



INSTITUTO SUPERIOR
UNIVERSITARIO

SUCE

**GUÍA GENERAL DE ESTUDIO
DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS**



Guía General de Estudio de Máquinas Eléctricas

Rubén Darío Tirira Chulde

Manuel David Rodríguez Santillán

René Darío Gualotuña Vargas

2026

Esta publicación ha sido sometida a revisión por pares académicos específicos por:

Jefferson Isaac Minaya Chimbo

Instituto Superior tecnológico Tsáchila

Corrección de estilo:

- Edgar Javier Cajas Oña - Docente - Sucre

Diseño y diagramación:

- Freddy Javier Centeno Martínez - Docente - Sucre

x|

Editorial RIMANA

Primera Edición
Quito – Ecuador

INSTITUTO SUPERIOR UNIVERSITARIO SUCRE

ISBN: 978-9942-590-13-8

Esta publicación está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional.



MISIÓN

Ser una Institución Superior Universitaria con estándares de calidad académica e innovación, reconocida a nivel nacional con proyección internacional.

VISIÓN

Formamos profesionales competentes con espíritu emprendedor, capaces de contribuir al desarrollo integral del país.

Los contenidos de este trabajo están sujetos a una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material citando la fuente, bajo los siguientes términos: Reconocimiento- debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante. No Comercial-no puede hacer uso del material con propósitos comerciales. Compartir igual-Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original. No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual
4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)**

Usted acepta y acuerda estar obligado por los términos y condiciones de esta Licencia, por lo que, si existe el incumplimiento de algunas de estas condiciones, no se autoriza el uso de ningún contenido.

Índice

Presentación de la asignatura	7
Resultados del aprendizaje.....	8
UNIDAD 1.....	10
1. Fundamentos de electromagnetismo aplicado	10
1.1 Conceptos esenciales de magnetismo	10
1.1.1 Campo magnético, flujo y densidad de flujo	10
1.1.2 Materiales magnéticos y curvas características básicas	11
1.1.3 Materiales magnéticos y curvas características básicas	12
1.2 Inducción electromagnética	14
1.2.1 Ley de Faraday y fenómenos de inducción.....	14
1.2.2 Principio de Lenz y dirección de la corriente inducida.....	14
1.3 Circuitos magnéticos.....	15
1.3.1 Reluctancia, permeabilidad y trayectoria del flujo	15
1.3.2 Fuerza magnetizante y analogías con circuitos eléctricos.....	16
1.4 Inducción electromagnética aplicada	17
1.4.1 Interacción entre campo magnético y movimiento	17
1.4.2 Relación entre flujo, fuerza electromotriz inducida y transferencia de energía.....	18
1.4.3 Aplicaciones fundamentales de transformadores, motores y generadores.....	19
UNIDAD 2.....	21
2. Transformadores	21
2.1 Principio de funcionamiento	21
2.1.1 Inducción mutua.....	21
2.1.2 Relación de tensiones y espiras.....	21
2.2 Construcción y tipos de transformadores.....	22
2.2.1 Núcleo ferromagnético.....	22
2.2.2 Devanados.....	22
2.2.3 Tipos generales de transformadores.....	22
2.3 Autotransformadores.....	23
2.4 Conexiones trifásicas	23
2.4.1 Conexión en estrella (Y)	23
2.4.2 Conexión en triángulo (Δ).....	23

2.4.3 Conexiones combinadas Y-Y, Y- Δ , Δ -Y, Δ - Δ	24
2.5 Ensayos y parámetros eléctricos	25
2.5.1 Ensayo en vacío	25
2.5.2 Ensayo en cortocircuito.....	25
2.5.3 Circuito equivalente	26
2.5.4 Regulación de tensión	26
UNIDAD 3.....	27
3. Motores de corriente continua.....	27
3.1 Construcción y principio electromecánico.....	27
3.1.1 Componentes principales del motor de corriente continua	27
3.1.2 Formación del par electromagnético.....	27
3.1.3 Función del colector y la conmutación	27
3.2 Tipos de motores de corriente continua	28
3.2.1 Motor de excitación independiente.....	28
3.2.2 Motor de derivación (shunt).....	28
3.5 Pérdidas en motores de corriente continua.....	29
3.5.1 Pérdidas eléctricas.....	29
3.5.2 Pérdidas magnéticas y mecánicas	29
3.6 Pruebas básicas de diagnóstico	29
3.6.1 Prueba de vacío.....	29
3.6.2 Prueba de carga.....	30
UNIDAD 4.....	31
4.Motores de corriente alterna	31
4.1 Introducción y fundamento electromecánico	31
4.1.1 Campo magnético giratorio.....	31
4.2 Motores síncronos.....	31
4.2.1 Estructura y componentes	31
4.2.2 Condición de sincronismo y operación estable.....	32
4.2.3 Requisitos de arranque	32
4.2.4 Aplicaciones comunes	32
4.3 Motores de inducción.....	32
4.3.1 Principio de deslizamiento.....	32
4.3.2 Construcción básica	33

4.3.3 Aplicaciones típicas	33
4.4 Ensayos básicos de motores de corriente alterna	33
4.4.1 Ensayo en vacío	33
4.4.2 Ensayo con rotor bloqueado.....	33
UNIDAD 5.....	35
5. Generadores eléctricos	35
5.1 Principios de conversión electromecánica	35
5.1.1 Fundamento de generación eléctrica.....	35
5.1.2 Polaridad y sentido de la fem inducida	35
5.2 Generadores síncronos	35
5.2.1 Construcción y componentes principales.....	35
5.2.2 Velocidad síncrona y frecuencia generada.....	36
5.2.3 Producción de tensión trifásica	36
5.2.4 Regulación de tensión y excitación.....	36
5.2.5 Curva de saturación del generador.....	36
5.3 Sincronización y operación con redes eléctricas.....	37
5.3.1 Condiciones de sincronismo	37
5.3.2 Sincronoscopio y lámparas sincronizadoras	37
5.4 Generadores asíncronos	37
5.4.1 Principio de operación	37
5.4.2 Generación autónoma y dependencia del banco capacitivo.....	37
5.5 Aplicaciones y consideraciones generales	38
Referencias Bibliográficas	39

Presentación de la asignatura

La asignatura de Máquinas Eléctricas constituye un eje fundamental dentro de la formación del ingeniero eléctrico, pues integra los principios del electromagnetismo con la conversión de energía y el funcionamiento de los equipos presentes en los sistemas eléctricos modernos. El estudio de transformadores, motores y generadores permite comprender los procesos mediante los cuales la energía eléctrica se adapta, se transforma y se convierte en energía mecánica útil para aplicaciones industriales y de servicios.

