencia Eléctrica del devanado secundario
- X_{f1} = Reactancia equivalente a los flujos de fuga en el primario
- X_{f2} = Reactancia equivalente a los flujos de fuga en el secundario.
- I_1 = Corriente de entrada al primario
- I_2 = Corriente de carga
- e_1 = Voltaje inducido por el flujo mutuo en el devanado primario
- e_2 = Voltaje inducido por el flujo mutuo en el devanado secundario.

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE NUCLEO FERROMAGNÉTICO.

El circuito de la fig.2.10 se debe modificar al considerar transformadores con núcleos ferromagnéticos, los cuales poseen, como ya hemos visto, características de saturación y de histéresis.

Si en el circuito de la fig.2.9 se aplica un voltaje V_1 al embobinado primario, teniendo al embobinado secundario en circuito abierto, la corriente en el secundario será nula y solo circulará la corriente de excitación I_e en el primario capaz de establecer un flujo magnético. El transformador así analizado se comporta como el reactor de núcleo ferromagnético analizado en la sec. I.3.6, y por consiguiente podemos aprovechar el circuito eléctrico equivalente del reactor, que se muestra en la fig. , para incorporar al circuito de la fig.2-10 la componente de pérdidas en el núcleo y la componente de magnetización. El circuito eléctrico equivalente de un transformador de núcleo ferromagnético queda finalmente como se muestra en la fig. 2.11

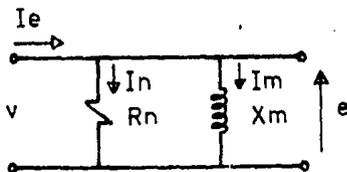


Fig.1.20 (c).-Circuito eléctrico equivalente de un reactor con núcleo ferromagnético.

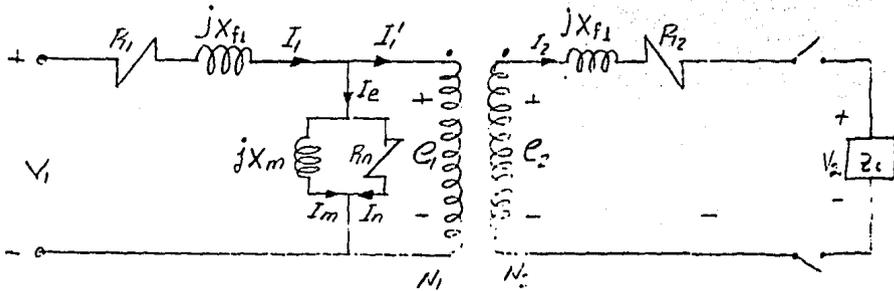


Fig.2.11

La suma de I_m e I_n la llamamos CORRIENTE DE EXCITACION (I_e), (veá se las Secc.I.3.3 y I.3.6 de esta guía) y por definición es aquella corriente que circula en un transformador real con núcleo de hierro, cuando el embobinado secundario está abierto y se aplica al primario el voltaje nominal.

De la misma forma como se hizo en el caso del transformador ideal, los parámetros del circuito equivalente de un transformador real pueden ser referidos a cualquier lado (primario ó secundario) de un transformador, aprovechando la propiedad del T_1 ideal de que $Z_1 = a^2 Z_2$. El procedimiento es similar al utilizado para obtener la expresión (2-5). También nos auxiliamos de (2-1) y (2-2). Los circuitos equivalentes resultantes son:

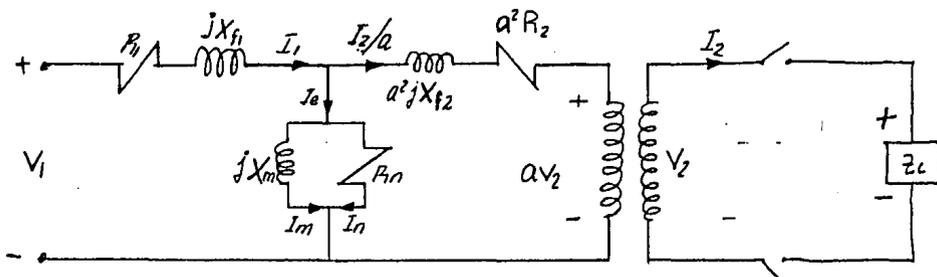


Fig.2-12 (a).- Circuito equivalente a un transformador de núcleo de hierro con sus parámetros referidos al primario.

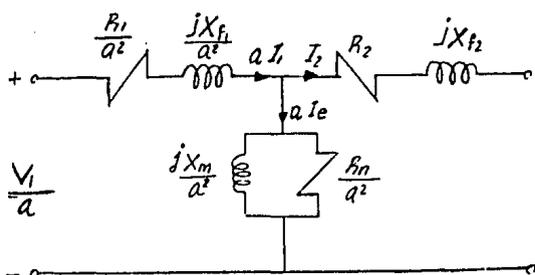


Fig.2-12 (b).- Circuito equivalente a un transformador de núcleo de hierro con sus parámetros referidos al secundario.

CIRCUITOS EQUIVALENTES APROXIMADOS.

En la mayoría de los transformadores, que son operados a frecuencias de 50 o 60 c.P.S., la corriente de excitación I_e es pequeña, 2 a 4% de la corriente suministrada por los transformadores a las cargas. Consecuentemente, la rama que representa al núcleo en las figs. 2-12(a) y (b) puede ser movida a cualquier extremo del circuito. Usualmente la rama en derivación se mueve al extremo izquierdo en la fig. 2-12(a) y al extremo derecho en la fig. 2-12(b), obteniéndose los circuitos equivalentes "aproximados" mostrados:

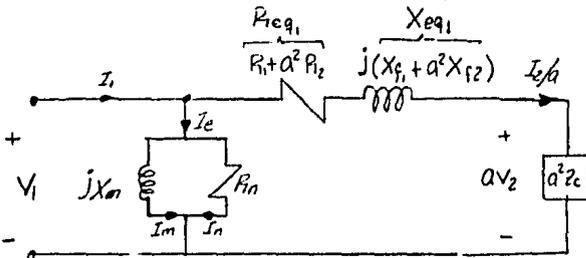


Fig.2-13 (a).-Circuito equiv.aprox.de un Transf.de núcleo de hierro referido al primario.

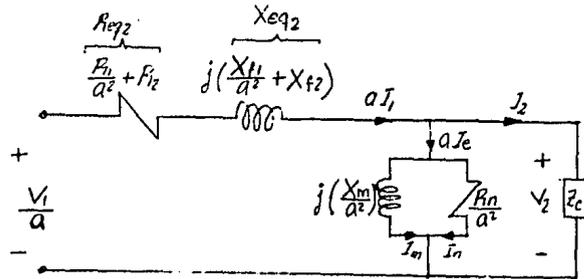


Fig.2-13 (b).- Circuito equiv.aprox. de un Transf. de núcleo de hierro referido al secundario.

en donde la resistencia y la reactancia de dispersión equivalentes del transformador, referidas al primario son:

$$R_{eq1} = R_1 + a^2 R_2 \quad (2-10)$$

$$X_{eq1} = X_{f1} + a^2 X_{f2} \quad (2-11)$$

en donde la resistencia y la reactancia de dispersión equivalentes del transformador, referidas al secundario son:

$$R_{eq2} = \frac{R_1}{a^2} + R_2 \quad (2-12)$$

$$X_{eq2} = \frac{X_{f1}}{a^2} + X_{f2} \quad (2-13)$$

Estos circuitos aproximados son los que se utilizan en la práctica. El circuito equivalente exacto se usará únicamente en análisis especiales y diseño.

DIAGRAMAS DE FASORES

Estos diagramas son usados para determinar la diferencia entre los voltajes sin carga y a plena carga, ó para calcular el factor de potencia de entrada del transformador.

Pueden trazarse usando los circuitos equivalentes de las figs. 2-12(a) y (b) como se muestran en las figs. 2-12 (a) y (b) respectivamente, para una carga con factor de potencia atrasado.

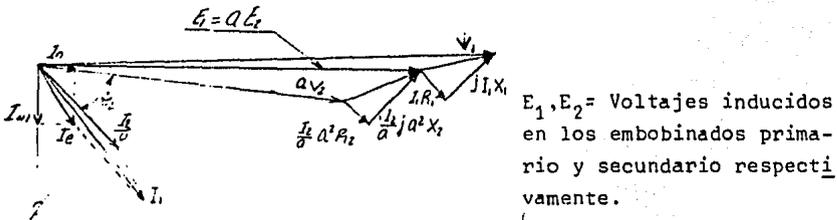


Fig.2-14 (a).= Diagrama de fasores de un transformador de núcleo de hierro con carga Inductiva que corresponde al circuito de la fig.2-12a

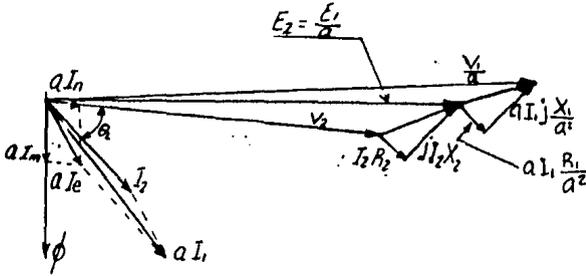


Fig.2.14 (b).-Diagrama de fasores de un transformador de núcleo de hierro con carga inductiva que corresponde al circuito de la fig. 2-12(b).

Los diagramas complejos para los circuitos equivalentes aproximados son más simples que los aquí expuestos para circuitos exactos.

DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE NUCLEO DE HIERRO.

Los parámetros por determinar son:

- 1) Las resistencias eléctricas de los dos embobinados (R_1 y R_2)
- 2) Las reactancias de dispersión X_{f1} y X_{f2}
- 3) La reactancia de magnetización X_m^2 y la resistencia equivalente a las pérdidas del núcleo R_n

Las pruebas fundamentales de "CORTO CIRCUITO" y "CIRCUITO ABIERTO" permiten determinar dichos parámetros, así como las pérdidas eléctricas y magnéticas.

PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

Las pérdidas en el núcleo son obtenidas mediante ésta prueba que

consiste básicamente en aplicar voltaje y frecuencia nominal al devanado secundario del transformador, teniendo el primario en circuito abierto.

Según el circuito equivalente aprox. referido al primario de la fig.2-13 (a), al no haber carga es obvio que los únicos parámetros que tienen que ser considerados en esta prueba son X_m y R_n :

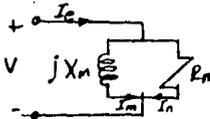


Fig.2-15 (a)

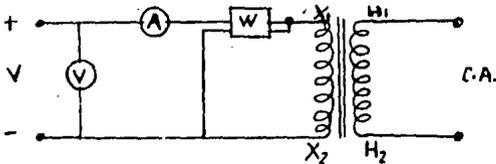


Fig.2-15 b. Prueba de circuito abierto. Conexión de Aparatos

Se escogerá conectar los instrumentos de medición en el lado de baja tensión porque:

- a) Es más fácil el suministro de voltaje
- b) Existe mayor seguridad personal para el operador
- c) Se usan instrumentos que operan con corrientes relativamente pequeñas y voltaje de baja tensión.

Al aplicar voltaje nominal V , el amperímetro A mide la corriente de excitación I_e y el Wattmetro W la potencia de pérdidas en el núcleo (P_n)

La impedancia propia del embobinado de prueba es : $Z_n = \frac{V}{I_e}$

$$I_e = \frac{V}{Z_n} \quad (2-14)$$

Del circuito reducido:

$$V = I_n R_n \Rightarrow I_n = \frac{V}{R_n} \quad (2-15)$$

$$V = I_m X_m \Rightarrow I_m = \frac{V}{X_m} \quad (2-16)$$

La lectura en el wattmetro indica $P_n = V I_e \cos \theta_n$ (Watts) (2-17)

Como el diagrama fasorial es:  (2-17a)

implica que $P_n = V I_n$

por lo tanto $P_n = V \left(\frac{V}{R_n} \right) = \frac{V^2}{R_n} \Rightarrow R_n = \frac{V^2}{P_n}$ (2-18)

De manera similar: $Q_n = V I_e \text{ Sen } \theta_n$ (Volts .Amperes)

$$Q_n = V I_m \quad (2-19)$$

por lo tanto: $Q_n = V \left(\frac{V}{X_m} \right) = \frac{V^2}{X_m} \Rightarrow X_m = \frac{V^2}{Q_n}$ (2-20)

Del triángulo de potencias del circuito reducido:

$$\theta_n = \text{ang.} \cos \frac{P_n}{S_n} \quad S_n = V I_e \quad (2-21)$$



En esta prueba se observa que al aplicarse voltaje y frecuencia constante al transformador, las pérdidas magnéticas se mantienen constantes cualquiera que sea el valor de la corriente de carga. Las pérdidas del núcleo son independientes de la carga.

PRUEBA DE CIRCUITO CORTO

En ésta prueba se trata de establecer las corrientes nominales en los embobinados del transformador, para conocer las pérdidas

de potencia por efecto Joule en los mismos.

Se aplica un voltaje reducido (V_r) a frecuencia nominal al primario, de magnitud tal que haga circular las corrientes nominales en ambos enbobinados, manteniendo al secundario en corto circuito. Aplicar este voltaje reducido (V_r) la corriente I_e es despreciable respecto a la corriente nominal, por ello se elimina del circuito equivalente la rama que representa al núcleo. Entonces, para esta prueba el circuito equivalente aproximado de la fig. 2-13 (b) se reduce al de la fig 2-16.

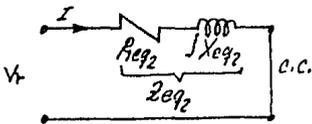


Fig. 2-16

La conexión de aparatos es como sigue:

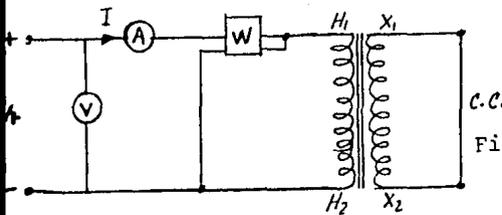


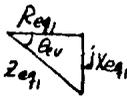
Fig. 2,17,.-Prueba de Circuito Corto.

El voltaje reducido en el volmetro (V) empíricamente de valor entre 3 y 7% del voltaje nominal representa la caída de voltaje en los enbobinados del transformador, y la lectura en el Wattmetro (W) la potencia consumida por pérdidas eléctricas en los devanados.

$$\text{La lectura del Wattmetro indica: } P_{cu} = I^2 R_{eq1} \Rightarrow R_{eq1} = \frac{P_{cu}}{I^2} \quad (2-23)$$

$$\text{La impedancia es: } Z_{eq1} = \frac{V_r}{I} \quad (2-24)$$

La reactancia equivalente estará dada por: $X_{eq1} = \sqrt{Z_{eq1}^2 - R_{eq1}^2}$ (2-25)

Del triángulo de impedancias  $\theta_{cu} = \text{ang} \cos \frac{R_{eq1}}{Z_{eq1}}$ (2-26)

De (2-10), $R_{eq1} = R_1 + a^2 R_2$; $R_1 = a^2 R_2$ (2-27)

$$R_{eq1} = R_1 + R_1 = 2 R_1$$

$$R_1 = \frac{R_{eq1}}{2} \quad (2-28)$$

similarmente, $R_{eq1} = a^2 R_2 + a^2 R_2 = 2 a^2 R_2$ (2-29)

$$R_2 = \frac{R_{eq1}}{2 a^2} \quad (2-30)$$

De (2-11), $X_{eq1} = X_{f1} + a^2 X_{f2}$; $X_{f1} = a^2 X_{f2}$ (2-31)

$$X_{f1} = \frac{X_{eq1}}{2} \quad (2-32)$$

similarmente: $X_{f2} = \frac{X_{eq2}}{2 a^2}$ (2-33)

En esta prueba se observa que las pérdidas eléctricas están en función de la carga, ya que al modificarse la carga las corrientes en el primario y secundario del transformador también varían, ocasionando mayor ó menor pérdidas por efecto Joule en el cobre. La expresión que relaciona las pérdidas eléctricas con la variación de carga en por ciento está dada por:

$$P_{cu1} (\%) = \left(\frac{n}{100} \right)^2 P_{cu1}$$

P_{cu1} = Pérdidas en el cobre al 100%

Por Ejemplo:

a 100% de carga: $Pcu_1 = I_1^2 Req_1$

a 75% de carga: $Pcu_1 (75\%) = (0.75)^2 I_1^2 Req_1 = (0.75)^2 Pcu_1$

a 50% de carga: $Pcu_1 (50\%) = (0.5)^2 I_1^2 Req_1 = (0.5)^2 Pcu_1$

CUESTIONARIO

I.- Indique si es falsa o verdadera cada una de las siguientes expresiones:

- | | VERDADERA | FALSA |
|---|-----------|-------|
| 1) Un transformador real cuenta con las siguientes pérdidas: a) Pérdidas de voltaje por flujos de fuga. b) Pérdidas de potencia por corrientes parásitas. c) Pérdidas de potencia por histéresis y Pérdidas de potencia por efecto Joule. | () | () |
| 2) En un transformador real, la cantidad de energía que recibe en un embobinado, no es la misma cantidad de energía que entrega el otro embobinado a la carga, | () | () |
| 3) El flujo de fuga es una pequeña parte del flujo generado por la corriente de Magnetización en el primario, que no alcanza a enlazar al devanado secundario y se pierde. | () | () |
| 4) Las ecuaciones de voltaje, que corresponden al circuito eléc. equivalente exacto de un transformador, son obtenidas considerando: 1º) Un núcleo lineal y 2º) Los flujos de fuga en el primario y secundario, y aplicando la Ley de voltajes de Kirchhoff tanto al primario como al secundario del transformador. | () | () |
| 5) Las pérdidas en el núcleo que se presentan en un transformador de núcleo ferromagnético, en el circuito equivalente, están representadas por la resistencia que esta en paralelo con la reactancia de magnetización, | () | () |
| 6) Debido a que la corriente de excitación es pequeña respecto a la corriente suministrada a las cargas por los transformadores, la rama en derivación del circuito equivalente puede moverse hacia cualquier extremo, formándose así el | | |

	VERDADERA	FALSA
circuito equivalente aproximado.	()	()
7) Las pruebas de circuito corto y circuito abierto permiten determinar los parámetros del circuito equivalente de un transformador.	()	()
8) Se observa, en la prueba de circuito abierto, que las pérdidas en el núcleo son independientes de la condición de carga.	()	()
9) En la prueba de corto circuito se observa que las pérdidas eléctricas están en función de la condición de carga.	()	()

II.- RELACIONE LA COLUMNA DE LA DERECHA CON LA COLUMNA DE LA IZQUIERDA, COLOCANDO DENTRO DEL PARENTESIS EL NUMERO CORRESPONDIENTE.

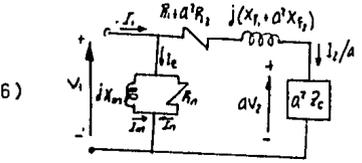
- | | |
|--|---|
| 1) La manera de reducir estas pérdidas es devanando los embobinados primario y secundario lo más adherido posible al núcleo y muy juntos entre si, y utilizando material de alta permeabilidad magnética en el núcleo, con amplia sección transversal del mismo y un buen diseño geométrico. | () Pérdidas por efecto Joule. |
| 2) Estas pérdidas dependen del calibre y tipo de material usado en los embobinados. | () Pérdidas por Flujos de Fuga. |
| 3) Son las ecuaciones de voltaje que satisfacen un circuito eléctrico equivalente exacto de un transformador. | () Circuito equivalente aproximado de un transformador de núcleo de hierro referido al secundario. |

4) En este circuito equivalente, se consideran las pérdidas en el núcleo, conectando una resistencia en paralelo con una reactancia.

() Circuito equivalente aproximado de un transformador de núcleo de hierro referido al primario.

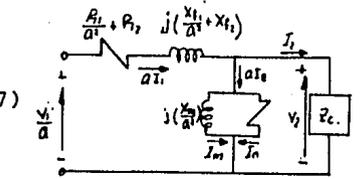
5) Es la corriente que circula en un transformador real con núcleo de hierro, cuando el embobinado secundario está abierto y se aplica al primario el voltaje nominal.

() Diagrama de conexión con instrumentos para la prueba de circuito abierto.



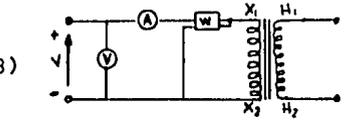
6)

() Diagrama de conexión con instrumentos para la prueba de circuito corto.



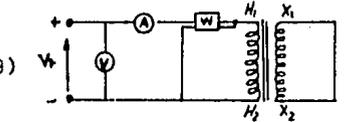
7)

() Corriente de excitación.



8)

() Circuito equivalente de un transformador de núcleo ferromagnético.



9)

$$V_1 = (R_1 + jX_{f1}) I_1 + E_1$$

$$V_2 = (R_2 + jX_{f2}) I_2 + E_2$$

EJEMPLOS

- 1).- A un transformador monofasico de 220/110 VOLTS; 60 H_Z ., 3 KVA, se le practican: las pruebas de circuito corto y circuito abierto, obteniéndose los siguientes resultados.

Prueba	Volts.	Amperes	Watts.	Alimentado por el Lado:	
Circuito Corto	6.5	13.65	50	H	Alto Voltaje
Circuito Abierto	110	3.05	10	X	Bajo Voltaje

Dibujar el circuito equivalente aproximado referido al primario (Alta Tensión), con todos sus parámetros y corrientes.

SOLUCION

De la prueba de Circuito Corto.

$$Z_{eg1} = \frac{V_r}{I} = \frac{6.5}{13.65} = 0.476 \Omega$$

$$Reg_1 = \frac{P_{cu}}{I^2} = \frac{50}{(13.65)^2} = \frac{50}{186.32} = 0.268 \Omega$$

$$X_{eg1} = \sqrt{(Z_{eg1})^2 - (Reg_1)^2} = \sqrt{(0.476)^2 - (0.268)^2} = \sqrt{0.226 - 0.071}$$

$$X_{eg1} = 0.393 \Omega$$

$$R_1 = \frac{Reg_1}{2} = \frac{0.268}{2} = 0.134 = a^2 R_2$$

$$R_2 = \frac{Reg_1}{2 a^2} = \frac{0.268}{2 (2)^2} = \frac{0.268}{2 (4)} = \frac{0.268}{8} = 0.0335 \Omega$$

$$X_{f1} = \frac{X_{eg1}}{2} = \frac{0.393}{2} = 0.196 = a^2 X_{f2}$$

$$X_{f2} = \frac{X_{eg1}}{2a^2} = \frac{0.393}{2(2)^2} = \frac{0.393}{8} = 0.049 \Omega$$

De la prueba de circuito abierto

$$R_{n2} = \frac{V^2}{P_n} = \frac{(110)^2}{10} = 1210 \Omega$$

$$X_{m2} = \frac{V^2}{Q_n} = \frac{(110)^2}{VI_e \text{ Sen } \phi} = \frac{12100}{(110)(3.05) \text{ Sen } (\text{ang Cos } \frac{10}{(110)(3.05)})} = \frac{12100}{335.5 \text{ Sen } 88^\circ, 29'}$$

$$= \frac{12100}{335.35}$$

$$X_m = 36.08 \Omega$$

Los valores de R_n y X_m corresponden al lado de baja tensión; es necesario conocerlos en el lado de alta tensión, lado que corresponde al primario del transformador y en el cual se obtuvieron todos los parámetros de la prueba de circuito corto.

$$R_{n2} = \frac{R_{n1}}{a^2} \quad R_{n1} = a^2 R_{n2} = (2)^2 (1210) = 4840 \Omega$$

$$X_{m2} = \frac{X_{m1}}{a^2} \quad X_{m1} = a^2 X_{m2} = (2)^2 (36.08) = 144.32 \Omega$$

Los valores de las corrientes

$$I_m = \frac{V}{X_m} = \frac{220}{144.32} = 1.52 \angle -90^\circ \text{ Amperes.}$$

$$I_n = \frac{V}{R_n} = \frac{220}{1210} = 0.181 \angle 0^\circ$$

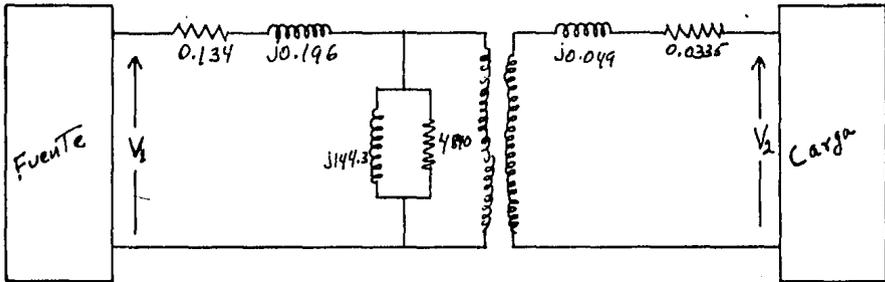
$$I_e = 0.181 - j 1.52 = \sqrt{(0.181)^2 + (1.52)^2} = \sqrt{0.032 + 2.31}$$

$$I_e = 1.53 \angle \text{ang Tan } \frac{I_m}{I_n} = 1.53 \angle 83^\circ 20' \text{ amp.}$$

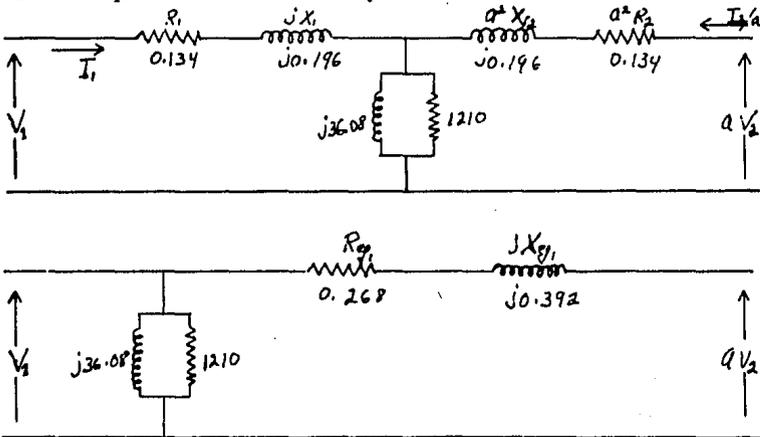
La corriente de excitación también se puede obtener de los datos.

$$I_{e1} = \frac{I_p 2}{a} = \frac{3.05}{2} = 1.526 \text{ amp.}$$

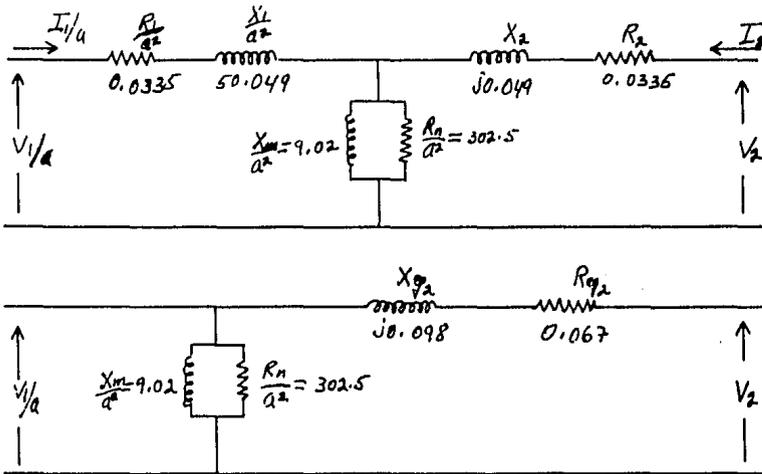
El circuito equivalente exacto es:



Circuito equivalente referido al primario.



Circuito equivalente referido al secundario.



2).- Con los datos del problema anterior, determinar:

- a).- Corriente nominal en ambos devanados.
- b).- % eficiencia para plena carga y 85% de carga cuando se tiene un f.p = 0.8 (-)

S O L U C I Ó N .

$$a).- I_1 \text{ nominal} = \frac{S_1 \text{ nominal}}{V_1 \text{ nominal}} = \frac{V A \text{ placa}}{V_1 \text{ placa}} = \frac{3000}{220} = 13.63 \text{ Amp.}$$

$$I_2 \text{ nominal} = \frac{S_2 \text{ nominal}}{V_2 \text{ nominal}} = \frac{V A \text{ placa}}{V_2 \text{ placa}} = \frac{3000}{110} = 27.27 \text{ Amp.}$$

$$b).- \% \eta = \frac{VA \cos \phi}{VA \cos \phi + P_{cu} + P_n} \times 100 = \frac{3000 \times 0,8}{3000 \times 0,8 + 50 + 10} \times 100 = 97,56\%$$

Para una carga del 85% de su capacidad,

$$\% \eta = \frac{VA \cos \phi}{V A \cos \phi + P_{cu} + P_n} \times 100 = \frac{(0,85) (3000) (0,8)}{(0,85) (3000) + 36,12 + 10} \times 100$$

$$\% \eta = \frac{2040}{2040 + 36.12 + 10} \times 100 = \frac{2040}{2086.12} \times 100 = 97.78 \%$$

3. A un transformador monofásico de 2400/240 Volts, 60Hz , 120 KVA, se le practican las pruebas de corto circuito y circuito abierto, a una temperatura de 20°C ambiental, obteniéndose los siguientes resultados:

Prueba	Volts	Amperes	Watts	lado que opera como primario
CORTO CIRCUITO	100	50	2000	H
CIRCUITO ABIERTO	240	20	1600	X

Dibujar el circuito equivalente aproximado referido al primario (alta tensión en este caso), con todos sus parámetros y corrientes.

De la prueba de corto circuito:

$$Z_{eq1} = \frac{V_r}{I} = \frac{100}{50} = 2 \Omega$$

$$R_{eq1} = \frac{P_{cu}}{I^2} = \frac{2000}{(50)^2} = 0.8 \Omega$$

$$X_{eq1} = \sqrt{Z_{eq1}^2 - R_{eq1}^2} = \sqrt{(2)^2 - (0.8)^2} = 1.833 \Omega$$

$$R_1 = \frac{R_{eq1}}{2} = \frac{0.8}{2} = 0.4 = a^2 R_2$$

$$R_2 = \frac{R_{eq1}}{2a^2} = \frac{0.8}{2(10)^2} = 0.004 \Omega \quad R_2 = \frac{R_1}{a^2} = \frac{0.4}{100} = 0.004 \Omega$$

$$X_{F1} = \frac{X_{eq1}}{2} = \frac{1.833}{2} = 0.9165 \Omega = a^2 X_F$$

$$X_{F2} = \frac{X_{eq1}}{2a^2} = \frac{1.833}{2(10)^2} = 0.009165 \Omega \quad X_{F2} = \frac{X_{F1}}{a^2} = \frac{0.9165}{100} = 0.009165 \Omega$$

De la prueba de circuito abierto:

$$R_{n_2} = \frac{V^2}{P_n} = \frac{(240)^2}{1600} = 36 \Omega$$

$$X_{m_2} = \frac{V^2}{Q_n} = \frac{(240)^2}{4800 \text{ Sen}(\text{ang} \cos \frac{1600}{4800})} = \frac{57600}{4800 \text{ Sen}(\text{ang} \cos \frac{1600}{4800})} = 12.728 \Omega$$

Estos 2 valores calculados corresponden al lado de baja tensión; es necesario conocerlos en el lado de alta tensión, lado que corresponde al primario del transformador y en el cual se obtuvieron todos los parámetros de la prueba de corto circuito.

