



INSTITUTO
SUPERIOR
TECNOLÓGICO
LUIS ROGERIO
GONZALEZ

2022

GUIA DIDACTICA MÁQUINAS ELÉCTRICAS I

GUIA MÁQUINAS
ELÉCTRICAS I

FERNANDO PATRICIO
ARÉVALO SALAMEA

© 2022, Instituto
Superior Tecnológico
Luis Rogerio González

ISBN: XX

Agosto de 2022

EDICIÓN: Instituto
Superior Tecnológico Luis
Rogerio González

Corrección de textos:

Xx

Portada y contraportada:

Xx

Pares revisores:

Xx

Impresión:

Imprenta general de la
Universidad de Cuenca

Honorato Loyola 2-80 y

Agustín Cueva

Cuenca- Ecuador

Telf: 4051000 ext. 1437

Ing. Sandra Pesántez, Msg.

Rectora del Instituto
Superior Tecnológico Luis
Rogerio González

Lcda. Rosana Moscoso,
Msg.

Vicerrectora del Instituto
Superior Tecnológico Luis
Rogerio González

Ing. Sebastián Guamán,
Msg.

Coordinadora de Carrera de
Tecnología Superior en
Electricidad

Arq. Karla Alvarado, Msg.

Coordinadora de la Unidad
de Investigación,
Desarrollo Tecnológico e
Innovación

Unidad de Investigación,
Desarrollo Tecnológico e
Innovación

Instituto Superior
Tecnológico Luis Rogerio
González

10 de agosto y Cacique
Tenemaza

Azogues, Ecuador

Contenido

Descripción de la asignatura	8
Objetivo General	9
Objetivos Específicos.....	10
UNIDAD 1: Introducción a los Sistemas Electromecánicos	10
Resultados de aprendizaje de la unidad	10
Introducción	10
1.1. Relaciones fundamentales y características de funcionamiento de las máquinas	12
1.1.2. Relación entre inducción electromagnética y fuerza electromagnética	15
1.2. Campo magnético	16
1.3. Ley de Faraday.....	20
UNIDAD 2: Transformadores.....	22
Resultados de aprendizaje de la unidad	22
Introducción	23
2.1. Principio de funcionamiento	25
2.2. Tipos y construcción de transformadores....	27
2.2.1. Características constructivas.....	27
2.2.2. Tipos de transformadores	30
2.2.2.1. Nivel de voltaje.....	32
2.2.2.2. Transformadores de medida	34
2.2.2.3. Autotransformadores.....	35
2.2.2.4. Transformadores trifásicos	36
2.3. Transformador ideal.....	39
2.4. Circuito equivalente	45

UNIDAD 3: Máquinas síncronas de corriente alterna ..	49
Resultados de aprendizaje de la unidad	49
Introducción	49
3.1. Máquinas síncronas.....	50
Construcción.....	51
3.2. Generador síncrono	58
3.3. Motor síncrono.....	59
3.4. Diagramas y configuraciones	60
3.4.1. Circuito equivalente del generador síncrono	60
3.4.2. Circuito equivalente del motor síncrono	67
3.4.3. Arranque de motores síncronos.....	69
UNIDAD 4: Máquinas asíncronas de corriente alterna	69
Resultados de aprendizaje de la unidad	69
Desarrolla los diagramas y configuraciones de máquinas síncronas.....	70
Introducción	70
4.1. Motores trifásicos asíncrono.....	70
4.1.1. Desarrollo del par inducido	72
4.1.2. Deslizamiento del rotor.....	73
4.1.3. Frecuencia del rotor	74
4.2. Circuito equivalente	75
4.2.1. Modelo de transformador.....	75
4.2.2. Modelo de circuito del rotor	77
4.2.3. Circuito equivalente final	79
Bibliografía	80

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Ciclo de la Electricidad</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2. Principio de producción de campos magnéticos.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3. Principio de funcionamiento de transformadores</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4. Principio de funcionamiento de motores</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5. Principio de funcionamiento de generadores</i>	<i>19</i>
<i>Figura 6. Ley de Faraday, representación gráfica</i>	<i>22</i>
<i>Figura 7. Partes del transformador</i>	<i>27</i>
<i>Figura 8. Estructura del núcleo de un transformador ...</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9. Diseño del núcleo de un transformador</i>	<i>30</i>
<i>Figura 10. Transformador elevador.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 11. Transformador reductor</i>	<i>33</i>
<i>Figura 12. Transformadores de medida.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 13. Esquema de un autotransformador.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 14. Tipos de conexión de transformadores trifásicos</i>	<i>39</i>
<i>Figura 15. Circuito equivalente exacto de un transformador</i>	<i>46</i>
<i>Figura 16. Circuito equivalente simplificado del transformador, referenciado al primario (a) o referenciado al secundario (b)</i>	<i>48</i>
<i>Figura 17. Partes constitutivas de una máquina eléctrica giratoria</i>	<i>52</i>
<i>Figura 18. Máquina síncrona con el inducido en el rotor</i>	<i>57</i>
<i>Figura 19. Máquinas síncronas con el inducido en el estator, de polos salientes (a) y de polos lisos (b)</i>	<i>57</i>
<i>Figura 20. Circuito equivalente de un generador síncrono.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 21. Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico</i>	<i>65</i>

Figura 22. Configuración de generadores síncronos trifásicos, en estrella o Y (a) y en triángulo o D (b)	66
Figura 23. Simplificación del circuito equivalente de un generador síncrono	67
Figura 24. Circuito equivalente de un motor síncrono trifásico, completo (a) y simplificado (b)	68
Figura 25. Modelo de transformador de un motor	77
Figura 26. Modelo del circuito del rotor, de forma general (a) y referenciado al rotor (b)	78
Figura 27. Circuito equivalente de un motor asíncrono simplificado	80

Descripción de la asignatura

La asignatura correspondiente al área curricular de formación profesional busca proporcionar los conocimientos necesarios sobre las máquinas eléctricas de manera general, y en el caso particular de este módulo, las máquinas eléctricas de corriente alterna. En esta asignatura los estudiantes aprenderán todos aquellos conceptos y fenómenos físicos que se han aprovechado para dar funcionamiento a las diferentes máquinas eléctricas que conocemos hoy en día, posteriormente se estudiarán cada una de las máquinas eléctricas, puntualmente se abordaran los transformadores, las máquinas síncronas de corriente alterna y las máquinas asíncronas de corriente alterna, de las cuales se tocaran aspectos como su principio de funcionamiento, partes constitutivas, variantes constructivas, aplicaciones y usos, así como sus parámetros de operación. Para que la construcción del conocimiento sea integral, el estudiante recibirá los contenidos por medio de dos métodos interrelacionados y mutuamente complementarios, en primer lugar, la parte teórica en la que se sentaran todas las bases necesarias sobre los conceptos inherentes a las máquinas eléctricas, generando así

las primeras nociones sobre las mismas; luego se desarrollará la parte práctica en la que el estudiante tendrá la oportunidad de consolidar sus conocimientos teóricos en base a la observación, manipulación y operación de las máquinas antes citadas. Todos los temas antes mencionados se tratarán sin olvidar que la formación debe ser de carácter integral, por lo que se desarrollará la materia sin dejar de lado temas transversales como la seguridad e higiene industrial, las buenas prácticas ambientales y la eficiencia energética.

Objetivo General

Formar profesionales tecnólogos superiores en electricidad, éticos, con conocimiento teórico-práctico, mediante la articulación del uso y enfoque de habilidades blandas, cuidado medio ambiental, seguridad y salud en el trabajo, que se involucren en el desarrollo de proyectos eléctricos en campos de la generación, transmisión, distribución y eficiencia energética contribuyendo al avance y progreso de la matriz energética y productiva del país.

Objetivos Específicos

- Desarrollar competencias profesionales en el campo de la generación de energía eléctrica a través de la aplicación de las tecnologías renovables que optimicen los métodos existentes y se proyecten hacia formas de producción amigables con el ambiente.

UNIDAD 1: Introducción a los Sistemas Electromecánicos

Resultados de aprendizaje de la unidad

1. Aplica los principios electromecánicos y sus magnitudes
2. Conoce las características de funcionamiento de las máquinas eléctricas
3. Entiende las relaciones fundamentales y características de sistemas electromagnéticos

Introducción

Una máquina eléctrica es un dispositivo que puede convertir energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica. Cuando este dispositivo se utiliza para convertir energía mecánica en energía eléctrica se denomina generador, y cuando convierte energía eléctrica en energía mecánica se llama motor. Puesto que puede convertir energía eléctrica en mecánica o viceversa, una máquina eléctrica se puede utilizar como

generador o como motor. Casi todos los motores y generadores útiles convierten la energía de una a otra forma a través de la acción de campos magnéticos [1].

El transformador es un dispositivo eléctrico estrechamente relacionado con las máquinas eléctricas. Convierte energía eléctrica de a un nivel de voltaje a energía eléctrica de a otro nivel de voltaje. Como los transformadores operan sobre los mismos principios que los generadores y los motores, es decir, utilizan la acción de un campo magnético para realizar el cambio de nivel de voltaje, por lo general se estudian junto con éstos [1].

Estos tres tipos de dispositivos eléctricos se encuentran en todos los ámbitos de la vida cotidiana moderna. En el hogar, los motores eléctricos hacen funcionar a los refrigeradores, congeladores, aspiradoras, batidoras, equipos de aire acondicionado, ventiladores y muchos otros aparatos similares. En los talleres los motores suministran la fuerza motriz para casi todas las herramientas. En consecuencia, los generadores son necesarios para suministrar la energía que utilizan todos estos motores [1].

¿Por qué son tan comunes los motores y los generadores eléctricos? La respuesta es muy simple: la electricidad es una fuente de energía limpia y eficiente, fácil de controlar y transmitir a grandes distancias. Un motor eléctrico no requiere de ventilación ni combustibles constantes, a diferencia de los motores de combustión interna; por esta razón es adecuado en ambientes donde no se desea tener

residuos contaminantes. Además, la energía calorífica y la mecánica se pueden convertir en energía eléctrica en sitios lejanos y transmitirla a grandes distancias hasta cualquier hogar, oficina o fábrica donde se requiera. Los transformadores ayudan a este proceso por medio de la reducción de las pérdidas de energía en el sitio donde se genera la energía eléctrica y en el sitio donde se utiliza [1].