El enfoque de la asignatura combina fundamentos teóricos con actividades de carácter práctico, orientadas al análisis del comportamiento real de las máquinas bajo diferentes condiciones de operación. Se abordan aspectos constructivos, modelos equivalentes, ensayos normalizados y criterios de selección, con el propósito de que el estudiante desarrolle una visión integral sobre el desempeño, la eficiencia y la confiabilidad de estos equipos.

La formación propuesta busca que el estudiante relacione los fenómenos físicos con las aplicaciones tecnológicas, fortaleciendo su capacidad para interpretar diagramas, realizar cálculos de diseño y evaluar parámetros eléctricos y mecánicos. El aprendizaje se apoya en el análisis de casos y en la resolución de problemas propios del ámbito profesional, promoviendo un pensamiento crítico y responsable frente al uso de la energía eléctrica. De acuerdo con la orientación académica establecida, el estudio de las máquinas eléctricas contribuye a la preparación para el mercado laboral, donde se requiere dominio de conceptos de electromagnetismo aplicado, comprensión de los métodos de control y mantenimiento, y conocimiento de las normas de seguridad asociadas a la operación de equipos

Resultados del aprendizaje

Comprende de manera integral los fundamentos del electromagnetismo aplicado y su relación directa con el funcionamiento de las máquinas eléctricas, interpretando los fenómenos de inducción, magnetización y conversión de energía como base para el análisis de transformadores, motores y generadores presentes en los sistemas eléctricos modernos.

Reconoce con criterio técnico los elementos constructivos de las máquinas eléctricas, identificando la función del núcleo, devanados, sistemas de aislamiento, dispositivos de conmutación y mecanismos de ventilación, con el fin de explicar cómo cada componente influye en el rendimiento, la vida útil y la seguridad operativa de los equipos.

Interpreta y utiliza modelos equivalentes de transformadores y máquinas rotativas, a partir de los parámetros obtenidos en ensayos normalizados, desarrollando la capacidad de relacionar mediciones eléctricas con el comportamiento real de los equipos bajo diferentes condiciones de carga y operación.

Analiza el desempeño de motores de corriente continua y de corriente alterna considerando las curvas características de torque, velocidad, deslizamiento y eficiencia, lo que le permite seleccionar el tipo de máquina más adecuado para aplicaciones industriales y sistemas de accionamiento.

Describe y evalúa los métodos de control, arranque y protección empleados en máquinas eléctricas, valorando los criterios técnicos y normativos que garantizan la confiabilidad del sistema, la continuidad del servicio y la seguridad de las personas e instalaciones.

Aplica procedimientos de cálculo para el dimensionamiento básico de transformadores y motores, estimando pérdidas, regulación de tensión y parámetros de operación, con el propósito de tomar decisiones fundamentadas en procesos de selección, mantenimiento y diagnóstico técnico.

Integra los conocimientos teóricos con actividades prácticas de laboratorio y análisis de casos reales, demostrando capacidad para resolver problemas del ámbito profesional mediante el uso de instrumentos de medición, interpretación de diagramas y elaboración de informes técnicos con rigor académico.

UNIDAD 1

1. Fundamentos de electromagnetismo aplicado

1.1 Conceptos esenciales de magnetismo

1.1.1 Campo magnético, flujo y densidad de flujo

El estudio del campo magnético constituye la base operativa de las máquinas eléctricas, ya que la interacción entre corrientes y campos magnéticos es la responsable de la conversión de energía electromecánica. Desde un enfoque físico, un campo magnético corresponde a una región del espacio donde una carga en movimiento experimenta una fuerza perpendicular a su trayectoria, fenómeno que se deriva de la ley de Lorentz (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

Para caracterizar el comportamiento magnético se introducen dos magnitudes fundamentales: el flujo magnético y la densidad de flujo. El flujo magnético expresa la cantidad total de campo que atraviesa una superficie dada y su formulación general, presentada en la Ecuación (1), permite analizar cómo el campo se distribuye en un núcleo o región determinada:

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1)$$

Esta definición integral resulta esencial para describir sistemas donde el campo no es uniforme, situación frecuente en estructuras ferromagnéticas y entrehierros de máquinas. En casos donde la distribución del campo puede considerarse aproximadamente constante, la expresión anterior se reduce a la relación mostrada en la Ecuación (2), que es ampliamente utilizada en el diseño elemental de transformadores y máquinas rotativas (Del Toro, 1985):

$$\Phi = B \cdot A \quad (2)$$

La densidad de flujo magnético B , medida en teslas, representa la intensidad del campo por unidad de área. Su control es determinante para evitar saturación magnética, fenómeno que altera la linealidad del

sistema y genera incrementos notables de pérdidas, deteriorando la eficiencia y el comportamiento dinámico de la máquina (Chapman, 2012).

Cuando una corriente circula por un conductor rectilíneo, el campo magnético adopta la forma de circunferencias concéntricas alrededor del conductor, tal como se ilustra en la Figura 1. El sentido de estas líneas se determina mediante la regla de la mano derecha, herramienta fundamental para establecer la orientación del campo en función del sentido de la corriente (Wildi, 2006).