Por tanto,

$$\text{Si } R_{n_2} = \frac{R_{n_1}}{a^2}, \quad R_{n_1} = a^2 R_{n_2} = (10)^2 36 = 3600 \Omega$$

$$\text{Si } X_{m_2} = \frac{X_{m_1}}{a^2}, \quad X_{m_1} = a^2 X_{m_2} = (10)^2 12.728 = 1272.8 \Omega$$

Con esto completamos todos los valores del circuito. Las corrientes I_e , I_m e I_n se pueden calcular directamente del primario:

$$I_{m_1} = \frac{V_1}{X_{m_1}} = \frac{2400}{1272.8} = 1.8856 \angle -90^\circ \text{ Amperes. (Circula por una bobina pura)}$$

$$I_{n_1} = \frac{V_1}{R_{n_1}} = \frac{2400}{3600} = 0.6666 \angle 0^\circ \text{ Amperes (Circula por una resistencia)}$$

$$\text{por tanto } I_e = -j 1.8856 + 0.6666 = \sqrt{(0.6666)^2 + (1.8856)^2} = 2 \text{ Amp.}$$

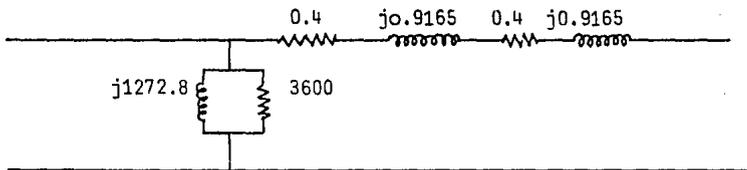
$$\text{Es decir, } I_e = 2 \angle \text{ang} \tan \frac{I_m}{I_n} = 2 \angle -70.52^\circ \text{ Amperes.}$$

Valor que representa el 4% de la corriente nominal. La corriente de excitación también podíamos haberla obtenido de la tabla de valores indicada en el enunciado del problema. Ahí observamos que en circuito abierto circulan 20 A, valor que corresponde a la corriente de excitación en el lado de baja tensión. Si la pasamos al lado primario:

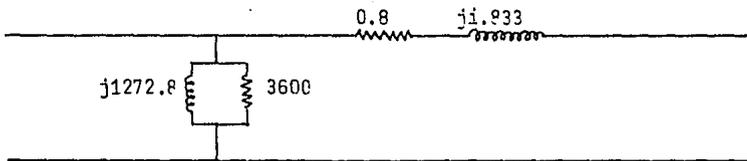
$$I_{e2} = a I_{e1}$$

$$\therefore I_{e1} = \frac{I_{e2}}{a} = \frac{20}{10} = 2 \text{ Amp.}$$

Ahora, podemos dibujar el circuito pedido en el enunciado.



que podemos reducir a:



3. En el transformador del ejemplo anterior, ¿cuánto vale el % de regulación de voltaje, para una carga con f.p. = 0.8(-) atrasado? ¿cuánto vale la eficiencia nominal?

$$a) \% \text{ reg} = \frac{V_1/a - V_2 \text{ placa}}{V_2 \text{ placa}} \times 100$$

necesitamos calcular:

$$\frac{V_1}{a} = V_2 + I_2 (R_{eq2} + j X_{eq2})$$

$$\frac{V_1}{a} = V_2 + \frac{S_2}{V_2} \left[\frac{R_1}{a^2} + R_2 + j \left(\frac{X_{f1}}{a^2} + X_{f2} \right) \right]$$

sustituyendo:

$$\frac{V_1}{a} = 240 + \frac{120000}{240} \left[\left(\frac{0.4}{100} + 0.004 \right) + j \left(\frac{0.9165}{100} + 0.009165 \right) \right]$$

$$\frac{V_1}{a} = 240 + 500 (0.008 + j0.01833)$$

$$\frac{V_1}{a} = \frac{240}{V_2} + \frac{4 + j9.165}{I_2 (R_{eq_2} + jX_{eq_2})}$$

$$b) \quad \eta = \frac{KVA \cos 0.2}{KVA \cos 0.2 + P_{cu} + P_n} = \frac{120,000 \times 0.8}{120,000 \times 0.8 + 2000 + 1600}$$

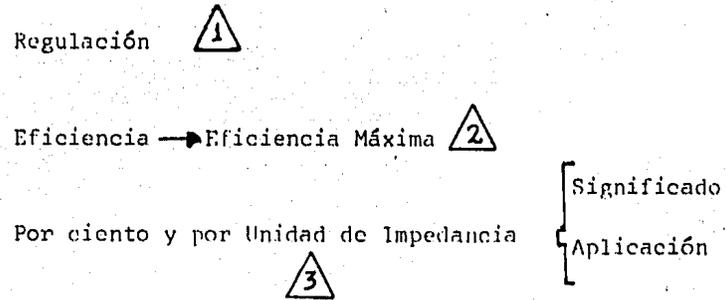
$$\eta = \frac{96000}{99600} = 0.9638$$

$$\% \eta = 96.38$$

PROBLEMAS :

- 1) Resuelva los problemas: 4-1, 4-7, 4-8, del texto: Gourishankar V., Conversión de Energía Electromecánica (México: Representaciones y Serv. de Ing. S.A., 1975).

CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS
TRANSFORMADORES



CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

	1	2	3
Gourishankar V.: Conversión de Energía Electromecánica; Representaciones y Serv.de Ing.S.A.; México 1975.	CAP,4 Sec,4-13	CAP,4 Sec,4-13	CAP,4 Sec,4-13
Pérez,V.:Pruebas de Equipo Eléctrico; Edit.Limusa;México,1981	COMPLEMENTO DE LAS PRUEBAS 6 y 7.	COMPLEMENTO DE LAS PRUEBAS 6 y 7.	PRUEBA 7

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1).- Establecer los conceptos de:
 - a) Regulación de voltaje en transformadores
 - b) Eficiencia de los transformadores
 - c) Por ciento y por unidad de impedancia
- 2).- Explicar la utilidad básica de los parámetros normalizados.
- 3).- Calcular el porcentaje de regulación, eficiencia y porcentaje de impedancia de transformadores reales.

La regulación de voltaje y la eficiencia son las dos características de mayor importancia en el funcionamiento de los transformadores.

REGULACION DE VOLTAJE DE LOS TRANSFORMADORES

La regulación de voltaje es una medida de la variación de la tensión de salida de un transformador, cuando la corriente de carga con un factor de potencia, varía de cero a su valor nominal. La diferencia entre los valores del voltaje de salida cuando está sin carga un transformador, y el nominal a plena carga, expresada como una fracción del valor nominal, es definida como la regulación del voltaje nominal del transformador:

$$\% \text{ de regulación de voltaje} = \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 \quad (2-35)$$

(% Reg.Vol.)

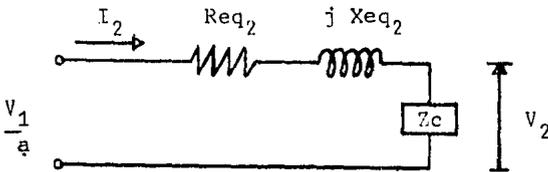
V_{20} = Voltaje de salida en vacío ó sin carga.
 V_{2n} = Voltaje de salida bajo carga.

Hemos visto que la corriente "Ie" es pequeña comparada con la corriente nominal de un transformador de núcleo de hierro, por lo que, para cálculos de regulación de voltaje, puede eliminarse la rama que representa al núcleo en el circuito equivalente aproximado referido al secundario (Fig.2-10b). Quedando la ecuación (2-35) como:

$$\% \text{ de regulación de voltaje} = \frac{\frac{V_1}{a} - V_2(\text{nominal})}{V_2(\text{nominal})} \times 100 \quad (2-36)$$

$$\text{donde } \frac{V_1}{a} = V_2 + I_2 (R_{eq_2} + j X_{eq_2}) \quad (2-37)$$

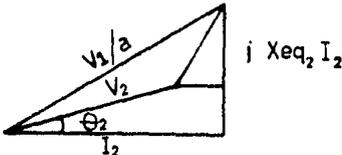
Esta expresión (2-37) se obtiene al aplicar Kirchoff al circuito equivalente de un transformador, referido al secundario, donde se ha despreciado la corriente de excitación.



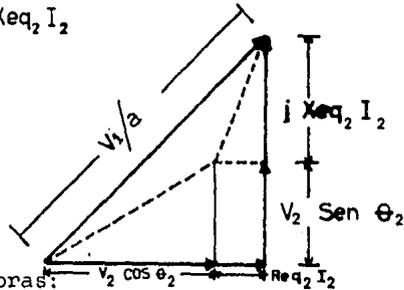
por ley de Kirchoff

$$\frac{V_1}{a} = V_2 + I_2 (R_{eq_2} + j X_{eq_2})$$

cuya representación fasorial es



Si proyectamos el fasor V_2 :



aplicando el teorema de pitagoras:

$$\frac{V_1}{a} = \sqrt{(V_2 \cos \theta_2 + R_{eq_2} I_2)^2 + (V_2 \sin \theta_2 + X_{eq_2} I_2)^2} \quad (2-38)$$

De ésta manera V_1/a queda expresada en función del factor de potencia.

EFICIENCIA DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

Por definición; eficiencia = $\eta = \frac{\text{Potencia de salida } (P_2)}{\text{Potencia de entrada } (P_1)}$ (2-39)

En la práctica siempre existen pérdidas de energía por lo que la potencia suministrada al transformador es diferente a la potencia de salida:

(2-40)

$$P_2 = V_2 I_2 \cos \theta_2 \quad (2-41)$$

$$P_1 = P_2 + \text{Pérdidas en el transformador.}$$

donde, Perd.en el transformador = Perd.eléctricas (P_{cu}) + Perd. magnéticas (P_n)

(2-42)

entonces, $\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{cu} + P_n} = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_{cu} + P_n} =$

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + I_2^2 \text{Req}_2 + P_n} \quad (2-43)$$

EFICIENCIA MAXIMA.

Derivando parcialmente la expresión 2.43 primero con respecto a I_2 y luego con respecto al factor de potencia e igualandolas a cero, se obtiene el siguiente par de valores:

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_n}{\text{Req}_2}}$$

factor de potencia (f.p.) = $\cos \theta_2 = 1$

De donde se concluye que la eficiencia es máxima cuando el transformador tiene carga puramente resistiva; si tiene además carga capacitiva é inductiva el factor de potencia debe ser unitario.

Otra forma de visualizar la eficiencia máxima se obtiene de la expresión

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_n}{R_{eq2}}}$$

$$I_2^2 R_{eq2} = P_n$$

de donde se observa que para que la eficiencia sea máxima las pérdidas eléctricas de un transformador deben ser iguales a las pérdidas magnéticas.

Por otro lado si la exp. 4 se multiplica por el cuadrado de la corriente nominal (I_{2n}) obtenemos:

$$I_{2n}^2 I_2^2 R_{eq2} = I_{2n}^2 P_n$$

$$(I_{2n} R_{eq2}) I_2^2 = I_{2n}^2 P_n$$

donde $I_{2n}^2 R_{eq2} = P_{cu}$; $P_{cu} I_2^2 = I_{2n}^2 P_n$

pérdidas eléctricas a corriente nominal a circuito corto.

$$I_2^2 = I_{2n}^2 \frac{P_n}{P_{cu}} = \frac{I_2}{I_{2n}} = I_{2n} \sqrt{\frac{P_n}{P_{cu}}}$$

Para un transformador real $P_{cu} > P_n$, por lo que el radical será menor que la unidad y se concluye que la corriente (I_2) para η_{max} es menor que la corriente nominal, o sea que la eficiencia máxima en un transformador se presenta antes de la condición de carga plena.

POR CIENTO Y POR UNIDAD DE IMPEDANCIA

El uso de parámetros normalizados, permite eliminar los problemas que ocasiona la presencia de transformadores y diferentes niveles de voltaje cuando se hace el análisis de un sistema de potencia, también son especialmente útiles al comparar las características de operación de varios transformadores de iguales ó diferentes capacidades.

Los valores nominales de voltaje, de corriente y los volt-amperes del transformador se usan como cantidades base para la normalización de los parámetros. Si se toman dos valores base arbitrarios (generalmente voltaje nominal y potencia nominal), Los demás valores base quedan automáticamente determinados.

En el circuito equivalente aproximado referido al secundario para la prueba de circuito corto fig. 2-17. se tiene:

$$Z_{eq2} = \frac{V_r}{I_{nom}}$$

entonces si tomamos como valores base a: (2-45)

$$V_E = V_{nom}$$

$$I_E = I_{nom} \quad \text{span style="float: right;">(2-46)}$$

la impedancia base es: $Z_B = \frac{V_{nom}}{I_{nom}}$

entonces la impedancia normalizada ó en por unidad se define como:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{eq2}}{Z_B} = \frac{V_r}{V_{nom.}} = \frac{\text{VOLTAJE REDUCIDO EN LA PRUEBA DE CIRCUITO CORTO A CORRIENTE - NOM.}}{\text{VOLTAJE NOMINAL}}$$

Usualmente la ecuación anterior se expresa en por ciento y se le denomina "porcentaje de impedancia."

$$\% Z = \frac{\text{VOLTAJE REDUCIDO EN LA PRUEBA DE CIRCUITO CORTO A CORRIENTE NOMINAL}}{\text{Voltaje Nominal}} \times 100$$

(2-48)

Se observa que, si se tienen diferentes %Z en transformadores, se tendrán distintos voltajes de salida. De ahí la importancia de este dato.

Ejemplos:

- 1) Estudie los ejemplos: 4-2, 4-3, 4-4, 4-5, 4-6, del texto: Gourishankar V., Conversión de Energía Electromecánica (México: Representaciones y Serv. de Ing.S.A., 1975).
- 2) Estudie los ejemplos: 3-2, 3-3, 3-4, 3-5, del texto: Matsch L.W., Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas (México: Representaciones y Serv. de Ing.S.A. 1974).

Problemas:

- 1) Resuelva los problemas: 4-9, 4-10, 4-11, 4-12, 4-15, del texto: Gourishankar V., Conversión de Energía Electromecánica (México: Representaciones y Serv. de Ing.S.A., 1975)

MODULO 7:

TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN Y NOCIONES DE DISEÑO

CUADRO SINÓPTICO

Transformadores de Medición



{ Transformadores de Potencial
{ Transformadores de Corriente

Nociones de Diseño → Fórmulas Teóricas y Empíricas.

CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

	
Gourishankar V.: Conversión de Energía Electromecánica; Representaciones y Serv.de Ing.S.A.; Méx.,1965.	CAP.4 Sec.4-1
Siskind CH.: Eléctrical Machines: Direct-Alternating Current; Mc.Graw-Hill Kogakusha; Japón, 1959.	CAP.8

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1).- Aplicación de los :
 - a).- Transformador de potencial
 - b).- Transformador de corriente

- 2).- Conocer los conceptos fundamentales que se utilizan en el diseño de transformadores,

TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN.

Son transformadores de alta precisión, que reproducen fielmente un parámetro del primario en el secundario a una escala menor. Con ellos se logra, de una manera económica y segura efectuar lecturas de alto voltaje y grandes corrientes, utilizando instrumentos de baja escala, con ayuda de estos transformadores también se logra la protección y control de líneas de transmisión, transformadores industriales, y en general de cualquier maquinaria eléctrica.

Se dividen en dos grupos:

- 1) Transformadores de Potencial
- 2) Transformadores de Corriente

- TRANSFORMADORES DE POTENCIAL (T.P.)

Son transformadores monofásicos que se fabrican para un amplio rango de tensiones en el primario, y una sola tensión en el secundario de 115 VOLTS. que se utiliza para alimentar instrumentos de control, protección y medición que operen con señal de voltaje. Su principio de operación y sus elementos de construcción son los mismos que los ya descritos.

- TRANSFORMADORES DE CORRIENTE (T.C.)

Estos constan de un núcleo toroidal ferromagnético, un embobinado primario con muy pocas vueltas ó una simple barra de cobre grueso, y un secundario con muchas vueltas de alambre de cobre

delgado.

El primario se conecta en serie con la línea.

Se fabrican con valores nominales en el primario desde 10 hasta 1200 Amperes, y en el secundario habrá (por norma) un valor único de 5 Amperes nominales.

El siguiente esquema muestra la manera de interconectar un transformador de potencial, y uno de corriente en una línea de transmisión, para medir la corriente y el voltaje de una línea con respecto a tierra.

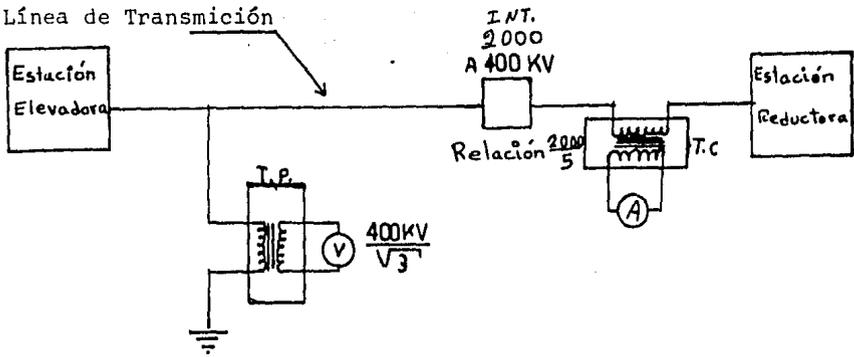
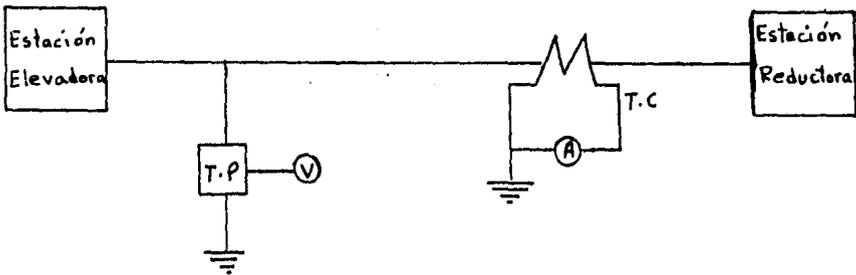
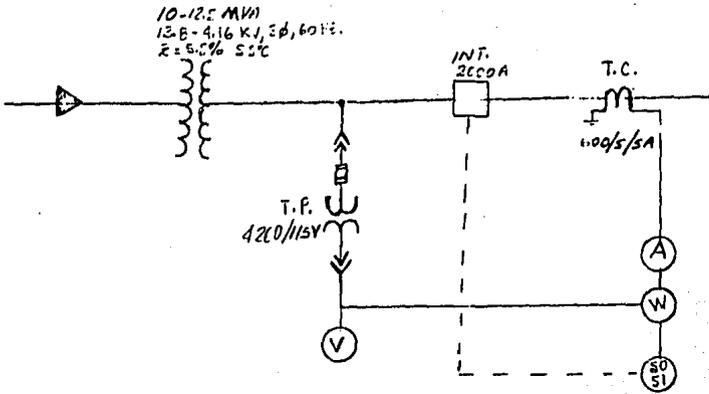


Diagrama unifilar de la línea de Transmisión.



Ejemplo de interconexión de transformadores en un sistema eléctrico de potencia:



NOCIONES DE DISEÑO.

Los materiales empleados para fabricar un transformador son: conductores para los devanados, aislamiento y acero al silicio para el núcleo.

Para construirlo es necesario, determinar:

- número de vueltas de los embobinados
- calibre de los conductores
- dimensiones del núcleo
- selección de aislamientos.

Los datos mínimos que se requieran para el diseño de un transformador son:

- capacidad del transformador
- voltaje primario
- voltaje secundario
- sobreelevación de temp.
- número de fases

- altura sobre el nivel del mar
- temperatura ambiente
- frecuencia

1) CALCULO DEL NUMERO DE VUELTAS

El cálculo del número de vueltas de cualquier bobina arroyada sobre una estructura ferromagnética que opere con C.A. se obtiene de la ecuación (1-22a)

donde $V_{ef} = 4.44 f N \Phi_{max}$ (1-22 a)

$$\Phi_{max} = B_{max} A_c \quad (1-28)$$

A_c = Area corregida

Las laminaciones de acero al silicio operan satisfactoriamente con una densidad de flujo: $B_{max} = 1 \frac{\text{Weber}}{m^2}$ (2-49)

El área corregida (A_c) es el área efectiva de la sección transversal del núcleo laminado afectada por el factor de apilamiento. Recordemos que el espesor de las capas de barniz interlaminares reducen el área efectiva ferromagnética del núcleo. Con los barnices modernos se obtiene fácilmente un f.a. = 0.95

$$A_c = A \times 0.95 \quad (2-50)$$

Por lo tanto: $V_{ef} = 4.44 f N A_c$ (2-51)

donde V_{ef} = Voltaje eficaz (VOLTS), f = frecuencia (H.), N = número de vueltas en la bobina, A_c = área corregida (m^2)

En el embobinado primario se tendrá:

$$V_{ef_H} = 4.44 f N_H A_c$$

y en el secundario:

$$V_{efx} = 4.44 f N_x A_c$$

Conviene calcular primero las vueltas del bobinado secundario, y después las vueltas del bobinado primario a través de la relación de transformación.

2) CALCULO DEL CALIBRE DE LOS CONDUCTORES.

Un valor promedio de densidad de corriente que permite un buen conductor es:

$$\sigma = 3 \frac{\text{Amp.}}{\text{mm}^2}$$

Sabemos que:

$$\sigma = \frac{\text{Amp}}{S_c} ; S_c = \text{Unidad de área de la sección transversal del conductor.}$$

ó sea:

$$S_c = \frac{\text{Amp.}}{\sigma}$$

así que

$$S_c = \frac{\text{Amp}}{3} \quad (\text{mm}^2)$$

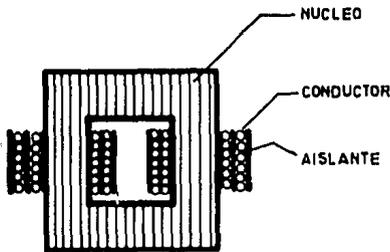
Con el valor de "Sc" recurrimos a una tabla que relacione el calibre comercial con el área de la sección del conductor en mm².

3) CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO

La fórmula empírica que permite obtener el área de la sección transversal del núcleo es:

$$A = 0.00155 \cdot \text{KVA} \quad (\text{m}^2)$$

En la construcción de un transformador es necesario considerar los siguientes elementos: Las dimensiones del núcleo fabricado con laminas barnizadas ó revestidas con algún material aislante, el tamaño de las bobinas, que se devanan en capas aisladas entre sí con papel, algodón, micarta ó ductos de enfriamiento. En la bobina también es importante considerar el calibre del conductor y el número de vueltas. En la figura siguiente se muestran estos elementos.



TEMA III.

OPERACION DEL TRANSFORMADOR EN SISTEMAS ELECTRICOS.

OBJETIVO GENERAL:

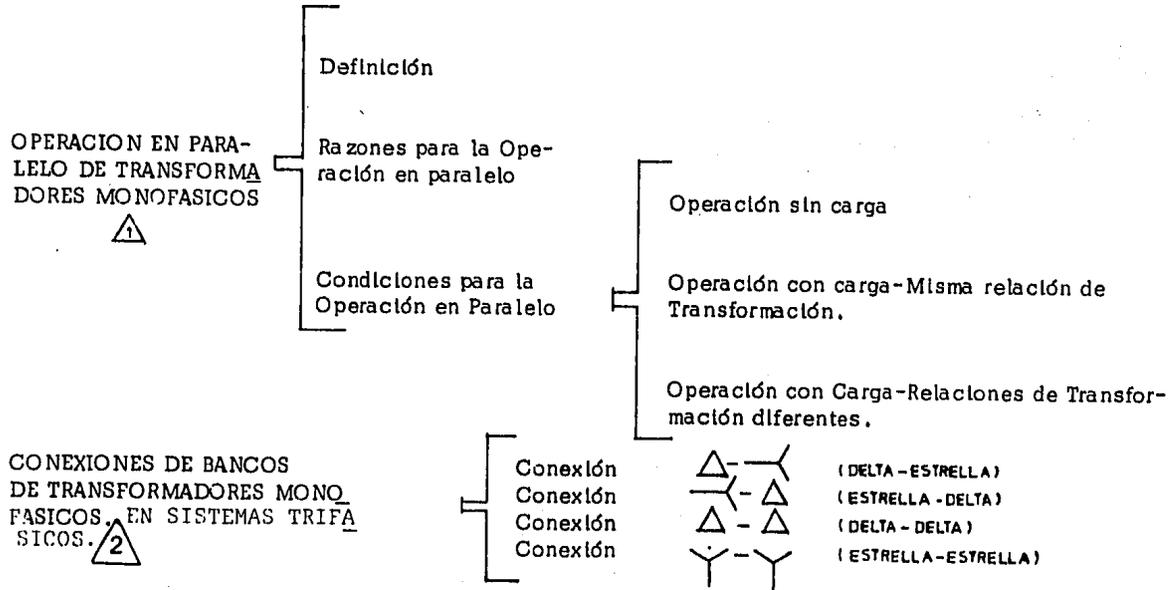
Describir las conexiones de los transformadores al integrarlos a un sistema eléctrico, sus elementos auxiliares, y aplicar los criterios de selección de equipo para un uso específico.

I N T R O D U C C I O N .

En las unidades anteriores se ha hablado del transformador con siderándolo en forma aislada, es decir, sin la influencia de la carga. Sin embargo dentro de los sistemas de potencia y en las redes de distribución, un transformador opera como parte integrante de un sistema eléctrico.

Para integrar un transformador a una red de distribución, es frecuente el caso en que deba ser conectado en paralelo para suministrar una carga común, o bien, que dos ó tres transformadores deban ser conectados juntos para ser utilizados en sistemas polifásicos. En base a estos dos casos frecuentes es como se desarrolla el primer módulo de esta unidad.

CONEXIONES DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN SISTEMAS MONOFASICOS Y TRIFASICOS.



CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

	1	2
Gourishankar V.: Conversión de Energía Electromecánica; Representaciones y Serv.de Ing. S.A.; Méx. 1975.		CAP. 4 Sec.4-15-E
Langsdorf, A: Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna; Ediciones del Castillo, S.A.; España 1967.	CAP. 8	CAP. 8
Siskind, Ch.: Electrical Machines: Direct-Alternating Current; Mc.Graw-Hill Kogokusha; Japón, 1959.	CAP. 2 SEC. -2-3	CAP. 2 SEC. 2-6

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1) Conocer las razones para la operación en paralelo de los transformadores
- 2) Establecer las condiciones necesarias para la operación correcta en paralelo.
- 3) Realizar las conexiones correctas para la operación en paralelo.
- 4) Analizar algunos efectos que condicionan la operación en paralelo, bajo diferentes condiciones:
 - 1°.- Sin carga,
 - 2°.- Con carga y misma relación de transformación y
 - 3°.- Con carga y relaciones de transformación diferentes
- 5) Resolver problemas de transformadores conectados en paralelo
- 6) Condiciones para la conexión de bancos de transformador es monofásicos en un sistema trifásico.
- 7) Conocer cada una de las conexiones trifásicas y sus características
- 8) Resolver problemas de conexiones trifásicas con transformadores monofásicos.

III.8.1.- OPERACION EN PARALELO DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS.

- Definición.-

Dos ó mas transformadores operan en paralelo cuando sus primarios están conectados a una misma fuente y los secundarios a la misma carga.

- Razones para la Operación en Paralelo.-

Dos ó mas transformadores operan en paralelo cuando:

- a) La capacidad de generación es grande y no se fabrican transformadores de esa capacidad, o bien si se requiere repartir la carga.
- b) Se aumenta la capacidad instalada en alguna industria ó sistema. Resulta más conveniente conectar en paralelo otro transformador con el ya existente, que instalar uno nuevo que tenga la capacidad total.
- c) Se desea continuidad de servicio en una instalación donde la carga se divide en dos ó más transformadores en paralelo, de tal manera que el servicio no quede interrumpido por falla o reparación de un transformador.

- Condiciones para la Operación en paralelo.-

Dos o más transformadores operaran correctamente en paralelo si satisfacen las siguientes condiciones.

- a).- Los voltajes primarios y secundarios deben ser iguales. Esto obviamente implica que las relaciones de transformación sean iguales. (*)
- b).- Los transformadores deberán ser conectados apropiadamente considerando la polaridad.
- c).- Las Impedancias equivalentes deberán ser inversamente proporcionales a las respectivas relaciones de Kilovolt-Amperes (KVA)
- d).- La relación de la resistencia equivalente a la reactancia equivalente ($R_{eq.}/X_{eq.}$) de todos los transformadores deberá ser la misma.

(*) Para verificar estas condiciones se recomienda estudiar las pruebas 3, 4, y 5 del texto: Pruebas de Equipo Eléctrico del Ing. V. Pérez Amador (México, Edit. Limusa W; 1981).

La fig.3-1 muestra como dos transformadores pueden ser conectados en paralelo cuando tienen la misma polaridad (fig.3-1a) y cuando tienen polaridades opuestas (fig.3-1b).

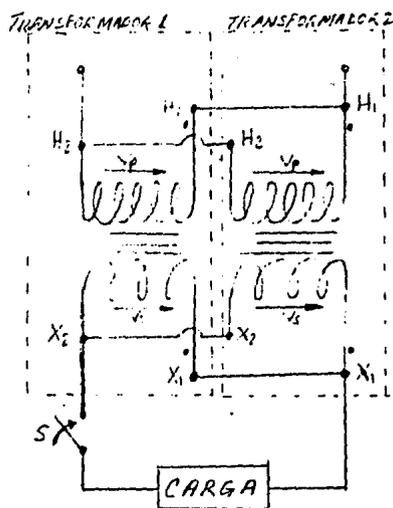


Fig.3-1 (a).-Transformadores con polaridad sustractiva.

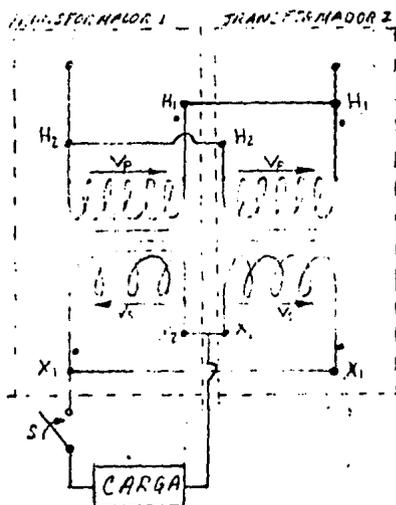


Fig.3-1 (b).-Transformadores con polaridades diferentes (Polaridad aditiva el transformador 1, Polaridad sustractiva el transformador 2).

Algunos efectos que condicionan la operación en paralelo de los transformadores, se pueden deducir de la fig. anterior, si suponemos que: 1° Los transformadores en paralelo operan sin carga, 2° Operan con carga y tienen relaciones de transformación iguales, y 3° operan con carga y tienen relaciones de transformación diferentes:

- Operación Sin Carga. -

Cuando el Interruptor S esta abierto los primarios y secundarios se estan energizando. Se observa que los voltajes secundarios estan en oposición y no puede haber circulación de corriente en esos embobinados si los voltajes inducidos son exactamente iguales. Esta condición existe solo si las relaciones de transformación de los dos transformadores son exactamente iguales, si no lo son existira una corriente circulante en los secundarios. Si el transformador uno tiene una relación de transformación (a_1), diferente a la del transformador dos (a_2) los voltajes inducidos no seran iguales y podria circular una corriente en los secundarios debido a una diferencia de voltajes :

$$I_c = \frac{(a_1 - a_2) V_s}{a_1 Z_{eq1} + a_2 Z_{eq2}} \quad (3-1)$$

NOTA.= Esta ecuación no es estrictamente correcta porque los términos de Impedancia Z_{eq1} y Z_{eq2} se muestran como cantidades escalares y son realmente fasores. Sin embargo, el error que se comete al utilizar esta fórmula generalmente no es significativa en la práctica.

La demostración de esta fórmula se puede ver en el Cap.8 del Siskind

- Operación Con Carga-Misma Relación de Transformación.

Cuando dos transformadores que tienen iguales relaciones de transformación son conectados en paralelo, la corriente de carga total se divide entre ellos inversamente proporcional a sus impedancias equivalentes.