Es por todo lo antes mencionado, que uno de los ejes centrales en la formación en el campo amplio de la electricidad es el estudio de las máquinas eléctricas, tomando en cuenta las necesidades de la sociedad contemporánea, los avances tecnológicos y el factor ambiental.

1.1. Relaciones fundamentales y características de funcionamiento de las máquinas

1.1.1. Conversión de energía electromagnética

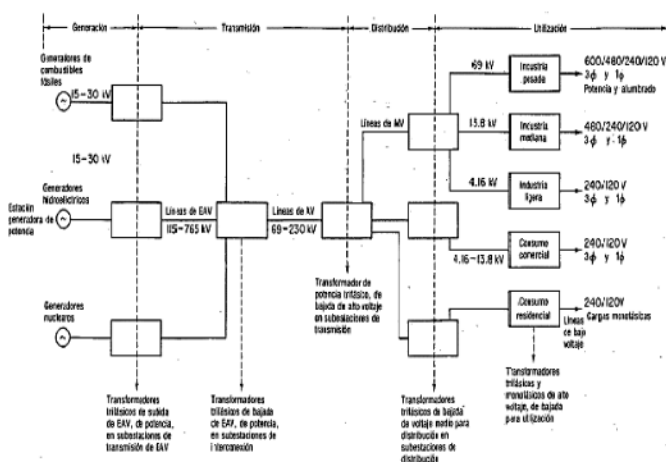
El primer registro de la posibilidad de intercambio entre energía mecánica y eléctrica se debe a Michael Faraday en 1831. Este descubrimiento ha dado lugar al generador y al motor eléctrico, micrófono, bocina, transformador, galvanómetro y todos aquellos dispositivos cuyos principios y características se describen a continuación [2].

La conversión de energía electromagnética relaciona las fuerzas eléctricas y magnéticas del átomo con la fuerza mecánica que se aplica a la materia y al movimiento. La energía mecánica se puede *convertir* en energía eléctrica y viceversa mediante *dínamos*. Aunque esta conversión puede producir también otras formas de energía, como calor y luz, consideradas como energías residuales o pérdidas, mismas que se procuran mantener al mínimo para lograr una conversión perfecta [2].

Así, la energía mecánica de una caída de agua se puede convertir en energía eléctrica mediante un *alternador*; la energía eléctrica producida se *transforma* a un mayor voltaje para su transmisión a grandes distancias, luego se transforma una vez más para reducirla a niveles de distribución para ser consumida por diferentes tipos de abonados. En los puntos de consumo, la energía eléctrica se puede convertir de nuevo en energía mecánica mediante motores, energía térmica con hornos eléctricos, energía luminosa con focos eléctricos, etc. O bien se puede convertir en energía eléctrica con otros parámetros de operación al emplear convertidores, rectificadores y variadores de frecuencia. Esta descripción se puede conocer como el ciclo de la

electricidad (Figura 1), partiendo por la generación, pasando por la transmisión y distribución, hasta llegar a los puntos de carga para su uso final [2].

Figura 1. Ciclo de la Electricidad



Fuente: [2].

1.1.2. Relación entre inducción electromagnética y fuerza electromagnética

Se han descubierto varios fenómenos naturales de origen electromagnético que relacionan a las energías mecánica y eléctrica, y para lograr la conversión entre una y otra, debemos entender sus relaciones, considerándola como una ***reacción reversible*** en la mayoría de sus aplicaciones. Las formas de energía residual (calorífica, luminosa, etc.), también fruto de la conversión, ocasionan pérdidas energéticas en el sistema electromecánico [2].

Los efectos electromagnéticos más importantes son los que relacionan una fuerza mecánica aplicada sobre un cuerpo, provocando el movimiento del mismo bajo la influencia de campos eléctricos y magnéticos [2], estos son:

- I. Fuerza de atracción existente entre las placas cargadas de un capacitor: Su naturaleza es mecánica, comprobable si se introduce un material dieléctrico entre las placas, ya que tenderá a

moverse a la parte más densa del campo eléctrico.

II. Principio de reluctancia: Si un material magnético se encuentra inmerso en un campo magnético, sobre dicha muestra se ejerce una fuerza que tiende a moverlo hacia la parte más densa del campo magnético.

III. Inducción electromagnética.

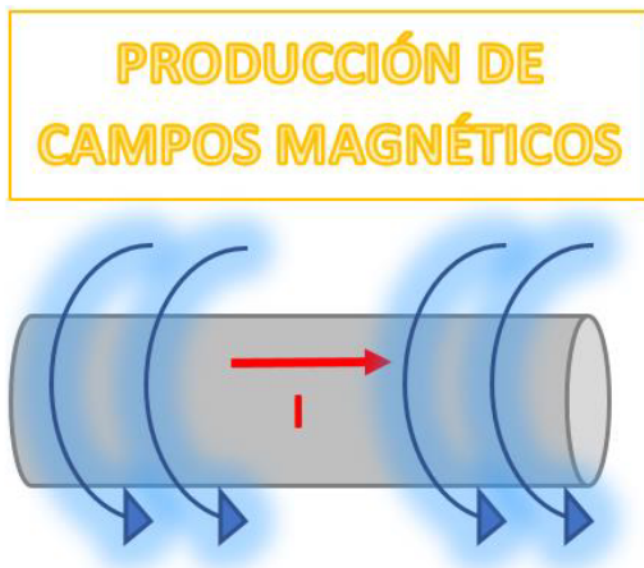
IV. Fuerza electromagnética.

1.2. Campo magnético

“Los campos magnéticos son el mecanismo fundamental para convertir la energía de una forma a otra en motores, generadores y transformadores. Existen cuatro principios básicos que describen cómo se utilizan los campos magnéticos en estos aparatos” [1]:

I. “Un conductor que porta corriente produce un campo magnético a su alrededor” [1]. A esta propiedad de los campos magnéticos se le conoce como *producción de campos magnéticos*.

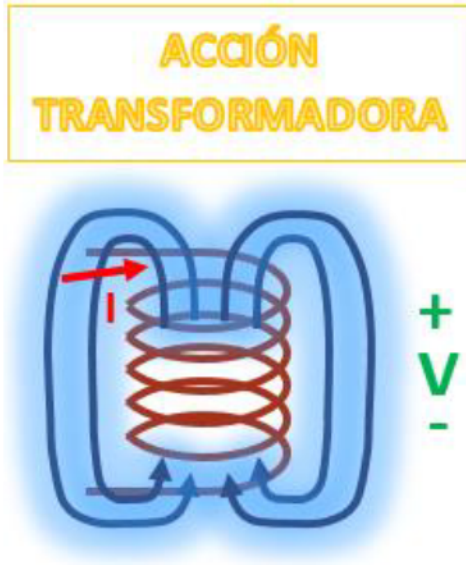
Figura 2. Principio de producción de campos magnéticos



Fuente: Autoría propia

- II. “Un campo magnético variable en el tiempo induce un voltaje en una bobina de alambre si pasa a través de ella (este principio es la base del funcionamiento del transformador)” [1]. A esta propiedad de los campos magnéticos se le conoce como **acción transformadora**.

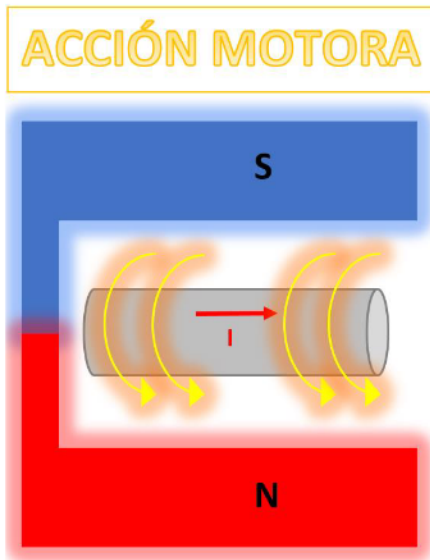
Figura 3. Principio de funcionamiento de transformadores



Fuente: Autoría propia

- III. “Un conductor que porta corriente en presencia de un campo magnético experimenta una fuerza inducida sobre él (ésta es la base del funcionamiento del motor)” [1]. A esta propiedad de los campos magnéticos se le conoce como ***acción motora***.

Figura 4. Principio de funcionamiento de motores

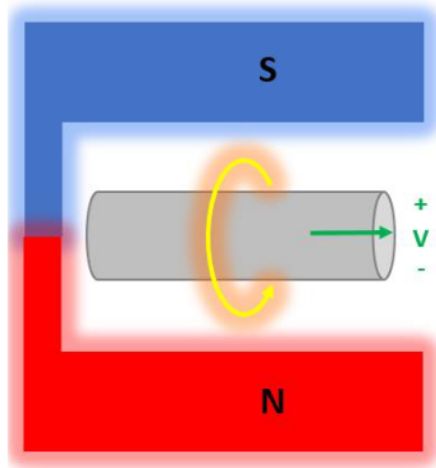


Fuente: Autoría propia

- IV. “Un conductor eléctrico que se mueva en presencia de un campo magnético tendrá un voltaje inducido en él (ésta es la base del funcionamiento del generador)” [1]. A esta propiedad de los campos magnéticos se le conoce como ***acción generadora***.

Figura 5. Principio de funcionamiento de generadores

ACCIÓN GENERADORA



Fuente: Autoría propia

1.3. Ley de Faraday

En 1831, mientras realizaba sus experimentos, Michael Faraday hizo uno de los descubrimientos más importantes en electromagnetismo. Ahora conocida como ley de Faraday de inducción electromagnética, reveló una relación fundamental entre el voltaje y el flujo en un circuito. La ley de Faraday establece que [3]:

- I. “Si el flujo que vincula un lazo (o vuelta) varía como una función de tiempo, se induce un voltaje entre sus terminales” [3].
- II. “El valor del voltaje inducido es proporcional a la velocidad de cambio del flujo” [3].