Figura 1. Distribución del campo magnético alrededor de un conductor con corriente



1.1.2 Materiales magnéticos y curvas características básicas

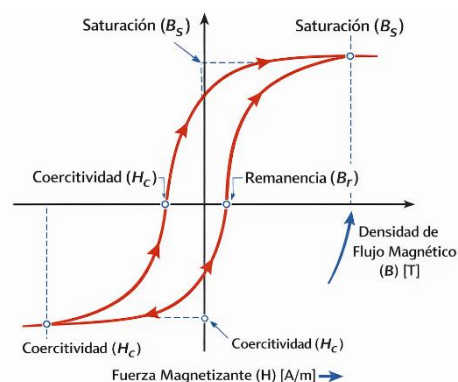
El comportamiento de los materiales magnéticos constituye un elemento central en el diseño y operación de máquinas eléctricas, ya que el núcleo ferromagnético determina cómo se establece, guía y almacena el flujo magnético dentro de la estructura. Los materiales comúnmente empleados en transformadores, motores y generadores son clasificados de acuerdo con su respuesta al campo magnético aplicado, destacándose tres grupos fundamentales: diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos. Entre ellos, los ferromagnéticos poseen una relevancia técnica superior debido a su alta permeabilidad y a la capacidad de concentrar flujo, condición esencial para alcanzar niveles adecuados de inducción en dispositivos eléctricos (Wildi, 2006).

Los materiales ferromagnéticos presentan una relación no lineal entre la densidad de flujo magnético B y la intensidad del campo magnético H . Esta relación, conocida como curva de magnetización o curva $B-H$, refleja la facilidad con la que el material puede ser magnetizado y constituye un parámetro crítico

para determinar la operación segura del núcleo. Como se aprecia en la Figura 2, la pendiente inicial de esta curva representa la permeabilidad del material, mientras que su tendencia a “aplanarse” revela la aproximación a la saturación, punto a partir del cual aumento adicional en H producen incrementos mínimos en B (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

El comportamiento cíclico del material al ser sometido a magnetización alternante da origen al lazo de histéresis, representado también en la Figura 2. Este lazo muestra que el material no regresa exactamente a su estado inicial al retirar el campo aplicado, fenómeno debido a fuerzas internas entre dominios magnéticos. El área encerrada por el lazo corresponde a las pérdidas por histéresis, las cuales incrementan con la frecuencia y la amplitud de la magnetización. Estas pérdidas, junto con las corrientes parásitas inducidas dentro del material, constituyen una parte esencial del análisis térmico de máquinas eléctricas (Del Toro, 1985).

Figura 2. Curva B–H y lazo de histéresis de un material ferromagnético



1.1.3 Materiales magnéticos y curvas características básicas

Las pérdidas magnéticas representan un componente esencial en el análisis energético de máquinas eléctricas, ya que afectan de manera directa la eficiencia, el calentamiento y la estabilidad operativa de transformadores, motores y generadores. Estas pérdidas se originan dentro del núcleo ferromagnético cuando el flujo magnético varía en el tiempo, situación inherente a los sistemas de corriente alterna. Entre los mecanismos principales destacan las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes

parásitas o de Foucault, cuya magnitud depende de las propiedades del material, la frecuencia de operación y la densidad de flujo magnético alcanzada (Wildi, 2006).

Las pérdidas por histéresis surgen del comportamiento cíclico que presentan los dominios magnéticos cuando el material es sometido a magnetización alternante. Como se analiza a partir del lazo de histéresis mostrado en la Figura 2, la magnetización no sigue la misma trayectoria durante el ciclo de incremento y decremento del campo magnético. El área encerrada por el lazo representa la energía perdida en cada ciclo de magnetización, la cual se disipa en forma de calor dentro del núcleo. Una forma aproximada de cuantificar estas pérdidas se expresa mediante la Ecuación (3), conocida como la ecuación de Steinmetz:

$$P_h = k_h f B_{\max}^n \quad (3)$$

En esta expresión, P_h representa la potencia perdida por histéresis, k_h es una constante dependiente del material, f la frecuencia de operación y B_{\max} la densidad de flujo máxima alcanzada en el ciclo. El exponente n suele encontrarse entre 1,6 y 2,0 para materiales ferromagnéticos comunes. Esta formulación permite observar que las pérdidas por histéresis aumentan de forma significativa con la frecuencia y con los niveles de flujo magnético a los que se somete el núcleo (Del Toro, 1985).

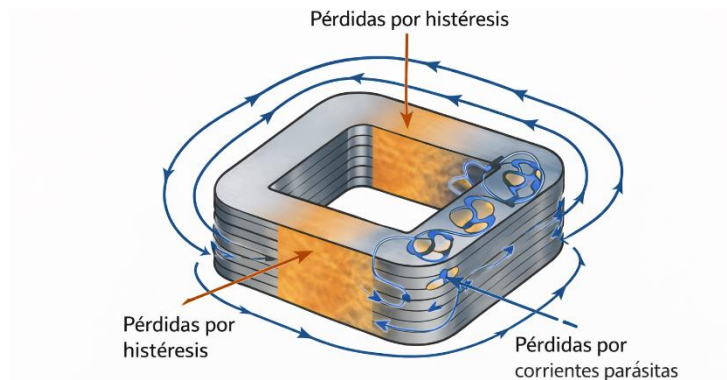
Por otra parte, las pérdidas por corrientes parásitas se originan debido a que un flujo variable induce corrientes circulantes dentro del material ferromagnético, tal como lo establece la ley de Faraday. Estas corrientes internas producen calentamiento por efecto Joule y representan un componente importante de las pérdidas totales del núcleo. Su magnitud puede aproximarse mediante la Ecuación (4):

$$P_e = k_e f^2 B_{\max}^2 t^2 \quad (4)$$

La adecuada selección del material y del espesor de las láminas, así como el control de la densidad de flujo, resulta determinante para minimizar las pérdidas magnéticas y mejorar la eficiencia global de la máquina. Un diseño correcto permite reducir el calentamiento, evitar puntos de saturación indeseada y

extender la vida útil del dispositivo, especialmente en transformadores de potencia y motores de servicio continuo (Chapman, 2012), ver Figura 3.