Haciendo uso del circuito equivalente de un transformador referido al secundario, se representa el sistema de transformadores en paralelo :

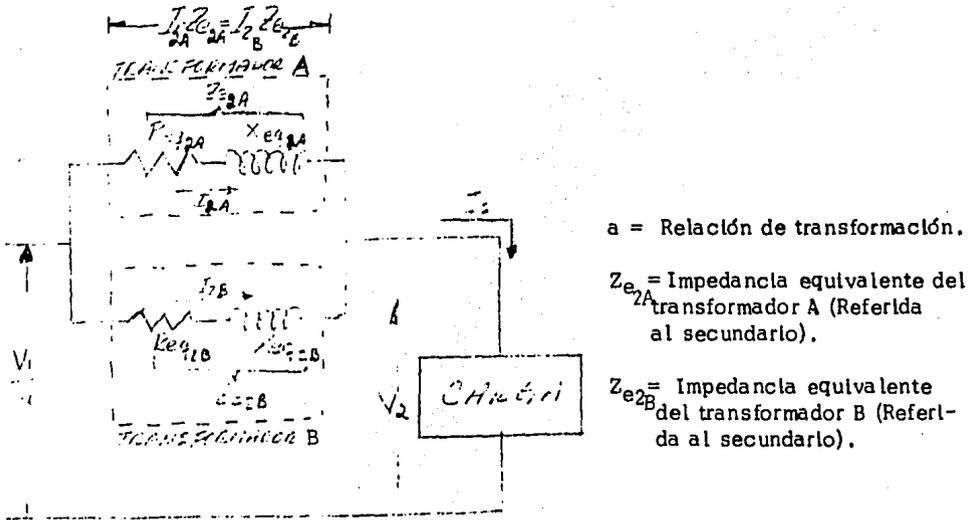


Fig. 3-2

De la figura se observa que, puesto que la magnitud y fase del voltaje primario (V_1/a) y la del secundario (V_2) deben ser iguales para cada uno de los transformadores, por razón de la forma en que se hayan conectados, la caída en la impedancia equivalente debe ser también igual para todos:

$$I_{2A} Z_{e2A} = I_{2B} Z_{e2B}$$

por tanto:

$$\frac{I_{2A}}{I_{2B}} = \frac{Z_{e2B}}{Z_{e2A}} \quad \text{o} \quad \frac{I_{2B}}{I_{2A}} = \frac{Z_{e2A}}{Z_{e2B}} \quad (3-2)$$

Puesto que los transformadores A y B se encuentran a plena capacidad:

$$S_A = V_2 I_{2A} \Rightarrow I_{2A} = \frac{S_A}{V_2} \quad (3-3a)$$

$$S_B = V_2 I_{2B} \Rightarrow I_{2B} = \frac{S_B}{V_2} \quad (3-3b)$$

Sustituyendo (3-3a) y (3-3b) en (3-2):

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{Z_{e2B}}{Z_{e2A}} \quad \text{o} \quad \frac{S_B}{S_A} = \frac{Z_{e2A}}{Z_{e2B}} \quad (3-4)$$

de donde si $(Z_{e2B}/Z_{e2A}) > (S_A/S_B)$, implicaría que $Z_{e2B} > Z_{e2A}$ y por la ecuación (3-2) se deduce que por el transformador A estaría circulando una mayor cantidad de corriente que por el transformador B, lo que significaría que el transformador A pudiera estar sobrecargado. Sin embargo, si en la misma expresión (3-4) se observara que $(Z_{e2A}/Z_{e2B}) > (S_B/S_A)$, por el mismo razonamiento anterior significaría que el transformador B sería el que ahora pudiera estar sobrecargado. Por lo tanto, si la carga total en amperes se ha de dividir entre los transformadores en proporción a los KVA de cada uno de ellos, será necesario que la relación de sus impedancias equivalentes (Z_{e2A}, Z_{e2B}) sean inversamente proporcionales a sus relaciones de sus respectivas capacidades en KVA nominales.

- Operación Con Carga - Relaciones de Transformación Diferentes.

Los transformadores con relaciones de transformación considerablemente diferentes no pueden funcionar en paralelo. Pero si difieren ligeramente en sus relaciones de transformación, la corriente de carga total se dividirá

de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$I_A = \frac{(a_B - a_A) V_2 + (a_B Z_{e2B} I_2)}{(a_A Z_{e2A}) + (a_B Z_{e2B})} \quad (3-5 a)$$

$$I_B = \frac{(a_A - a_B) V_2 + (a_A Z_{e2A} I_2)}{(a_A Z_{e2A}) + (a_B Z_{e2B})} \quad (3-5b)$$

EJEMPLO III.1.

Dos transformadores A y B operan en paralelo como se muestra en la figura 3-3 (a). Con los datos mostrados. Calcular la corriente en cada uno de los transformadores y determinar la potencia en KVA que suministra cada transformador a la carga.

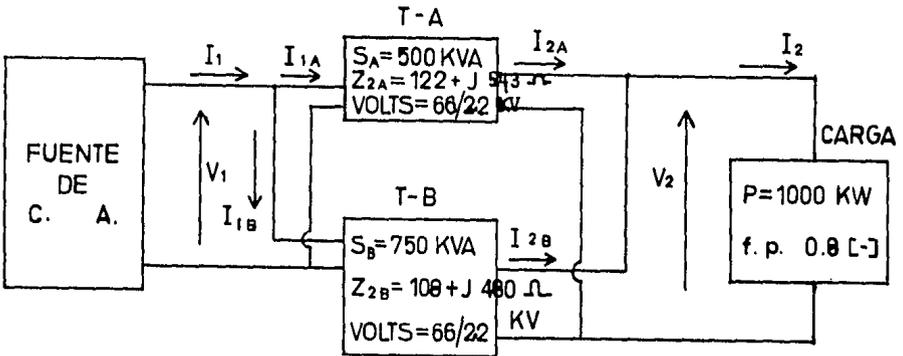


Fig.3.3. 2

SOLUCION:

La potencia demandada por la carga es la que deben entregar los dos transformadores:

$$P = V_2 I_2 \cos \theta = 1000 \text{ KW} ; \cos \theta = 0.8$$

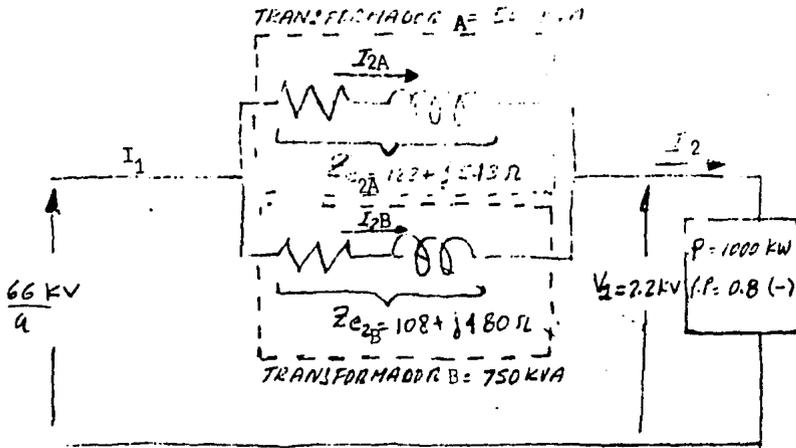


FIG. 3-3 (b)

$$I_2 = \frac{P}{V_2 \cos \theta} = \frac{1000}{2.2 (0.8)} = 568.2 \text{ Amp.}$$

$$I_2 = I_{2A} + I_{2B} \text{ ---- (a)} \quad \begin{aligned} Z_{e2A} &= 122 + j543 = 556 \angle 77.33^\circ \\ Z_{e2B} &= 108 + j480 = 492 \angle 77.32^\circ \end{aligned}$$

$$\text{De (3-2) se obtiene: } I_{2A} = \frac{Z_{e2B}}{Z_{e2A}} I_{2B} \text{ ---- (b)}$$

$$\text{sustituyendo (b) en (a): } I_2 = I_{2B} + \frac{Z_{e2B}}{Z_{e2A}} I_{2B} = \left(\frac{Z_{e2B}}{Z_{e2A}} + 1 \right) I_{2B}$$

$$\therefore I_{2B} = \frac{I_2}{\frac{Z_{e2B}}{Z_{e2A}} + 1} = \frac{568.2}{\frac{492 \angle 69.44^\circ}{556 \angle 77.33^\circ} + 1 \angle 0^\circ} = \underline{\underline{303.85 \angle -33.13^\circ}} \text{ ---- (c)}$$

$$\text{(c) en (b): } I_{2A} = 0.88 \angle -7.93^\circ (303.85 \angle -33.13^\circ) = \underline{\underline{267.4 \angle 41.06^\circ}} \text{ (d)}$$

se puede observar que el transformador B de menor Impedancia Interna es el que toma mayor corriente. Compararemos las corrientes obtenidas con las corrientes nominales de cada transformador:

$$I_{A \text{ nom.}} = \frac{S_A}{V_2} = \frac{500}{2.2} = 227.3 \text{ Amp.} \Rightarrow I_{A'} \text{ nom} < I_{2A}$$

∴ el transformador A está sobrecargado

$$I_{B \text{ nom}} = \frac{S_B}{V_2} = \frac{750}{2.2} = 340.9 \text{ Amp} \Rightarrow I_{B \text{ nom}} > I_{2B}$$

∴ EL Transformador B no está sobrecargado.

Obtengamos ahora la potencia que está entregando cada transformador:

$$S_A = V_2 I_{2A} = 2.2 \times 267.4 = 588.28 \text{ KVA.}$$

$$S_B = V_2 I_{2B} = 2.2 \times 303.85 = 668.47 \text{ KVA.}$$

III.7.2.- CONEXIONES DE BANCOS DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN UN SISTEMA TRIFASICO.

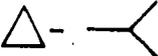
Transformadores monofásicos que deben manejar una cantidad considerable de potencia son agrupados en conexión trifásica formando BANCOS.

Principales condiciones para la conexión en banco de transformadores monofásicos:

- a) Que los transformadores tengan la misma capacidad en KVA
- b) Que sus voltajes primario y secundario sean iguales
- c) Que tengan la misma polaridad de voltajes, sustractiva ó aditiva

Se recomienda usar transformadores de un mismo fabricante.

Generalmente la potencia eléctrica es generada y transmitida como potencia trifásica, empleando para ello bancos de transformadores monofásicos ó transformadores trifásicos, Los arreglos más comunmente empleados son las conexiones: (a) - delta-delta, (b) estrella-estrella, (c) estrella-delta, ó (d) delta-estrella.

CONEXION 

Tres transformadores monofásicos con sus primarios conectados en delta y sus secundarios conectados en estrella se muestran en la fig.3-4.

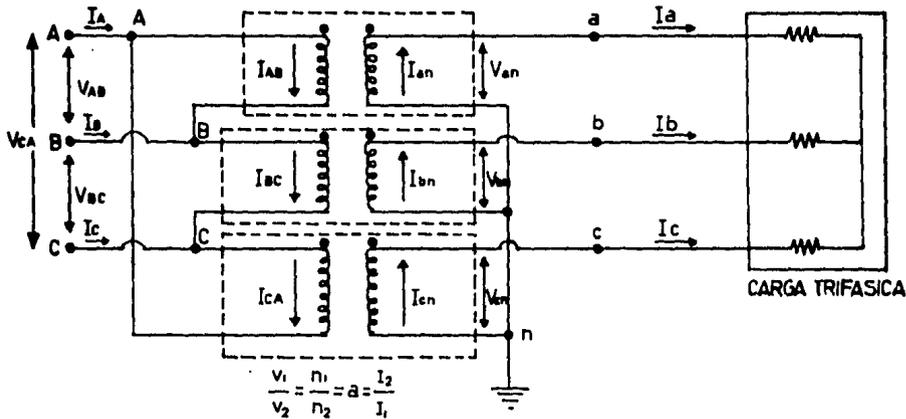


Fig. 3-4

De la fig. se observa que el sentido de las corrientes en los devanados primarios y secundarios, se han establecido suponiendo polaridad sustractiva en los transformadores.

En un sistema trifásico balanceado las ondas de voltaje en las fases son de la misma magnitud y tienen un defasamiento angular de 120° elec., por lo que las ondas de voltaje quedan representadas fasorialmente por 3 vectores de igual magnitud, defasados entre sí 120° elec., como se muestra en la fig. 3-5

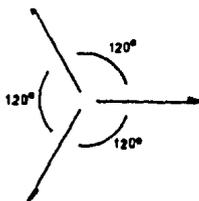


Fig.3-5 : 3 Vectores de igual magnitud defasados entre sí. 120° elec.

Si consideramos que la secuencia de fases del sistema es positiva .

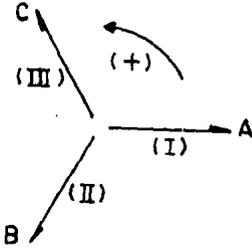


FIG. 3-5a.-Secuencia Positiva

y de acuerdo a como esta conectado el transformador en el sistema , podemos designar a los vectores de la fig.3-5 de la siguiente manera :

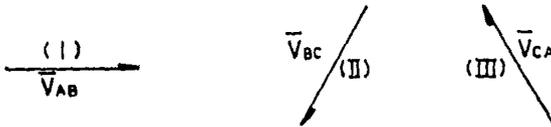


Fig.3.-5b

Ahora bien, puesto que en una conexión delta ó estrella la suma fasorial de los voltajes en los tres embobnados debe ser siempre igual a cero. La delta del primario del transformador tendrá el siguiente diagrama fasorial que cumple con la secuencia positiva del sistema y la polaridad sustractiva de los transformadores:

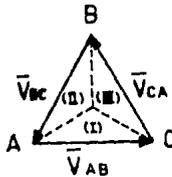


Fig.-3-5c.-Diagrama fasorial de la conexión Delta del primario.

El diagrama fasorial correspondiente a la conexión estrella del secundario

del transformador se obtiene de la misma manera que se obtuvo el diagrama fasorial de la fig.3-5c.

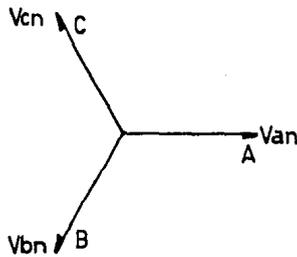


Fig.3-5D.-Diagrama Fasorial de la conexión estrella del secundario.

Si se obtiene la estrella equivalente de la conexión delta del primario y el diagrama fasorial así obtenido se sobrepone al diagrama fasorial de la conexión estrella del secundario del transformador:

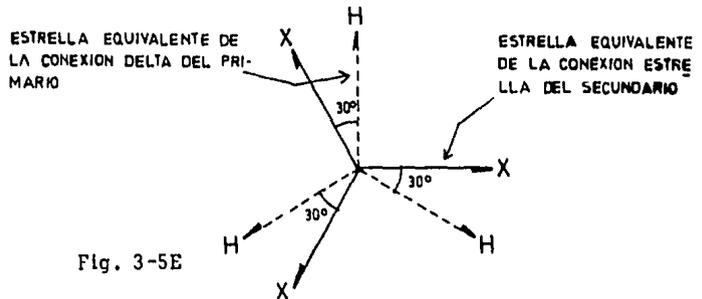


Fig. 3-5E

Se observa fácilmente que el desplazamiento angular del primario (H) respecto al secundario (x) para una secuencia positiva, es de H 30°atraz de x.

Veamos ahora como se relacionan los voltajes de línea (V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) con los voltajes de fase (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}). De la fig.3-5 D se puede observar que:

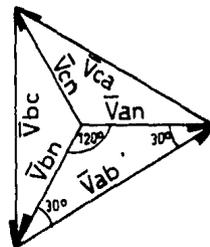


Fig. 3-5F
-149-

Donde:

$$\bar{V}_{ab} = \bar{V}_{an} - \bar{V}_{bn}$$

$$\bar{V}_{bc} = \bar{V}_{bn} - \bar{V}_{cn}$$

$$\bar{V}_{ca} = \bar{V}_{cn} - \bar{V}_{an}$$

Puesto que la suma de los ángulos interiores de un triángulo son 180° , y puesto que el desplazamiento angular entre \bar{V}_{an} y \bar{V}_{bn} es de 120° ; los ángulos interiores de 30° del triángulo formado por \bar{V}_{ab} , \bar{V}_{an} y \bar{V}_{bn} en la fig.3-5F son obligados. De la fig.3-5F podemos obtener las siguientes expresiones considerando magnitudes escalares:

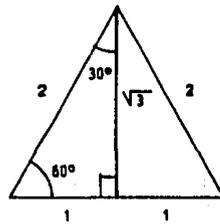
$$\frac{|V_{ab}|}{\text{Sen } 120^\circ} = \frac{|V_{an}|}{\text{Sen } 30^\circ}$$

$$|V_{ab}| = \frac{\text{Sen } 120^\circ}{\text{Sen } 30^\circ} |V_{an}|$$

$$= \frac{\text{Cos } 30^\circ}{\text{Sen } 30^\circ} |V_{an}|$$

$$|V_{ab}| = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{1}{2}} |V_{an}|$$

$$|V_{ab}| = \sqrt{3} |V_{an}|$$



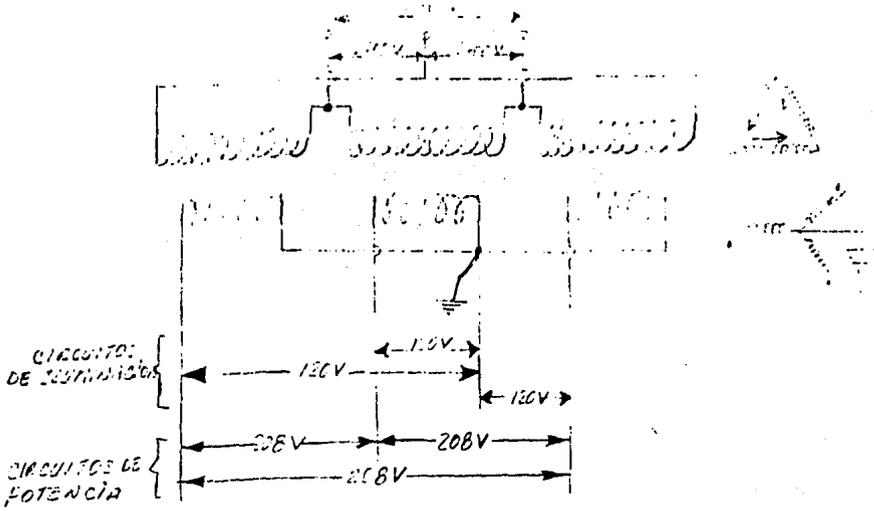
De donde se concluye que el voltaje entre fases es $\sqrt{3}$ veces el voltaje de línea a neutro en una conexión estrella.

Por un razonamiento análogo, se puede demostrar que en una conexión delta la corriente de línea es $\sqrt{3}$ veces la corriente de fase.

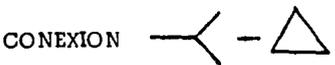
Se emplea éste tipo de conexión Delta-Estrella, fig.3-5, donde es necesario elevar el voltaje.

En el lado de alta el aislamiento es sometido a solamente el 58% del voltaje de línea a línea (la corriente en la bobina de un transformador conectado en Δ es $1/\sqrt{3}$, o sea el 58% de la corriente de línea). Otra ventaja es que el neutro es estable y no flotará cuando la carga esté desbalanceada.

Esta conexión es de uso común en sistemas de distribución a 4 hilos, para alimentar circuitos trifásicos de fuerza y circuitos monofásicos de alumbrado.



Flg.3-5)



Esta conexión, Flg.3-6, se emplea para disminuir voltajes, p.ej. al final de una línea de transmisión; también se emplea moderadamente en sistemas de

distribución de bajo voltaje a 3 hilos,

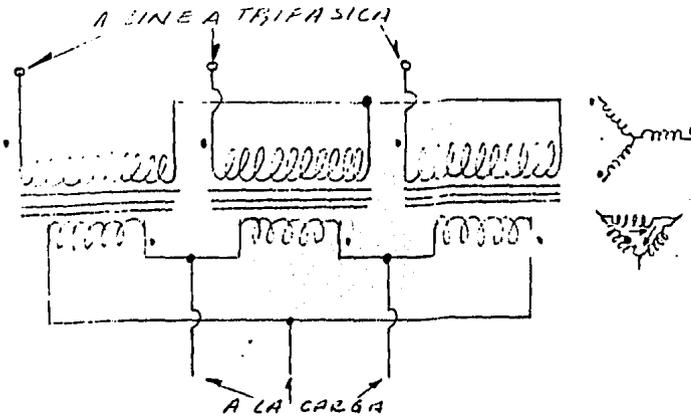
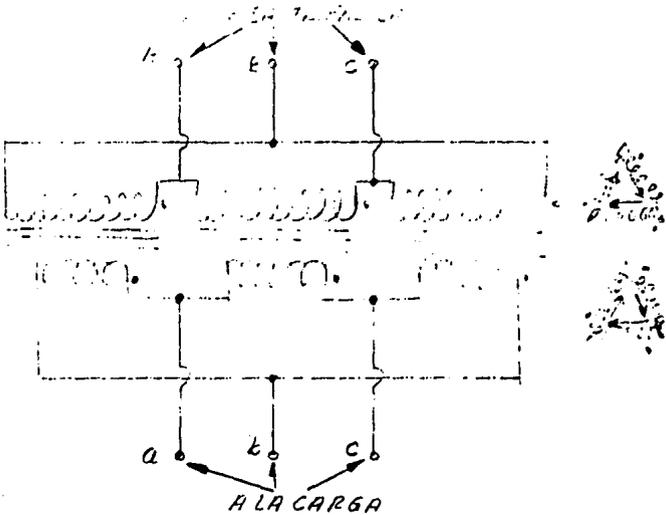


FIG. 3-6

- CONEXION  -

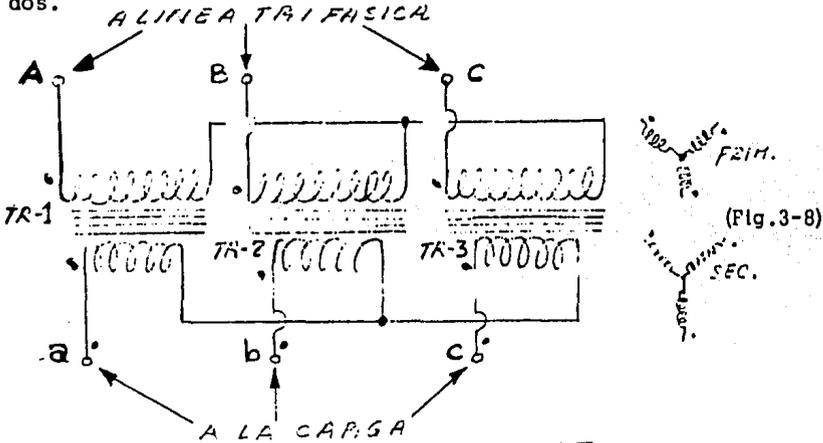
Este arreglo (fig.3-7) es usado generalmente en sistemas en los cuales los voltajes no son muy altos y especialmente cuando la continuidad del servicio deba mantenerse aún cuando uno de los transformadores fallara. Cuando uno de los transformadores es quitado por falla ó reparación, el banco continuará operando en un arreglo que se conoce como DELTA ABIERTA.



(Fig.3-7)

No existe el problema que se tiene en la conexión Y-Y para cargas desbalanceadas. Los voltajes trifásicos en la carga permanecen iguales no obstante el grado de desbalanceo de la carga.

- CONEXION Y-Y.- Esta conexión (mostrada en la fig.3-8) dará servicio satisfactorio solo si la carga trifásica es balanceada; aún si la carga es moderadamente desbalanceada los tres voltajes de línea a neutro estarán desbalanceados.



El voltaje en terminales en una conexión Y es $\frac{V}{\sqrt{3}}$, mientras que en una conexión Δ es V , o sea, un 73% mayor; la corriente en la bobina de un transformador conectado en estrella es igual a la corriente de línea I , mientras que la de uno conectado en Δ es $\frac{I}{\sqrt{3}}$, o sea, el 58% de la corriente de línea. Así pues, el devanado en Y tendrá menos espiras y necesitará un conductor de mayor sección transversal que aquel conectado en Δ , ocasionando que su construcción sea menos costosa y que resista mejor los esfuerzos debidos a grandes corrientes de corto circuito. Por ello, la conexión Y-Y es ventajosa en sistemas que operan a tensiones relativamente altas.

INCONVENIENTES QUE PRESENTA LA CONEXION Y-Y:

a).- Si la carga es desbalanceada el neutro no permanece fijo con respecto a los potenciales de línea. El llamado "NEUTRO FLOTANTE" hace que exista una pobre regulación de las tensiones de línea a neutro. Esta dificultad se puede corregir aterrizando el neutro del primario, que de esta manera se conecta automáticamente al neutro de la estrella del generador normalmente aterrizado.

Ahora bien, en el modulo 3, SEC. I. 3. 3 se mostró que la corriente de excitación tiene una componente de 3a armónica. Como el primario tiene un hilo neutro de retorno, las terceras armónicas que están en fase llegarán simultáneamente a él, por lo que el neutro conducirá 3 veces la componente de 3a. armónica, a frecuencia de 180 HZ, ocasionando que un armónico de 3er orden en la tensión de fase del generador aparezca en las tensiones de fase de los secundarios.

b).- En ausencia de conexión neutra del primario, no existirá trayectoria cerrada para la 3a. armónica, por lo que no podrá circular ésta en el circuito de alimentación, ocasionando un armónico de 3er orden en la tensión de fase del primario y secundario.

c).- Si el neutro del secundario se aterriza, se establecerán corrientes de 3a armónica en el secundario y, puesto que todas están en fase, se sumarán directamente en el neutro de retorno a tierra. Estas corrientes perturbadoras de frecuencia triple (180 HZ), producirán interferencias

inductivas en circuitos telefónicos.

Estas corrientes secundarias de frecuencia triple se suprimen acoplado a cada transformador un devanado auxiliar ó TERCARIO y conectando los devanados terciarios en Δ , como se muestra en la fig. (3-8^a). Se suele diseñar el terciario con un régimen de carga en KVA de un tercio aproximadamente, del correspondiente a los devanados principales. El número de espiras en el terciario, es indiferente, ya que cuanto mayor sea el número de espiras, menor será la corriente de magnetización de frecuencia triple, así, se hace posible alimentar una carga auxiliar (p.ej. los servicios propios de una subestación eléctrica) a cualquier tensión deseada, esto justifica el costo adicional del terciario, que compensa aún más la economía producida al utilizar la conexión Y, en vez de la Δ en devanados principales.

d).- En caso de fallar uno de los transformadores no es posible alimentar una carga trifásica balanceada, pero sí una desbalanceada.

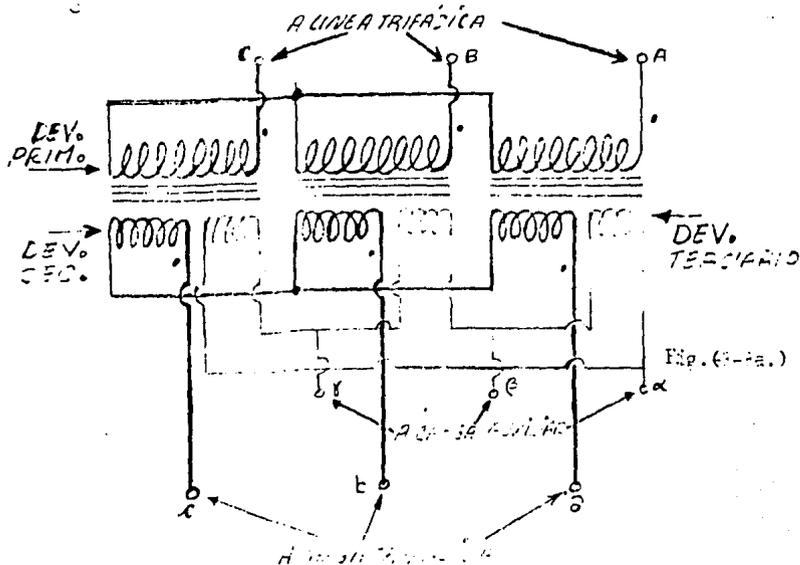


Fig. (3-8a.)

C U E S T I O N A R I O

I).- Indique si es falsa ó verdadera cada una de las siguientes expresiones:

VERDADERA FALSA

- | | | |
|--|-------|-------|
| 1). Dos transformadores operan en paralelo cuando sus primarios estan conectados a una misma fuente y los secundarios a la misma carga. | () | () |
| 2). Una de las razones para conectar transformadores en paralelo es que se aumente la capacidad de carga instalada. | () | () |
| 3). Si la capacidad de generación es grande y no se fabrican transformadores de tal capacidad se pueden instalar transformadores en paralelo para manejar esa energía. | () | () |
| 4). Cuando se desea continuidad de servicio en una instalación, es conveniente tener un arreglo de transformadores en paralelo. | () | () |
| 5). Las relaciones de voltaje del primario al secundario deben ser idénticas; es una de las condiciones para que operen correctamente en paralelo dos ó mas transformadores. | () | () |
| 6). Para conectar apropiadamente transformadores en paralelo debe considerarse la polaridad. | () | () |
| 7). Las impedancias equivalentes deben ser inversamente proporcionales a las respectivas relaciones de KVA, en transformadores conectados en paralelo, para una mejor repartición de carga en los transformadores. | () | () |
| 8). La relación de la resistencia equivalente a la reactancia equivalente de todos los transformadores en paralelo, debe ser la misma para aprovechar la máxima capacidad de los transformadores. | () | () |

	VERDADERA	FALSA
9. La conexión Y-Y de transformadores monofásicos da servicio satisfactorio solo si la carga trifásica es balanceada.	()	()
10. La conexión $\Delta - \Delta$ se utiliza donde los voltajes no son muy altos y especialmente cuando la continuidad del servicio debe mantenerse aún cuando uno de los transformadores falle.	()	()
11. La conexión Δ - Δ es de uso común en sistemas de distribución a 4 hilos, para alimentar cargas trifásicas (Motores, bancos de resistencia, etc.) y cargas monofásicas (alumbrado, motores monofásico ,etc.)	()	()
12. La conexión Δ - Δ es frecuentemente empleada al final de una línea de transmisión, cuando se trata de reducir el voltaje.	()	()

II).-Describa las principales condiciones que se deben cumplir para poder efectuar una conexión trifásica de transformadores monofásicos.

III).- Efectúe un diagrama trifásico de conexiones para conectar en Y-Y, Δ - Δ , y Δ - Δ tres transformadores monofásicos.

P R O B L E M A S

- 1). Resuelva los problemas: 41, 42, 43, 44, 45, 47, del capítulo 8 del texto: Siskind, Ch.: Electrical Machines: Direct-Alternating Current (Japón: Mc.Graw-Hill Kogakusha, LTD, 1959)

MODULO 9:

TRANSFORMADORES TRIFASICOS

CUADRO SINÓPTICO:

Clasificación 

Características y Ventajas 

Componentes y Accesorios Auxiliares 

CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

	1	2	3
Siskind, Ch.: Electrical Machines: Direct-Alternating Current Mc. Graw-Hill Kogokusha; Japón, 1959	CAP. 8	CAP. 8	CAP. 8
Matsch I.W.: Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas; Representaciones y Serv. de Imp.S.A.; Méx., 1974.	CAP. 3 Sec. 3-11	CAP. 3 Sec. 3-11	

OBJETIVOS ESPECIFICOS.

1. En transformadores trifásicos es importante conocer:

- Tipos de núcleos
- Conexiones de los devanados { Diagrama
- Clasificación { Fasorial
- Ventajas y desventajas
- Componentes y accesorios
- Especificaciones

GENERALIDADES.

Al generar y transmitir la potencia eléctrica en forma trifásica, se obtienen las siguientes ventajas:

- a).- Economía en conductores al tener hilos comunes de retorno de corriente, en conexiones trifásicas
- b).- Potencia instantánea constante
- c).- Se obtienen campos magnéticos giratorios en función de la frecuencia utilizada, ventaja que es fundamental para las máquinas de corriente alterna como se verá en la unidad siguiente.

III.8.1.- CLASIFICACION DE LOS TRANSFORMADORES TRIFASICOS

Los transformadores trifásicos se clasifican como transformadores de Potencia si su capacidad es mayor de 500 KVA, y como transformadores de DISTRIBUCION si su capacidad es igual o menor a 500 KVA.

Por el tipo de construcción, los transformadores trifásicos se clasifican en:

TRANSFORMADORES ACORAZADOS Y NO ACORAZADOS Ó TIPO NUCLEO.

En el tipo núcleo los embobinados primario y secundario rodean una parte considerable del núcleo magnético, como se muestra en la fig. 3-9 (a). Nótese que el primario y el secundario de cada fase se devana alrededor de su propia "pierna".

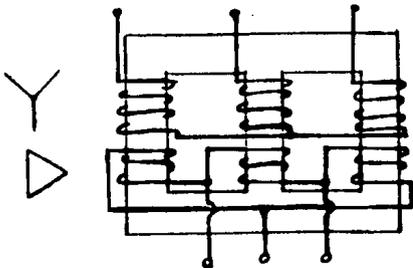


Fig.3-9 (a).-TRANSFORMADOR TIPO NUCLEO.

En el transformador trifásico tipo acorazado (Fig.3-9 (b)), el circuito magnético rodea una porción considerable de los embobinados primario y secundario. Tiene la ventaja sobre el tipo núcleo de que puede trabajar en delta abierta, si uno de los embobinados es dañado.