Por definición, y de acuerdo con el sistema SI de unidades, cuando el flujo dentro de un lazo varía a razón de 1 weber por segundo, se induce un voltaje de 1 V entre sus terminales. Por ello, si el flujo varía dentro de una bobina de N vueltas, el voltaje inducido está dado por [3]:

$$E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

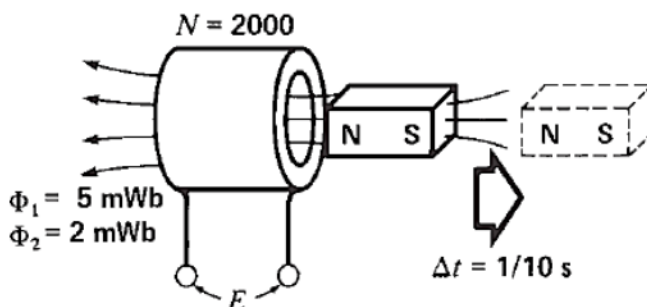
Donde:

- E = voltaje inducido [V]
- N = número de vueltas en la bobina
- $\Delta\Phi$ = cambio de flujo dentro de la bobina [Wb]
- Δt = intervalo de tiempo durante el cual cambia el flujo [s]

La ley de Faraday de inducción electromagnética abrió la puerta a un sinnúmero de aplicaciones prácticas y estableció la base de operación de transformadores, generadores y motores de corriente alterna [3].

Ejemplo: Una bobina de 2000 vueltas o espiras encierra un flujo de 5 mWb producido por un imán permanente. El imán es extraído de repente y el flujo en el interior de la bobina cae uniformemente a 2 mWb en 1/10 de segundo. ¿Cuál es el voltaje inducido? [3].

Figura 6. Ley de Faraday, representación gráfica



Fuente: [3]

Solución:

El cambio de flujo es:

$$\Delta\Phi = (5\text{mWb} - 2\text{mWb}) = 3\text{mWb}$$

Como el cambio se da uniformemente en $1/10$ de segundo (Δt), el voltaje inducido es:

$$E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 2000 * \frac{3\text{mWb}}{0,1 \text{ s}} = 60\text{v}$$

Pero si por alguna razón el flujo dejase de cambiar, el voltaje se reduce a 0.

UNIDAD 2: Transformadores

Resultados de aprendizaje de la unidad

1. Comprende el funcionamiento de transformadores y características
2. Reconoce los tipos de conexión y construcción
3. Interpreta como circuito equivalente a un transformador

Introducción

El transformador es probablemente uno de los dispositivos eléctricos más útiles jamás inventados. Puede aumentar o disminuir el voltaje o corriente de un circuito de corriente alterna, puede aislar circuitos entre sí y puede incrementar o disminuir el valor aparente de un capacitor, un inductor o un resistor. Además, el transformador nos permite transmitir energía eléctrica a grandes distancias y distribuirla de manera segura en fábricas y hogares [3].

El primer sistema de distribución de potencia que se usó en Estados Unidos fue uno de corriente directa de 120 V inventado por Thomas Alva Edison para suministrar potencia a las bombillas incandescentes. La primera central de potencia de Edison entró en operación en la ciudad de Nueva York en septiembre de 1882. Desafortunadamente, este sistema de potencia generaba y transmitía potencia a tan bajos voltajes que se requerían corrientes muy altas para suministrar cantidades significativas de potencia. Estas corrientes altas

ocasionaban enormes caídas de voltaje y pérdidas de potencia en las líneas de transmisión y restringían mucho el área de servicio de las estaciones de generación. En la década de 1880 las centrales generadoras se localizaban a muy pocas calles entre sí para evitar este problema. El hecho de no poder transmitir potencias a sitios lejanos con los sistemas de potencia de cd de bajo voltaje significó que las estaciones generadoras fueran de poca capacidad, locales y, por lo tanto, relativamente ineficientes [1].

La invención del transformador y el desarrollo simultáneo de las fuentes de potencia alterna eliminaron para siempre las restricciones referentes al alcance y al nivel de los sistemas de potencia. Un transformador cambia, idealmente, un nivel de voltaje alterno a otro nivel de voltaje sin afectar la potencia que se suministra. Si un transformador eleva el nivel de voltaje en un circuito, debe disminuir la corriente para mantener la potencia que entra en el dispositivo igual a la potencia que sale de él. De esta manera, a la potencia eléctrica alterna que se genera en un sitio determinado, se le eleva el voltaje para transmitirla a largas distancias con pocas pérdidas y luego se reduce para dejarla nuevamente en el nivel de utilización final. Puesto que las pérdidas de transmisión en las líneas de un sistema de potencia son proporcionales al cuadrado de la corriente, al elevar con transformadores 10 veces el voltaje de transmisión se reduce la corriente en el mismo número de veces y las pérdidas de transmisión se reducen 100 veces. Sin el transformador, simplemente no sería posible utilizar la potencia eléctrica en muchas de las formas en que se utiliza hoy en día [1].

En un sistema moderno de potencia se genera potencia eléctrica a voltajes de 12 a 25 kV. Los transformadores elevan el voltaje hasta niveles comprendidos entre 110 kV y cerca de 1 000 kV para ser transmitido a grandes distancias con pocas pérdidas. Posteriormente, los transformadores bajan el voltaje a un nivel de entre 12 kV y 34.5 kV para su distribución local y para permitir que la potencia eléctrica se pueda utilizar con seguridad en los hogares, oficinas y fábricas a voltajes tan bajos como 120 V [1].

2.1. Principio de funcionamiento

El transformador es una máquina eléctrica estática, destinada a funcionar con *corriente alterna*, constituida por dos arrollamientos, *primario* y *secundario*, que permiten transformar la energía eléctrica, con unas magnitudes V-I determinadas, a otras con valores generalmente diferentes [4].

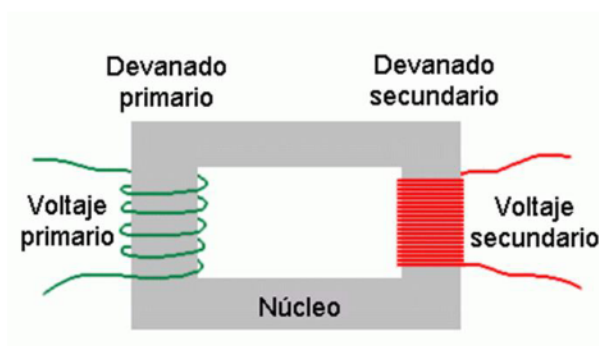
Estos dispositivos permiten satisfacer las necesidades de transmisión de energía eléctrica, elevando la tensión obtenida en los alternadores de las centrales generadoras, para evitar así las pérdidas en la etapa de transmisión debidas al efecto Joule, posteriormente otros transformadores se encargarán de realizar el trabajo inverso, esto es, reducir el nivel

de voltaje a los niveles de utilización en los centros poblados.

El arrollamiento de mayor tensión recibe el nombre de devanado de *alta tensión* (A.T.) y el de menor tensión se denomina devanado de *baja tensión* (B.T.). El proceso de transformación tiene un gran rendimiento al no disponer la máquina de partes móviles, pudiendo llegar a presentar rendimientos del 99,7% en transformadores grandes [4].

El devanado que se conecta a la fuente de alimentación será identificado como primario, consecuentemente el devanado conectado a la carga se denominará devanado secundario, esto claro, sin importar si el transformador está cumpliendo un trabajo de elevar o reducir el voltaje de ingreso de la máquina. [1] La identificación de partes del transformador se puede observar en la Figura 7.

Figura 7. Partes del transformador



Fuente: www.demaquinasyherramientas.com

Los devanados se arrollan (envuelven) sobre un material que los contenga denominado **núcleo**. El primario será el encargado de producir el campo magnético variable, fruto del flujo de corriente eléctrica alterna por dicho devanado; este campo influirá sobre el secundario induciendo a lo largo de sus espiras un voltaje, mismo que se puede verificar en los terminales del devanado secundario.

2.2. Tipos y construcción de transformadores

2.2.1. Características constructivas

De forma general el transformador está constituido por tres elementos, mismos que de acuerdo a la aplicación de la máquina podrán variar

o se les podrá acoplar otros componentes adicionales. Estas tres partes constitutivas son:

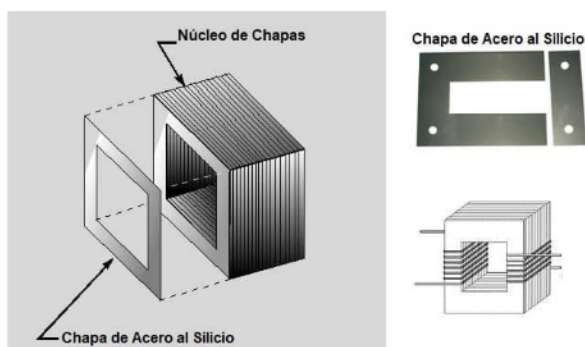
- **Devanado primario:** (o bobina primaria) está conectado a la fuente de energía y es el encargado de producir el campo magnético necesario para que el transformador realice su trabajo. Puede ser un devanado de bajo o alto voltaje, dependiendo de la aplicación del transformador.
- **Devanado secundario:** (o bobina secundaria) es en donde se induce el voltaje que alimentará la carga, debido a la variación del campo magnético. Al igual que el devanado primario puede ser de bajo o alto voltaje, dependiendo de la aplicación del transformador.
- **Núcleo:** es el camino cerrado por donde circulará el campo magnético producido en el primario, por esto el núcleo constituirá el circuito magnético del transformador, sobre este se colocarán tanto la bobina primaria como la secundaria.

Normalmente estos elementos se conjugan entre si dando origen al diseño más común de transformador que existe en la actualidad, tal como se puede ver en la Figura 7.

Con el paso de los años, la evolución tecnológica y la creciente demanda de energía eléctrica en el mundo industrializado, el sistema antes expuesto se ha modificado, con el objetivo de ser cada vez más eficiente, por ejemplo, en caso del núcleo se determinó que lo mejor era utilizar un material ferromagnético para su construcción, eso facilitaría y garantizaría que la mayor cantidad posible del campo magnético circule por dicho núcleo y llegue al secundario, lo siguiente fue laminar el material del núcleo (Figura 8), esto en cambio redujo significativamente las pérdidas producidas por el calentamiento del núcleo debido a las corrientes de cortocircuito que se originaban en su estructura; pero no solo el material sufrió modificaciones, su diseño constructivo también cambio, es así que se pasó del diseño convencional denominado como *de columnas* (Figura 9.b) al diseño *acorazado* (Figura 9.a), lo cual mejoro significativamente las perdidas por dispersión del flujo magnético, con la consideración de que, en este

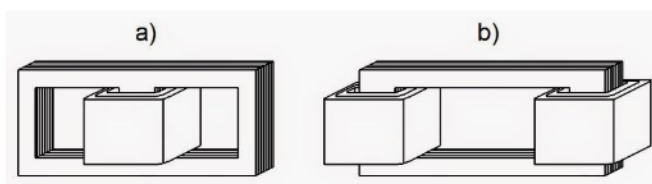
nuevo diseño de tres columnas, las bobinas irían montadas sobre la columna central, la misma que tendría el doble de ancho que las columnas periféricas.