Figura 3. Pérdidas por histéresis y corrientes parásitas



1.2 Inducción electromagnética

1.2.1 Ley de Faraday y fenómenos de inducción

El principio de inducción electromagnética constituye uno de los fundamentos más relevantes de las máquinas eléctricas, ya que describe cómo un flujo magnético variable en el tiempo produce una fuerza electromotriz (fem) en un conductor o devanado. Este fenómeno fue establecido experimentalmente por Michael Faraday en 1831 y formalizado posteriormente en lo que se conoce como la ley de Faraday, base conceptual sobre la que operan transformadores, generadores y prácticamente todas las máquinas rotativas modernas (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

La ley establece que una variación temporal del flujo magnético que atraviesa un circuito induce una fem proporcional a la rapidez con la que cambia dicho flujo. Este principio se expresa mediante la Ecuación (5), formulación ampliamente utilizada para describir procesos de generación eléctrica:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

1.2.2 Principio de Lenz y dirección de la corriente inducida

El principio de Lenz constituye el complemento indispensable de la ley de Faraday, ya que establece el sentido de la fem y de la corriente inducida cuando el flujo magnético varía en el tiempo. Este principio, formulado por Heinrich Lenz en 1834, determina que la corriente inducida siempre se orienta de manera tal que se opone a la causa que la genera. Su aplicación garantiza la conservación de la energía y define el comportamiento dinámico de sistemas electromagnéticos, evitando respuestas no físicas o inestables (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

La interpretación más común del principio de Lenz consiste en observar la respuesta inducida ante un incremento o disminución del flujo. Cuando el flujo magnético que atraviesa un circuito aumenta, la corriente inducida produce un campo magnético opuesto a dicho incremento. Por el contrario, si el flujo disminuye, la corriente inducida genera un campo que intenta mantener el flujo original. Esta relación se deriva directamente del signo negativo presente en la formulación de Faraday, mostrado en la Ecuación (5), y constituye un mecanismo regulador fundamental en máquinas eléctricas.

1.3 Circuitos magnéticos

1.3.1 Reluctancia, permeabilidad y trayectoria del flujo

El análisis de circuitos magnéticos permite modelar el comportamiento del flujo dentro de núcleos y estructuras utilizadas en máquinas eléctricas. Este enfoque, análogo a los circuitos eléctricos, facilita el diseño y la evaluación de dispositivos como transformadores, motores y generadores, ya que permite estimar la facilidad con la que el flujo se establece y circula dentro de un material ferromagnético. En un circuito magnético ideal, el flujo se desplaza a través del camino de menor reluctancia, concepto equivalente a la resistencia en un circuito eléctrico, pero aplicado al comportamiento magnético (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

La reluctancia magnética, denotada por \mathcal{R} , representa la oposición que presenta un material al establecimiento del flujo magnético. Esta propiedad depende de la longitud del camino magnético, el área transversal del núcleo y la permeabilidad del material. Se expresa mediante la Ecuación (6):

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (6)$$

donde l es la longitud del camino del flujo, A el área transversal y μ la permeabilidad del material. Esta relación permite comprender por qué las máquinas eléctricas utilizan materiales ferromagnéticos de alta permeabilidad: valores elevados de μ reducen la reluctancia y facilitan el establecimiento del flujo, mejorando la transferencia de energía electromagnética (Del Toro, 1985).

1.3.2 Fuerza magnetizante y analogías con circuitos eléctricos

La fuerza magnetizante, también conocida como fuerza magnetomotriz (fmm), constituye el agente responsable de establecer y mantener el flujo magnético dentro de un circuito. De forma análoga a cómo una fuente de voltaje impulsa una corriente a través de un circuito eléctrico, la fuerza magnetizante impulsa el flujo a través del circuito magnético venciendo la reluctancia del medio. Esta analogía conceptual facilita el análisis de máquinas eléctricas y permite emplear herramientas familiares de los circuitos eléctricos para comprender fenómenos magnéticos con mayor claridad (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003). La fuerza magnetomotriz es generada por una corriente que circula a través de un devanado, y su magnitud se expresa mediante la Ecuación (7).

$$\text{fmm} = N I \quad (7)$$

Donde N es el número de espiras del devanado e I es la corriente que circula por él. Esta relación evidencia que incrementar el número de espiras o la corriente de excitación intensifica la capacidad del devanado para establecer flujo magnético dentro del núcleo. La combinación de ambas variables ofrece flexibilidad de diseño, permitiendo que transformadores, motores y generadores operen dentro de los rangos deseados de flujo y densidad magnética (Del Toro, 1985).

Utilizando la analogía eléctrica, la fuerza magnetomotriz se puede comparar con el voltaje, el flujo magnético con la corriente y la reluctancia con la resistencia. Esto conduce a una formulación equivalente a la ley de Ohm para circuitos magnéticos, expresada en la Ecuación (8).

$$\Phi = \frac{f_{mm}}{\mathcal{R}} \quad (8)$$

Las analogías se extienden incluso a configuraciones más complejas. Así como en circuitos eléctricos existen resistencias en serie y paralelo, los circuitos magnéticos pueden presentar reluctancias combinadas, que permiten modelar múltiples trayectorias del flujo. En estructuras ferromagnéticas que incluyen entrehierros, derivaciones o ramas paralelas, estas aproximaciones facilitan el análisis de distribución del flujo y la identificación de regiones con mayor carga magnética o riesgo de saturación (Chapman, 2012), ver Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros equivalentes entre los circuitos eléctrico y magnético