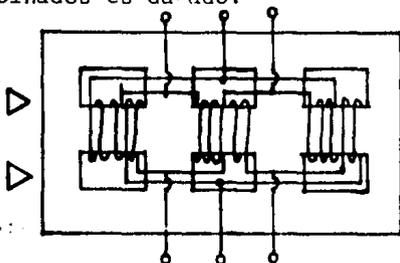


Fig.3-9 (b).-TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO.

III.8.2.- CARACTERISTICAS Y VENTAJAS DE TRANSFORMADORES TRIFASICOS Y DE BANCOS TRIFASICOS.

Un transformador trifásico consta de seis embobinados, tres de alta tensión y tres de baja tensión, devanados sobre un núcleo común a manera de formar una sola estructura,

Un banco trifásico, como se describió anteriormente, consta de 3 transformadores monofásicos independientes que se interconectan a manera de formar un sistema que recibe y cede potencia eléctrica trifásica a la misma frecuencia pero a diferente voltaje y corriente.

Ventajas del transformador trifásico;

- Presenta un ahorro considerable de espacio al ser compacto
- Es de menor costo debido a que el ensamble completo se reduce en tamaño y es localizado en un solo tanque, además porque se utiliza menor cantidad de aceite y de bushings ó boquillas.

- Es un poco mas eficiente que tres transformadores monofásicos.

Ventajas del banco trifásico.

- Se puede colocar un 4º transformador de reserva, para que no haya interrupción de energía cuando se quite uno de los transformadores por falla ó mantenimiento.
- Se puede trabajar a tensiones muy altas al tener las fases independientes.

III.8.3.- COMPONENTES Y ACCESORIOS AUXILIARES.

En la fig.3-10 se ilustra un transformador de 1000 KVA, con sus componentes y accesorios principales, que en cuanto a partes es representativo de los transformadores de distribución y pequeña potencia.

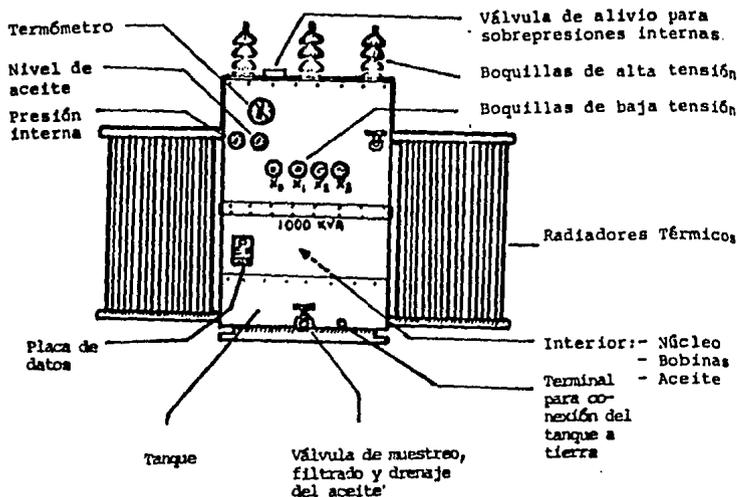


FIG 3-10

TANQUE.- Es la estructura metálica que envuelve al transformador, sus funciones son:

- a).- Contener al núcleo, bobinas y aceite en forma segura y compacta.
- b).- Proteger al conjunto contra agentes externos como son el oxígeno, la humedad y partículas ambientales.
- c).- Radiar en forma eficiente el calor hacia el exterior.

Para aumentar la superficie de enfriamiento en transformadores de pequeña capacidad (p.ej. 100 KVA), se soldan aletas metálicas formando radiadores verticales, como se muestra en la fig. 3-11a. En transformadores de mediana capacidad (p.ej. 300 KVA) se soldan tubos ovalados (FIG.3-11b), Aquí el aceite tiene circulación natural, lo que hace que la eficiencia de disipación térmica sea mayor.

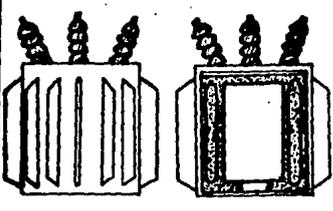


Fig.3-11 (a)

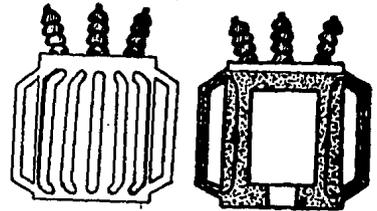


Fig.3-11 (b)

Los sistemas de enfriamiento como los anteriores, que solo utilizan aceite tanque, aletas ó tubos, se les clasifica como tipo (OA) y se denominan transformadores auto enfriados en aceite.

Los transformadores tipo (OA/FA) se denominan transformadores auto-enfriados en aceite con aire forzado (FIG.3-11c). Estos se utilizan cuando la carga es variable y presenta picos máximos en determinados intervalos de tiempo. Cuando se excede la capacidad nominal operan los ventiladores y se suministra aire forzado entre los tubos, acelerando así el enfriamiento por convección.

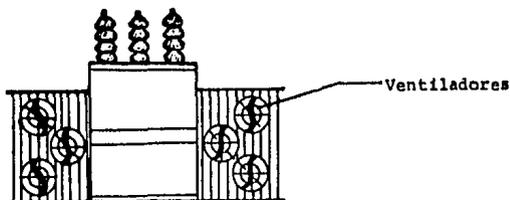


Fig.3-11 (c)

Existen otros tipos de enfriamiento poco comunes como el (OW) que utiliza un serpentín de cobre con agua en su interior que penetra al transformador, ó como el tipo (FOA) que utiliza una bomba que hace recircular el aceite, ó, como el tipo (AA) utilizado en transformadores muy pequeños y que emplea el aire ambiente como refrigerante.

- NUCLEO (Circuito Magnético).

El de tipo acorazado además del buen aprovechamiento del flujo magnético, envuelve a los embobinados protegiéndolos y rigidizándolos mecánicamente. En operación normal del transformador, los embobinados están sujetos a esfuerzos mecánicos, debidos a las propiedades de alargamiento y acortamiento de las líneas de flujo, vistas al principio del curso.

La construcción del núcleo es a base de laminaciones de acero al silicio, aisladas entre sí con una capa de barniz dieléctrico.

DEVANADOS

Los alambres de cobre recocido que los constituyen utilizan como aislante cinta de papel impregnada con aceite mineral y aditivos; entre capas de vueltas de las bobinas se intercalan cartones prensados con adhesivos epóxicos. También es de amplio uso el barniz dieléctrico.

BOQUILLAS O AISLADORES DE POTENCIA Ó BUSHINGS.

Sus funciones son:

- a).- Aislar el tanque y sus soportes respecto a las líneas de tensión.
- b).- Garantizar la distancia mínima normalizada entre líneas y entre líneas y tanque, para evitar arcos eléctricos en el caso de sobretensiones.
- c).- Proteger contra la intemperie las entradas y salidas de los cables de alto y bajo voltaje del transformador.
- d).- Resistir los esfuerzos mecánicos que se presentan cuando existen fallas de corto circuito.

Las boquillas se fabrican de materiales que tienen alta rigidez dieléctrica, buena resistencia mecánica y buena resistencia a agentes ambientales. A estos materiales pertenecen: el vidrio templado, la porcelana, y la más utilizada la resina epóxica.

VALVULA DE ALIVIO.- Es un dispositivo que da salida a los gases producidos por sobrecargas ó arcos eléctricos, está situada en la

parte superior del tanque.

R E F R I G E R A N T E .- Por razones económicas y operacionales se utiliza aceite como medio refrigerante. Los embobinados se encuentran sumergidos en el aceite; cuando sucede un circuito corto el aceite se calienta y pierde su densidad por lo que viaja a la superficie y las paredes del tanque donde disipa su calor. Luego vuelve a recuperar su densidad y regresa hacia las partes inferiores del recipiente para iniciar otra vez el ciclo. Se efectúa así una transferencia de calor por convección natural del transformador al aceite y del aceite al tanque,

El aceite sirve también como dieléctrico por lo que debe garantizar:

- a).- Punto mínimo de inflamación; 130° C
- b).- Viscosidad; 57 a 59 segundos a 37,8° C, en un viscosímetro saybolt universal.
- c).- Estar libre de: cloruros, alcalis, sulfatos, humedad (la humedad permisible es alrededor de 50 partes por millón)
- d).- Tensión disruptiva : Una lámina de aceite de 0.1 " de espesor debe soportar, sin que salte el arco eléctrico, 60 segundos a una tensión de 30 kv. y a 25°C

VALVULA DE MUESTREO.- Dentro de los programas de mantenimiento preventivo, deben hacerse pruebas al aceite de los transformadores, al menos cada seis meses, para ello se toman muestras de aceite abriendo la válvula de muestreo situada en la parte inferior del tanque, que se someten, entre otras pruebas, a la prueba de rigidez dieléctrica. Esta prueba consiste (*) en ir aplicando por medio de dos electrodos, incrementos de voltaje (3 kv/seg.) al aceite, hasta el valor al cual ocurre la ruptura del dieléctrico, esto es, cuando

se forma el arco eléctrico entre los dos electrodos. Si el resultado no es satisfactorio, el aceite debe someterse a un proceso de filtrado para eliminar humedad e impurezas. Un proceso de filtrado consiste en hacer circular el aceite, exteriormente, a través de un filtro especial llamado "filtro prensa", constituido básicamente por una bomba que hace circular el aceite a través de una serie de hojas de papel, las cuales son renovadas cada media hora, a una presión aproximada de 5 kg/cm^2 . Otro de los procesos utiliza la fuerza centrífuga para separar los contaminantes, en este proceso se recomienda hacer circular tres veces el volumen total del aceite.

- ELEMENTOS INDICADORES.- Los elementos indicadores de temperatura, presión y nivel de aceite, son generalmente del tipo carátula que traen integrados, si se requiere, contactos eléctricos que operan alarmas o válvulas de alivio según las necesidades.

TERMINAL DE TIERRA.

Además del neutro, por norma el tanque debe conectarse solidamente a tierra (con cable no menor al calibre # 6 AWG) para conducir a tierra las corrientes peligrosas de circuito corto que pudieran dañar al personal o equipo y que son producidas por fallas de circuito corto, sobretensiones por rayos, ó por desbalances de carga.

* Se recomienda estudiar la prueba N°9 del texto: Pérez Amador, V., Pruebas de Equipo Eléctrico (México, Edit. Limusa W., 1981)

TANQUE CONSERVADOR.- Es un tanque que en algunos casos se instala con el objeto de minimizar la expansión y contracción del aceite.

N O T A : En algunas ocasiones se instala también un cilindro de nitrógeno entre el transformador y el medio exterior, para poder controlar la presión que generalmente se fija entre 0.5 y 0.8 atm.

RELE BUCHHOLZ.- Relevador de protección que se instala en el tubo que une al tanque conservador con el tanque del transformador, y que opera por la presión de los gases generados en el interior del tanque por fallas incipientes. Conexiones o uniones mal hechas durante la construcción del transformador son detectadas por este relevador antes de que causen mayores daños.

CAMBIADOR DE DERIVACIONES O DE TAPS.

Algunos transformadores tienen éste dispositivo que permite cambiar el número de vueltas en los devanados cuando se requiere ajustar el voltaje. El cambiador puede ser de dos tipos:

- a).- Cambiador de derivaciones en vacío. Efectúa el cambio de derivaciones cuando el transformador se encuentra sin carga y desenergizado.
- b).- Cambiador de derivaciones con carga. Este puede hacer el cambio de taps estando el transformador energizado y con carga.

Los TAPS normalmente se fabrican para dar un rango de variación $\pm 0.5\%$ respecto al voltaje nominal, con 4 derivaciones de 2.5% cada una

C U E S T I O N A R I O

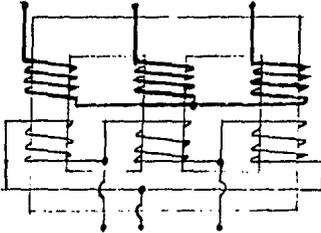
I).- Indique si es falsa o verdadera cada una de las siguientes expresiones:

VERDADERA FALSA

1) Los transformadores trifásicos se clasifican como transformadores de potencia y de distribución, según sea su capacidad mayor ó menor o igual a 500KVA respectivamente. () ()

2) Por su construcción los transformadores trifásicos se clasifican en transformadores tipo acorazado y tipo núcleo. () ()

3) La figura siguiente representa un transformador tipo núcleo. () ()



4) Los transformadores que en su sistema de enfriamiento solo utilizan aceite, tanque y aletas ó tubos, se denominan transformadores autoenfriados en aceite y se clasifican como tipos "OA" () ()

- 5) Los transformadores que en su sistema de enfriamiento utilizan además de aceite, tanque y aletas, ventiladores que forzan aire para enfriar, se denominan transformadores autoenfriados en aceite con aire forzado y se clasifican como tipos "OA/FA" () ()
- 6) La válvula de alivio de un transformador se encuentra en la parte superior del tanque y deja escapar los gases producidos por alguna sobrecarga ó arco eléctrico. () ()
- 7) El proceso de transferencia de calor por convección natural del transformador al aceite y del aceite al tanque es como sigue: Cuando sucede un circuito corto el aceite se calienta y pierde su densidad, por lo que viaja a las paredes del tanque y a la superficie donde disipa su calor. Luego vuelve a recuperar su densidad y regresa hacia las partes inferiores del tanque para volver a iniciar el ciclo. () ()
- 8) La válvula de muestreo está situada en la parte inferior del tanque y permite sacar muestras de aceite para su análisis. () ()

- 9) Además del neutro de un transformador, el tanque debe conectarse sólidamente a tierra. () ()
- 10) El relé buchiholz se instala en el tubo que une al tanque conservador con el tanque del transformador y opera por la presión de los gases generados en el interior del tanque por fallas. () ()

II).- Diga al menos tres ventajas que se tienen al instalar un transformador trifásico.

MODULO 10:

CUADRO SINÓPTICO

DESCRIPCION DE ELEMENTOS DE UNA SUBESTACION

Definición de Subestación Eléctrica 

Clasificación de Subestaciones 

Elementos Principales de una Subestación 

CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICO

	△ 1	△ 2	△ 3
Enriquez,H.G: Manual de Inst.Eléc. Residenciales e Industriales; Edit. Limusa S.A.; Méx.1980.	CAP.5	CAP.5	CAP.5
Enriquez,H.G: Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas;Edit. Limusa S.A.; Méx; 1979.	CAP.2	CAP.2	CAP.2

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1) Conocer los tipos de subestación eléctrica
- 2) Identificar los elementos principales de una subestación
- 3) Describir las funciones de los elementos más importantes de una subestación.

DEFINICION DE SUBESTACION ELECTRICA.

Una subestación eléctrica es un conjunto de elementos que sirven para modificar el voltaje y la corriente y proveer un medio de interconexión, o bien para transformar la energía eléctrica de corriente alterna a corriente directa.

CLASIFICACION DE SUBESTACIONES ELECTRICAS.

- 1) Por su operación:
 - a) de corriente alterna
 - b) de corriente directa
- 2) Por la función que desempeñan:
 - a) elevadoras
 - b) reductores
 - c) de enlace
 - d) rectificadoras
- 3) Por su construcción:
 - a) tipo intemperie (normalmente se instalan cuando se tienen tensiones mayores de 15 Kv)
 - b) tipo interior
 - c) tipo blindada

(A) **APARTARRAYOS.**- Las sobretensiones transitorias de corta duraci3n (30-200 μ seg.), causadas por descargas atmosf3ricas en las l3neas 3 por la operaci3n de interruptores en el sistema, producen sobrecorrientes que son conducidas a tierra por el apartarrayos. Su operaci3n es analoga al de un interruptor autom3tico: Se encuentra normalmente abierto y cuando existe una sobretensi3n en la l3nea, cierra el circuito a tierra y efectúa la descarga de sobrecorriente. Pasado el transitorio instantáneamente vuelve a abrir interrumpiendo la corriente, si no fuera así, ésta tendería a continuar fluyendo hacia tierra impulsada por el voltaje normal de la l3nea, pudiendo producir así un Circuito Corto.

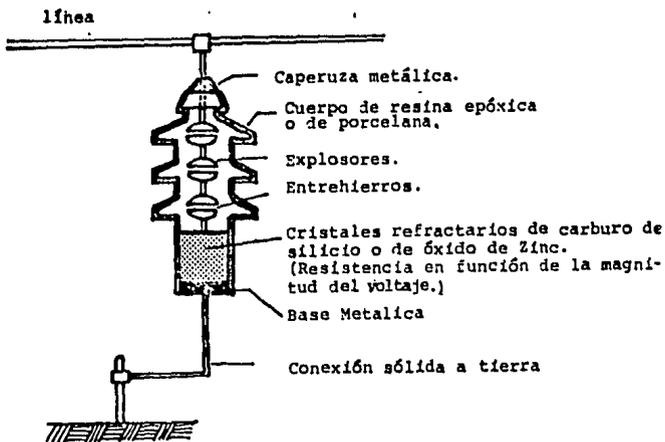


Fig.3-13.-Apartarrayos tipo autovalvular.

(B) **CUCHILLAS FUSIBLES.**- Elemento de desconexi3n y protecci3n auxiliar del transformador contra corto circuito. Cuando se funde un fusible queda abierta una fase, un transformador de potencial detecta NO-Voltaje en la fase y opera un relevador que hace abrir autom3ticamente las 3 fases.

Ⓒ - EQUIPO DE MEDICION.- Esta constituido por los transformadores de corriente, los transformadores de potencial, y los aparatos de medición que se conectan en los secundarios de ambos.

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE (TC). Su función es cambiar un valor de corriente, a otro con el que se pueda alimentar instrumentos de medición, de control o de protección. Su capacidad queda determinada por los instrumentos que se alimentan, y pueden ser de 15,30,50,60 y 70 VA. Las conexiones que pueden tener sus embobinados son las ya conocidas A-A,Y-Y, etc. Se deberan conectar los devanados de acuerdo a sus marcas de polaridad, y su secundario siempre a tierra.

Existen TC que operan con corrientes bajas y se construyen sin devanado primario, el primario lo constituye la línea a la que se conectan, estos reciben el nombre de transformador de corriente tipo DONA.

La corriente en el secundario de los TC normalmente es de 5 Amperes.

TRANSFORMADORES DE POTENCIAL.- Su función es transformar un valor de voltaje, sin tomar en cuenta la corriente, en otro con el que se pueda alimentar instrumentos de medición, de control o de protección que requieran señal de voltaje. Sus capacidades varían de 15 a 60 VA y su voltaje en el secundario es normalmente de 115 volts.

Ⓓ.- CUCHILLAS DE PRUEBA.- Sirven para puentear la alimentación al transformador y puedan así efectuarse las pruebas y mediciones

que se deseen. Deben operarse sin carga y utilizando una pértiga.

Ⓔ - INTERRUPTOR AUTOMATICO DE ALTA TENSION.- Dispositivo electro-mecánico que interrumpe y restablece la continuidad del servicio de energía eléctrica. Debe ser capaz de interrumpir con carga 6 con corriente de corto circuito,

Se construyen de dos tipos: en aceite, y neumáticos

En el interruptor tipo aceite, cuando se abren sus contactos se produce un arco entre ellos, el arco se extingue rápidamente por la acción del aceite en el cual se encuentran sumergidos. Después de un tiempo predeterminado vuelven a cerrarse los contactos automáticamente, y si la falla persiste volveran a abrirse; en total efectuará tres cierres y cuatro aperturas, después de las cuales y reparada la falla, se cerrará manualmente.

Ⓕ - TRANSFORMADOR.TRIFASICO.- Es el elemento más importante de la subestación que: a) transfiere energía de un circuito a otro, b) hace la transferencia de energía por inducción electromagnética, c) sus circuitos están aislados eléctricamente y acoplados magnéticamente, d) transfiere la energía manteniendo la frecuencia constante y con un cambio de voltaje.

Sus ecuaciones fundamentales son:

- Relación de transformación:
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- Ecuación de voltaje inducido: $V_{ef} = 4.44 f N \Phi \text{ max.}$

- Ecuaciones de Potencia:

Para un transformador monofásico

$$P = VI \text{ (VA)}$$

$$P = VI \cos \theta \text{ (w)}$$

Para un transformador trifásico.

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \text{ (VA)}$$

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \text{ (w)}$$

- Ecuaciones de corrientes:

Para un transformador monofásico

$$I_1 = \frac{P}{V_1 \cos \theta}$$

$$I_2 = \frac{P}{V_2 \cos \theta}$$

Para un transformador trifásico.

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} V_1 \cos \theta}$$

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} V_2 \cos \theta}$$

Los transformadores por el número de fases pueden ser monofásicos o trifásicos.

Por el tipo de núcleo: a) núcleo tipo columnas, b) núcleo tipo acorazado.

Por su forma de enfriamiento:

- 1) Tipo OA: Transformadores Auto enfriados en aceite
- 2) Tipo OA/FA: Transformadores autoenfriados en aceite con aire forzado.
- 3) Tipo OW: Transformadores con un serpentín de cobre con agua
- 4) Tipo FOA: Transformador con bomba para hacer recircular el aceite,
- 5) Tipo AA : Utilizan el aire ambiental.

Ⓒ - TABLERO DE DISTRIBUCION. - Gabinete de lámina de acero donde se alojan los circuitos de distribución y protección, necesarios para protección contra circuitos cortos y sobrecargas.

La fig.3-14 siguiente muestra algunos elementos de una subestación:



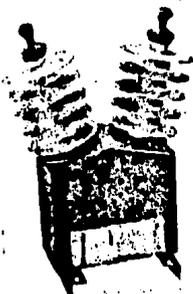
Cuchilla-fusible



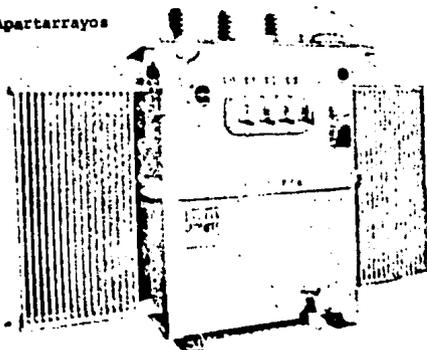
Apartarrayos



Sistema de apertura simultánea para falla monofásica



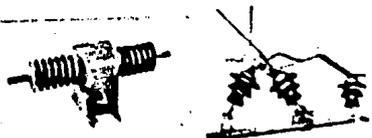
Transf. de potencial



Transformador trifásico



Tablero de distribución



Transf. de corriente Cuchilla de prueba



Cable de alimentación a la carga

Fig.3-14.- Elementos de una Subestación.

C U E S T I O N A R I O

I.- Indique si es falsa ó verdadera cada una de las siguientes expresiones:

VERDADERA FALSA

- | | | |
|---|-------|-------|
| <p>1).- Una subestación eléctrica es un conjunto de elementos que sirven para modificar el voltaje y la corriente y proveer un medio de interconexión, ó bien para transformar la energía eléctrica de corriente alterna a corriente directa.</p> | () | () |
| <p>2).- Por la función que desempeñan, las subestaciones se clasifican en elevadas, reductoras, de enlace y rectificadas.</p> | () | () |
| <p>3).-La operación del apartarrayos es como la de un interruptor automático: se encuentra normalmente abierto y cuando ocurre una sobre-tensión en la línea, cierra el circuito a tierra y efectúa la descarga de sobrecorriente. Pasado el transitorio instantáneamente vuelve a abrir interrumpiendo la corriente.</p> | () | () |
| <p>4).-La función de un transformador de corriente es cambiar un valor de corriente a otro valor con el que se puedan alimentar instrumentos de medición, control y de protección.</p> | () | () |
| <p>5).- La función de los transformadores de potencial es transformar un valor de voltaje, sin tomar en cuenta la corriente, en otro valor con el que se puedan alimentar instrumentos que requieran señal de voltaje.</p> | () | () |
| <p>6).-Las cuchillas de prueba sirven para puentear la alimentación al transformador y poder así, efectuar pruebas al transformador.</p> | () | () |

- 7).- Un interruptor automático es un dispositivo electromecánico que interrumpe y restablece la continuidad del servicio de energía y debe ser capaz de interrumpir con carga ó con corriente de circuito corto. () ()
- 8).- En el interruptor automático tipo aceite cuando se abren sus contactos se produce un arco que es extinguido por la acción del aceite. Después de un tiempo predeterminado vuelven a cerrarse los contactos automáticamente, y si la falla persiste volveran a abrirse; en total efectuará tres cierres y cuatro aperturas, despues de las cuales y reparada la falla se cerrará manualmente. () ()
- 9).- Un transformador es un dispositivo que transfiere energía de un circuito a otro, lo hace por inducción electromagnética sin un cambio en la frecuencia y sin partes móviles. () ()

TEMA IV.

MOTORES POLIFASICOS DE INDUCCION

OBJETIVO GENERAL

Conocer los principios de operación del motor de inducción y analizar su comportamiento bajo distintas condiciones de carga.

INTRODUCCION

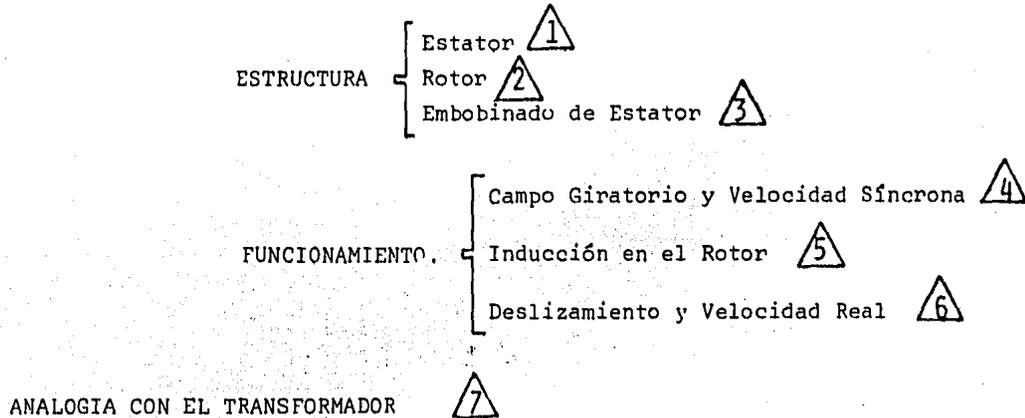
El motor de inducción recibe este nombre, debido a que igual que el transformador, opera bajo el principio de inducción electromagnética, y como nunca llega a operar a velocidad síncrona se le conoce también como motor asíncrono. Por el número de fases los motores de inducción se clasifican en: trifásicos, bifásicos y monofásicos. Los motores trifásicos tienen amplia aplicación en la industria. Los bifásicos son muy usados como dispositivos de posición en sistemas de control automático y los monofásicos se utilizan ampliamente en el hogar y la industria como primotores de utensilios, tales como ventiladores, fonógrafos, bombas, batidoras, etc.

Por el tipo de rotor estos motores pueden ser: a) de rotor devanado y b) de rotor Jaula de ardilla.

De acuerdo a la frecuencia y velocidad de operación requerida los motores de inducción se fabrican de varios polos.

ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR POLIFASICO DE
INDUCCION.

CUADRO SINÓPTICO.



CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICO

	△1	△2	△3	△4	△5	△6	△7
Matsch L.W.-Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas; Representaciones y Serv.de Ingeniería,S.A.; México,1974	CAP.5 Sec.5-1 5-2-3- 4	CAP.7 Sec.7	CAP.4 Sec.4-	CAP.5 Sec.5- 5,CAP. 7 Sec.7-	CAP.7 Sec.7-	CAP.7	
Gourishankar V- Conversión de Energía Electromecánica; Representaciones y Serv. de Ingeniería,S.A.; México 1977.	CAP.9 Sec.9- 1,2	CAP.9 Sec.9- 2	CAP.8 Sec.8- 5	CAP.9 Sec.9- 3,4	CAP.9 Sec.9- 4	CAP.9 Sec.9- 4	CAP.9 Sec.9-4
Slskind Ch.S.-Electrical Machines.Second Edition; International Student Edition Mc.Graw-Hill Kogakusha,Ltd; Tokio Japón 1959.	CAP.9	CAP.9	CAP.9	CAP.9	CAP.9	CAP.9	

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir las partes esenciales de un motor de inducción
2. Características del estator y rotor
3. Diferenciar los dos tipos de rotor que existen para motores de inducción y analizar sus ventajas y desventajas.
4. Estudiar y establecer los conceptos de:
 - a) Campo giratorio
 - b) Velocidad Síncrona
 - c) Deslizamiento
5. Analizar el comportamiento del voltaje inducido en el rotor en magnitud y frecuencia, cuándo el motor opera con rotor libre (operación bajo marcha) y con rotor bloqueado.
6. Explicar de que manera se produce el par mecánico que hace girar al rotor.

11.1.- ESTRUCTURA

Un motor de inducción consiste esencialmente de un estator y un rotor, el primero es la parte fija que sirve de base a devanados que reciben energía de la fuente de alimentación, y el segundo es la parte móvil con devanados en los que se induce la energía de trabajo.

1.1.1. ESTATOR

Está hecho de láminas de acero circulares con ranuras a lo largo de su periferia interior donde se localizan los lados de las bobinas. Los estatores de motores de dos fases llevan dos embobinados separados, colocados en cuadratura. En motores trifásicos, son colocados tres embobinados separados 120° eléctricos.

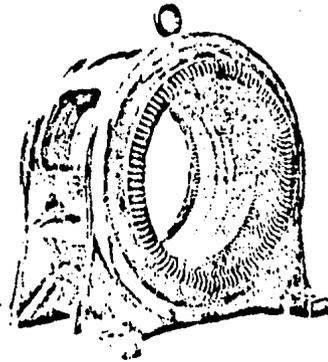


Fig.4-1.-Estator de un motor de inducción

ROTOR

Este puede ser o un ROTOR EMBOBINADO o un ROTOR JAULA DE ARDILLA. El rotor embobinado se embobina con el mismo número de polos del

estator y se le pueden conectar resistencias o fuentes de voltaje externas, a través de escobillas estacionarias que hacen contacto continuo con los anillos deslizantes (montados en la flecha) a los que está conectado el embobinado, para obtener alto par de arranque a bajas corrientes ó para control de velocidad.

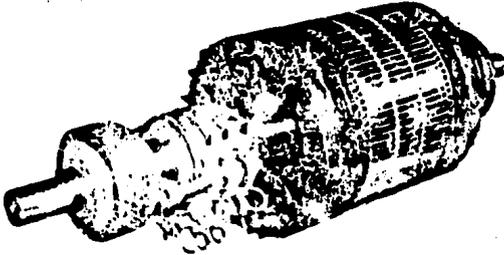


Fig.4-2.-Rotor Devanado.

El rotor Jaula de ardilla está constituido por barras que se vacían sobre el rotor; las barras, por lo general son de aluminio y al fundirse en el rotor debido a la forma que se les da, quedan unidas entre si en corto circuito en la forma de una Jaula de ardilla.

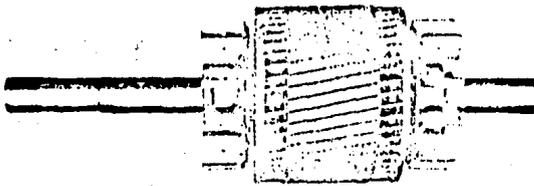
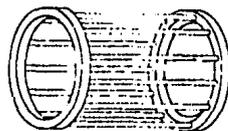


Fig.4-3 (a).-Rotor Jaula de Ardilla



Jaula de ardilla simplificada.

Fig. 4-3 (b)

La desventaja que se tiene al utilizar el rotor Jaula de ardilla es que no son posibles las conexiones externas al rotor y consecuentemente el control del motor es deficiente. Por ello, cuando es necesario controlar la velocidad del motor ó para proveer a la máquina con un alto par de arranque se utiliza un rotor de debandado.

EMBOBINADO DE ESTATOR.

El tipo de embobinado usado en el estator (y en el rotor deabanado) de un motor de inducción polifásico es el embobinado deabanado-completo como el mostrado en la fig.4-4 en éste tipo de embobinado (1) el número de deabanados por fase es igual a las ranuras/fases y (2) el número de deabanados en cada grupo polar por fase es igual a las ranuras/ (polosxfases). Otro factor importante es que las bobinas de cada grupo deben siempre ser conectadas en serie.