Figura 8. Estructura del núcleo de un transformador



Fuente: www.areatecnologia.com

Figura 9. Diseño del núcleo de un transformador



Fuente: [4].

2.2.2. Tipos de transformadores

Los transformadores se clasificarán en función de los parámetros que los describen, por tanto, según el parámetro que se tome en cuenta, variará la

clasificación de dichos dispositivos. Entre los parámetros más importantes y comunes a tomar en cuenta tendremos los que se citan a continuación, junto con su respectiva clasificación.

- **Nivel de voltaje:** se clasifican en *elevadores* y *reductores*.
- **Número de fases:** se clasifican en *monofásicos*, *trifásicos* y *polifásicos*.
- **Tipo de núcleo:** se clasifican en *simple o de columnas*, *acorazado*, *toroidal*, *grano orientado*, *aire*, *envolvente* y *piezoeléctrico*.
- **Forma de núcleo:** se clasifica en *tipo I*, *tipo E*, *tipo C* y *toroidal*.
- **Diseño de los devanados:** se clasifica en *separados*, *concéntricos* y *alternados*.
- **Conexión de las bobinas:** se clasifica en *estrella (Y)*, *triángulo (D)* y *zig-zag (Z)*.
- **Sistema de refrigeración:** se clasifica en *OA*, *OA/FA*, *FOA*, *OA/FOA/FOA*, *OW*, *FOW*, *AA*, *AFA* y *AA/AFA*.
- **Material del núcleo:** se clasifica en *aire*, *hierro* y *variable*.
- **Emplazamiento:** se clasifica en *subterráneo*, *poste*, *piso* o *plataforma*, *cámara* y *especiales*.
- **Condición de servicio:** se clasifica en *exterior* e *interior*.
- **Aislamiento de los devanados:** se clasifica en *aislados entre si* y *autotransformadores*.
- **Trabajo:** se clasifica en *potencia*, *medida*, *impedancia*, *comunicaciones*, *aislamiento*,

electrónico, con diodo dividido, de pulso, flyback, híbrido y balun.

- **Tipo de protección:** se clasifica en *convencionales, autoprotegidos* y de *frente muerto*.
- **Conexión externa:** se clasifica en *radial* y *mall*.

De entre todas estas clasificaciones, se abordarán y describirán las más importantes.

2.2.2.1. Nivel de voltaje

Hace referencia al nivel de voltaje de operación del transformador, por lo que se distinguen dos tipos claramente identificados, esta característica está relacionada estrechamente con el tipo de trabajo que realizan, siendo también catalogados como transformadores de potencia. En este grupo tenemos a los transformadores elevadores y los reductores.

- **Transformadores elevadores:** incrementan el voltaje de salida en relación al voltaje de entrada. En estos transformadores el número de espiras del devanado secundario es mayor a las del devanado primario (Figura 10).

Figura 10. Transformador elevador



Fuente: www.fundacionendesa.org

- **Transformadores reductores:**
disminuyen el voltaje de salida en relación al voltaje de entrada. En estos transformadores el número de espiras del devanado primario es mayor al secundario (Figura 11).

Figura 11. Transformador reductor



Fuente: www.fundacionendesa.org

2.2.2.2. Transformadores de medida

Son una subclasificación de los transformadores por el trabajo que realizan, su particularidad es la aplicación que se les da a los mismos, la cual consta en tomar muestreos de voltaje o corriente, cuando su magnitud es demasiado alta para ser medida por equipos de medición convencional, y la reducen a niveles más seguros y que también se pueden medir con facilidad. A su vez se dividen en dos grupos, los llamados TC (transformadores de corriente) y los TP (transformadores de potencial), cada uno con sus particularidades en función de la magnitud a manejar, pero con una similitud en estructura, el lado del primario será siempre el dalo de alta y el secundario el de baja y por tanto el lado donde se realizarán las mediciones.

En la Figura 12 podemos observar algunos modelos de transformadores de medida, los cuales resultan bastante particulares en su forma además de ser bastante llamativos para las personas si se comparan con el diseño de un transformador convencional.

Figura 12. Transformadores de medida



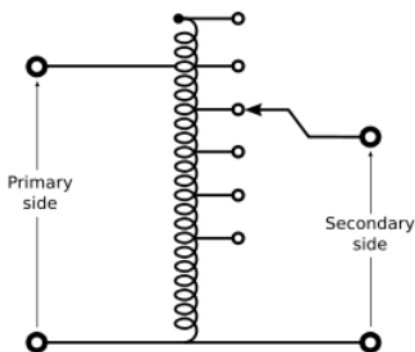
Fuente: www.pti-sa.com.

2.2.2.3. Autotransformadores

Son un tipo particular de transformadores ubicados en la clasificación por el tipo de aislamiento de los devanados, su característica fundamental es que prescinden de uno de sus devanados, por lo tanto, en lugar de tener tres partes constitutivas este tipo de transformador solo tendrá dos partes, lo cual se ve reflejado como un beneficio económico al reducirse los costos de construcción del mismo.

Estos transformadores se utilizan para reducir o elevar niveles de voltaje, pero solo en pequeñas cantidades en referencia a las magnitudes del primario. Además de lo antes mencionado, estos dispositivos cuentan con un selector del lado del secundario, denominado selector de tomas o taps, que permite al usuario ajustar el nivel de voltaje de la salida, según el requerimiento o la necesidad. En la Figura 13 se observa la representación esquemática de un autotransformador.

Figura 13. Esquema de un autotransformador



Fuente: www.freepng.es

2.2.2.4. Transformadores trifásicos

Finalmente, en el grupo clasificado por el número de fases se encuentran los transformadores trifásicos, que son otro tipo de transformadores de

uso habitual y de gran demanda, ya sea para redes de distribución, así como en usos particulares dentro de fábricas o industrias e incluso en los grandes centros comerciales.

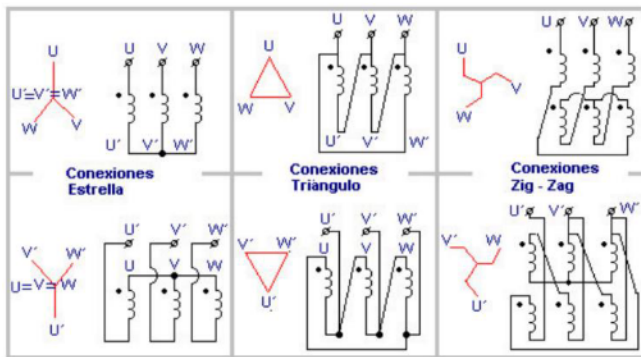
Los transformadores trifásicos se pueden obtener de dos maneras distintas, la primera es por una conexión interna de las bobinas que constituirán el transformador trifásico y la otra opción es un arreglo o conexión de unidades monofásicas que se conoce como banco de transformadores.

Lo que debemos tener en cuenta cuando se habla de transformadores trifásicos es que vamos a tener por lo menos tres conductores energizados a la entrada y tres a la salida, por lo tanto, cada línea de entrada y salida se conectará a una bobina del transformador, así podemos concluir entonces que los transformadores trifásicos estarán constituidos por una bobina primaria y una secundaria para cada línea de alimentación; de aquí se derivan algunos tipos de conexiones de las bobinas de un transformador trifásico, las que se enumeran y explican a continuación.

- **Conexión triángulo:** Conocida también como conexión en delta y se puede representar por la letra D o la letra griega Δ . En la conexión en triángulo se unen sucesivamente los extremos de polaridad opuesta de cada dos devanados hasta cerrar el circuito. Según sea el orden de sucesión se obtienen dos configuraciones como se puede ver en la Figura 14.
- **Conexión estrella:** Conocida también como conexión Y. En la conexión estrella se unen en un mismo punto los tres extremos de los devanados que poseen la misma polaridad, existiendo dos formas básicas según se unan, (U, V, W) o bien (U', V', W') como se puede observar en la Figura 14.
- **Conexión Zigzag:** La conexión zig-zag en la práctica sólo se emplea en el lado de menor tensión. Consiste en subdividir en dos partes iguales los devanados secundarios, una parte se conecta en estrella y luego cada rama se une en serie con las bobinas invertidas

de las fases adyacentes, siguiendo un determinado orden cíclico. Esta configuración se puede observar en la Figura 14.

Figura 14. Tipos de conexión de transformadores trifásicos



Fuente: transformadoressiosac.com

La combinación de estas configuraciones, tanto en las bobinas primarias como secundarias da origen a diversas variantes de transformadores trifásicos, cada uno con sus ventajas y desventajas, lo que debe ser analizado en función del trabajo que desarrollará el dispositivo.

2.3. Transformador ideal

Se establecerá como transformador ideal a aquel dispositivo que cumple con los siguientes condicionantes:

- El núcleo es infinitamente permeable, por lo que requiere un campo magnético bastante reducido para provocar un flujo [2].
- En el material del núcleo no se presentan corrientes de cortocircuito ni pérdidas por histéresis [2].
- Todo el flujo producido es confinado a circular dentro del núcleo [2].
- La resistencia de cada devanado es despreciable y por tanto estos son puramente inductivos [2].

En la Figura 15 observamos un transformador ideal en el que el primario y secundario poseen N_P y N_S vueltas, respectivamente. El primario está conectado a una fuente sinusoidal E_g y la corriente magnetizante I_m crea un flujo Φ_m . El flujo está enlazado completamente por los devanados primario y secundario, por lo que es un flujo mutuo. El flujo varía sinusoidalmente, y alcanza un valor pico $F_{m\acute{a}x}$. De analizar este dispositivo y la relación entre

sus componentes, se deduce la expresión para la relación de voltaje y relación de vueltas a de un transformador ideal [1]:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} = a$$

Donde:

- V_P = voltaje inducido en el primario [V]
- V_S = voltaje inducido en el secundario [V]
- N_P = número de vueltas en el primario
- N_S = número de vueltas en el secundario
- a = relación de transformación

Mientras que la relación entre las corrientes primaria y secundaria del transformador ideal se establece por medio de la siguiente ecuación:

$$N_P * I_P = N_S * I_S$$

Si dejamos las corrientes de un lado de la ecuación y las relacionamos con **a**, tendremos:

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} = a$$

Donde:

- I_P = corriente circulante en el primario
[A]
- I_S = corriente circulante en el secundario
[A]

Se debe tener en cuenta “que el ángulo de fase de V_P es igual al ángulo de V_S y el ángulo fasorial de I_P es el mismo que el de I_S .” [1] por lo que se puede concluir que la relación de vueltas del transformador ideal afecta las magnitudes de los voltajes y corrientes, pero no sus ángulos [1].