Circuito Eléctrico	Circuito magnético
f.e.m.[V]	f.m.m.[A.V.]
Densidad de corriente [A/m]	Induccion [T]
Conductividad [S/m]	Permeabilidad [H/m]
Campo eléctrico [V/m]	Campo magnético [A.v/m]
Corriente el[ectrica [A]	Flujo magnético [Wb]
Potencial eléctrico [V]	Potencial magnético [A.v]
Resistencia eléctrica [ohm]	Reluctancia [H ⁻¹]

1.4 Inducción electromagnética aplicada

1.4.1 Interacción entre campo magnético y movimiento

La interacción entre un conductor en movimiento y un campo magnético es uno de los mecanismos esenciales que permiten la conversión entre energía mecánica y eléctrica. Este principio, íntimamente ligado a la ley de Faraday y al principio de Lenz, establece que cuando un conductor se desplaza dentro de un campo magnético, se induce en él una fuerza electromotriz cuya magnitud depende de la velocidad de movimiento, la intensidad del campo y la orientación relativa entre ambos (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003). En aplicaciones prácticas como generadores eléctricos, es el movimiento mecánico del

rotor el que provoca que los conductores corten líneas de flujo, generando una fem inducida según la Ecuación (9).

$$e = B l v \quad (9)$$

donde B es la densidad de flujo magnético, l la longitud efectiva del conductor dentro del campo y v la velocidad relativa del movimiento. Esta formulación, aplicable a situaciones donde el campo es uniforme y el movimiento es perpendicular al flujo, constituye una representación simplificada pero altamente útil en el análisis de máquinas rotativas (Chapman, 2012).

El principio también se aplica en motores eléctricos, pero con un propósito inverso: en lugar de generar energía eléctrica a partir de movimiento, los motores utilizan la interacción entre corriente y campo para producir fuerza mecánica. En este caso, la corriente inducida en el rotor actúa de forma que se opone al movimiento relativo entre el rotor y el campo, en concordancia con el principio de Lenz. Esta oposición genera una fuerza que impulsa la rotación del rotor, fenómeno que constituye la base del torque electromagnético (Del Toro, 1985).

1.4.2 Relación entre flujo, fuerza electromotriz inducida y transferencia de energía

La relación entre el flujo magnético, la fem inducida y la transferencia de energía constituye el núcleo operativo de transformadores, motores y generadores. En esencia, cuando el flujo magnético que atraviesa un devanado varía en el tiempo, se induce una tensión que puede transferir energía hacia otro circuito o convertirse en trabajo mecánico según la configuración del sistema. Este principio, derivado de la ley de Faraday, permite explicar la operación de prácticamente todas las máquinas eléctricas (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

Cuando un flujo variable vinculado a un circuito ejerce un cambio temporal significativo, la fem inducida actúa como un mecanismo de transferencia energética. El valor instantáneo de esta fem se expresa mediante la relación ya introducida en la Ecuación (5), pero la forma en que esta tensión

contribuye a la conversión de energía depende del camino que sigue la corriente inducida y de las condiciones del sistema. (Wildi, 2006).

En máquinas rotativas, la relación entre flujo y fem inducida adquiere una dimensión adicional. Cuando el rotor intercepta líneas de flujo debido al movimiento mecánico, la fem inducida expresada en la Ecuación (9) puede entregar energía eléctrica al circuito externo, como ocurre en generadores, o puede absorber energía para producir fuerza mecánica, como en motores. Esta dualidad explica la naturaleza reversible de la conversión electromecánica de energía, donde el sentido del flujo de energía depende únicamente de las condiciones de operación (Chapman, 2012).

La potencia eléctrica asociada a un conductor sometido a un campo magnético puede analizarse relacionando la fem inducida y la corriente que circula por dicho conductor. Si se considera un conductor de longitud l sometido a un campo magnético B y una velocidad de desplazamiento v , la fem inducida se obtiene mediante la Ecuación (9). Si una corriente I circula por él, la potencia instantánea puede expresarse como:

$$P = e I = B l v I \quad (10)$$

1.4.3 Aplicaciones fundamentales de transformadores, motores y generadores

La inducción electromagnética constituye el principio operativo central de las máquinas eléctricas, permitiendo la transferencia de energía entre circuitos, la conversión entre dominios eléctricos y mecánicos y la regulación de múltiples variables de operación. Su aplicación difiere según el dispositivo, pero el fundamento físico permanece inalterado: una variación de flujo magnético provoca la aparición de una fem capaz de producir movimiento, generar corriente o transferir energía (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

En transformadores, la inducción electromagnética posibilita la transferencia de energía entre dos devanados sin que exista conexión eléctrica directa entre ellos. El devanado primario, al ser alimentado con corriente alterna, produce un flujo variable que induce una tensión en el devanado secundario

mediante el acoplamiento magnético. La magnitud de la tensión inducida depende de la relación de espiras entre los devanados, mientras que la eficiencia del proceso está determinada por la calidad del acoplamiento magnético y las características del núcleo. Esta forma de transferencia energética, descrita por la Ecuación (5), constituye un método altamente eficiente y seguro para adaptar niveles de tensión y corriente en sistemas de potencia (Wildi, 2006).

En los motores eléctricos, la inducción electromagnética se manifiesta a través de la interacción entre corrientes inducidas y campos magnéticos. Cuando un rotor se encuentra expuesto a un campo magnético variable o a un movimiento relativo respecto al campo, se inducen en él corrientes cuyo campo asociado interactúa con el campo del estator, generando un par de fuerzas que produce movimiento mecánico. Este principio, que responde al sentido establecido por el principio de Lenz, explica la producción del torque electromagnético y constituye la base de operación de motores de inducción y motores síncronos (Chapman, 2012). En estos dispositivos, la adecuada relación entre flujo, corrientes inducidas y geometría del entrehierro determina el rendimiento y la estabilidad de operación.