Para una información más amplia, respecto a los embobinados ver: C.S. Siskind Electrical Machines, Direct and Alternating Current (Tokio: Mc Graw-Hill Kogakusha Ltd., 1959)

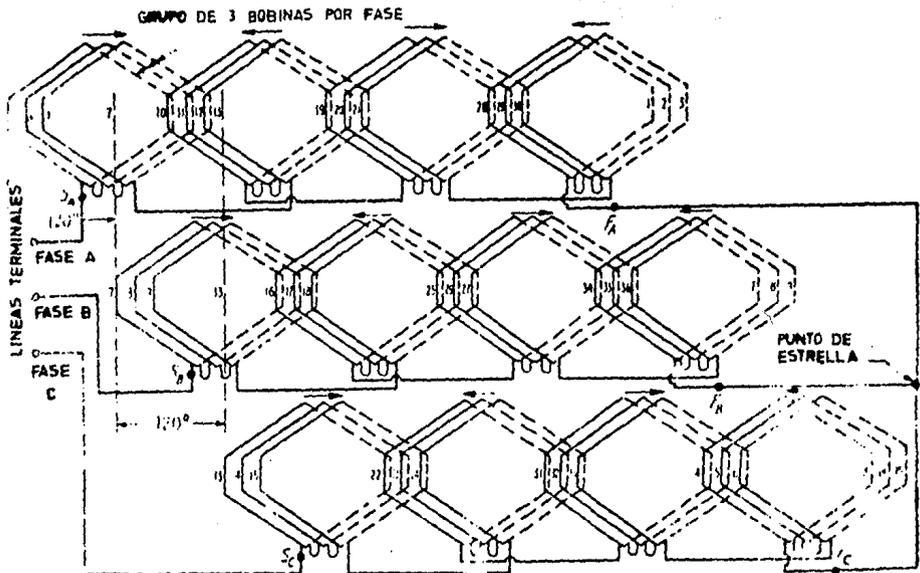


Fig.4-4.-Embobinado devanado-completo para un motor trifásico conectado en estrella, de 36 ranuras, 4 polos.

11.2.- FUNCIONAMIENTO

CAMPO GIRATORIO Y VELOCIDAD SINCRONA

Cuando el embobinado de estator trifásico se conecta a la fuente de alimentación fluyen en cada uno de los embobinados de las fases, tres corrientes independientes defasadas una de otra 120° eléctricos, como las mostradas en la fig.4-5 (a). La fig. 4-5 (b) muestra el estator de un motor de inducción trifásico de dos polos. Cada fase consiste de una bobina y las bobinas están separadas 120° mecánicos. Las direcciones de corriente en los instantes (1), (2), (3) y (4) se muestran por cruces y puntos, y las direcciones del campo magnético por flechas. De las figs.4-5 (a) y 4-5 (b) se observa que CUANDO LAS TRES CORRIENTES DE FASE I_A, I_B, I_C están DEFASADAS 120° ELECTRICOS y CUANDO LOS EMBOBINADOS DE LAS TRES FASES ESTAN SEPARADAS EN ESPACIO POR 120° MECANICOS, EL CAMPO MAGNETICO RESULTANTE GIRA EN EL ESPACIO como si un par de polos magnéticos físicos estuvieran girando mecánicamente..

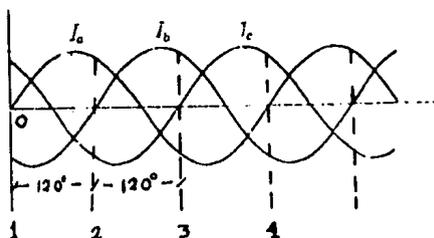


Fig.4-5 (a).- Ondas de corriente en un sistema trifásico.

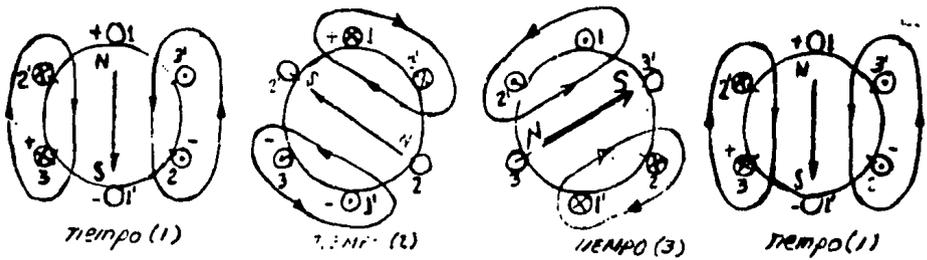


Fig.4-5(b).-Campo magnético giratorio bipolar establecido en un estator trifásico,

De la figura 4-5 (b) se observa que el par de polos magnéticos inducidos giran una revolución por ciclo de corriente ó sea que recorren 2 veces el paso polar por ciclo de corriente.

Paso polar es la distancia angular entre los centros de las ranuras de los devanados inducidos. (Fig.4-6). Por cada medio ciclo de corriente se recorrerá una distancia ó paso polar.

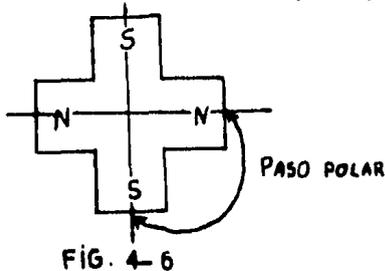


FIG. 4-6

El campo giratorio obtenido tiene las siguientes características:

- Magnitud constante
- Sentido de giro. Queda determinado por la secuencia de las corrientes.
- Velocidad constante. Si la frecuencia de las corrientes es constante.

Si hubieran sido cuatro polos, el campo hubiera girado un medio de una revolución (dos polos) por cada ciclo; para seis polos el campo habría girado un tercio de una revolución por ciclo, etc. De

aquí que la VELOCIDAD del CAMPO GIRATORIO ES INVERSAMENTE PROPORCIONAL AL NUMERO DE PARES DE POLOS. Además, con dos polos la velocidad del campo giratorio supone una revolución por segundo (rps) para una frecuencia de 1 ciclo por segundo (cps), 2 rps para una frecuencia de 2 cps, ó 60 rps para 60 cps. Por lo tanto LA VELOCIDAD DEL CAMPO GIRATORIO ES DIRECTAMENTE PROPORCIONAL A LA FRECUENCIA. Los dos conceptos anteriores se combinan para dar forma a lo que se conoce como VELOCIDAD SINCRONA del campo giratorio.

$$= N_s = \frac{f}{P/2} = \frac{2 f}{P} \text{ (r p s)}$$

donde: f es la frecuencia, Y P es el número de polos
Y puesto que es más conveniente especificar la velocidad en revoluciones por minuto (rpm):

$$N_s = \frac{120 f}{P} \text{ (r p m)}$$

Hay que observar que la expresión anterior nos da la velocidad del campo giratorio y no la velocidad del rotor; el rotor siempre gira a una velocidad menor que depende de la carga mecánica en la flecha del motor. Obviamente, LA VELOCIDAD DEL CAMPO GIRATORIO ES CONSTANTE PARA UNA FRECUENCIA CONSTANTE.

INDUCCION EN EL ROTOR

Supongase el campo magnético giratorio representado por un par de polos físicos norte y sur girando a ω_s radianes por segundo y un rotor con un embobinado en circuito corto, como se muestra en la fig.4-7 (a)

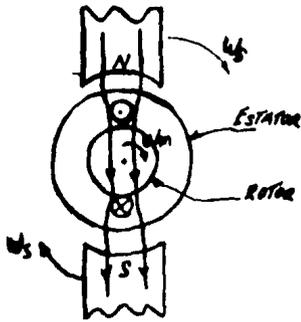


Fig.4-7 (a).-Campo magnético giratorio alrededor de un rotor

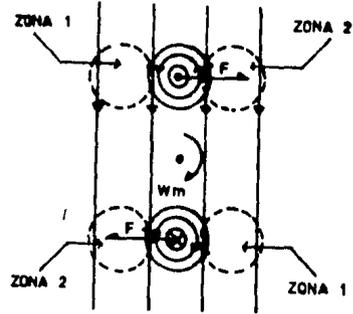


Fig. 4-7 (b)

Al principio, el rotor se encuentra parado. El campo magnético giratorio del estator empieza a girar recorriendo al embobinado del rotor a ω_s radianes por segundo. Por Ley de Faraday se induce una fem y circula una corriente en el embobinado del rotor, esta corriente inducida crea su propio campo que circunda al conductor del embobinado (siguiendo las manecillas del reloj cuando la corriente está entrando, veáse la figura), este campo creado por la corriente inducida fortalece el campo magnético giratorio en la zona 1 de los conductores y lo debilita en la zona 2 (veáse la figura 4-7 (b)) produciendo así fuerzas mecánicas en el rotor en la dirección mostrada. Por el efecto conjunto de varias fuerzas en el embobinado del rotor, el rotor gira en la misma dirección del campo magnético giratorio.

DESLIZAMIENTO Y VELOCIDAD REAL

En el caso ideal en el que el rotor no tuviera inersia ó pérdidas, éste giraría a la velocidad síncrona W_s , con lo que sería estacionario respecto del campo magnético giratorio; consecuentemente no se induciría fem en la bobina del rotor y no circularía corriente. El par desarrollado valdría cero también.

En el caso real, el rotor tiene inersia y pérdidas y la energía para vencerlas solo puede ser transmitida el rotor desde la fuente de alimentación si la velocidad angular del rotor es menor que la velocidad angular del campo giratorio. La velocidad angular del rotor no puede exceder a la velocidad angular síncrona del campo giratorio a menos que el rotor sea accionado por un primotor externo.

A la diferencia entre la velocidad síncrona (W_s) y la velocidad a la cual gira el rotor (W_m) Se le define como DESLIZAMIENTO. y se expresa comunmente en porcentaje:

$$\% S = \frac{W_s - W_m}{W_m} \times 100 \quad (4-1)$$

de donde se deduce que: $W_m = W_s (1-S)$ (4-2)

ANALOGIA CON EL TRANSFORMADOR

Hemos visto que al energizar las bobinas de estator en un motor de inducción, se crea un campo magnético giratorio que magnetiza los nucleos de rotor y estator (veáse la figura 4-8 (a)).

Este campo giratorio a la vez que gira induce voltajes en las bobinas del rotor, guardando así una analogía con la operación del

transformador, donde el primario sería el embobinado del estator y el secundario el embobinado del rotor. De la figura 4-8 (a) puede verse que los embobinados de rotor y estator no tienen ninguna conexión física pero se encuentran acoplados por un encadenamiento de flujo magnético de la misma manera como se encuentran acoplados los embobinados primario y secundario en un transformador ver figura 4-8 (b)

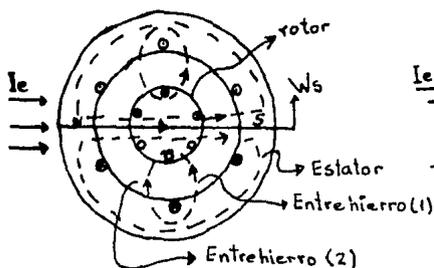


Fig. 4-8 (a)

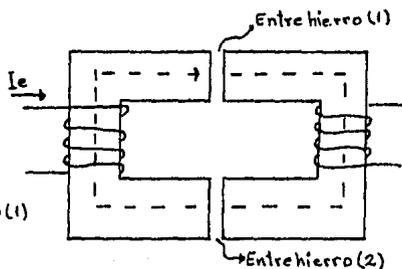


Fig. 4-8 (b)

Al estudiar el transformador ordinario se demostró que la energía suministrada al primario se transfiere inductivamente al secundario, salvo las pérdidas debidas a la resistencia del primario, a la histéresis y a las corrientes parásitas en el núcleo.

Dos consideraciones principales gobiernan el análisis.

- a) La segunda ley de Kirchhoff: Que establece cualquiera que sea la naturaleza de los componentes de un circuito, la suma algebraica de las tensiones (caídas de tensión) para un instante cualquiera, calculadas al recorrer cualquier malla es igual a cero para todo instante de tiempo.
- b) Las f.m.m.s del primario se combinan para producir una resultante suficiente para mantener el flujo que, a su vez, induce la fuer-

za contraelectromotriz en el primario y la fem de trabajo en el secundario.

Al aplicar estos principios al transformador, se entendía que los dos circuitos eléctricos estaban fijos, por lo que la frecuencia era la misma en el primario como en el secundario. Estos mismos principios son aplicables al caso de movimiento relativo entre los circuitos primario y secundario; la consideración a) es cierta sin restricción y la b) está limitada unicamente a que las fmms del primario y secundario deben continuar actuando sobre el mismo circuito magnético si existe movimiento relativo entre los circuitos eléctricos. Estos sencillos principios son de fundamental importancia en el análisis de los motores asíncronos.

Considerando un motor con rotor devanado, con las escobillas en circuito abierto el rotor permanece estático.

La magnitud del voltaje inducido en el rotor estático (V_{20}) se relaciona al voltaje que recibe el estator (V_1) por la relación de transformación "a" (como en el caso del transformador),

$$(4-3) \quad V_{20} = \frac{V_1}{a} ; \quad a = \text{relación del N}^\circ \text{ de vueltas, por fase, del embobinado estator al N}^\circ \text{ de vueltas del embobinado rotor.}$$

y la frecuencia es la misma para ambos voltajes: $f_1 = f_2$

f_1 = frecuencia en el estator

f_2 = frecuencia en el rotor

Bajo condiciones de marcha la magnitud y frecuencia del voltaje en movimiento en el rotor es proporcional al deslizamiento (S).

Bajo condiciones de marcha, para un deslizamiento "s"

$$\text{Voltaje en el rotor } (V_2) = SV_{20} = \frac{SV_1}{a} \quad (4-4)$$

$$\text{y la frecuencia en el rotor } f_2 = Sf_{20} = Sf_1 \quad \text{ó} \quad W_2 = S W_1 \quad (4-5)$$

EJEMPLO 1

Un motor de inducción de rotor devanado, trifásico, seis polos, 60 ciclos, 220 volts, tiene el estator conectado en delta y el rotor conectado en estrella. El rotor tiene la mitad del número de vueltas del estator. Para una velocidad del rotor de 1110 rpm, calcular:

- el deslizamiento
- el voltaje inducido por fase en el rotor cuando esta bloqueado.
- el voltaje por fase generado en el rotor bajo condiciones de marcha.
- el voltaje entre fases en el rotor bajo condiciones de marcha.
- la frecuencia del voltaje inducida en el rotor bajo condiciones de marcha.

SOLUCION:

a) La velocidad síncrona en un motor de 6 polos, 60 ciclos es:

$$N_s = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{1200-1110}{1200} \times 100 = 7.5\%$$

b) $V_{20} = \frac{V_1}{a} = \left(\frac{1}{2} \right) (220) = 110 \text{ Volts.}$

c) $V_2 = SV_{20} = (0.075) (110) = 8.25 \text{ Volts.}$

d) Volts entre las terminales del rotor = $\sqrt{3} (8.25) = 14.25 \text{ Volts}$

e) $f_2 = S f_1 = (0.075) (60) = 4.5$ ciclos.

frecuencia inducida en el rotor bajo condiciones de marcha.

C U E S T I O N A R I O

I. Relacione la columna de la derecha con la columna de la izquierda, escribiendo dentro del parentesis la letra que corresponda:

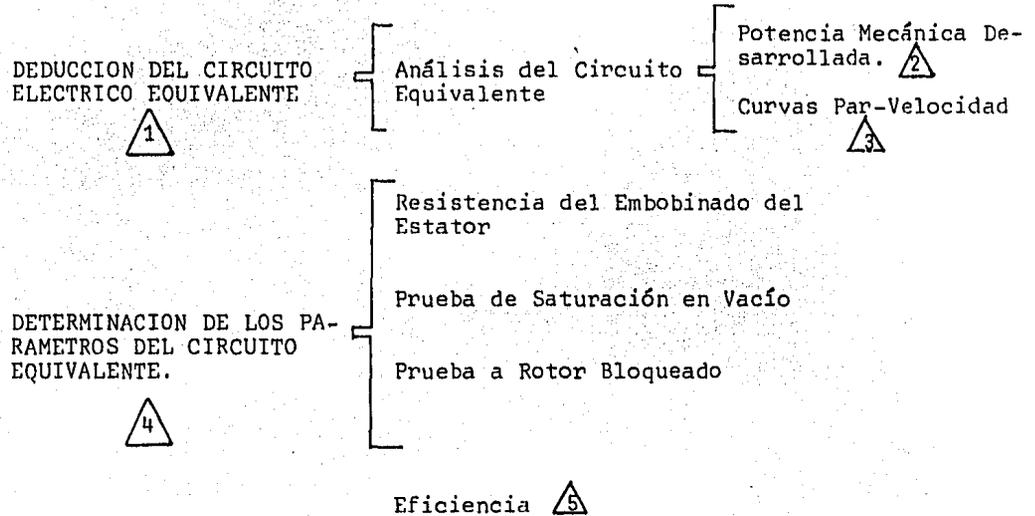
- a) Es la parte fija en un motor de inducción que sirve de base a los devanados que reciben la energía de la fuente de alimentación. () Campo magnético giratorio.
- b) Es la parte móvil en un motor de inducción que tiene devanados en los que se induce la energía de trabajo. () $f_1 = f_2$
- c) Es el tipo de rotor al que pueden conectarse resistencias o fuentes de voltaje externas, para obtener alto par de arranque a bajas corrientes o para control de velocidad. () Condiciones de marcha ó de giro.
- d) Es el tipo de rotor al que no se le pueden hacer conexiones externas y que trae como consecuencia que el control del motor no se puede efectuar. () $V_2 = \frac{S V_1}{a}$
- e) Es el tipo de embobinado mas comunmente empleado para devanar el estator. () Condiciones estáticas ó de rotor bloqueado.
- f) Tres corrientes defasadas 120° eléctricos, circulando cada una de ellas por cada uno tres embobinados separados 120° mecánicos producen ? () $V_{20} = \frac{V_1}{a}$
- g) Es la velocidad a la que gira el campo magnético giratorio y que es directamente proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional al número de pares de polos. () Deslizamiento

- h) Es la ecuación que determina la velocidad síncrona en revoluciones por minuto. () $f_2 = Sf_1$
- i) Se le define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad a la cual gira el rotor expresada en por ciento. () Rotor
- j) Es la expresión que determina la magnitud del voltaje inducido en el rotor, bajo condiciones estáticas. () Estator
- k) Sucede en estas condiciones que, la magnitud del voltaje inducido en el rotor se relaciona al voltaje en el estator por la relación de transformación. () Embobinado debanado-completo
- l) Es la expresión que determina la frecuencia en el rotor, en función de la frecuencia en el estator bajo condiciones estáticas. () Rotor jaula de Ardilla.
- m) Es la expresión que determina la magnitud del voltaje inducido en el rotor, bajo condiciones de giro. () $N_S = \frac{120 f}{p}$ (r p m)
- n) Sucede bajo estas condiciones que, la magnitud del voltaje inducido en el rotor se relaciona al voltaje en el estator por la relación de transformación y por el deslizamiento. () Velocidad Síncrona
- o) Es la expresión que determina la frecuencia en el rotor, en función de la frecuencia en el estator, bajo condiciones de giro. () Rotor debanado

II. Explicar de que manera se produce el par mecánico que hace girar al rotor.

CIRCUITO ELECTRICO EQUIVALENTE, CURVAS PAR VELOCIDAD.

CUADRO SINÓPTICO



CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICO

	1	2	3	4	5
Matsch L.W.-Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas; Representaciones y Serv. de Ingeniería, S.A.; México, 1974.	CAP.7 Sec.7-5	CAP.7 Sec.7-5	CAP.7 Sec.7-9	CAP.7 Sec.7-15	CAP.7 Sec.7-5
Gourishankar V.-Conversión de Energía Electromecánica; Representaciones y Serv.de Ingeniería, S.A.; México 1977.	CAP.9 Sec.9-6	CAP.9 Sec.9-6	CAP.9 Sec.9-6	CAP.9 Sec.9-12	CAP.9 Sec.9-12
Siskind CH.S.-Electrical Machines. Second Edition; International Student Edition. Mc.Graw-Hill Kogakusha, Ltd; Japón 1959.	CAP.9	CAP.9	CAP.9	CAP.9	CAP.9

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.- Obtener el circuito eléctrico equivalente de un motor de inducción.
- 2.- Establecer los conceptos básicos de:
 - a).- Potencia mecánica desarrollada por un motor de inducción
 - b).- Par mecánico
 - c).- Velocidad
 - d).- Corriente de línea
 - e).- Voltaje de Alimentación
 - f).- Factor de Potencia
 - g).- Frecuencia
 - h).- Deslizamiento
- 3.- Resolver problemas de aplicación práctica utilizando el circuito equivalente.
- 4.- Analizar el comportamiento de una máquina de inducción a partir de su deslizamiento.

12.1.- DEDUCCION DEL CIRCUITO ELECTRICO EQUIVALENTE.

Vimos en la sección anterior, Analogía con el Transformador, que para cualquier condición de giro el voltaje en el rotor es $S V_{20}$. Este voltaje dividido entre la impedancia del rotor (Z_2) nos da la corriente en el rotor por fase (I_2). Como la impedancia del rotor se forma de dos componentes: 1) La resistencia del rotor R_2 y 2) la reactancia SX_{20} , donde X_{20} es la reactancia de rotor bloqueado, entonces:

$$I_2 = \frac{S V_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{20})^2}} = \frac{V_{20}}{\sqrt{(R_2/S)^2 + X_{20}^2}} \quad (4-6)$$

La ecuación (4-6) puede representarse por un circuito como el que se muestra en la fig.4-9 (a) Sin embargo, puesto que es conveniente tener un circuito en el que aparezca la resistencia real del rotor (R_2), entonces (R_2/S) puede dividirse en dos componentes cuya suma sea su equivalente. Esto es:

$$\frac{R_2}{S} = R_2 + R_2 \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (4-7)$$

La fig.4.9 (a) puede entonces ser modificada para obtener el circuito de la fig. 4-9 (b)

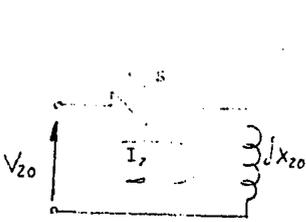


Fig.4-9 (a).-Circuito Eléctrico equivalente del rotor

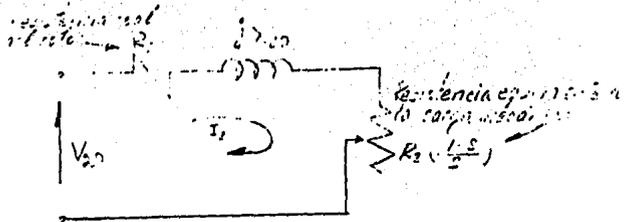


Fig.4-9 (b) Circuito eléctrico equivalente modificado del rotor por fase.

De este circuito se puede deducir que la potencia entregada al rotor por fase consiste de dos partes: (1) la potencia que causa las pérdidas en el cobre y (2) la potencia eléctrica que es convertida en potencia mecánica:

Pot.eléct.entregada al rotor (Pent.) = Pérdidas en el cobre (Pcu.)
+ Pot.desarrollada por el rotor (Pmec.)

Calculando la potencia real de entrada al rotor se tiene:

$$I_2^2 (R_2/S) = I_2^2 R_2 + I_2^2 R_2 \left[(1-S) / S \right] \quad \text{Watt}$$

$$P_{ent} = I_2^2 (R_2/S)$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_2 = P_{elec} (S)$$

$$P_{mec} = I_2^2 R_2 \left[(1-S)/S \right]$$

Esta expresión establece que la carga mecánica en un motor de inducción puede ser reemplazada por una resistencia eléctrica de valor $R_2 (1-S)/S$.

Ahora bien, el circuito equivalente del estator se deduce fácilmente si se hacen las dos consideraciones siguientes:

- a) El voltaje aplicado al estator (V_1), debe ser suficiente para producir el voltaje inducido en el rotor y además compensar

impedancia $Z_1 = R_1 + j X_1$

b) Las pérdidas eléctricas y magnéticas se pueden representar (como se vió cuando se estudio el transformador, Unidad 2 modulo 5) por una inductancia y una resistencia en paralelo.

Así que el circuito equivalente de estator queda de la siguiente manera:

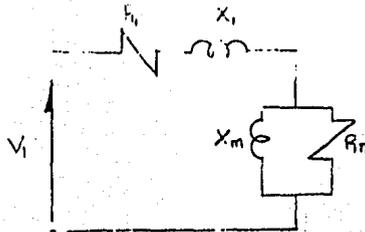


Fig.(4-10) Circuito Eléctrico Equivalente de estator por fase.

Puesto que en un motor de inducción ambos circuitos de estator y rotor se encuentran acoplados inductivamente por un encadenamiento de flujo magnético, se puede representar el circuito equivalente de un motor de inducción como se muestra en la fig.4-11.

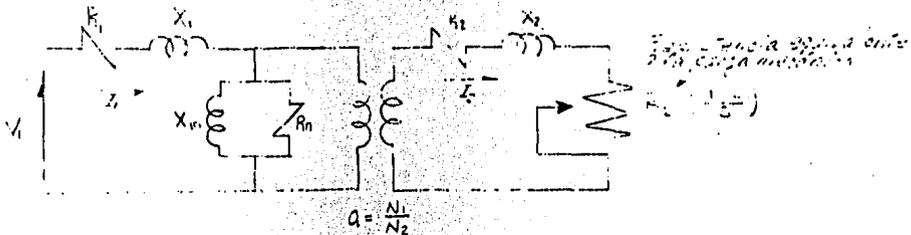


Fig.4-11.-Circuito Equivalente de un Motor de Inducción. Nótese la similitud que tienen el circuito equivalente de un motor de inducción y el circuito equivalente de un transformador.

Recorriendo la rama en paralelo que representa las pérdidas en el estator, hacia el extremo izquierdo del circuito (es despreciable la caída en la impedancia del estator respecto de V_1), y refiriendo los parámetros de rotor a estator se obtiene el circuito equivalente del motor de inducción en su forma más útil siguiente:

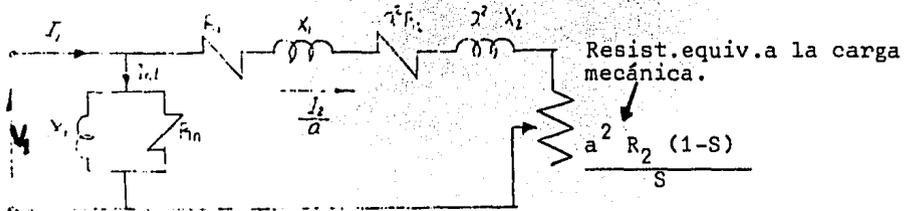


Fig.4-12.-Circuito aproximado equivalente de un motor de inducción con sus Parámetros referidos al circuito del estator.

2.2.- ANALISIS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

POTENCIA MECÁNICA DESARROLLADA

La expresión que determina la potencia mecánica (P_{mec}) desarrollada por un motor de inducción, en función de los parámetros del rotor referidos al estator, se obtiene directamente del circuito de la fig.4-12 si se aplica el principio de conservación de la energía. Se recomienda estudiar las sec. 6 y 7 del cap.6 del texto: Teoría de Las Máquinas de C.A. por A.S. Langsolorf; Ediciones del castillo S.A.; España (1968).

Haciendo en la fig.11: $R_{2e} = a^2 R_2$, $X_{2e} = a^2 X_2$, $I_{2e} = I_2/a$

$$\text{se tiene : } P_{mec} = \frac{V_1^2 R_{2e}}{(R_1 + R_{2e}/S)^2 + (X_1 + X_{2e})^2} \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (4-8)$$

del mismo circuito:
$$I_{2e} = \frac{V_1}{V (R_1 + R_{2e}/S)^2 + (X_1 + X_{2e})^2} \quad (4-9)$$

sustituyendo (9) en (8) :
$$P_{mec} = I_{2e}^2 R_{2e} \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (4-10)$$

ó :
$$\frac{I_{2e}^2 R_{2e}}{S} = I_{2e}^2 R_{2e} + P_{mec} \quad (4-10)$$

donde:
$$\frac{I_{2e}^2 R_{2e}}{S} = \text{Pot. entregada al rotor (Pent.)} \quad (4-11)$$

$$I_{2e}^2 R_{2e} = \text{Pérdidas en el cobre del rotor (Pcu)} \quad (4-12)$$

De las expresiones (4-11) y (4-12)

$$S = \frac{Pcu}{Pent.} \quad (4-13)$$

Multiplicando por (S) el numerador y denominador de la ec. (4-8)

se tiene:

$$P_{mec} = \frac{V_1^2 R_{2e} S (1-S)}{(SR_1 + R_{2e})^2 + S^2 (X_1 + X_{2e})^2} \quad (4-14)$$

De donde se observa que $P_{mec} = 0$ cuando $S=0$ (a vel. sincrona) y también $P_{mec}=0$ cuando $S=1$ (a rotor bloqueado).

El signo de (P_{mec} .) depende de la magnitud y signo de S:

1) Cuando $0 < S < 1$, la vel. del rotor está entre reposo y vel. sincrona y su sentido de giro es igual a la del campo giratorio. Por lo tanto (P_{mec}) es positiva e indica acción motriz.

2) Cuando $S < 0$ (deslizamiento negativo), el rotor está siendo impulsado hacia adelante en el mismo sentido del campo giratorio y la vel. real es mayor que la vel. sincrona; se ha invertido el sen

tido relativo de rotación entre el rotor y el campo giratorio, las fems y corrientes del rotor están invertidas, lo cual indica que la máquina cambió de acción motriz a generatriz. Por lo que (P_{mec}) es negativa.

3) Cuando $S > 1$, el rotor está siendo impulsado hacia atrás en sentido contrario del campo giratorio. La fem del rotor continúa con el mismo sentido que en 1) pero se hace mayor debido a la gran velocidad con que corta las líneas de inducción. Así, el motor se convierte en un freno eléctrico y (P_{mec}) es negativa.

CURVAS PAR-VELOCIDAD

La conversión de potencia eléctrica en potencia mecánica tiene lugar en el rotor. Para obtener la expresión que define el par mecánico (T) desarrollado por el rotor hacemos uso de la expresión (4-10)

$$P_{mec} = I_{2e}^2 R_{2e} \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (4-10)$$

$$\text{como } T = \frac{P_{mec}}{W} \left[\frac{Nw}{m} \right] \quad (4-15)$$

$$\text{donde } W = \text{Vel. angular} \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg.}} \right] = \frac{2\pi}{60} \text{ r p m}_{\text{ROTOR}} = \frac{2\pi}{60} (1-S) \text{ r p m}_{\text{mec.}} \quad (4-16)$$

Así que el par mecánico desarrollado por el rotor está dado por:

$$T = \frac{I_{2e}^2 (R_{2e}/S)}{(2\pi/60) \text{ rpm}_{\text{sinc.}}} \quad (4-17)$$

de (4-11), $I_{2e}^2 (R_{2e}/S)$ es la potencia eléctrica de entrada al rotor

$$\therefore T = \frac{\text{Pot.}}{(2\pi/60) \text{ rpm}_{\text{sinc}}} \quad (4-18)$$

La ecuación (4-17) establece que EL PRODUCTO DEL PAR POR EL DESLIZAMIENTO ES PROPORCIONAL A LAS PERDIDAS EN EL COBRE DEL ROTOR ($I_{2e}^2 R_{2e}$) lo que significa que en reposo ($S=1$) el par es directamente proporcional a la resistencia del rotor; así, un par de arranque grande exige una resistencia grande. (En motores de rotor devanado se incrementa la resistencia del rotor, agregando resistencias en serie a los embobinados)

El par mecánico expresado en función del voltaje aplicado queda como:

$$T = \frac{V_1^2 R_{2e} S}{(2\pi/60) \text{ rpm}_{\text{sinc}} [(SR_1 + R_{2e})^2 + S^2 (X_1 + X_{2e})^2]} \quad \begin{matrix} \text{de (9), (15) y} \\ (1E) \end{matrix} \quad (4-19)$$

de donde se observa que:

- 1) A velocidad síncrona ($S=0$) el par $T=0$.
- 2) A rotor bloqueado ($S=1$) el par toma el valor de par de arranque:

$$T_{\text{ARR}} = \frac{V_1^2 R_{2e}}{(2\pi/60) \text{ rpm}_{\text{sinc}} [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_{2e})^2]} \quad (4-20)$$

3) El par máximo para un voltaje aplicado dado es:

$$T_{\text{max}} = \frac{V_1^2}{(4\pi/60) \text{ rpm}_{\text{sinc}} [R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2]} \quad (4-21)$$

que sucede para:

$$S_{\text{max}} = \frac{R_{2e}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{2e})^2}} \quad (4-22)$$

El par máximo δ crítico caracteriza la carga que obliga al motor a detenerse, y se observa de (4-21) que es independiente de la resistencia del rotor, sin embargo, de (4-22) se observa que la resistencia del rotor determina el deslizamiento a que ocurre el par máximo.