Por último, la potencia que ingresa al transformador será exactamente la misma que sale de este, ya que estamos considerando un dispositivo sin pérdidas, esto únicamente en el caso de transformadores ideales. Por lo tanto, podemos determinar la potencia del transformador empleando la ley de ohm, como se ve en la siguiente ecuación:

$$V_P * I_P = V_S * I_S = P_P = P_S$$

Ejemplo: Se tiene un transformador con un bobinado primario de 200 espiras, que recibe un voltaje de 110v de la fuente de alimentación y entrega 9v a la carga con una corriente de 5A. Determine el número de espiras de la bobina

secundaria, así como la corriente que circulará por el primario y también la relación de transformación. Además, determine la potencia que ingresa al transformador y la que entrega a la carga.

Solución: Partiendo de las formulas vistas anteriormente se puede establecer una expresión matemática de igualdad entre los parámetros de número de espiras, voltajes y corrientes del transformador, que será empleada para calcular los parámetros requeridos.

$$a = \frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P}$$

En primer lugar, se puede determinar el valor de la relación de transformación, utilizando la siguiente fracción de la igualdad mostrada anteriormente:

$$a = \frac{V_P}{V_S}$$

Reemplazando los datos tenemos que:

$$a = \frac{110v}{9v} = 12,22$$

Para calcular el número de espiras del secundario emplearemos la siguiente parte de la igualdad:

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S}$$

Reemplazando los datos y despejando tenemos:

$$N_S = \frac{N_P * V_S}{V_P} = \frac{200 \text{ esp} * 9v}{110v} = 16,36 \text{ esp}$$

Para determinar la corriente del primario se empleará la siguiente parte de la igualdad:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P}$$

Despejando y reemplazando tenemos que:

$$I_P = \frac{V_S * I_S}{V_P} = \frac{9v * 5A}{110v} = 0,409A$$

Finalmente, para determinar la potencia se pueden emplear los parámetros del primario o los del secundario, ya que en el análisis del transformador ideal la potencia es la misma tanto en el ingreso del transformador como en la salida de este. Por lo tanto, tenemos que:

$$P_P = P_S = V_S * I_S = 9v * 5A = 45w$$

2.4. Circuito equivalente

“Las pérdidas que ocurren en los transformadores reales deben tenerse en cuenta para obtener un modelo exacto del comportamiento de un transformador, los parámetros a considerarse para dicha representación son” [1]:

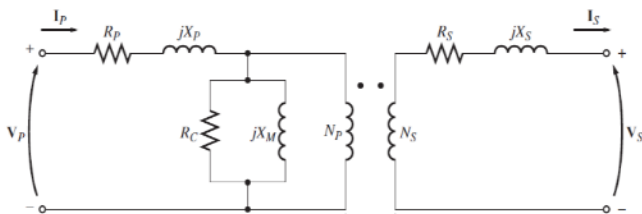
- I. **Pérdidas en el cobre ($I^2 \cdot R$):** se provocan por el calentamiento que presentan los conductores al paso de la corriente, su causa es la resistencia en “los devanados primario y secundario, estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente en los devanados” [1].
- II. **Pérdidas por corrientes de cortocircuito:** se originan “por el calentamiento resistivo en el núcleo del transformador, estas son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al transformador” [1].
- III. **Pérdidas por histéresis:** son causadas por la magnetización de los átomos del

núcleo y su oposición al cambio de polaridad, dependen del voltaje aplicado al transformador [1].

IV. **Flujo disperso:** se refiere al porcentaje de flujo magnético que escapa del núcleo y se atenúa en el aire, así como el porcentaje de flujo que sale del núcleo y circula solo por uno de los devanados, causando una autoinducción tanto en la bobina primaria como en la secundaria [1].

Bajo estas consideraciones se puede establecer el circuito equivalente de un transformador real, como una representación real del comportamiento de la máquina y sus componentes, tal como se observa en la Figura 15:

Figura 15. Circuito equivalente exacto de un transformador



Fuente: [1]

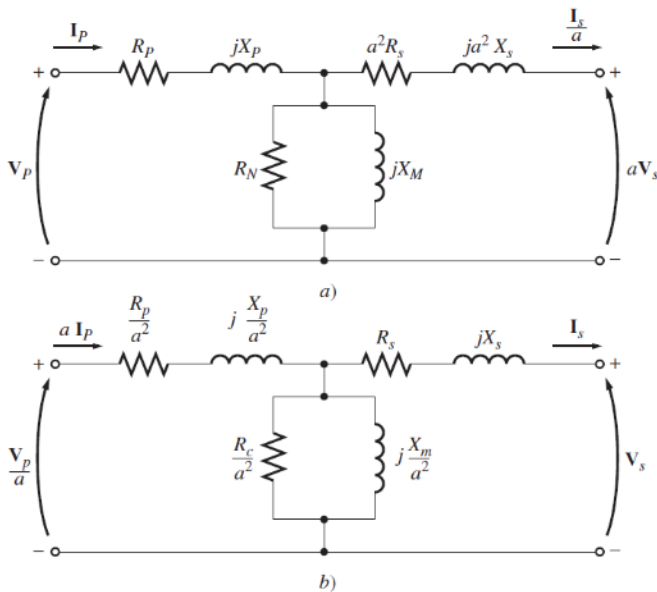
Donde:

- R_P = es la resistencia del devanado primario
- X_P = es la reactancia provocada por la auto inductancia del devanado primario
- R_S = es la resistencia del devanado secundario
- X_S = es la reactancia provocada por la auto inductancia del devanado secundario
- R_C = representa a las pérdidas ocasionadas en el núcleo
- X_M = es la reactancia provocada por la magnetización del núcleo

Pero este modelo puede no ser muy útil, ya que para analizar circuitos que incluyen transformadores normalmente es necesario referenciar todos los elementos del esquema representativo a uno de los lados del transformador, dicho de otra manera, habría que convertir los elementos del circuito equivalente a un solo nivel de voltaje, lo que se obtiene por medio del circuito equivalente simplificado, que es una aproximación del comportamiento real de los elementos y parámetros del dispositivo [1].

Para esta conversión es necesario incorporar el parámetro denominado como relación de transformación (**a**), que nos permitirá referir los elementos bien sea al primario o al secundario, por lo que se pueden obtener dos circuitos equivalentes que representan exactamente al mismo dispositivo, pero referidos en un caso al primario y en el otro caso al secundario del transformador, como se observa en la Figura 16 [1]:

Figura 16. Circuito equivalente simplificado del transformador, referenciado al primario (a) o referenciado al secundario (b)



Fuente: [1]

UNIDAD 3: Máquinas síncronas de corriente alterna

Resultados de aprendizaje de la unidad

1. Aprende el funcionamiento de máquinas síncronas
2. Aplica los tipos de conexión de máquinas síncronas
3. Comprende el funcionamiento de motor síncrono y circuito equivalente
4. Comprende el funcionamiento de generador síncrono y circuito equivalente
5. Desarrolla los diagramas y configuraciones de máquinas síncronas

Introducción

Se denomina como máquinas eléctricas síncronas a todas aquellas máquinas cuya velocidad de operación está estrechamente relacionada con la frecuencia de la red a la que están interconectadas.

Las máquinas síncronas, a diferencia de los transformadores, son máquinas que presentan un trabajo mecánico y por tanto son máquinas que poseen un movimiento de rotación dentro de sus partes constitutivas, específicamente son motores y generadores que trabajan con corriente alterna.

Lo más común es que los generadores sean síncronos, ya que para inyectar energía a la red es un requisito indispensable que estas máquinas guarden sincronía con dicha red. En el caso de los motores, si bien existen de tipo síncrono, son los motores asíncronos los más populares por su versatilidad y bajo costo.

3.1. Máquinas síncronas

Como ya se mencionó en la introducción, son máquinas eléctricas en las que una de sus partes constitutivas presenta un movimiento giratorio, cuya velocidad (medida en r.p.m. y representada por la letra n) se relaciona estrechamente con la frecuencia (f) de la red con la que operan. Esta relación de sincronía se puede representar por la siguiente ecuación [4]:

$$f = \frac{p * n}{120}$$

Donde:

- f = frecuencia de la red [Hz]
- p = número de polos del rotor
- n = velocidad de giro del rotor [r.p.m.]

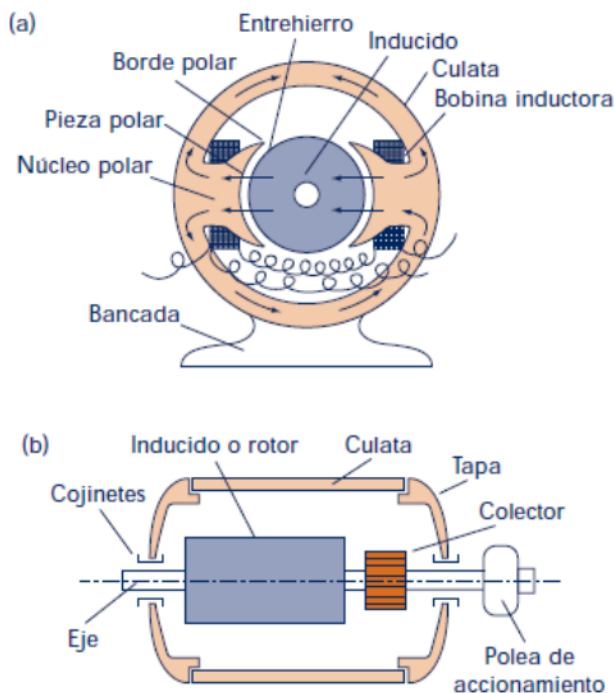
Si tomamos en cuenta que la frecuencia de la red es un valor constante y depende de cada país, podríamos reemplazar f por el valor de frecuencia de la red y se deberían determinar el número de polos y la velocidad de giro. En el caso particular del Ecuador la frecuencia de operación de la red es de 60 Hz.