UNIDAD 2

2. Transformadores

2.1 Principio de funcionamiento

2.1.1 Inducción mutua

El transformador opera mediante el fenómeno de inducción mutua. Cuando el devanado primario se alimenta con corriente alterna, se establece un flujo magnético variable que se enlaza con el devanado secundario. De acuerdo con la ley de Faraday, la variación temporal del flujo induce una fuerza electromotriz proporcional al número de espiras y a la rapidez del cambio del flujo, principio esencial en el funcionamiento de máquinas eléctricas (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (11)$$

Esta expresión refleja cómo una espira o un devanado experimenta una fem cuando existe un cambio de flujo, mecanismo que hace posible que un transformador transfiera energía de un circuito a otro sin conexión directa. El enlace magnético entre devanados es más eficiente cuando el núcleo concentra adecuadamente el flujo y minimiza los caminos dispersos, lo que permite un acoplamiento efectivo entre primario y secundario (Wildi, 2006).

2.1.2 Relación de tensiones y espiras

Si se asume que el flujo concatenado con ambos devanados es el mismo, puede establecerse una relación proporcional entre tensiones y espiras. Esta relación explica por qué un transformador puede elevar o reducir tensión sin alterar la frecuencia de la señal (Wildi, 2006).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (12)$$

La ecuación anterior permite analizar transformadores de forma directa, proporcionando una herramienta útil para seleccionar o dimensionar el equipo. La relación de transformación es un parámetro clave para aplicaciones de adaptación de niveles de tensión en sistemas de potencia y distribución (Del Toro, 1985).

2.2 Construcción y tipos de transformadores

2.2.1 Núcleo ferromagnético

El núcleo constituye el camino principal del flujo magnético. Se fabrica con chapas laminadas aisladas entre sí para reducir pérdidas por corrientes parásitas, que aumentan con el espesor del material y con la frecuencia. La forma del núcleo —tipo columna o acorazado— influye en la distribución del flujo, en los esfuerzos mecánicos y en la eficiencia térmica del transformador (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

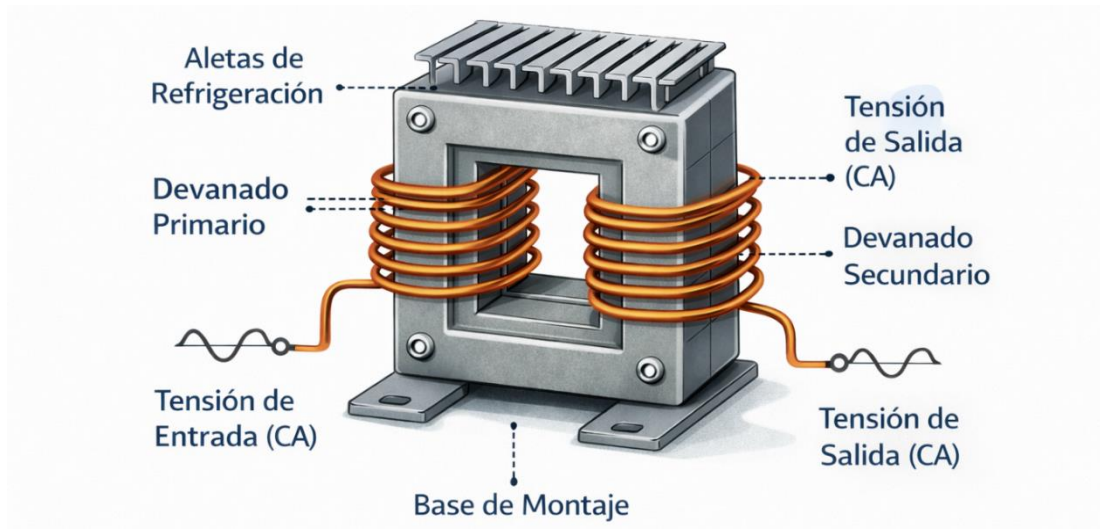
2.2.2 Devanados

Los devanados están contruidos en cobre o aluminio, aislados según el nivel de tensión nominal. La relación entre las espiras del primario y del secundario fija la relación de transformación, mientras que la sección del conductor se define considerando pérdidas, calentamiento y esfuerzos mecánicos por cortocircuito (Chapman, 2012).

2.2.3 Tipos generales de transformadores

Los transformadores de potencia y distribución son los más frecuentes en sistemas eléctricos. Ambos emplean los mismos principios de operación, con diferencias en diseño relacionadas con niveles de tensión, sistemas de refrigeración y requisitos de aislamiento (Wildi, 2006), ver Figura 4.

Figura 4. Componentes fundamentales de un transformador monofásico



2.3 Autotransformadores

El autotransformador utiliza un único devanado con derivaciones en lugar de dos bobinados independientes. Esta configuración permite obtener relaciones de transformación moderadas con menor cantidad de material conductor y mejores eficiencias. Su principal limitación es que no proporciona aislamiento galvánico entre entrada y salida, por lo que su aplicación debe considerar los requisitos de protección y coordinación de aislamiento (Del Toro, 1985).

2.4 Conexiones trifásicas

2.4.1 Conexión en estrella (Y)

La conexión en estrella se utiliza en transformadores de alta tensión porque permite disponer de un neutro accesible, facilita la puesta a tierra del sistema y reduce exigencias de aislamiento en los devanados. Cada fase está sometida únicamente a la tensión de fase, mientras que las tensiones de línea resultan mayores, lo que optimiza el uso del aislamiento disponible (Wildi, 2006).

2.4.2 Conexión en triángulo (Δ)

En la conexión Δ los devanados se enlazan formando un circuito cerrado. Cada devanado queda sometido a la tensión de línea y puede absorber corrientes elevadas. Esta configuración también permite la circulación interna de corrientes de secuencia cero, lo que ayuda a estabilizar el sistema frente a desequilibrios y ciertos armónicos (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

2.4.3 Conexiones combinadas Y-Y, Y- Δ , Δ -Y, Δ - Δ

Las conexiones combinadas se emplean para adaptar niveles de tensión entre subsistemas y controlar el comportamiento ante corrientes de desequilibrio. La configuración Y- Δ se utiliza frecuentemente en transformadores elevadores en generación, mientras que Δ -Y es común en transformadores reductores de distribución, debido a su capacidad para proporcionar neutro accesible, ver Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8.