4) Cuando la vel. es mayor que la de sincronismo ($S < 0$) el par es negativo y la máquina funciona como generador.

La variación del par con el deslizamiento se muestra en la fig. 4-13 donde se supuso $R_1 = 0.2$ y $X_1 = X_{2e} = 1.0$ para tres valores diferentes de R_{2e} .

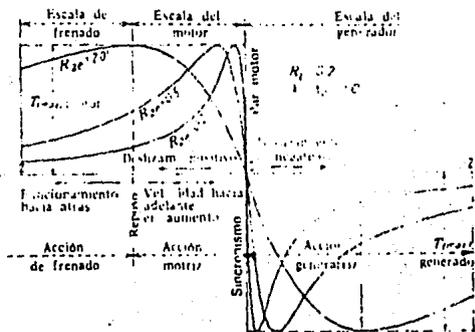


Fig. 4-13.-Variación del par motor con el deslizamiento (o la velocidad).

resulta análoga a la prueba de circuito abierto en un transformador.

El circuito de alambrado se muestra en la fig.4-14.

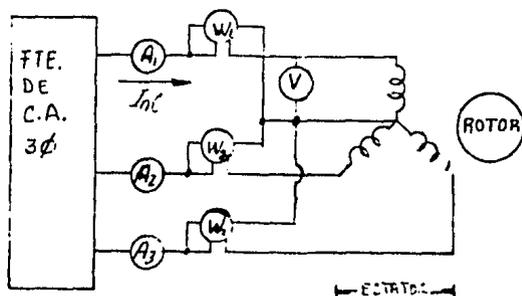


Fig.4-14.-Conexión de Instrumentos para la Prueba de Saturación en Vacío y de Corto Circuito.

La prueba se realiza variando el voltaje aplicado desde el 30 al 40% del voltaje nominal. A cada valor de voltaje se toman lecturas de voltaje, corriente y potencia. Con estas lecturas se obtiene el promedio de la corriente de línea y la potencia trifásica, para luego trazar las curvas de saturación en vacío (V - I) y de pérdidas en vacío (potencia). Se determinan:

a) Pérdidas en el cobre del embobinado estator por fase :

$$P_{cu} = I_n^2 R_1 \quad \text{WATTS por fase} \quad ; \quad I_n = \text{corriente por fase} \quad (4-24)$$

R_1 = resist.del estator determinada anteriormente.

b) Potencia eléctrica de entrada por fase:

$$P_{ent} = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{3} \quad (\text{WATTS POR FASE}); \quad W_1, W_2, W_3 = \text{Lecturas}$$

en Wattmetros.

(4-25)

c) Pérdidas en el núcleo de estator y rotor más las pérdidas mecánicas por fase: están dadas por:

$$P_{nm} = P_{ent} - P_{cu} \quad (4-26)$$

Para separar las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el núcleo, se traza la curva que define la ecuación (26) para cada valor de voltaje aplicado, como se muestra en la fig.4-15. Puesto que las pérdidas en el núcleo son cero a cero voltaje, las pérdidas mecánicas las da la intersección de la curva con el eje vertical.

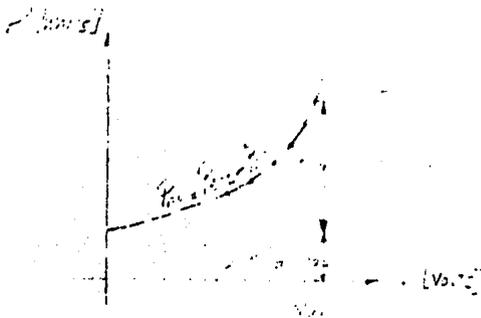


Fig.4-15.-Variación de las pérdidas en el núcleo y mecánicas

Perd.en el núcleo: $P_n = P_{nm} - P_{mec}$

(4-27)

d) Parámetros X_m y R_n ; están dados por la siguiente expresión.

$$R_n = \frac{V_1^2}{P_n}; \quad V_1 = \text{Voltaje aplicado por fase en la prueba de sat.en vacío} \quad (4-28)$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_m}; \quad I_m = I_{n1}^2 - I_n^2 \quad (4-29)$$

$$I_n = \frac{V}{R_n}$$

donde I_m es la corriente magnetizante, I_n es la corriente de pérdidas en el núcleo e I_{n1} es la corriente registrada a voltaje nominal.

PRUEBA CON ROTOR BLOQUEADO.

Esta prueba permite determinar la intensidad de corriente, el par y el factor de potencia en el arranque. Estando el rotor frenado los devanados se calentaran demasiado, por ello la prueba debe realizarse a voltaje reducido (de magnitud tal que haga circular la corriente nominal). El aplicar un voltaje reducido (V_r) permite anular la rama en paralelo del circuito equivalente y puesto que estando el rotor parado $S=1$, entonces $R_{2e} (1-S) / S = 0$ en el mismo circuito; quedando el circuito equivalente del motor para esta prueba como se muestra en la fig.4-16. Esta prueba es análoga a la de corto circuito de un transformador.

El diagrama de conexiones de la fig.4-14 se emplea también para esta prueba.

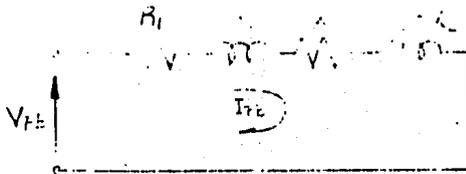


Fig.4-16, -Circuito Equivalente Para la Prueba de Rotor Bloqueado

Se tomaran lecturas de voltaje aplicado, corriente en el estator y potencia eléctrica de entrada,

Potencia eléctrica de entrada por fase:
$$P_{ent} = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{3} \quad (4-30)$$

donde W_1, W_2, W_3 son las lecturas en los wattmetros

Si I_{rb} es la corriente de estator leída, entonces:

$$R_{eq} = R_1 + a^2 R_2 = \frac{P_{ent}}{I_{rb}^2} \quad (4-31)$$

de donde se puede determinar $a^2 R_2$ puesto que se conoce la resistencia de estator (R_1)

La reactancia total es :
$$X_{eq} = X_1 + a^2 X_2 = \sqrt{\frac{V_{rb}^2}{I_{rb}^2} - R_{eq}^2} \quad (4-32)$$

Para motores en general se supone:
$$X_1 = a^2 X_2 \quad (4-33)$$

Para motores diseñados bajo norma la determinación de la reactancia es:

Clase Nema	X_1	X_2
A	0.5 X_{eq}	0.5 X_{eq}
B	0.4 X_{eq}	0.6 X_{eq}
C	0.3 X_{eq}	0.7 X_{eq}
D	0.5 X_{eq}	0.5 X_{eq}
Rotor Devanado	0.5 X_{eq}	0.5 X_{eq}

4.-EFICIENCIA.- Después de determinar los parámetros del circuito equivalente, bien se puede predecir la eficiencia del motor de inducción como función de la potencia de salida.

$$\eta = \frac{\text{Pot.de salida}}{\text{Pot.de entrada}} \times 100 = \frac{\text{Pot.de salida}}{\text{Pot.salida} + \text{Perd.}} \times 100 \quad (4-34)$$

donde: $\text{Perd.} = \text{Perd.Mag.} + \text{Perd.Mec.} + \text{Perd.Eléc.} \quad (4-35)$

Al motor de inducción además de las pruebas anteriores se le realizan pruebas adicionales como son las pruebas para obtener:

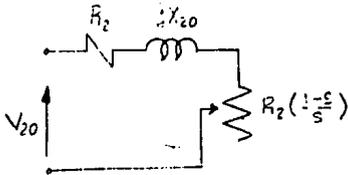
- a).- Curvas por velocidad
- b).- Elevación de **temperatura**
- c).- Alta tensión.

Estas pruebas se deben ver y ejecutar con todo detalle de acuerdo al libro Pruebas de Equipo Eléctrico 2 del Ing. Victor Pérez Amador Editorial Limusa.

CUESTIONARIO

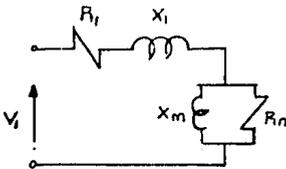
I.- Relacione la columna de la derecha con la columna de la izquierda, escribiendo dentro del paréntesis la letra que corresponda:

a)



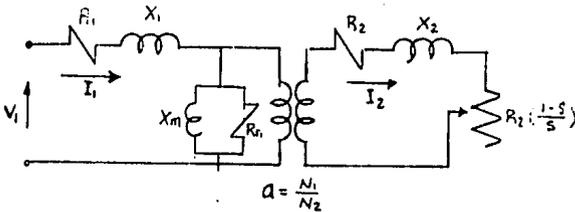
() Circuito Eléctrico Equivalente de un Motor de Inducción.

b)



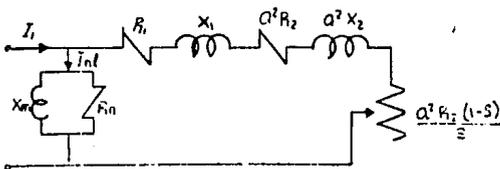
() Circuito Eléctrico Equivalente de un Motor de Inducción con los parámetros del Rotor referidos al circuito de Estator.

c)



$$() P_{mec} = \frac{V_1^2 R_{2e}}{(R_1 + R_{2e}/S)^2 + (X_1 + X_{2e})^2} \left(\frac{1-S}{S} \right)$$

d)



$$() S = \frac{P_{cu}}{P_{elec}}$$

e) Es la expresión que determina la potencia mecánica desarrollada por un motor de inducción.

() Circuito Eléctrico Equivalente del Rotor por fase.

- f) Es la expresión que permite predecir el deslizamiento de un motor de inducción como función de las pérdidas en el cobre del rotor y la potencia eléctrica de entrada al rotor. ()
$$T = \frac{P_{elec.}}{(2/60) \text{ rpm}_{sinc.}}$$
- g) Es la expresión que determina el par mecánico desarrollado por un motor de inducción en función de la potencia eléctrica de entrada al rotor. () Circuito Eléctrico Equivalente del Estator por fase.

II.- INDIQUE SI ES FALSA O VERDADERA CADA UNA DE LAS ASEVERACIONES SIGUIENTES.

- | | F A L S O | VERDADERO |
|--|-----------|-----------|
| 1) El deslizamiento es cero cuando el rotor gira a la misma velocidad síncrona del campo giratorio. | () | () |
| 2) El deslizamiento es unitario cuando el rotor está en reposo. | () | () |
| 3) El signo de la potencia mecánica ($P_{mec.}$) desarrollada por un motor depende de la magnitud y signo del deslizamiento (s) | () | () |
| 4) Cuando $0 < S < 1$, $P_{mec} > 0$ e indica que la máquina de inducción trabaja como motor. | () | () |
| 5) Cuando $S < 0$, $P_{mec} > 0$. Indica que el rotor está siendo impulsado a girar a mayor velocidad y en la misma dirección que el campo giratorio, el motor trabaja ahora como generador. | () | () |
| 6) Cuando $S > 1$, $P_{mec} < 0$. Significa que el rotor esta siendo impulsado a girar en sentido contrario al campo giratorio. El motor se | () | () |

F A L S O V E R D A D E R O

convierte en un freno eléctrico.

() ()

7) Cuando el rotor gira a la misma velocidad síncrona que el campo giratorio el par mecánico desarrollado es diferente de cero.

() ()

8) Cuando el rotor gira en la misma dirección y a mayor velocidad que el campo giratorio el par es positivo y la máquina trabaja como motor.

() ()

IV.- EXPLICAR BREVEMENTE EN QUE CONSISTE LA PRUEBA DE SATURACION EN VACIO Y QUE PARAMETROS SE DETERMINAN DE ESTA PRUEBA.

V .- EXPLICAR BREVEMENTE EN QUE CONSISTE LA PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO Y QUE PARAMETROS SE DETERMINAN DE ESTA PRUEBA.

EJEMPLOS:

1.- Un motor de inducción de rotor devanado de 15 H.P., 440 volts, trifásico, 60 Hz, 8 polos, tiene su estator y rotor conectados en estrella. La relación de las vueltas efectivas del rotor es $b = 2.4$ a 1. Las pérdidas de fricción de aire y fricción son 220 watts a velocidad nominal y pueden considerarse constantes desde cero carga hasta carga plena, el estator y el rotor tienen las siguientes constantes por fase.

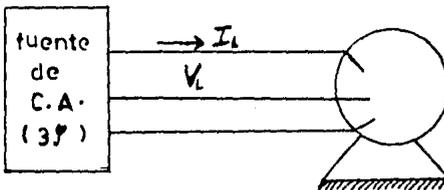
Estator: $r_1 = 0.52$ ohms, $X_1 = 1.15$ ohms, $X_m = 40$ ohms, $r = 360$ ohms

Rotor: $r_{22} = 0.11$ ohms, $X_{22} =$ ohms.

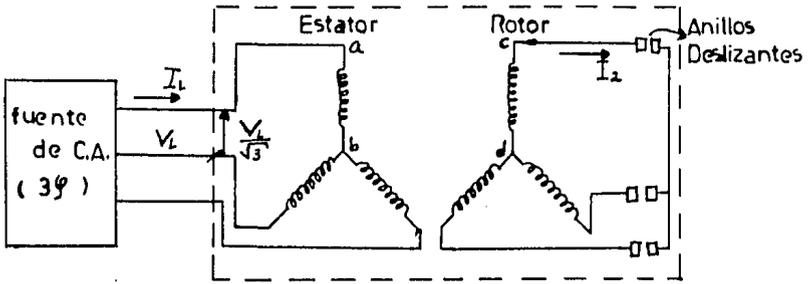
Las pérdidas de cargas parásitas son 120 watts, un deslizamiento $s = 0,045$ con voltaje nominal balanceado y frecuencia nominal aplicadas al estator y con los anillos deslizantes del rotor en corto circuito.

- a).- Dibujar el circuito equivalente exacto.
- b).- Calcular la corriente del estator por fase.
- c).- Calcular el factor de potencia al que opera el motor.
- d).- Calcular la corriente en el embobinado del rotor por fase.
- e).- Calcular la potencia de salida del motor en caballos de potencia.
- f).- Calcular la eficiencia del motor.
- g).- Calcular el par mecánico.
- h).- Dibuje el circuito equivalente aproximado y calcule lo que se señala anteriormente del inciso b, a y g.

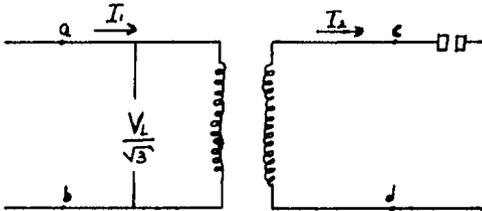
SOLUCION



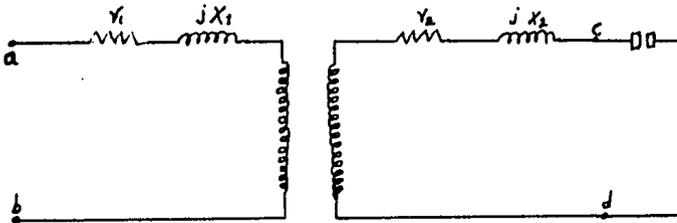
Esquema de alimentación al motor.



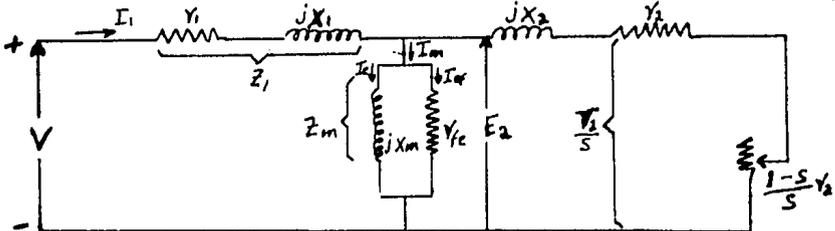
Esquema de conexiones de estator y rotor



Circuitos por fase.



Circuito eléctrico equivalente por fase



Circuito eléctrico con valores por fase y referidos al estator

En la figura anterior la impedancia del rotor se refiere al estator con el uso de la relación de impedancia.

$$b^2 = (2.4)^2 = 5.76$$

$$r_2 = b^2 r_{22} = 5.76 \times 0.11 = 0.634 \text{ ohms por fase}$$

$$X_2 = b^2 X_{22} = 5.76 \times 0.20 = 1.15 \text{ ohms por fase}$$

Para un deslizamiento $s = 0.045$, la impedancia del motor referida al estator es:

$$Z_2 = \frac{r_2}{s} + jX_2 = \frac{0.634}{0.045} + j1.15 = 14.10 + j1.15$$

$$Z_2 = 14.13 \angle 4.7^\circ \text{ ohms por fase.}$$

La impedancia de dispersión del estator es:

$$Z_1 = r_1 + jX_1 = 0.52 + j1.15 = 1.26 \angle 65.6^\circ$$

y la impedancia de excitación referida al estator es:

$$Z_m = \frac{r \ j \ X_m}{r + jX_m} = \frac{(360) (j40)}{360 + j40} = 39.8 \angle 83.65^\circ$$

$$Z_m = 4.40 + j39.5 \text{ ohms por fase}$$

b).- De la figura del inciso (a)

$$Z = Z_1 + \frac{Z_2 Z_m}{Z_2 + Z_m} = 1.26 \angle 65.6^\circ + \frac{(14.13 \angle 4.7^\circ) (39.8 \angle 83.65^\circ)}{14.13 \angle 4.7^\circ + 39.8 \angle 83.65^\circ}$$

$$Z = 0.56 + j1.15 + \frac{562 \angle 88.35^\circ}{44.8 \angle 65.6^\circ}$$

$$Z = 12.09 + j6.0 + 13.47 \angle 26.4^\circ \text{ ohms por fase}$$

El voltaje por fase es

$$V_1 = \frac{440}{3} = 146.67$$

La corriente por fase del estator

$$I_1 = \frac{V}{Z} = \frac{146.67 \angle -26.4^\circ}{13.47} = 10.9 \angle -26.4^\circ \text{ amp por fase}$$

c).- El factor de potencia al que opera el motor es:

$$F.P. = \cos \theta = \cos (-26.4^\circ) = 0.895$$

d).- La corriente del embobinado del rotor por fase

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{I_1 Z_2 Z_m}{(Z_2 + Z_m) Z_2} = \frac{I_1 Z_m}{Z_2 + Z_m}$$

$$I_2 = \frac{(18.85 \angle -26.4^\circ) (39.8 \angle 83.65^\circ)}{44.8 \angle 65.6^\circ} = 16.75 \angle -8.35^\circ \text{ amp.}$$

$$I_{22} = b I_2 = 2.4 \times 16.75 \angle -8.35^\circ = 40.2 \angle -8.35^\circ \text{ amp. por base}$$

e).- Potencia de salida (Pmec) del motor en su flecha

$$P_{em} = m I_2^2 \frac{1-s}{s} r_2 = 3 (16.75)^2 \left(\frac{1-0.045}{0.045} \right) 0.634$$

$$P_{em} = 11.300 \text{ watts.}$$

$$P_{mec} = P_{em} - (P_{fm} + P_{stray})$$

$$P_{mec} = 11.300 - (220 + 120) = 10960 \text{ watts.}$$

$$P_{mec} = \frac{10960}{746} = 14.7 \text{ H.P}$$

f).- La eficiencia (E_{ff}) es la relación de la Potencia de entrada a la Potencia de salida

$$P_{en} = mVI \cos \theta = 3 \times 254 \times 18.85 \times 0.895 = 12880 \text{ watts.}$$

$$E_{ff} = \frac{10960}{12880} = 1 - \frac{1920}{12880} = 1 - 0.149 = 0.851$$

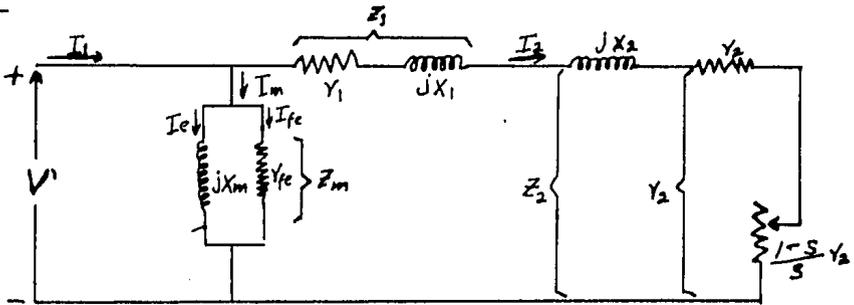
g).- El par (T) es la relación de la potencia mecánica a la velocidad angular mecánica (ω_m de rotación. La velocidad angular es.

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi (1-s)n_s}{60} = \frac{2\pi (1-0.045) \frac{1200}{60}}{60}$$

$$\omega_m = 90.0 \text{ rad/seg}$$

$$\text{el par es } T = \frac{10960}{90} = 121.8 \text{ n.m}$$

h).-



$$V' = v \left(1 - \frac{X_1}{X_m} \right)$$

La corriente referida al estator es

$$I_2 = \frac{V \left(1 - \frac{X_1}{X_m} \right)}{Z_1 + Z_2} = \frac{V \left(1 - \frac{X_1}{X_m} \right)}{r_1 + \frac{r_2}{s} + j(X_1 + X_2)}$$

$$I_2 = \frac{254 \left(1 - \frac{1.15}{40} \right)}{0.52 + 14.1 + j 2.30} = \frac{246.7}{14.62 + j 2.30} = \frac{246.7}{14.80 \angle 8.95^\circ}$$

$$I_2 = 16.7 \angle -8.95^\circ = 16.5 - j 2.60 \text{ amp. por fase}$$

2a. corriente de excitación es.

$$I_m = \frac{V \left(1 - \frac{X_1}{X_m} \right)}{Z_m} = \frac{246.7}{360} + \frac{246.7}{540} = 0.69 - j 6.17$$

$$I_1 = I_2 + I_m = 16.5 - j 2.60 + 0.69 - j 6.17$$

$$I_1 = 17.19 - j 8.77 = 19.30 \angle -27.0^\circ$$

El factor de potencia es:

$$F.P. = \cos \theta = \cos 27.0^\circ = 0.890$$

La corriente actual en el embobinado del rotor es:

$$I_{22} = 6I_2 = 2.4 \times 16.7 = 40.1 \text{ amp. por fase o por anillo deslizante.}$$

La potencia mecánica desarrollada es:

$$\begin{aligned} P_{em} &= mI_2^2 \frac{1-s}{s} r_2 = 3(16.7)^2 \left(\frac{1-0.045}{0.045} \right) (0.634) = \\ &= 11260 \text{ watts.} \end{aligned}$$

La potencia mecánica (P_{mec}) :

$$\begin{aligned} P_{mec} &= P_{en} - (P_{fw} + P_{stray}) = 11260 - (220 + 120) \\ &= 10920 \text{ watts.} \end{aligned}$$

$$P_{mec} = \frac{10920}{746} = 14.65 \text{ H.P.}$$

La potencia de entrada de (P_{en}) es:

$$P_{en} = 3 VI, \cos \theta = 3(254) (19.30) (0.890) = 13080 \text{ watts.}$$

Y la eficiencia (E_{ff}) es:

$$E_{ff} = \frac{P_{mec}}{P_{en}} = \frac{10920}{13080} = 1 - \frac{2160}{13080} = 0.834 \quad \% E_{ff} = 83.4 \%$$

El par mecánico (T_m) será :

$$T_m = \frac{P_{mec}}{\omega_m} = \frac{11040}{90} = 122.7 \text{ new-m.}$$

2).- Los siguientes resultados se obtuvieron al efectuarle unas pruebas a un motor de inducción de 10 H.P. trifásico, 440 volts, 14 amperes, 60 Hz, 8 polos con un rotor jaula de ar dilla (Diseño A).

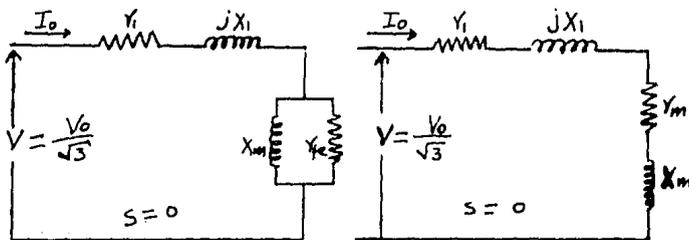
Prueba de Cero Carga: 440 volts línea a línea, corriente de línea 5.95 amp, potencia trifásica 350 watts.

Prueba de rotor bloqueado a 60 Hz: 94.5 volts línea a línea corriente de línea 13,85 amperes, potencia trifásica 890 watts.

La resistencia de C.d. del estator fue medida inmediatamente después de la prueba de rotor bloqueado, dando un valor promedio de 0,77 ohms, por fase, calcúlese las pérdidas rotacionales de cero carga y las constantes para el circuito equivalente simplificado para un motor bajo carga.

SOLUCION:

De la prueba de rotor libre ó cero carga, la corriente del rotor es despreciable y por lo tanto el circuito equivalente para un motor es:



Circuito equivalente de un motor con rotor libre

Donde $V = \frac{V_0}{3}$ Volts por fase

$$Z_0 = \frac{V}{I_0} = r_0^2 + X_0^2$$

$$P_0 = 3 I_0^2 r_0$$

$$r_0 = r_1 + r_m$$

$$X_0^2 = X_1^2 + X_m^2 = Z_0^2 - r_0^2$$

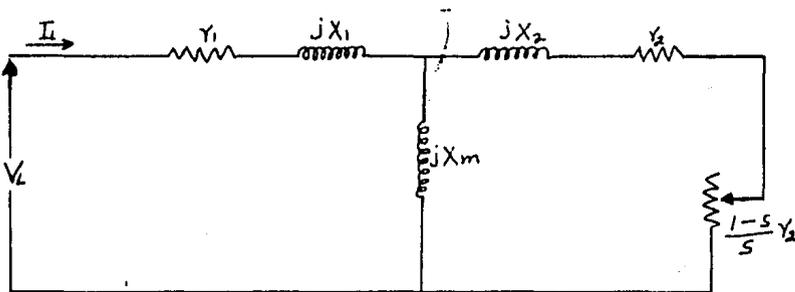
De los datos de prueba de cero carga.

$$Z_o = \frac{V_o}{3 (I_o)} = \frac{440}{3 (5.95)} = 42.8 \text{ ohms.}$$

$$r_o = \frac{P_o}{3 I_o^2} = \frac{350}{3 (5.95)^2} = 3.30 \text{ ohms.}$$

$$X_o = Z_o^2 - r_o^2 = (42.8)^2 - (3.30)^2 = 42.6 \text{ ohms}$$

De la prueba de rotor bloqueado.



Circuito equivalente simplificado para un motor bajo carga.

$$Z_L = \frac{V_L}{3 I_L} = \frac{94.5}{3 (13.85)} = 3.96 \text{ ohms.}$$

$$r_L = \frac{P_L}{3 I_L^2} = \frac{890}{3 (13.85)^2} = 1.545 \text{ ohms.}$$

$$X_L = Z_L^2 - r_L^2 = (3.96)^2 - (1.545)^2 = 3.65 \text{ ohms.}$$

$$X_1 = X_2 = 0.5 \times 3.65 = 3.65 \text{ ohms.}$$

$$X_m = X_o - X_1 = 42.6 - 1.825 = 40.77 \text{ ohms.}$$

$$r_z = (r_L - r_1) \left(\frac{X_2 + X_m}{X_m} \right)^2$$

$$r_2 = (1.545 - 0.77) \left(\frac{42.6}{40.77} \right)^2 = 3.945 \text{ ohms.}$$

MODULO 13

CLASIFICACION, NORMAS Y ESPECIFICACION DE LOS MOTORES DE INDUCCION.

CUADRO SINÓPTICO:

CLASIFICACION	1
NORMAS	2
ESPECIFICACIONES	3

CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

	△ 1	△ 2	△ 3
Matsch L.W.-Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas; Representaciones y Serv.de Ingeniería,S.A.;México 1974.	CAP.7 Sec.7-1	CAP.7 Sec.7-14	CAP.7
Gourishankar V.-Conversión de Energía Electromecánica;Representaciones y Serv.de Ingeniería,S.A.;México,1977.	CAP.9 Sec.9-1 9-2	CAP.9	CAP.9
Siskind CH,S.-Electrical Machines Second Edition; International Student Edition Mc,Graw-Hill Kogakusha; Ltd.; Tokio Japón,1959.	CAP.9	CAP.9	CAP.9

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1.- Conocer de una manera general como se clasifican los motores de inducción.
- 2.- Distinguir las diferentes clases NEMA de los motores de inducción:
 - a) Clase A
 - b) Clase B
 - c) Clase C
 - d) Clase D
- 3.- Conocer los diferentes puntos que hay que cubrir para especificar adecuadamente un motor de Inducción.

13.1.- CLASIFICACION

Existe un gran número de construcciones diferentes de motores de inducción, debido a que están confinados a características de operación estrechas, especialmente en lo que se refiere a PAR, CAPACIDAD DE SOBRECARGA, VARIACION DE VELOCIDAD, CONTROL DE VELOCIDAD y PROCEDIMIENTOS DE ARRANQUE. Además estos motores son construidos para operar en sistemas monofásicos ó polifásicos (bifásicos ó trifásicos).

Debido a que la velocidad de sincronismo de un motor de inducción está dada por $\text{rpm}_{\text{sin}_c} = 120 \text{ f/P}$, los motores de inducción pueden ser de distinto número de polos, dependiendo de la frecuencia y velocidad de operación requerida.

Atendiendo a la construcción del rotor los motores de inducción se clasifican como:

- a) Motor de inducción tipo JAULA DE ARDILLA
- b) Motor de inducción tipo ROTOR DEVANADO

Los motores de inducción Jaula de ardilla se utilizan ampliamente porque tienen características deseables para todos los propósitos. Son bajos en costo por H.P, tienen buen par de arranque y capacidad de sobrecarga, y son altamente eficientes. Estos motores pueden ser construidos para trabajar en atmósferas que contengan polvo, humedad, vapores corrosivos ó explosivos, ó bien para trabajar sumergidos en aceite o agua. Son prácticamente motores de velocidad constante y cuando se hace necesario poder controlar la velocidad, el rotor Jaula de ardilla puede entonces reemplazarse por un rotor devanado. Los motores Jaula de ardilla y los mo -

tores de rotor devanado difieren únicamente por la construcción del rotor.

3.2.- NORMAS

Los motores se encuentran normalizados en México bajo las Normas de CONNIE (Comité Consultivo Nacional de Normalización de la Industria Eléctrica) y en E.E.U.U. por las Normas Americanas de la NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes de Equipo Eléctrico). Estas clasifican a los motores atendiendo a sus diseños como clases A, B, C, D. Las curvas características Par-velocidad que corresponden a la clasificación A, B, C, D, en la fig. 4-17, ayudan a visualizar dicha clasificación.

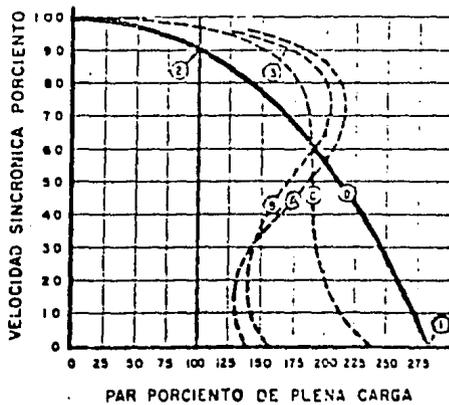


Fig. 4-17. -Curvas Par-Velocidad, Clases A, B, C, D.

Clase A. "Carga de Par Variable". En estas máquinas el par varía con el cuadrado de la velocidad de operación, como en ventiladores, sopladores y bombas centrífugas, todas las cuales requieren pares mucho más bajos a velocidades bajas que a velocidades altas. En estas máquinas el par de arranque solo es el requerido por fricción e inercia.

Clase B. "Carga de Par Constante". En estas los requerimientos de par no varían con la velocidad; La carga principal en estas máquinas es de fricción, como en transportadores, máquinas para las industrias del hule y papel, líneas de proceso, bombas de engranes, etc.

Clase C. "Carga de Potencia Constante". En este tipo de máquinas, la demanda de par aumenta al decrecer la velocidad. La potencia requerida permanece constante para todo el rango de velocidades. Típico de esta carga, son algunos tornos donde se hacen cortes gruesos a velocidades bajas, escaleras eléctricas, pulverizadores, compresores sin válvula de descarga, transportadores, etc.