Construcción

Las maquinas eléctricas giratorias, ya sean de corriente alterna o continua, comparten la estructura constitutiva en conjunto, con ciertas modificaciones según sea el caso. De forma general, las maquinas eléctricas rotativas constan de las siguientes partes:

- Estator
- Rotor
- Colector y escobillas
- Entrehierro
- Carcasa o culata
- Cojinetes

Figura 17. Partes constitutivas de una máquina eléctrica giratoria



Fuente: www.mheducation.es

ESTATOR: es la parte fija de la máquina, comúnmente es la encargada de producir y conducir los flujos magnéticos, esenciales para el funcionamiento de las máquinas eléctricas rotativas, por esta razón en ocasiones se le conoce también como **INDUCTOR**.

ROTOR: es la parte móvil giratoria de la máquina, es en donde el campo magnético inducirá

voltaje y corriente para el caso de los generadores, por lo que también se le llama INDUCIDO. En el caso de los motores, en el inducido se producirá un campo magnético debido al flujo de una corriente, dicho campo estará en oposición con el campo principal del inductor, lo que provocará movimiento en el inducido.

COLECTOR Y ESCOBILLAS: este conjunto de elementos es el encargado de recolectar la energía producida por la máquina (generador) o inyectar la energía necesaria para que la maquina experimente la interacción de dos campos magnéticos en oposición dando como resultado el movimiento de una de sus partes (motor). Está constituido por un colector de anillos para el caso de las máquinas de corriente alterna y de delgas en el caso de las máquinas de corriente continua, sobre el cual se deslizarán las escobillas, que son piezas hechas de carbón o grafito conectadas por medio de un cable flexible hacia el exterior de la máquina.

ENTREHIERRO: es ese tan necesario ESPACIO VACÍO entre el rotor y el estator de la máquina, su función es evitar que se produzcan

rozamientos o fricciones entre las partes antes mencionadas.

CARCASA O CULATA: es la envoltura de la máquina y está construida a base de algún material FERROMAGNÉTICO, sus funciones son conducir el campo magnético y también brindar una protección a la máquina de elementos externos que pudiesen alterar su funcionamiento.

COJINETES: sirven de APOYO al rotor de la máquina, su función más importante es evitar que la máquina pierda eje o presente movimientos anómalos, se los conoce también como RODAMIENTOS.

A pesar de que las máquinas eléctricas rotativas presentan una estructura común, tienen ciertas variaciones según su aplicación, por ejemplo, para máquinas pequeñas que no superan los 10 kVA el devanado inductor se coloca en el estator y por tanto en el rotor estará colocado el inducido; por el contrario, en máquinas superiores a 10 kVA se invierten los componentes, colocando el inducido en el estator y el inductor en el rotor [4].

Adicionalmente, en el caso de las máquinas de inducido estatorico se presentan dos variantes en el diseño del rotor, un rotor de polos liso y un rotor de polos salientes [4].

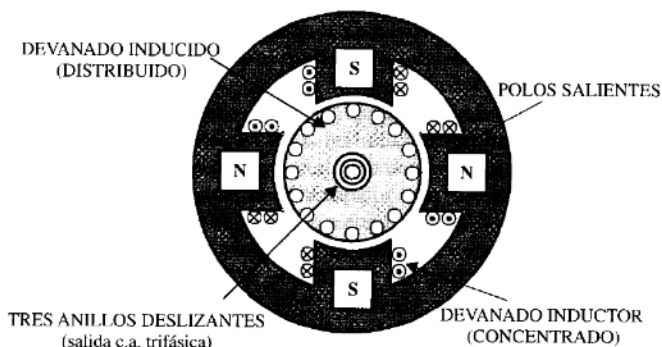
Esta variación en la estructura de las máquinas plantea algunas ventajas que se enumeraran a continuación:

- En el caso del inducido giratorio se requiere anillos para recoger el voltaje producido y enviarlo fuera de la máquina; el inducido fijo no necesita de estos anillos ya que se puede conectar directamente con conductores desde el inducido hacia el exterior [4].
- Los anillos rozantes producen perturbaciones y chisporroteo, además deben estar descubiertos, lo cual es un riesgo cuando se trabaja con voltajes demasiado elevados; mientras que en las máquinas de inducido estatorico al prescindir de anillos no presentarán dicho problema [4].
- Es difícil aislar los conductores de un inducido giratorio debido a las

vibraciones y la fuerza centrífuga causadas por el propio movimiento de la máquina, mientras que en un inducido estatorico no se presenta este problema [4].

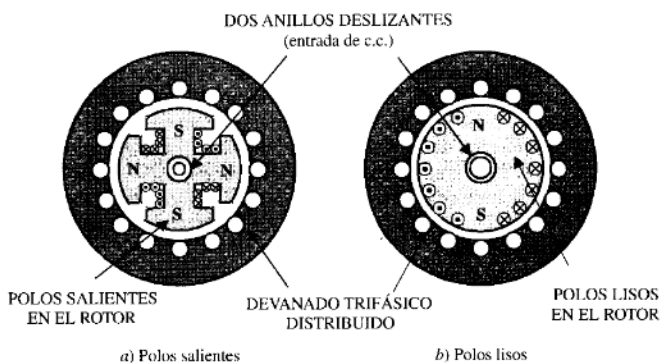
- Cuando el inductor se sitúa en el rotor, la corriente de magnetización llegará a sus bobinas a través de anillos rozantes, lo que no presenta un inconveniente si se toma en cuenta que la potencia requerida para la magnetización no es de una magnitud considerable [4].
- En el caso de las máquinas de inducido estatorico, el rotor presenta dos variantes constructivas, el modelo se elegirá en función de la velocidad de operación de la máquina [4].

Figura 18. Máquina síncrona con el inducido en el rotor



Fuente: [4]

Figura 19. Máquinas síncronas con el inducido en el estator, de polos salientes (a) y de polos lisos (b)



Fuente: [4]

3.2. Generador síncrono

“Los generadores síncronos comerciales se construyen con un campo magnético de corriente continua estacionario o con uno rotatorio” [3].

Un generador síncrono de campo estacionario tiene la misma apariencia externa que un generador de cd. Los polos salientes crean el campo de cd, el cual es cortado por una armadura rotatoria. La armadura posee un devanado trifásico cuyas terminales están conectadas a tres anillos colectores montados en el eje. Un juego de escobillas que se deslizan sobre los anillos colectores permite conectar la armadura a una carga trifásica externa. La armadura es impulsada por un motor de gasolina, o alguna otra fuente de potencia motriz. Conforme gira, se induce un voltaje trifásico, cuyo valor depende de la velocidad de rotación y de la corriente directa de excitación en los polos estacionarios. La frecuencia del voltaje depende de la velocidad y del número de polos en el campo. Se utilizan generadores de campo estacionario cuando la salida de potencia es de menos de 5 kVA. Sin embargo, para una salida más grande, es más barato, más seguro y más práctico emplear un campo rotatorio de cd [3].

Un generador síncrono de campo rotatorio tiene una armadura estacionaria llamada estator. El devanado trifásico del estator está conectado directamente a la carga, sin pasar por grandes y poco confiables anillos colectores y escobillas. Un estator estacionario también

facilita el aislamiento de los devanados porque no están sujetos a fuerzas centrífugas. También llamado en ocasiones alternador, el campo es excitado por un generador de cd, casi siempre montado en el mismo eje. Las escobillas que están en el conmutador se tienen que conectar a otro juego de escobillas montado sobre anillos colectores para alimentar la corriente directa I_x al campo rotatorio [3].

3.3. Motor síncrono

Los motores síncronos son idénticos a los generadores de corriente alterna de polos salientes. El estator se compone de un núcleo magnético ranurado, el cual porta un devanado imbricado trifásico. Por ello, el devanado también es idéntico al de un motor de inducción trifásico [3].

El rotor tiene un grupo de polos salientes que son excitados por una corriente directa. Las bobinas de excitación están conectadas en serie a dos anillos colectores y la corriente es alimentada al devanado por un excitador externo. Las ranuras también están hechas a lo largo de la circunferencia de los polos salientes. Portan un devanado de jaula de ardilla similar al de un motor de inducción trifásico, este devanado amortiguador se utiliza para arrancar el motor [3].

Los motores síncronos modernos con frecuencia utilizan excitación sin escobillas, similar a la utilizada en generadores síncronos. De acuerdo con la figura 17.3, un generador trifásico relativamente pequeño, llamado excitador, y un rectificador trifásico van montados en un extremo del eje del motor. La corriente directa I_x del rectificador es alimentada directamente a los devanados de polos salientes, sin pasar a través de las escobillas y anillos colectores. La corriente se puede variar controlando la pequeña corriente de excitación I_c que fluye en el devanado de campo estacionario del excitador. La figura 17.4 muestra la manera en que el excitador, el rectificador y los polos salientes están montados en un motor síncrono de 3000 kW [3].

3.4. Diagramas y configuraciones

3.4.1. Circuito equivalente del generador síncrono

El voltaje E_A es el voltaje interno que se genera y produce en una fase de un generador síncrono. Sin embargo, por lo general este voltaje E_A no es el voltaje que se presenta en las terminales del generador. De hecho, el único momento en que el voltaje interno E_A es igual al voltaje

de salida V_{Φ} de una fase es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina [1].

“Hay varios factores que ocasionan la diferencia que hay entre E_A y V_{Φ} ” [1]:

1. “La distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, llamada reacción del inducido” [1].
2. “La autoinductancia de las bobinas del inducido (o armadura)” [1].
3. “La resistencia de las bobinas del inducido” [1].
4. “El efecto de la forma del rotor de polos salientes” [1].

El primer efecto mencionado, y normalmente el más grande, es la reacción del inducido. Cuando el rotor de un generador síncrono gira, se induce un voltaje E_A en los devanados del estator del generador. Si se añade una carga a las terminales del generador, la corriente fluye. Pero el flujo de corriente de un estator trifásico produce su propio campo magnético en la máquina. Este campo magnético del estator distorsiona el campo magnético original del rotor y altera el voltaje de fase resultante. A este efecto se le llama reacción del inducido porque la corriente del inducido (estator) afecta el campo magnético que lo produjo en primera instancia [1].