Figura 5. Conexión trifásica Y-Y

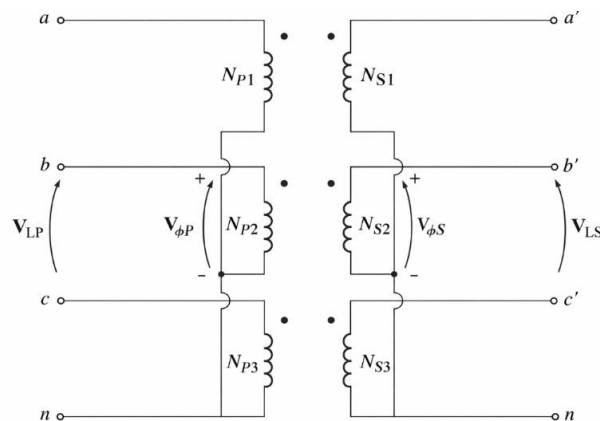


Figura 6. Conexión trifásica Y- Δ

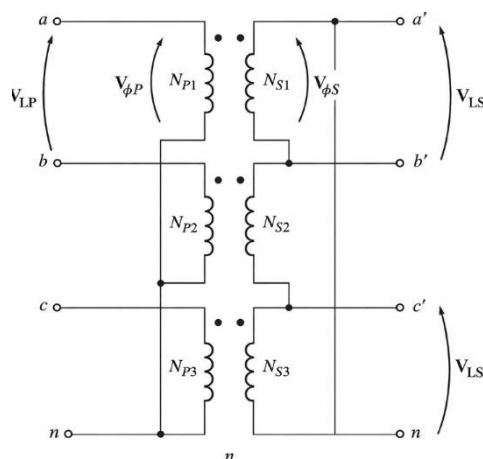


Figura 7. Conexión trifásica Δ -Y

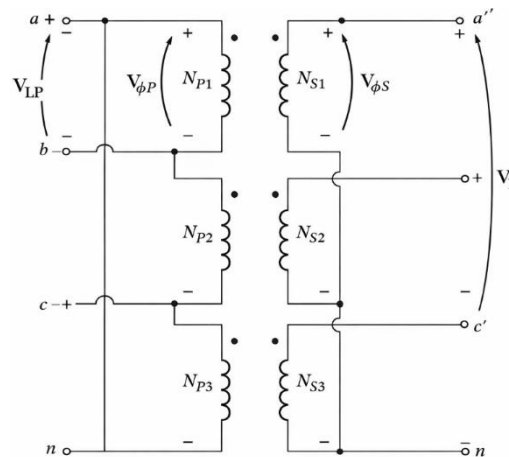
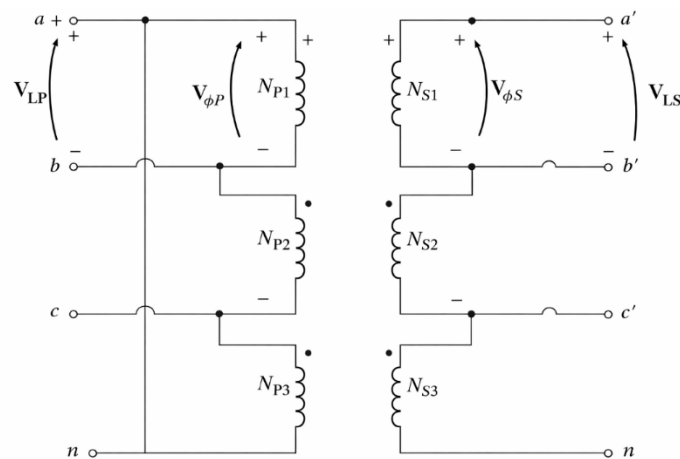


Figura 8. Conexión trifásica combinada Δ - Δ



2.5 Ensayos y parámetros eléctricos

2.5.1 Ensayo en vacío

El ensayo en vacío consiste en alimentar el primario con tensión nominal mientras el secundario permanece abierto. Permite determinar la corriente magnetizante y las pérdidas en el núcleo, que incluyen histéresis y corrientes parásitas (Wildi, 2006).

2.5.2 Ensayo en cortocircuito

En este ensayo se cortocircuita el secundario y se aplica al primario una tensión reducida para establecer la corriente nominal. Se utilizan las magnitudes medidas para calcular la impedancia equivalente y las pérdidas en los devanados, fundamentales para evaluar el comportamiento en carga (Del Toro, 1985).

2.5.3 Circuito equivalente

Los parámetros obtenidos en los ensayos permiten construir el circuito equivalente del transformador, que modela la resistencia, reactancia de dispersión y la rama magnetizante. Este modelo se emplea ampliamente para analizar regulación, caída de tensión y eficiencia (Chapman, 2012).

2.5.4 Regulación de tensión

La regulación expresa la variación relativa entre la tensión en vacío y la tensión bajo carga nominal:

$$RT = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100\% \quad (13)$$

Esta magnitud evalúa la capacidad del transformador para mantener la tensión dentro de límites aceptables cuando se aplican cargas reales en sistemas de distribución (Wildi, 2006).