Clase D. "Carga Variable y Velocidad Constante". En muchos casos una máquina de velocidad constante, tiene una carga variable, es decir requiere de una potencia variable.

Este diseño desarrolla un par de arranque muy grande (punto ① en la gráfica), de aprox. el 275% del par a plena carga. Sin embargo, de la fig. se ve que el par decae gradualmente durante el periodo de aceleración, por lo que no hay un par máximo bien definido como en los diseños A y B.

Otra característica de este motor es su alto deslizamiento a plena carga (punto ② en la gráfica).

Por su alto par de arranque este diseño se hace adecuado para acelerar cargas difíciles de arrancar. Por sus características en declive de la curva

Par-velocidad, se hace ideal para cargas en que se requiere desaceleración del motor durante los picos de carga. Aplicaciones típicas incluyen prensas para troquelado o embutido y prensas dobladoras de cortina.

Su principal inconveniente estriba en su baja eficiencia comparado con los otros diseños, ya que el alto par de arranque y el alto deslizamiento se obtienen a base de altas pérdidas en el rotor.

La tabla 4-1 al final del módulo contiene las características y aplicaciones de los motores de inducción.

3.3.- ESPECIFICACIONES.

Para especificar adecuadamente un motor de inducción, se deben considerar los siguientes puntos:

- 1) Características De La Carga y del Motor, tales como acoplamiento del motor a la carga, velocidad, capacidad en HP, pares requeridos (Par de Arranque, Par de Aceleración, Par Máximo), características de inercia y aceleración y ciclo de trabajo.
- 2) Sistemas de Arranque del Motor.- En relación a la fuente alimentadora, tales como variaciones permisibles de tensión al aplicar la corriente de arranque y capacidad requerida en KVA.
- 3) Condiciones Ambientales.- Tales como temperatura ambiente, altura sobre el nivel del mar, abuso mecánico y contaminantes. Estos factores determinan el tipo de aislamiento, así como la cubierta ó protección del

motor y métodos de ventilación especiales para el motor.

Si el ambiente contiene polvo, gases corrosivos ó explosivos, atmósfera salada, humedad excesiva, el motor requerirá envolturas especiales para proteger los arrollamientos y cualquier contacto rozante tal como un colector. Las envolturas de los motores están disponibles como a prueba de salpicaduras, a prueba de goteo, a pruebas de polvo, a prueba de explosión, etc.

La figura 4-18 (a) muestra un motor de inducción totalmente cerrado, enfriado por ventilador.

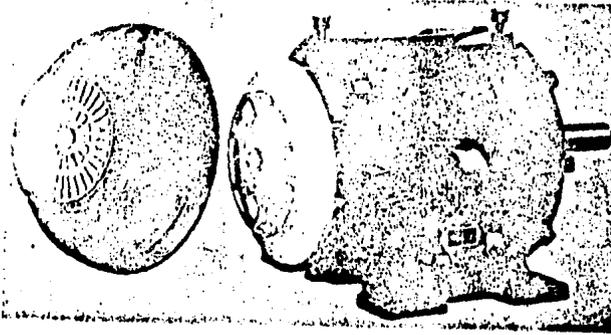


Fig. 4-18(a) Motor de inducción totalmente cerrado de 7 1/2 hp enfriado por ventilador

Fig. 14-18(b) .-Placa de un motor de Inducción

En resumen las especificaciones mas importantes de un motor son potencia, voltaje, velocidad, número de fase, clase de diseño, clase de aislamiento, tipo de conexión, temperatura ambiente, etc. Todos estos datos vienen consignados en la placa de un motor. Ver figura 4.8 b.

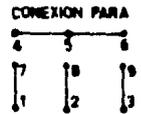
MOTOR C. A.		CONSTRUIDO A PRECISION		LINEA "E"		
Armazon 184 T	Forma P/BP	Clase aislante B	No. identificación 36636015 -1			
C. P. 5	R.P.M. 1740	Volts 220/440	Amperes 14.2 / 7.1	Hertz 60		
DISEÑO B		CLAVE H		CONEXION PARA		
Fases 3	Servicio: Continuo					
Max. Temp. Ambiental : 40°C		VOLTAJE MENOR		VOLTAJE MAJOR		

Fig.14,-18 b.-Placa de un Motor de Inducción.

Conociendo los distintos tipos de diseño para motores de inducción se puede seleccionar el tipo más adecuado para impulsar una carga dada; en la tabla 4.1 se pueden ver los tipos de diseño de motores y sus aplicaciones típicas.

TABLA 4 -1. CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE MOTORES POLIFÁSICOS DE C-A 60 HERTZ

Tipo de aplicación	Gama Hp	Par motor de arranque (%) ^a	Par motor máxima (%) ^a	Corriente de arranque (%) ^b	Deslizamiento (%)	Factor de potencia Elevado, (%)	Rendimiento (%) Elevado,	Aplicaciones típicas
Motor de arranque, motor y fuente de arranque, NEMA Clase A	0.5 a 300	Poco - Par motor 2 - 150 4 - 150 6 - 135 8 - 125 10 - 120 12 - 115 14 - 110 16 - 105	Hasta 250 pero no menor que 300	500 - 1000	Bajo, 3 - 5	87 - 89	87 - 89	Cargas de velocidad constante donde no se necesita un par motor de arranque elevado y donde se tolera una corriente de arranque elevada. Ventiladores, aspiradores, bombas centrífugas, máquinas-herramientas, herramientas para la elaboración de madera, transmisiones. Bajos en costo. Pueden requerir arrancador a tensión reducida. No deben estar sujetos a sobrecargas sostenidas, debido al calentamiento. Tienen par motor máximo elevado.
Motor general, motor normal a corriente de arranque, NEMA Clase B	0.5 a 300	Lo mismo que el anterior o bien mayor	Alrededor de los mismos de la Clase A, pero pueden ser menores	Alrededor de 500 - 850, menores que el promedio de la Clase A	3 - 5	Un valor menor que la Clase A	87 - 89	Misma que la Clase A - la ventaja sobre la Clase A es menor corriente de arranque, pero factor de potencia ligeramente más bajo.
Motor de arranque, motor de arranque, NEMA Clase C	1 a 300	300 a 250	Usualmente un poco menor que la Clase A, pero no menor que 200	Alrededor de lo mismo como la Clase B	2 - 7	Menor que la Clase A	82 - 84	Cargas de velocidad constante que requieren un par motor de arranque razonablemente elevado y muy baja corriente de arranque. Transmisiones, compresores, trituradores, agitadores, bombas de movimiento alternativo. Par motor máximo en reposo.
Motor de arranque, deslizamiento medio elevado, NEMA Clase D	0.5 a 150	Deslizamiento medio 350, deslizamiento elevado 250 - 315	Usualmente el mismo que el par motor en reposo	Deslizamiento medio 400 - 800, deslizamiento elevado 300 - 500	Medio 7-11, elevado 12 - 16	Bajo	Bajo	Deslizamiento medio. El par motor de arranque más elevado de todos los motores jaula de ardilla. Utilizados para cargas de inercia elevada, tales como ejes, zales, prensas cortadoras puentes, forjadoras a martillo, máquinas rasadoras, calderas. Tienen un par motor acelerante promedio muy elevado. Se utilizan deslizamientos elevados para accionadores, montacargas, etc. en cargas intermitentes.
Motor de arranque, motor de arranque, NEMA Clase E, o motor de arranque, NEMA Clase F	40 a 300	Bajo, no menor que 50	Bajo, pero no menor que 150	Normal 500 - 1 000, baja 350 - 500	1 a 3 1/2	Casi el mismo que la Clase A o Clase B	Casi el mismo que la Clase A o Clase B	Cargas de baja inercia directamente conectadas que requieren bajo par motor de arranque, tales como ventiladores y bombas centrífugas. Tienen rendimiento elevado y deslizamiento bajo.
Motor de arranque	0.5 a 3 000	Hasta 300	300 - 250	Depende de la resistencia externa del rotor, pero puede ser tan baja como 150	3 - 50	Elevado, con el rotor en cortocircuito, el mismo que la clase A	Elevado, con el rotor en cortocircuito el mismo que la Clase A, pero bajo cuando se utiliza con resistencia en el rotor para el control de la velocidad	Para cargas de par motor de arranque elevado donde se requiere muy baja corriente de arranque o donde el par motor debe aplicarse muy gradualmente y donde se necesita algún control de la velocidad (80% v. Ventiladores, bombas, transportadores, montacargas, grúas, compresores. Motor con control de la velocidad más caro y puede requerir más mantenimiento.

CUESTIONARIO

I.- Indique si es falsa o verdadera cada una de las aseveraciones siguientes:

- | | FALSO | VERDADERO |
|--|-------|-----------|
| 1) Los motores de inducción son construidos atendiendo principalmente a los requerimientos de par, capacidad de sobrecarga, variación de velocidad, control de velocidad y procedimientos de arranque. | () | () |
| 2) De acuerdo al sistema al que deban conectarse los motores de inducción, estos pueden ser monofásicos, bifásicos ó trifásicos. | () | () |
| 3) Los motores de inducción se fabrican en número par de polos, dependiendo de la frecuencia y velocidad de operación requerida. | () | () |
| 4) El rotor de un motor de inducción puede ser tipo Jaula de ardilla ó tipo rotor devanado. | () | () |
| 5) Los motores jaula de ardilla son bajos en costo por H.P, tienen buen par de arranque y capacidad de sobrecarga son altamente eficientes, y son practicamente motores de velocidad constante. | () | () |
| 6) Los motores jaula de ardilla y los motores de rotor devanado difieren por el tipo de rotor que emplean y la disposición del embobinado del estator. | () | () |
| 7) En los motores clase NEMA A el par aumenta al decrecer la velocidad y la potencia es la misma para cualquier velocidad. | () | () |
| 8) Los motores de inducción no pueden ser construidos para trabajar en ambientes corrosivos, explosivos ó que contengan polvos. | () | X) |

	FALSO	VERDADERO
9) En los motores clase NEMA B el par no varía con la velocidad.	()	()
10) Los motores clase NEMA C se emplean en cargas que requieren bajo par a velocidades bajas.	()	()
11) Los motores clase NEMA D son útiles donde la carga requiere de una potencia variable y una velocidad constante.	()	()
12) Para especificar adecuadamente un motor se deben tomar en cuenta las características de la carga y del motor, los sistemas de arranque y las condiciones ambientales.	()	()

TEMA V.

ARRANCADORES E INSTALACION DE MOTORES DE INDUCCION

OBJETIVO GENERAL

Seleccionar el motor y su equipo auxiliar para un uso específico y proyectar su instalación.

INTRODUCCION

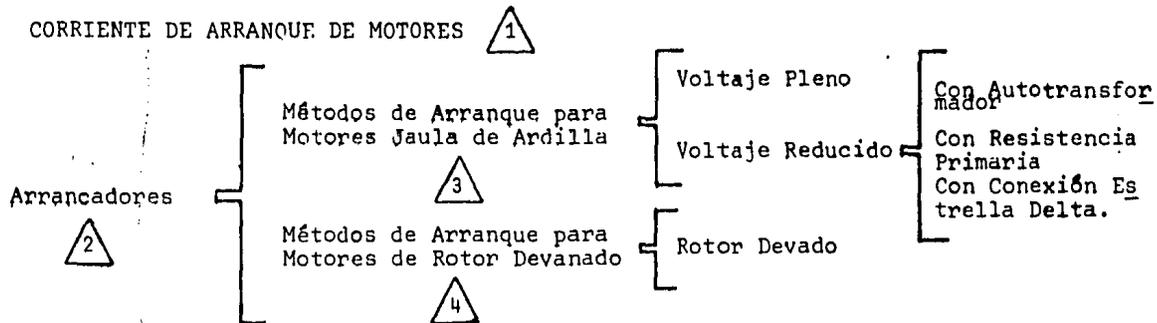
En la industria básicamente existen dos tipos generales de instalaciones eléctricas:

- a).- Las instalaciones eléctricas para alumbrado y
- b).- Las instalaciones eléctricas para fuerza ó de motores. Estudiamos estas últimas en forma particular para los motores de inducción.

Para la correcta instalación de los motores bajo las mejores condiciones técnicas y de seguridad, es necesario contar con datos tales como: tensión, frecuencia, tipo de motor, etc., y por su puesto se deberá cumplir con todas las normas técnicas de la Secretaría del Patrimonio y Fomento Industrial SEPAFIN.

CORRIENTE DE ARRANQUE DE MOTORES

CUADRO SINÓPTICO



INSTALACION ELECTRICA DE MOTORES

CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

	1	2	3	4
MATSH L;W.- Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas; Representaciones y Serv. de Ingeniería, S.A, México 1974.	CAP. 7 Sec.7-10 7-16	CAP.7 Sec.7-16	CAP.7	CAP. 7
GOURISHANKAR V.- Conversión de Energía Electromecánica; Representaciones y Serv. de Ingeniería,S.A.; México 1977.	CAP.9	CAP.9	CAP.9 Sec.9-14	CAP.9 Sec.9-14
SISKIND C,H,S.- Electrical Machines.Second Edición; International Student Edition Mc.Graw-Hill Kogarkusha,Ltd; Tokio Japón 1959	CAP.9	CAP.9	CAP.9	CAP.9

OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- 1.- Analizar los problemas que se tienen en el arranque de un motor de inducción.
- 2.- Explicar como se reduce la corriente de arranque
- 3.- Analizar los diferentes métodos que se siguen para arrancar un motor de inducción;
 - a).- Método de voltaje pleno
 - b).- Método de voltaje reducido
 - c).- Método de embobinado bipartido.
 - d).- Método de rotor devanado.
- 4.- Conocer el funcionamiento de los siguientes arrancadores;
 - a).- Arrancador automático a voltaje pleno
 - b).- Arrancador automático a voltaje reducido utilizando auto transformador.
 - c).- Arrancador automático a voltaje reducido utilizando re sistencia primaria.
 - d).- Arrancador automático a voltaje reducido utilizando co nexión estrella-delta.
 - e).- Arrancador automático utilizando embobinado bipartido
 - f).- Arrancador automático utilizando controlador de resisten cia en el rotor.
- 5.- Conocer los elementos principales que intervienen en la instalación eléctrica de un motor de inducción.

CORRIENTE DE ARRANQUE DE MOTORES

En el momento de arranque y período de aceleración el motor está sometido a su esfuerzo mas severo, en este instante el motor desarrolla un par de 125% a 275% del par de plena carga y toma una corriente de arranque de 5 a 6 veces la corriente nominal (6 de plena carga), dependiendo del tipo de diseño. Conforme el motor se acelera, va creando su propio voltaje contrario al que se está aplicando y la corriente tomada de la línea va disminuyendo.

ARRANCADORES.

Teóricamente no hay razón para que un motor de inducción no se pueda arrancar directamente de la línea, porque para la mayoría de los motores y los sistemas, los valores de corriente y par iniciales no son problema. Sin embargo debido a que en el arranque el motor toma una corriente inicial relativamente grande y esto puede causar disturbios en la línea de alimentación, e incluso el paro de otros motores conectados a la misma línea, se hace necesario el empleo de algún medio para reducir la corriente inicial.

La corriente de arranque varía directamente con el voltaje aplicado (el único factor limitante es la impedancia equivalente a rotor bloqueado), por lo tanto al bajar el voltaje baja la corriente proporcionalmente. Por otro lado el par de arranque varía con el cuadrado del voltaje aplicado. Esto es, si el voltaje se reduce al 50%, la corriente de arranque se reduce también al 50%, pero el par de arranque baja al 25%. De lo que se sigue que la corriente de arranque en un motor de inducción se podrá reducir lo más

que permita el par, es decir, que el valor mínimo del par deberá determinar el voltaje que deba aplicarse.

A continuación se dan algunos métodos de arranque de motores, (so lo los más empleados):

MÉTODOS DE ARRANQUE PARA MOTORES JAULA DE ARDILLA.

1) METODO DE VOLTAJE PLENO

Que sea ó no usado el arranque a voltaje pleno, dependerá de factores como (a) el tamaño y diseño del motor, (b) la clase de aplicación, (c) la localización del motor en el sistema de distribución y (d) la capacidad del sistema de potencia y los reglamentos que establece la C.F.E.

La fig.5.17 muestra un motor arranque de línea con un arrancador automático a voltaje pleno, este arrancador es simple, barato y fácil de instalar y mantener. El motor arranca al presionar el botón de arranque (START). Este energiza el contactor M a través de los contactos del relé de sobrecarga OL (normalmente cerrados), el cual, a su vez, cierra los contactos M; el contacto Mc también cierra para sellar el contactor principal, para que el botón de arranque pueda soltarse. La protección de sobrecarga está provista por 2 elementos térmicos OL colocados en la alimentación del motor. Si el motor se sobrecalienta, los elementos térmicos abren los contactos OL en el circuito de control para desenergizar la bobina principal; este abre los contactos M y desconecta el motor de su fuente.

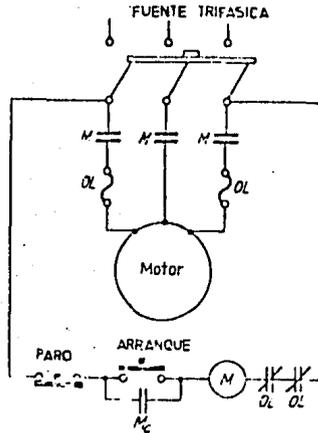


Fig.5.17.-Arrancador Automático a Voltaje Pleno.

2).- METODO DEL VOLTAJE REDUCIDO.

Dentro de este método existen tres formas de lograr que la corriente inicial sea reducida:

a).- Utilizando un Autotransformador ó Compensador.

La fig.5.18 muestra este tipo de arrancador. Consiste de 2 autotransformadores con derivaciones conectados en delta abierta, 6 contactos de arranque, 3 contactos de carrera, 2 bobinas de sobrecarga, una unidad de control de bajo voltaje bobina-boton de paro, y una manija (no mostrada) que se opera manualmente para activar el arranque y los contactos de carrera. Los autotransformadores son derivados generalmente en los puntos 50,65 y 80%, así que se puedan ajustar esos voltajes para requerimientos apropiados de par de arranque.

Al accionar la palanca montada en el exterior del gabinete hacia la posición ON, se cierran los 6 contactos del arrancador, se energizan los dos autotransformadores a través de los contactos S_1 , S_3 , S_4 y S_6 , y se aplica voltaje reducido (65% en la

Fig.5.18 (a) al motor a través de los contactos S_2 , S_4 y S_5 . Estas conexiones se muestran en la fig.5.18 (b). Después de que el rotor alcanza velocidad plena, la manija es vuelta a la posición OFF; esto abre los contactos de arranque y cierra los contactos R_1 , R_2 y R_3 . El motor ahora queda conectado a la fuente como se muestra en la fig.5.18 (c)

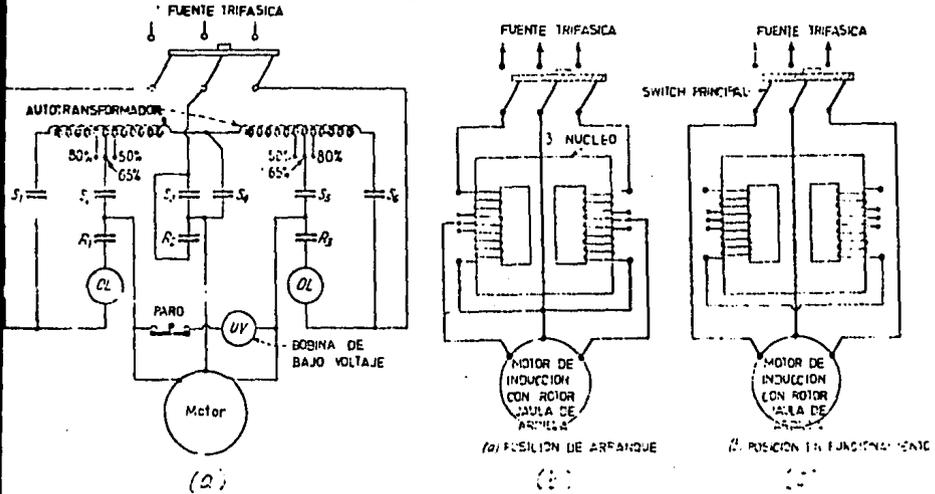


Fig.5.18.- Diagrama de un Arrancador con Autotransformador.

b). Utilizando una Resistencia Primaria,

La fig.5.19 muestra la conexión de un arrancador automático de resistencia primaria a un motor Jaula de ardilla. Consiste de 3 resistencias (idénticas), dos juegos de 3 líneas de contactos, dos contactores, un relé de tiempo, protección de sobrecarga, una estación de botones y varios contactos auxiliares. Cuando se oprime el boton de arranque, el contactor S y el relé de tiempo TR se energizan. Esto causa el cierre de los

contactos S y arranca el motor con las 3 resistencias en serie con el ; también los contactos del TR cierran para sellar el contactor S y el relé TR. Después de un tiempo de retardo dado por el relé de tiempo TR, cierran los contactos TR que hacen energizar R. Los contactos de R entonces cierran, corto circuitan las resistencias y dejan que el motor opere desde su fuente de voltaje.

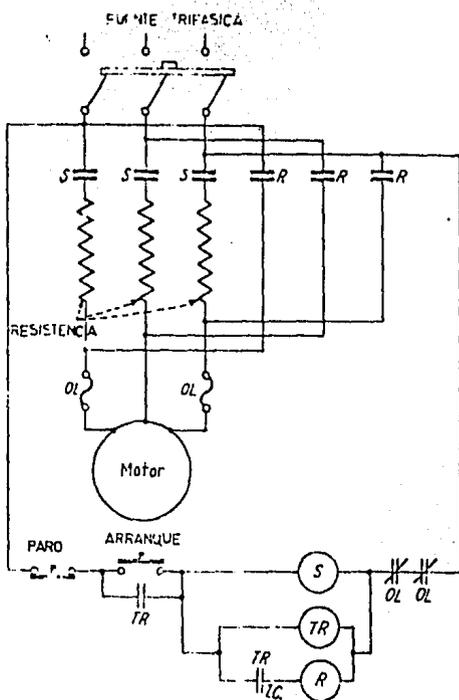


Fig.5.19.-Arrancador Automático Resistencia Primaria Conectado a un Motor Jaula de Ardilla.

c).- UTILIZANDO UNA CONEXION ESTRELLA-DELTA.

Este método es sumamente económico y se utiliza especialmente en motores que no son arrancados frecuentemente ó en donde los requerimientos de arranque no son muy severos.

La fig.5.20 muestra las conexiones para este arrancador. Al presionar el boton de arranque, los contactos M cierran y conectan las terminales a,b,c, de los embobinados a la línea, los contactos S cierran y conectan las terminales a',b',c' para formar el centro de la estrella. Después de un tiempo de retardo dado por TR, los contactos S abren y los contactos R cierran; estos últimos conectan al embobinado en delta.

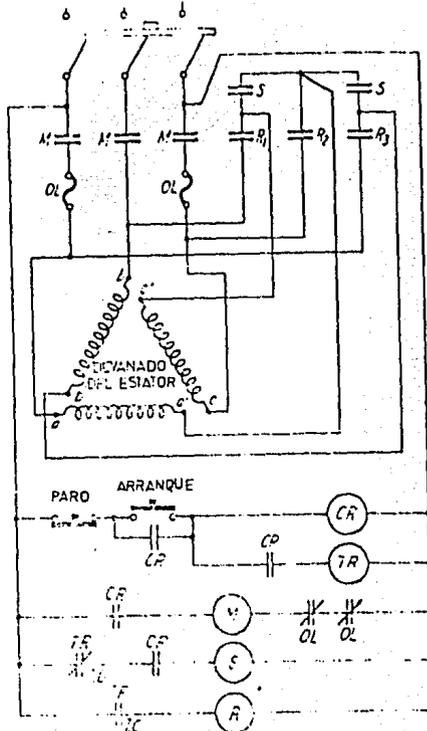


Fig.5.20.-Arrancador Automático a Voltaje Reducido Estrella-Delta.

3).- MÉTODO DE EMOBINADO BIPARTIDO.

Cuando un motor tenga un emboinado dividido en dos secciones idénticas conectadas en estrella y estas se conecten en paralelo para operación normal, el arrancador emboinado bipartido se puede emplear para limitar la corriente de arranque. El método se emplea particularmente en motores de dos voltajes, usualmente diseñados para operar en 220 V ó en 440V; en tales máquinas 9 terminales estan fuera y son marcadas como se muestra en la fig.5.21 (a). Para operación en 440V, se emplea la conexión estrella-serie formada por las uniones de T4 con T7, T5 con T8, T6 con T9 y T1, T2 y T3 quedan como terminales de línea; para operación en 220V se emplea la conexión doble-estrella-paralela, que se forma uniendo las terminales T4, T5 y T6 para formar el doble centro de estrella, las uniones de T1 y T7 T2 y T8, T3 y T9 quedan como terminales de línea de carga.

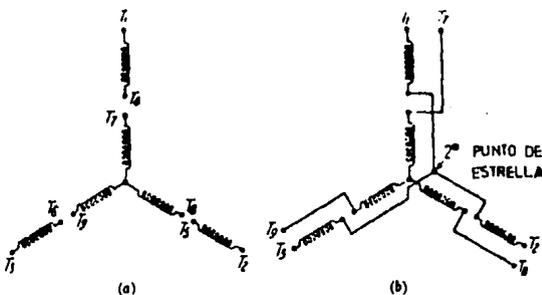


Fig.5.21.-Marcaje de Terminales y Conexión del Emboinado Estator para (a) operación Voltaje-dual (b) arranque emboinado-bipartido.

La fig.5.22 muestra un arrancador automático emboinado-biparti-

do. Al oprimir el boton de arranque, se energiza la bobina M_1 y el relé de tiempo TR; esto cierra los contactos M_c y M_1 . El motor arranca entonces con la mitad del embobinado estator conectado a la línea. Después de un retardo de tiempo dado por TR se cierra el contacto TR-T,C, se energiza la bobina M_2 y cierra el segundo arreglo de 3 contactos principales M_2 . Las dos secciones del embobinado quedan en paralelo y el motor opera normalmente como una máquina conectada en doble-estrella-papalela,

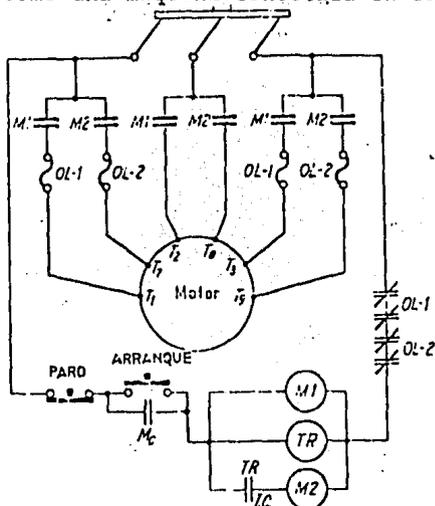


Fig.5.22.-Arrancador Automático Embobinado-Bipartido.

MÉTODOS DE ARRANQUE PARA MOTORES DE ROTOR DEVANADO.

1) MÉTODO DE ROTOR DEVANADO.

El motor de inducción de rotor devanado se usa frecuentemente cuando los requerimientos de arranque son particularmente severos. No solo es posible limitar la corriente de arranque, sino

también, la construcción del rotor ofrece dos ventajas adicionales: (1) el par de arranque se puede ajustar al par máximo del motor y (2) la velocidad del motor se puede controlar en un rango amplio. Los ajustes se hacen por la variación simultánea de tres resistencias conectadas al circuito del rotor. Esto es llevado a cabo (ver fig.5.23) utilizando un arreglo estrella de reostatos conectados a las escobillas montadas en los anillos deslizantes. En la posición OFF el rotor conectado en estrella está en circuito abierto y no gira. En la primera posición del arreglo de contactos, el controlador de resistencia conecta un valor de resistencia en cada fase de valor tal que limita la corriente en el circuito del rotor. Después que, la corriente de estator, por inducción, es igualada por un valor correspondiente de corriente, el motor arranca con entrada reducida. A medida que aumenta la velocidad del motor, gira el regulador de resistencia disminuyendo su valor de resistencia inicial, hasta llegar a su posición final donde son cortocircuitadas las 3 escobillas; es entonces cuando el embobinado del rotor es eléctricamente equivalente a un rotor Jaula de ardilla.

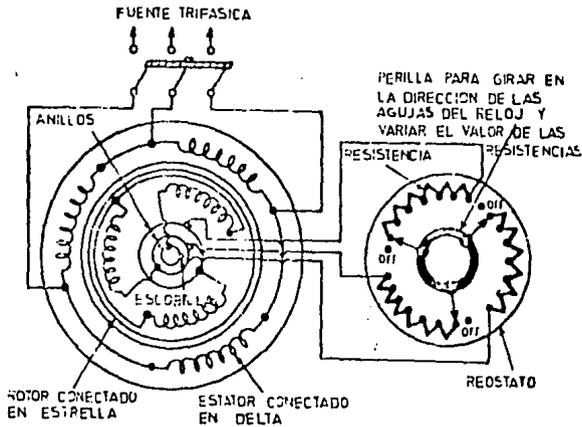


Fig.5.23.-Controlador de Resistencia Conectado a un Motor de Rotor Devanado.

INSTALACION ELECTRICA DE MOTORES.

Los elementos principales que intervienen en la instalación de motores se muestran en la fig.5.24 siguiente:

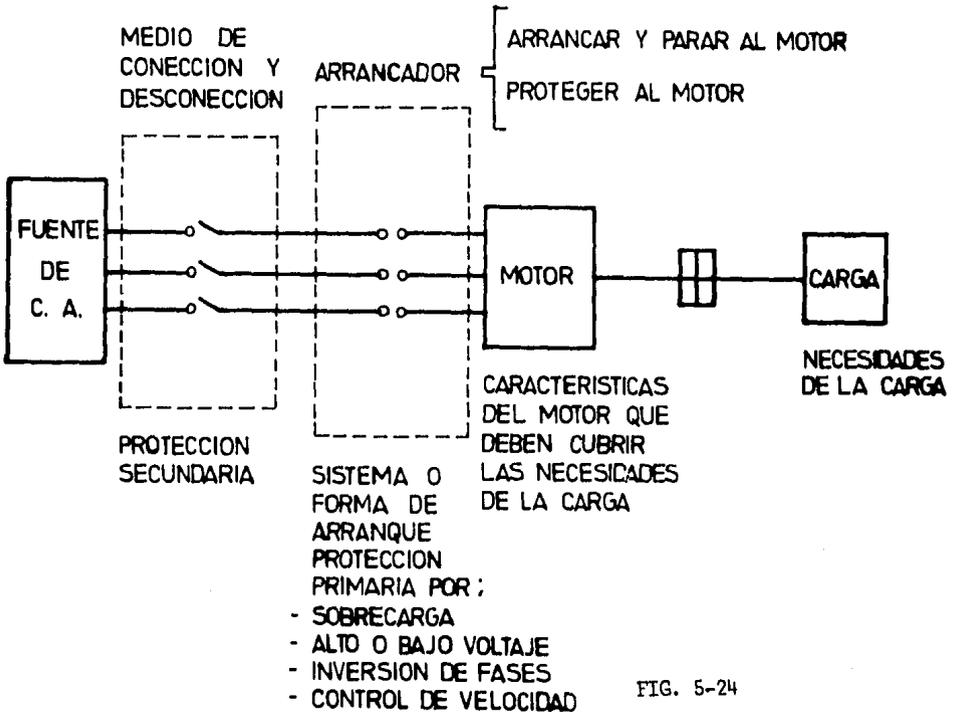


FIG. 5-24

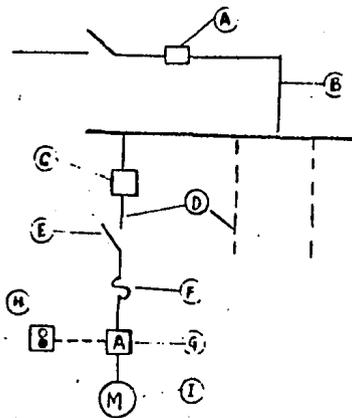


Fig.5.25.-Diagrama Unifilar que muestra la Instalación Eléctrica de un Motor.