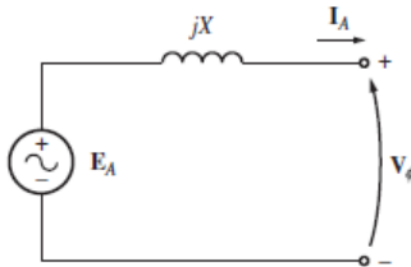
“Con dos voltajes presentes en los devanados del estator, el voltaje total en una fase es simplemente la suma del voltaje interno generado E_A más el voltaje de reacción del inducido E_{estat} ” [1]:

$$V_{\Phi} = E_A + E_{estat}$$

El campo magnético neto B_{net} es simplemente la suma de los campos magnéticos del rotor y del estator [1]:

$$B_{net} = B_R + B_S$$

Figura 20. Circuito equivalente de un generador síncrono



Fuente: [1]

Si se toma en cuenta el circuito equivalente anterior, “entonces el voltaje de reacción del inducido se puede expresar como” [1]:

$$E_{estat} = -jX * I_A$$

Por lo tanto, el voltaje en una de las fases quedaría representado como [1]:

$$V_{\Phi} = E_A - jX * I_A$$

Además de la reacción del inducido, las bobinas del estator tienen una autoinductancia y una resistencia. Si se llama L_A a la autoinductancia del estator (y se llama X_A a su reactancia correspondiente), mientras que a la resistencia del estator se le llama R_A , entonces la diferencia total entre E_A y V_{Φ} está dada por [1]:

$$V_{\Phi} = E_A - jX * I_A - jX_A * I_A - R_A * I_A$$

“Tanto los efectos de la reacción del inducido como la autoinductancia de la máquina se representan por medio de reactancias y se acostumbra combinarlas en una sola llamada reactancia síncrona de la máquina” [1]:

$$X_S = X + X_A$$

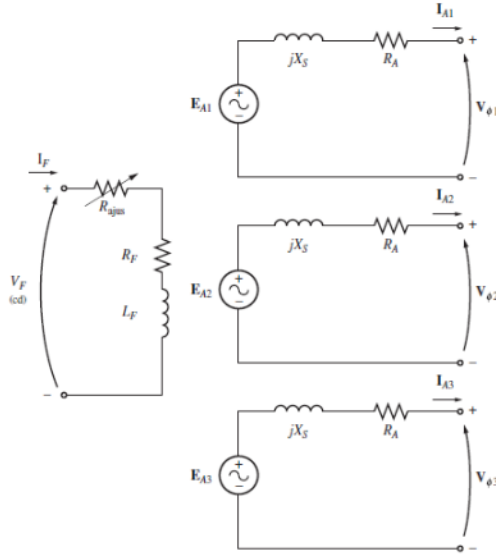
“Por lo tanto, la ecuación para describir V_{Φ} ”, quedaría como se observa a continuación [1]:

$$V_{\Phi} = E_A - jX_S * I_A - R_A * I_A$$

Ahora se puede realizar el circuito equivalente de un generador trifásico de corriente alterna, que está constituido:

por una fuente de potencia de cd que suministra potencia al circuito de campo del rotor, que se modela por medio de la inductancia y resistencia en serie de la bobina. Un resistor ajustable R_{ajus} está conectado en serie con R_F y este resistor controla el flujo de corriente de campo. El resto del circuito equivalente consta de los modelos de cada fase. Cada fase tiene un voltaje interno generado con una inductancia en serie X_S (que consta de la suma de la reactancia del inducido y la autoinductancia de la bobina) y una resistencia en serie R_A . Los voltajes y corrientes de las tres fases están separados por 120° , pero en todo lo demás son idénticos [1].

Figura 21. Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico



Fuente: [1]

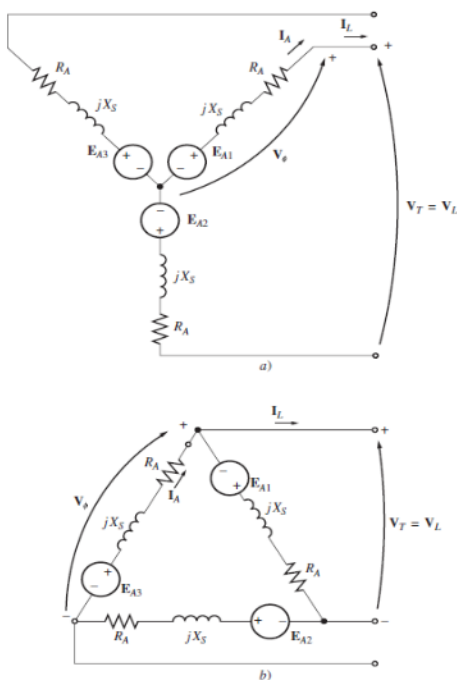
“Estas tres fases se pueden conectar en Y o en D. Si se conectan en Y, entonces el voltaje del terminal V_T está relacionado con el voltaje de fase por” [1]:

$$V_T = V_L = \sqrt{3}V_\phi$$

Si se conectan en D, entonces:

$$V_T = V_\phi$$

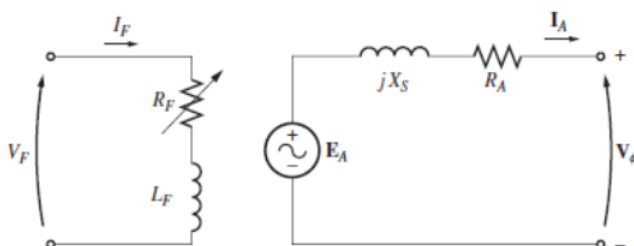
Figura 22. Configuración de generadores síncronos trifásicos, en estrella o Y (a) y en triángulo o D (b)



Fuente: [1]

Considerando que, cada una de las tres fases son exactamente idénticas en comportamiento, se propone representar a la máquina con un solo circuito equivalente, asumiendo que este se debe replicar como ya se había indicado anteriormente [1].

Figura 23. Simplificación del circuito equivalente de un generador síncrono

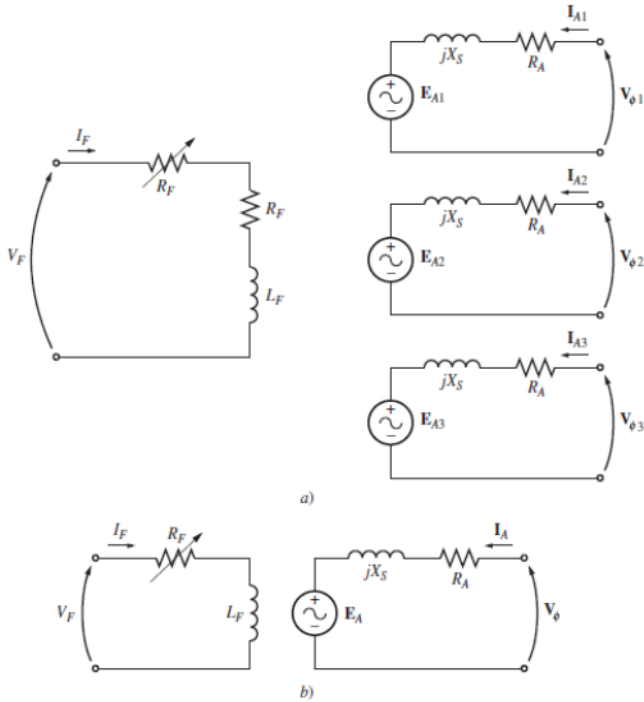


Fuente: [1]

3.4.2. Circuito equivalente del motor síncrono

Un motor síncrono es igual en todos los aspectos a un generador síncrono, excepto en que la dirección del flujo de potencia es la opuesta, debido a esto se puede esperar que la dirección del flujo de corriente en el estator del motor también se invierta. Por lo tanto, el circuito equivalente de un motor síncrono es exactamente igual al circuito equivalente de un generador síncrono, excepto en que la dirección de referencia de I_A está invertida [1].

Figura 24. Circuito equivalente de un motor síncrono trifásico, completo (a) y simplificado (b)



Fuente: [1]

“Debido al cambio en la dirección de I_A , cambia también la ecuación del circuito equivalente, quedando como se ve” [1]:

$$V_{\Phi} = E_A + jX_S * I_A + R_A * I_A$$

O también:

$$E_A = V_{\Phi} - jX_S * I_A - R_A * I_A$$

Como se observa, “la ecuación es exactamente la misma que para el generador, solo que el signo de la corriente cambia” [1].

3.4.3. Arranque de motores síncronos

“Se pueden utilizar tres métodos para hacerlo de manera segura” [1]:

1. *Reducir la velocidad del campo magnético del estator* a un valor lo suficientemente bajo como para que el rotor pueda acelerar y fijarse a él durante un semiciclo de la rotación del campo magnético. Este objetivo se puede lograr con la reducción de la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada [1].
2. *Utilizar un motor primario externo* para acelerar el motor síncrono hasta velocidad síncrona, pasar por el procedimiento de entrada en sincronía y convertir la máquina al instante en un generador. Entonces, apagar o desconectar el motor principal para convertir la máquina síncrona en un motor [1].
3. *Utilizar devanados de amortiguamiento* que son unas barras especiales dispuestas en ranuras labradas en la cara del rotor de un motor síncrono y en cortocircuito en cada extremo con un gran anillo en cortocircuito [1].

UNIDAD 4: Máquinas asíncronas de corriente alterna

Resultados de aprendizaje de la unidad

1. Conoce el principio de funcionamiento de máquinas asíncronas
2. Reconoce el funcionamiento de motores y generadores de inducción
3. Evalúa los tipos de motor de inducción y características de funcionamiento

Desarrolla los diagramas y configuraciones de máquinas síncronas

Introducción

A diferencia de las máquinas síncronas, las máquinas asíncronas no dependen de la frecuencia de la red para operar.

A pesar de que se pudiese considerar como una característica poco significativa, es aquella que les ha dado supremacía a las máquinas asíncronas con respecto a las síncronas.

En el caso de las máquinas asíncronas se puede encontrar motores que operen con estas características, los generadores necesariamente deben operar bajo sincronía de la frecuencia de la red, ya que se interconectarán con dicha red.

4.1. Motores trifásicos asíncrono

Un motor de inducción tiene físicamente el mismo estator que una máquina síncrona, pero con un rotor de

construcción diferente. Se parece (y es igual) al estator de una máquina síncrona. Hay dos tipos diferentes de rotores de motores de inducción que pueden utilizarse dentro del estator. Uno se llama rotor de jaula de ardilla o rotor de jaula y el otro se conoce como rotor devanado [1].

Los rotores tipo jaula de ardilla de los motores de inducción constan de una serie de barras conductoras dispuestas dentro de ranuras labradas en la cara del rotor y en cortocircuito en alguno de sus extremos mediante grandes anillos de cortocircuito. A este diseño se le llama rotor de jaula de ardilla porque los conductores, si se examinan por sí solos, parecen una de las ruedas de ejercicio donde corren las ardillas o hámsters [1].

El otro tipo de rotor es un rotor devanado. Un rotor devanado tiene un conjunto completo de devanados trifásicos. Por lo general, las tres fases de los devanados del rotor están conectadas en Y, y los extremos de los tres alambres del rotor están unidos a los anillos rozantes en el eje del rotor. Los devanados del rotor están en cortocircuito por medio de escobillas montadas en los anillos rozantes. Por lo tanto, los rotores devanados de los motores de inducción tienen corrientes en el rotor accesibles en las escobillas del estator, donde se pueden examinar y donde es posible insertar una resistencia extra en el circuito del rotor. Se puede sacar ventaja de este hecho para modificar la característica par-velocidad del motor [1].

Los rotores devanados de los motores de inducción son más grandes que los motores de inducción de jaula y requieren mucho más mantenimiento debido al desgaste asociado con las escobillas y con los anillos rozantes. Como resultado, rara vez se utilizan en los motores de inducción [1].

4.1.1. Desarrollo del par inducido

La velocidad de rotación del campo magnético está dada por:

$$n = \frac{120 * f}{p}$$

Tal como lo habíamos visto en las máquinas síncronas.

El voltaje inducido en el rotor está dado por:

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \vec{B}) \cdot \mathbf{I}$$

Donde:

- $\mathbf{v}$ = velocidad de la barra en relación con el campo magnético
- $\mathbf{B}$ = vector de densidad de flujo magnético
- $\mathbf{I}$ = longitud del conductor en el campo magnético

Lo que produce el voltaje inducido en la barra del rotor es el movimiento relativo del rotor en comparación con el campo magnético del estator [1].

4.1.2. Deslizamiento del rotor

“La velocidad de deslizamiento se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor” [1]:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m$$

Donde:

- n_{des} = velocidad de deslizamiento de la máquina
- n_{sinc} = velocidad de los campos magnéticos
- n_m = velocidad mecánica del eje del motor

El de deslizamiento es igual a la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o un porcentaje. Definiéndolo como [1]:

$$S = \frac{n_{des}}{n_{sinc}} (* 100\%)$$

Sustituyendo y expresando la velocidad mecánica del eje del motor, tendríamos:

$$n_m = (1 - S) * n_{sinc}$$

Si lo expresamos en función de la velocidad angular, tendríamos:

$$\omega_m = (1 - S) * \omega_{sinc}$$

4.1.3. Frecuencia del rotor

En el caso de $n_m = 0$ r/min, la frecuencia en el rotor es $f_r = f_e$, y el deslizamiento es $S = 1$. En el caso de $n_m = n_{sinc}$, la frecuencia en el rotor es $f_r = 0$ Hz y el deslizamiento es $S = 0$. Para cualquier velocidad entre ellas, la frecuencia del rotor es directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad del campo magnético n_{sinc} y la velocidad del rotor n_m . Con esta consideración, la frecuencia del rotor se puede determinar por medio de la siguiente expresión [1]:

$$f_r = \frac{p}{120} (n_{sinc} - n_m)$$

4.2. Circuito equivalente

Se requiere hacer varios análisis hasta llegar al circuito equivalente final de un motor de inducción, dichas consideraciones se explican a continuación.

4.2.1. Modelo de transformador

“Como cualquier otro transformador, hay cierta resistencia y autoinductancia en los devanados primarios (estator) que se deben representar en el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se llama R_1 y la reactancia de dispersión del estator X_1 ” [1].

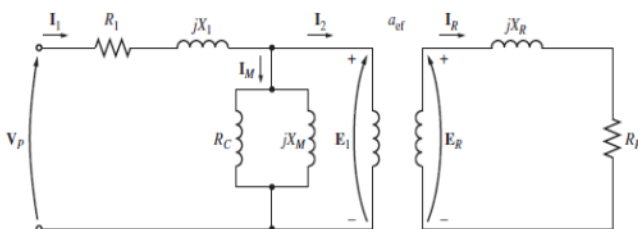
Además, como cualquier otro transformador con núcleo de hierro, el flujo en la máquina se relaciona con la integral del voltaje aplicado E_1 , a diferencia de un transformador convencional, la presencia de un entrehierro en los motores de inducción, incrementa fuertemente la reluctancia del camino del flujo y, por lo tanto, reduce el acoplamiento entre los devanados primario y secundario. Mientras más alta sea la reluctancia que provoca el entrehierro, mayor será la corriente de magnetización que se requiera para obtener cierto nivel de flujo. Por lo tanto, la reactancia de magnetización X_M en el circuito equivalente tendrá que ser mucho menor (o la susceptancia B_M tendrá que ser mucho mayor) de lo que sería en un transformador ordinario [1].

El voltaje primario interno del estator E_1 se acopla al secundario E_R por medio de un transformador ideal con una relación efectiva de vueltas a_{ef} . La relación efectiva de vueltas a_{ef} es bastante fácil de determinar en un motor con rotor devanado: básicamente es la relación entre los conductores por fase del estator y los conductores por fase del rotor, modificada por las diferencias entre los factores de paso y de distribución. Es bastante difícil ver claramente a_{ef} en el caso de un motor con rotor de jaula de ardilla porque no hay diferencias entre los devanados en este tipo de rotor [1].

“El voltaje E_R producido en el rotor en turno produce un flujo de corriente en el circuito del rotor (o del secundario) en cortocircuito de la máquina” [1].

Las impedancias del primario y la corriente de magnetización del motor de inducción son similares a los componentes correspondientes en el circuito equivalente de un transformador. El circuito equivalente de un motor de inducción difiere del circuito equivalente de un transformador, principalmente, en los efectos de variación de la frecuencia en el rotor sobre el voltaje del rotor E_R y las impedancias del rotor R_R y jX_R [1].

Figura 25. Modelo de transformador de un motor



Fuente: [1]

4.2.2. Modelo de circuito del rotor

“Se llama E_{R0} a la magnitud del voltaje inducido del rotor en condición de rotor bloqueado, la magnitud del voltaje inducido con cualquier deslizamiento está dada por la siguiente ecuación” [1]:

$$E_R = S * E_{R0}$$

“La frecuencia del voltaje inducido con cualquier deslizamiento está dada por la siguiente ecuación” [1]:

$$f_r = S * f_e$$

“Este voltaje se induce en un rotor que consta tanto de resistencia como de reactancia. La resistencia del rotor R_R es constante, independientemente del deslizamiento, mientras que

la reactancia del rotor se ve afectada de manera más compleja por el deslizamiento” [1].

“La reactancia del rotor de un motor de inducción depende de la inductancia del rotor y de la frecuencia del voltaje y corriente en el rotor, la reactancia del rotor está dada por” [1]:

$$X_R = S * X_{R0}$$

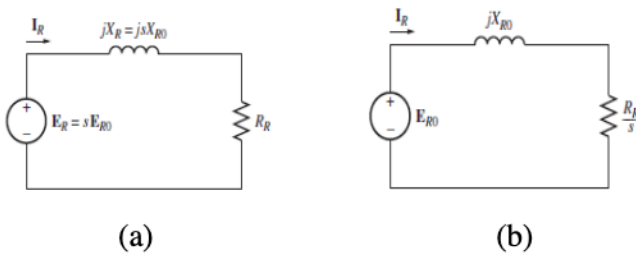
El flujo de corriente está dado por:

$$I_R = \frac{E_{R0}}{R_R/S + jX_{R0}}$$

La impedancia equivalente del rotor es:

$$Z_{R,eq} = R_R/S + jX_{R0}$$

Figura 26. Modelo del circuito del rotor, de forma general (a) y referenciado al rotor (b)



Fuente: [1]

4.2.3. Circuito equivalente final

Para producir el circuito equivalente por fase final de un motor de inducción, es necesario referir la parte del rotor del modelo al lado del estator, tal como se refieren los elementos del secundario al primario de un transformador. Si la relación efectiva de vueltas de un motor de inducción es a_{ef} , entonces el voltaje transformado del rotor es [1]:

$$E_1 = E'_R = a_{ef} * E_{R0}$$

La corriente del rotor es:

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{ef}}$$

La impedancia del rotor es:

$$Z_2 = a_{ef}^2 \left(\frac{R_R}{S} + jX_{R0} \right)$$

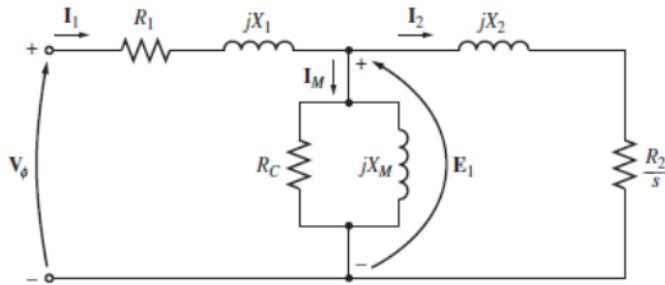
También se puede definir como:

$$R_2 = a_{ef}^2 * R_R$$

$$X_2 = a_{ef}^2 * jX_{R0}$$

Obteniendo de esta manera el siguiente circuito equivalente:

Figura 27. Circuito equivalente de un motor asíncrono simplificado



Nota: [1]

Bibliografía

- [1] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, 5ta ed., México: McGrawHill, 2012, pp. 1-50.
- [2] I. L. Kosow, Máquinas Eléctricas y transformadores, 2da ed., México: PrenticeHall, 1993, pp. 2-4.
- [3] Theodore Wildi, Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia, 6ta ed., México: Pearson Educación, 2007, pp. 29-183.

[4] J. F. Mora, Máquinas Eléctricas, 5ta ed., España:
McGrawHill, 2003, p. 161.