- (A).- Protección del Alimentador Principal.-Es un interruptor que puede ser de fusibles ó automático y se debe calcular como la suma de la corriente de arranque del motor mayor,más la suma de las corrientes nominales de los demás motores conectados al mismo alimentador (si los hay).
- (B).- Alimentador Principal.-La corriente que determina el área de sección transversal del conductor alimentador, se calcula por corriente y por caída de tensión,considerando que como máximo transportará la corriente de arranque del motor de mayor potencia,más las corrientes nominales de los demás motores.
- (C).- Protección Del Circuito Derivado.-Es el interruptor que protege al conductor que alimenta al motor individual mente, y que debe permitir el paso de la corriente de arranque del motor.
- (D).- Circuito Derivado.-Los conductores que van desde el último dispositivo de protección hasta la carga, se determinan considerando que la corriente que deben soportar es la corriente de arranque del motor.

- (E).- Medio de Desconexión.-Este dispositivo permite aislar el motor del resto del sistema, puede ser manual ó automático y normalmente no opera sin carga.
- (F).- Protección del Motor.- Se protege al motor contra una sobrecorriente que pueda ser causada por una sobrecarga en el motor ó por un corto-circuito en el mismo. La capacidad del interruptor debe ser de un valor no tan bajo que no permita el paso de la corriente de arranque, ni tan alto que no proteja al motor contra corto-circuito.
- (G).- Arrancador.-La función de este dispositivo es arrancar y parar el motor, debe ser capaz de abrir con carga y disponer de un mecanismo supresor de arco.
- (H).- Estación de Botones.-Es un dispositivo que permite operar el motor local o remotamente. Generalmente tiene un boton de paro y otro de arranque.
- (I).- Motor.- En general son tres los datos básicos que hay que conocer para seleccionar un motor:
- a).- La velocidad ó velocidades de operación
 - b).- La capacidad requerida en H.P.
 - c).- Los pares requeridos en puntos críticos del ciclo de operación.

C U E S T I O N A R I O

I.- INDIQUE SI ES FALSA O VERDADERA CADA UNA DE LAS ASEVERACIONES SIGUIENTES:

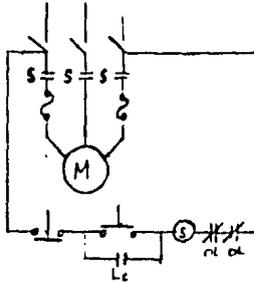
- | | FALSO | VERDADERO |
|--|-------|-----------|
| 1) Es en el instante del arranque que el motor toma un valor de corriente que es de 5 a 6 veces la corriente nominal. | () | () |
| 2) El arrancador es un dispositivo eléctrico sirve para arrancar y proteger al motor. | () | () |
| 3) El valor mínimo del par de arranque que se necesita para mover la carga del motor, es el que determina el valor mínimo de voltaje que debe aplicarse en el instante del arranque de un motor de inducción, para disminuir la corriente de arranque. | () | () |
| 4) Los métodos para arrancar un motor Jaula de Ardilla son: | | |
| a) Voltaje Pleno, | | |
| b) Voltaje Reducido | () | () |
| c) Embobinado Bipartido | | |
| 5) El método de arranque a Voltaje Reducido emplea un autotransformador, una resistencia primaria, o bien una conexión estrella-delta en el estator. | () | () |
| 6) El método de arranque Embobinado Bipartido solo se emplea si el embobinado de estator esta dividido en dos secciones idénticas conectadas en estrella y estas se conectan en paralelo para operación normal. | () | () |
| 7) En el método de arranque Rotor Devanado se emplea un arreglo estrella de reostatos conectados a las escobillas montadas en los anillos deslizantes, cuyo valor de cada resistencia se va disminuyendo conforme aumenta la velocidad del motor. | () | () |

(Continuación CUESTIONARIO)

FALSO VERDADERO

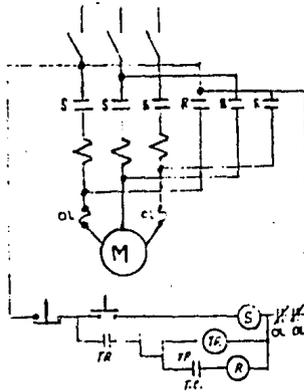
- 8) La siguiente figura representa un arrancador automático a tensión reducida tipo Resistencia Primaria conectado a un motor Jaula de ardilla.

() ()



- 9) El siguiente circuito representa un arrancador automático a tensión plena conectado a un motor Jaula de Ardilla.

() ()



II. EXPLICAR EN QUE CONSISTE EL METODO DE ARRANQUE ROTOR DEVANADO.

III. HACER UN DIAGRAMA UNIFILAR QUE MUESTRE LOS ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN LA INSTALACION DE UN MOTOR.

TEMA VI.

MOTORES MONOFASICOS DE INDUCCION.

OBJETIVO GENERAL

Analizar la manera como operan, los motores monofasicos de inducción, los problemas de arranque y los distintos medios que se siguen para resolverlos.

INTRODUCCION

Un gran número de motores pequeños ó de potencia fraccionaria son diseñados para operar en sistemas monofásicos, teniendo amplia aplicación en el hogar, la oficina, la industria y en general en cualquier lugar donde se disponga de electricidad.

Los fabricantes de motores han desarrollado varios tipos de tales máquinas, cada tipo tiene características de operación bien definidas. Por ejemplo un tipo opera satisfactoriamente en C.D. o en C.A. a cualquier frecuencia arriba de 60 C.P.S, otro gira a velocidad absolutamente constante, sin consideración de la carga; otro desarrolla un par de arranque considerable; y sin embargo otro, aunque no es capaz de desarrollar un elevado par de arranque, es en cambio muy barato y muy fuerte.

El tipo de motor que funciona en C.D. ó C.A. hasta de 60 c.p.s es el motor serie de C.D., y puesto que puede conectarse a cualquier fuente de suministro se le conoce tambien con el nombre de Motor Universal.

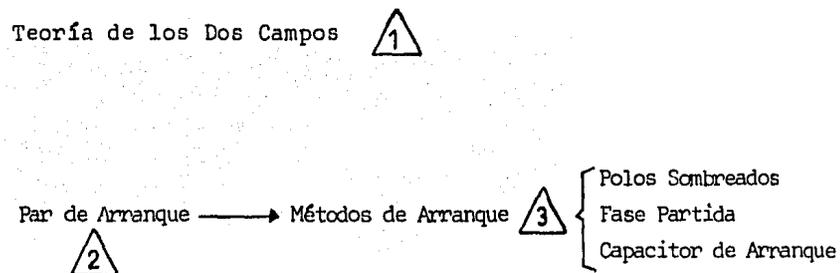
Los elementos mecánicos de un motor monofásico de inducción, son los mismos que los del motor polifásico de inducción. En el motor monofásico su flujo

ó firm es PULSATORIO. En los motores polifásicos como ya lo vimos su flujo ó firm es GIRATORIO.

Los métodos usados para arrancar motores de inducción monofásicos incorporan una característica para producir un campo magnético rotatorio en el punto de reposo y se clasifican de la siguiente manera.

- a).- Motor de Fase Partida
- b).- Motor de Arranque con Capacitor (Ejemplo: Los motores de las lavadoras, el motor de los refrigeradores etc.)
- c).- Motor de polos sombreados (Ejemplo: El motor utilizado en los tocadis - cos).
- d).- Motor Universal (Ejemplo: El motor de licuadora, taladro, mezcladoras, aspiradoras etc).

En el presente trabajo se presenta un análisis cualitativo del motor monofasio de inducción; para un estudio cuantitativo de este tema se recomienda estudiar la bibliografía indicada en el cuadro de referencias bibliográficas.



CUADRO DE REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

	1	2	3
Matsh L.W.- Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas; Representaciones y Serv. de Ingeniería, S.A.; México, 1974.	CAP.7 Sec.20	CAP.7 Sec.19	CAP.7
Gourishankar V.-Conversión de Energía Electromecánica; Representaciones y Serv. de Ingeniería,S.A.; México 1977.	CAP.9 Sec.13	CAP.9 Sec.14	CAP.9 Sec.15
Siskind CH.S.-Electrical Machines.Second Edición; International Student Edition Mc.Graw-Hill Kogakusha; Ltd; Tokio Japón 1959.	CAP.7	CAP.7	CAP.7
Langsdorf A,S.- Teoría de las Máquinas de C.A.; Mc.- Graw-Hill; México 1977.	CAP.9	CAP.9	CAP.9

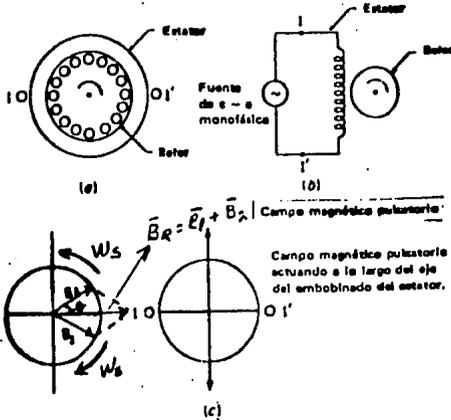
OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1.- Descomposición de un campo magnético pulsatorio en dos campos magnéticos giratorios.
- 2.- Analizar el arranque de los motores monofásicos.
- 3.- Métodos de arranque:
 - a) Polos sombreados
 - b) Fase partida
 - c) Capacitor de arranque
- 4.- Especificaciones de los motores monofásicos

TEORIA DE LOS DOS CAMPOS

Cuando se aplica un voltaje senoidal de C.A. al estator se establece un campo también senoidal a lo largo del eje de la bobina, como se muestra en la fig.

6-1.



Un motor de inducción monofásico de polos salientes. (a) Una vista de la sección transversal. (b) Una representación esquemática. (c) Eje del campo magnético pulsante debido a la corriente del estator.

Fig.6-1

Si la corriente en el estator es $i(t) = I_{max} \cos \omega_1 t$, el valor pico de la densidad de flujo será: $b_{pico}(t) = B_{max} \cos \omega_1 t$.

La densidad de flujo en cualquier punto R, a α radianes eléctricos del eje de la bobina estará dada por:

$$b_R(\alpha, t) = b_{pico}(t) \cos \alpha = B_{max} \cos \alpha \cos \omega_1 t$$

esta ecuación se puede escribir como:

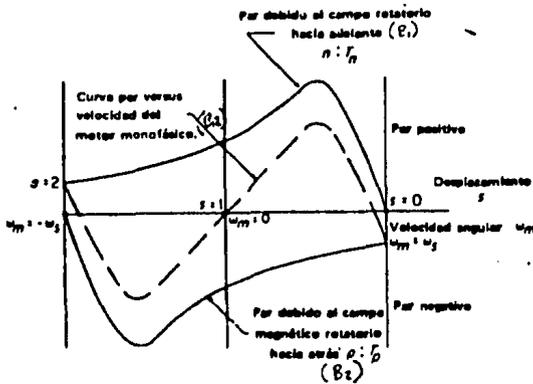
$$b_R(\alpha, t) = 1/2 B_{max} [\cos(\alpha - \omega_1 t) + \cos(\alpha + \omega_1 t)]$$

$$\delta b_R(\omega t) = b_n(\omega t) + b_p(\omega t)$$

donde $b_n(\omega t) = 1/2 B_{max} \cos(x - W_1 t)$ representa un campo magnético giratorio, de amplitud $1/2 B_{max}$, que gira en sentido a manecillas.

Similarmente $b_p(\omega t) = 1/2 B_{max} \cos(\omega t - W_1 t)$ representa un campo magnético giratorio que gira en sentido contrario a manecillas.

De lo anterior se observa que un campo magnético pulsatorio puede descomponerse en dos campos magnéticos giratorios opuestos de magnitud igual a un medio de la amplitud del campo pulsatorio. Los dos campos giratorios n y p inducen corrientes en el rotor y pares mecánicos son producidos (véase la sec. Inducción en el Rotor; Módulo 1, Unidad 4). Si se obtienen las curvas par-velocidad para cada uno de los campos giratorios y luego se suman algebraicamente, se obtiene la curva par-velocidad para el motor monofásico. Esto se muestra en la fig. 6-2.



Característica par versus velocidad angular de un motor de inducción monofásico, obtenida por medio de la teoría de campo rotatorio doble. La dirección de las manecillas del reloj se considera como la dirección hacia adelante.

Fig. 6-2.

PAR DESARROLLADO POR EL MOTOR MONOFASICO.

Se ve de la fig.6-2 que un motor de inducción monofásico desarrolla par en cualquier dirección en que se arranque, pero no tiene par de arranque. Se usan varios métodos para hacer que el motor monofásico arranque por si solo. El par de arranque se provee creando un efecto polifásico. Algunos métodos se describen a continuación:

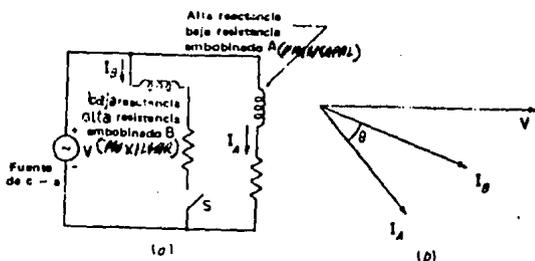
METODOS DE ARRANQUE:

Ha sido ya mencionado que en contraste con el motor polifásico, el motor monofásico no tiene par de arranque. Para que el motor monofásico arranque debe producirse ya sea un flujo giratorio semejante al del motor polifásico, o bien debe incluirse un colector con escobillas en el rotor. Para producir un flujo giratorio en reposo es necesario un segundo arrollamiento (embobinado auxiliar ó de arranque) en el estator en adición al embobinado principal.

- Fase Partida.

Los motores de fase partida son los motores monofásicos más utilizados. El estator está provisto de dos embobinados en cuadratura espacial. (producen campos magnéticos en cuadratura). el embobinado principal A tiene una alta reactancia y una baja resistencia comparada con el embobinado auxiliar B. Ambos embobinados se conectan en paralelo durante el arranque y cuando el motor alcanza el 75% de su velocidad nominal, un interruptor centrífugo sensitivo de velocidad automático desconecta el embobinado auxiliar. La fig. 6-3 muestra el diagrama esquemático.

Como las impedancias de los dos embobinados son desiguales, las corrientes que circulan en ellos no están en fase (ver fig. 6-3b). El efecto combinado de las corrientes defasadas en tiempo y el hecho de que circulan en dos embobinados en cuadratura espacial, produce un campo magnético giratorio que hace girar el rotor.



Un motor de inducción de fase dividida. (a) Representación esquemática del estator. (b) Diagrama con θ mostrando las corrientes en los embobinados del estator. (El rotor que se muestra en la figura no se muestra)

FIG. 6-3

MOTOR DE FASE AUXILIAR CON RESISTENCIA DE ARRANQUE.-

Puede llevarse a cabo un incremento del ángulo θ de la fig. 6-3 (b) y del par de arranque insertando una resistencia en serie con el embobinado de arranque. Esta resistencia debe desconectarse junto con el embobinado de arranque alrededor del 70% de la velocidad sincrónica.

MOTOR DE FASE AUXILIAR CON REACTANCIA DE ARRANQUE.-

Insertando una reactancia en serie con el embobinado principal se tiene el mismo efecto que la inserción de una resistencia en serie con el embobinado de arranque. Esta reactancia debe ponerse en circuito corto, ó de otra manera se hace inefectiva, cuando se abre el embobinado de arranque por el interruptor centrífugo.

- CAPACITOR DE ARRANQUE.-

Para vencer la falta de un par de arranque suficiente en el motor estandar de fase partida, se adiciona un capacitor en el circuito del embobinado auxiliar como se muestra en la fig.6-4. El hacer esta adición causa que el defasamiento entre la corriente del embobinado principal y la corriente del embobinado auxiliar sea más próximo a los 90 grados eléctricos (ver fig.6.4b). Como el par de arranque de un motor de fase partida es proporcional al seno del

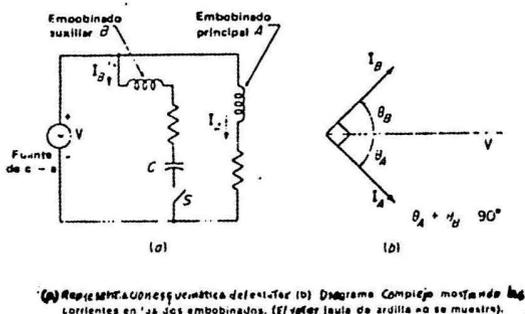


Fig. 6 - 4

ángulo de defasamiento entre las corrientes de arranque principal y auxiliar, el adicionar el capacitor implica incrementar el par de arranque en aproximadamente dos y medio veces.

Los motores con condensador de arranque se construyen de 1/8 a 10 H.P. Para una tensión de línea de 110 Volts. el tamaño del condensador es de 70-90 μf . para motores de 1/8 H.P., de 120 - 150 μf . para motores de 1/4 de H.P. para el motor de 1/2 el capacitor es de 230 - 280 μf y para un motor de 1 H.P.

el capacitor es de 340 - 410 *μf.*

Como en el motor de fase dividida, el embobinado de arranque del motor con condensador se abre por un interruptor centrífugo alrededor del 70% de su velocidad sincrónica.

CAPACITOR PERMANENTE.

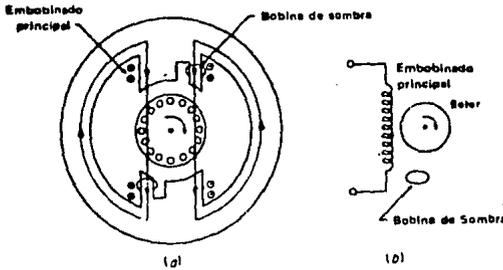
En este tipo de motor el embobinado de arranque y el condensador están diseñados para funcionar de manera permanente, proporcionando un motor bifásico desequilibrado.

El motor de fase auxiliar con condensador permanente utiliza el mismo condensador para el arranque y la marcha y, por lo tanto, tiene un par de arranque pequeño.

- SOMBREANDO LOS POLOS.- En el motor de polos sombreados la estructura magnética del estator se construye con polos salientes. La fig. 6-5 muestra la construcción de los polos y la manera como un anillo ó collar se coloca alrededor de una parte del polo (se le conoce como parte sombreada del polo).

El embobinado principal del estator, la pieza polar y el anillo forman un transformador con el secundario en corto circuito. Cuando se aplica un voltaje al estator se establece un campo magnético que enlaza al anillo y le induce un voltaje (por ley de Faraday) que hace circular una corriente, esta corriente crea un flujo magnético que se opone al cambio en el flujo de excitación (por Ley de Lenz). Consecuentemente el flujo que enlaza la parte sombreada del polo alcanza su valor máximo mas tarde que el flujo de excitación, ocasionando con esto que el flujo magnético resultante cambie de la parte no sombreada del polo a la parte sombreada del polo, creándose

así el efecto de un campo magnético giratorio que ejerce un par en el rotor estacionario y lo hace girar.



Un motor de inducción de polos sombreados. (a) Una vista de la sección transversal. (b) Una representación esquemática

Fig. 6-5

MOTOR UNIVERSAL

PRINCIPIO DE OPERACION.-

Este motor conocido también como motor serie de corriente directa (C.D), puede operar en corriente directa o en corriente alterna (C.A.) porque la dirección del par es determinada por la polaridad del campo y la dirección de la corriente a través de la armadura.

La fig. (6-6) representa un motor serie de dos polos en el cual el par produce rotación contraria a las manecillas del reloj para ambas direcciones del flujo de corriente.

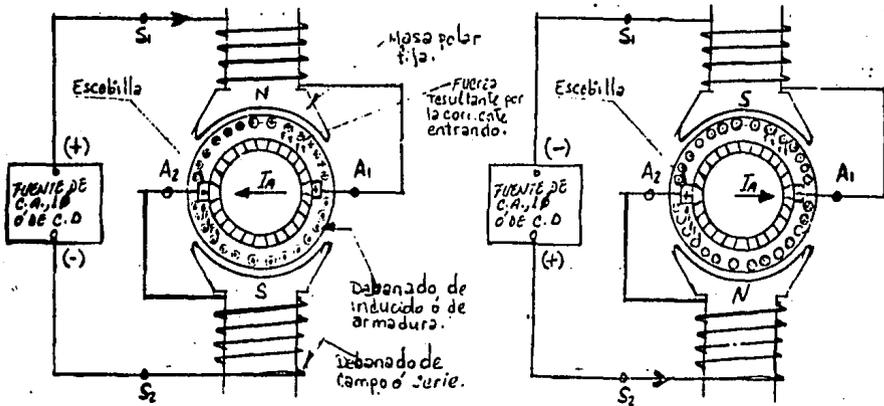


Fig.6-6.- Motor serie mostrando que la dirección de rotación no cambia cuando la polaridad de la línea se invierte.

Puesto que la misma corriente que pasa a través del debanado de campo pasa a través del debanado de armadura, cuando la corriente alterna cambia de positivo a negativo, y viceversa, simultáneamente afecta la polaridad del campo y la dirección de la corriente en los conductores de armadura.

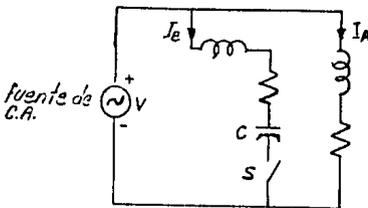
En la fig. 6-6 (a) se muestra la polaridad de la fuente como correspondería a la primera mitad del ciclo de una onda de C.A., los polos norte y sur que corresponden al sentido de la corriente y a la manera como ha sido debanado el embobinado de campo son mostrados también.

Con la corriente a través de la armadura de derecha a izquierda se asume que las corrientes en los conductores de armadura entran en el lado norte (mostradas con cruces en la figura) y salen en el lado sur (mostradas con puntos). Puesto que la tendencia de un motor a producir rotación, depende del flujo creado por los polos principales y la corriente que fluye en el embobinado de armadura, se observa que la armadura girará en sentido contrario a manecillas. Cuando las polaridades de la fuente de alimentación se invierten, como correspondería a la segunda mitad del ciclo de una onda de C.A., los polos se invierten. La corriente a través de la armadura ahora será de izquierda a derecha y las corrientes que entran y salen (cruces y puntos) en los conductores de armadura por lo tanto se invierten. La fig. 256 (b) representa esas condiciones, de la cual se puede observar que la armadura continuará girando en sentido contrario a las manecillas del reloj.

CUESTIONARIO

I.- Indique si es falsa o verdadera cada una de las aseveraciones siguientes:

- | | FALSA | VERDADERA |
|--|-------|-----------|
| 1).- Un campo magnético pulsatorio puede descomponerse en dos campos magnéticos giratorios opuestos de magnitud igual a un medio de la amplitud del campo pulsatorio. | () | () |
| 2) Los campos magnéticos giratorios producto del campo pulsatorio, producen par en cualquier dirección en que se arranque el motor monofásico, pero no producen par de arranque. | () | () |
| 3) En el motor monofásico de polos sombreados el estator está provisto de dos embobinados en cuadratura espacial. | () | () |
| 4) En el motor monofásico de fase partida la estructura magnética del estator se construye con polos salientes. | () | () |
| 5) El siguiente esquema representa el estator de un motor de inducción monofásico de fase dividida. | () | () |

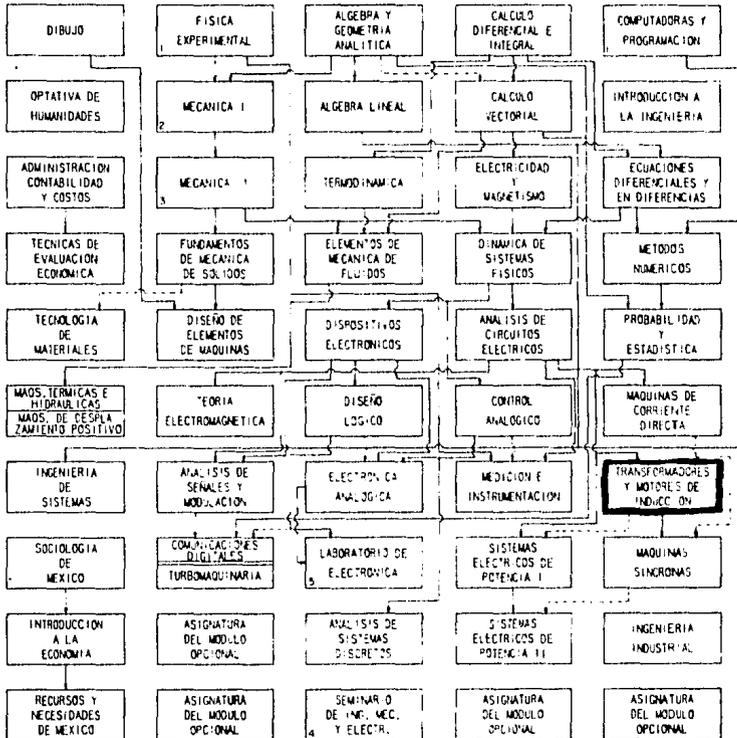


II.- Explicar en que consiste el método de arranque de polos sombreados.

III.- Explicar en que consiste el método de arranque de fase partida.

CARRERA DE INGENIERO MECANICO-ELECTRICISTA

AREA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA



MODULOS OPCIONALES DEL AREA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

MODULO DE SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA	MODULO DE UTILIZACION DE ENERGIA ELECTRICA	MODULO DE COMUNICACIONES	MODULO DE ELECTRONICA	MODULO DE COMPUTACION
-PROTECCION DE SISTEMAS ELECTRICOS	-INSTALACIONES ELECTRICAS E ILUMINACION	-AMPLIFICACION DE SEÑALES	-AMPLIFICACION DE SEÑALES	-ELECTRONICA DIGITAL
-PLANTAS GENERADORAS	-SISTEMAS DE TRANSPORTE ELECTRICO	-RADIACION Y PROPAGACION	-ELECTRONICA DIGITAL	-DISEÑO DE SISTEMAS DIGITALES
-SISTEMAS DE DISTRIBUCION	-ELECTRONICA DE POTENCIA	-SISTEMAS DE COMUNICACIONES	-CONTROL DIGITAL	-ORGANIZACION DE COMPUTADORAS
-OPTATIVA DEL MODULO	-OPTATIVA DEL MODULO	-OPTATIVA DEL MODULO	-OPTATIVA DEL MODULO	-OPTATIVA DEL MODULO
• OPERACION DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA	• CONTROL INDUSTRIAL	• CIRCUITOS PARA COMUNICACIONES	• ELECTRONICA DE POTENCIA	• REDES DE COMPUTADORAS
• INSTALACIONES ELECTRICAS E ILUMINACION	• SISTEMAS DE DISTRIBUCION	• SISTEMAS DE COMUNICACIONES I	• INSTRUMENTACION ELECTRONICA	• CONTROL DIGITAL
• TEMAS SELECTOS DE SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA	• TEMAS SELECTOS DE UTILIZACION DE ENERGIA ELECTRICA	• TEMAS SELECTOS DE COMUNICACIONES	• TEMAS SELECTOS DE ELECTRONICA	• TEMAS SELECTOS DE COMPUTADORAS

1. NUEVA MATERIA OBLIGATORIA PARA LOS ALUMNOS QUE INGRESARON A LA CARRERA A PARTIR DE OCTUBRE DE 1979.
 2. SI EL ALUMNO NO PUEDE CURSAR SIMULTANEAMENTE MECANICA I Y CALCULO VECTORIAL, SE SUGIERE QUE CURSE PRIMERO CALCULO VECTORIAL.
 3. SI EL ALUMNO NO PUEDE CURSAR SIMULTANEAMENTE MECANICA II Y ECUACIONES DIFERENCIALES Y EN DIFERENCIAS, SE SUGIERE QUE CURSE PRIMERO ECUACIONES DIFERENCIALES Y EN DIFERENCIAS.
 4. SE REQUIEREN 310 CREDITOS.
 5. NUEVA MATERIA OBLIGATORIA PARA LOS ALUMNOS QUE HASTA EL SEMESTRE EN CURSO NO HAN ACREDITADO LAS MATERIAS DE DISEÑO LOGICO Y/O ELECTRONICA ANALOGICA.
- PREREQUISITOS ACADEMICOS NECESARIOS PREREQUISITOS ACADEMICOS CONVENIENTES
- PARA CURSAR LAS ANTERIORES DE LAS MATERIAS DE LOS MODULOS OPCIONALES, CONSULTAR AL COORDINADOR DE LA CARRERA LA POSICION DE LAS MATERIAS EN EL DIAGRAMA INDICA LA SECUENCIA EN QUE DEBE CURSARLAS PARA ACREDITARLAS

Asignatura: TRANSFORMADORES Y MOTORES DE INDUCCION

ANTECEDENTES, OBJETIVO Y CONTENIDO DE LOS TEMAS:

1. **CARACTERÍSTICAS DE LOS CIRCUITOS MAGNÉTICOS**
ANTECEDENTES: Electricidad y Magnetismo, Análisis de Circuitos Eléctricos.
OBJETIVO: El alumno analizará el comportamiento de las variables eléctricas y magnéticas en circuitos magnéticos excitados con C.D. y C.A.
CONTENIDO: Concepto de circuito magnético, leyes y parámetros del circuito magnético. Excitación de núcleos ferromagnéticos (sin y con entrelaço) con C.D. Curvas magnetización, saturación. Área de histéresis, energía magnética almacenada. Excitación de núcleos ferromagnéticos (sin y con entrelaço) con C.A. Flujo en el núcleo. Corriente de excitación. Pérdidas por histéresis. Análisis de la corriente de excitación. Pérdidas por corrientes parásitas. Loss en el núcleo. Factor de pila. Reactor con núcleo ferromagnético. Circuito equivalente.
2. **TEORÍA DEL TRANSFORMADOR**
ANTECEDENTES: Tema 1 de este curso.
OBJETIVO: El alumno conocerá las características de operación de los transformadores y analizará su comportamiento bajo diversas condiciones de carga.
CONTENIDO: Estructura del transformador. E.P.F. inducidas en los devanados. Relación de transformación. Polaridad. Reducción del circuito equivalente. Determinación de los parámetros. Circuitos equivalentes aproximados y diagrama de fasores. Análisis de comportamiento bajo distintas condiciones de carga. Regulación. Eficiencia. Por ciento y por unidad de impedancia. Síntesis y aplicación de estos parámetros. Transformadores de potencial. Transformadores de corriente. Nociones de diseño. Fórmulas teóricas y empíricas.
3. **OPERACION DEL TRANSFORMADOR EN SISTEMAS ELÉCTRICOS.**
ANTECEDENTES: Tema 2 de este curso.
OBJETIVO: El alumno describirá las conexiones de los transformadores al integrarlas a un sistema eléctrico, sus auxiliares y aplicará los criterios de selección de equipo para un uso específico.
CONTENIDO: Conexiones de transformadores monofásicos en sistemas monofásicos y trifásicos. Requisitos de polaridad, relación de transformación, impedancia, secuencia de fases y desplazamiento angular. Transformadores trifásicos. Características y Ventajas. Auxiliares del transformador: tanque, boquillas, aceite, sistemas de enfriamiento. Clasificación. Requisitos de elementos de una subestación. Especificaciones de transformador y criterios de selección.
4. **MOTORES POLIFÁSICOS DE INDUCCIÓN**
ANTECEDENTES: Temas 1 y 2 de este curso.
OBJETIVO: El alumno conocerá los principios de operación del motor de inducción y analizará su comportamiento bajo distintas condiciones de carga.
CONTENIDO: Estructura del motor polifásico de inducción. Armadura, campo giratorio y velocidad síncrona. Inducción en el rotor. Análogo con el transformador. Aislamiento y velocidad real. Circuito equivalente. Análisis del circuito equivalente bajo diferen-

ANTECEDENTES, OBJETIVO Y CONTENIDO DE LOS TEMAS:

- tes regímenes de carga. Tipos de embobinados de rotor, curvas de velocidad, normas y clasificación. Especificaciones.
5. **INSTALACION DE MOTORES DE INDUCCION.**
ANTECEDENTES: Tema 4 de este curso.
OBJETIVO: El alumno seleccionará el motor y equipo auxiliar para un uso específico y proyectará su instalación.
CONTENIDO: Corrientes de arranque de motores, objeto, características y especificaciones de los arrancadores. Protección. Selección de motores, arrancadores, elementos de protección, cables y conexiones. Diagrama e instalación.
6. **MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUCCION**
ANTECEDENTES: Tema 4 de este curso.
OBJETIVO: El alumno analizará la posibilidad de operación en una fase, los problemas de arranque y distintas opciones para obtener el arranque.
CONTENIDO: Tendría de los dos campos. Par de arranque. Diferentes embobinados de arranque. Clasificación.