UNIDAD 3

3. Motores de corriente continua

3.1 Construcción y principio electromecánico

3.1.1 Componentes principales del motor de corriente continua

El motor de corriente continua convierte energía eléctrica en energía mecánica mediante la interacción entre el campo magnético del estator y las corrientes inducidas en el rotor. Su arquitectura clásica comprende un estator con imanes permanentes o devanados de campo, un rotor laminado con ranuras que alojan los conductores del inducido, un colector segmentado encargado de la conmutación y un conjunto de escobillas que permiten el intercambio eléctrico con las delgas. La disposición de estos elementos proporciona un control estable de la velocidad y un torque adecuado para aplicaciones industriales, de automatización y accionamientos de precisión (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

3.1.2 Formación del par electromagnético

El par electromagnético se origina cuando un conductor que transporta corriente se encuentra dentro de un campo magnético. La fuerza ejercida sobre el conductor sigue la ley de Lorentz, cuya formulación se introduce a continuación como nueva ecuación en la secuencia general de la guía. La expresión se presenta en la Ecuación (14):

$$F = B I l \quad (14)$$

3.1.3 Función del colector y la conmutación

El colector segmentado y las escobillas permiten invertir la corriente en los conductores del rotor en los instantes adecuados, manteniendo un par unidireccional. La transición de corriente entre delgas consecutivas constituye el proceso de conmutación, cuya estabilidad influye de forma directa en las pérdidas, el calentamiento y la vida útil del motor. Un diseño adecuado del colector y el material de las

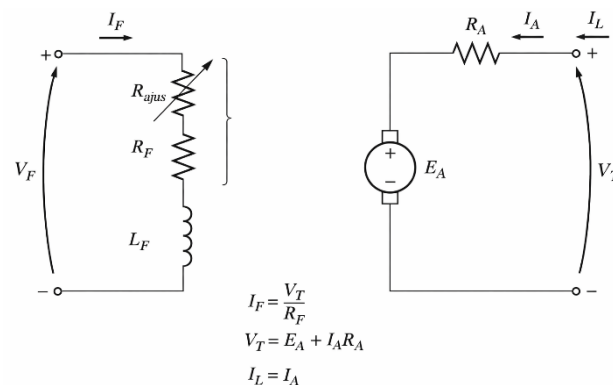
escobillas reduce chispas, vibraciones y desgaste, garantizando un funcionamiento uniforme incluso en condiciones de carga variables (Chapman, 2012).

3.2 Tipos de motores de corriente continua

3.2.1 Motor de excitación independiente

En este motor, el devanado de campo se alimenta desde una fuente externa independiente del inducido. Esta característica permite regular el flujo magnético con precisión y controlar el torque mediante ajustes en la corriente del inducido. El torque electromagnético se rige por la expresión ya definida en la Ecuación (2) de capítulos previos, donde el torque depende proporcionalmente del flujo por polo y de la corriente de armadura (Fitzgerald et al., 2003), ver Figura 9.

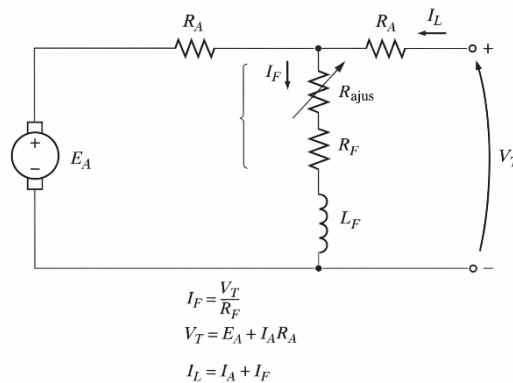
Figura 9. Circuito equivalente de un motor de cd de excitación independiente



3.2.2 Motor de derivación (shunt)

El motor shunt presenta su devanado de campo conectado en paralelo con el inducido. Gracias a la alta resistencia del devanado de campo, el flujo magnético permanece prácticamente constante, lo que brinda estabilidad de velocidad aún bajo variaciones moderadas de carga (Wildi, 2006), ver Figura 10.

Figura 10. Circuito equivalente de un motor de cd de excitación en derivación



3.5 Pérdidas en motores de corriente continua

3.5.1 Pérdidas eléctricas

Las pérdidas eléctricas se producen en los devanados del campo y del inducido debido al calentamiento resistivo. La potencia disipada sigue la expresión general presentada en la Ecuación (4) en unidades anteriores, en la cual las pérdidas en cobre dependen del cuadrado de la corriente y de la resistencia del devanado. Estas pérdidas aumentan con la carga y requieren una adecuada gestión térmica para garantizar la vida útil del motor (Fitzgerald et al., 2003).

3.5.2 Pérdidas magnéticas y mecánicas

Las pérdidas magnéticas comprenden histéresis y corrientes parásitas en el núcleo del rotor, mientras que las pérdidas mecánicas se derivan del rozamiento en los cojinetes, fricción en el colector y resistencia del aire. Estas pérdidas afectan la eficiencia global del motor y deben considerarse en el diagnóstico, mantenimiento y evaluación del rendimiento operativo (Wildi, 2006).

3.6 Pruebas básicas de diagnóstico

3.6.1 Prueba de vacío

La prueba de vacío evalúa el comportamiento del motor sin carga. Se registra la corriente del inducido y la velocidad de rotación para identificar fricción excesiva, desalineación, irregularidades en las escobillas o defectos en el colector. Una corriente mayor a la esperada indica la presencia de pérdidas mecánicas o magnéticas elevadas. Este procedimiento resulta útil como diagnóstico preliminar antes de pruebas más exigentes (Chapman, 2012).

3.6.2 Prueba de carga

Durante la prueba de carga el motor acciona un dispositivo mecánico controlado, registrándose corriente, torque y velocidad. La eficiencia del motor se evalúa mediante la Ecuación (15), introducida aquí como nueva ecuación general del documento:

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100\% \quad (15)$$

Esta ecuación permite determinar la proporción de energía útil respecto de la energía suministrada, identificando pérdidas excesivas y comportamientos térmicos anómalos (Del Toro, 1985).

UNIDAD 4

4. Motores de corriente alterna

4.1 Introducción y fundamento electromecánico

4.1.1 Campo magnético giratorio

El funcionamiento de los motores de corriente alterna se basa en la creación de un campo magnético giratorio, generado por corrientes trifásicas desfasadas alimentadas al estator. Cada fase produce un campo alternante, y la superposición espacial de los tres campos origina un vector magnético resultante que gira a velocidad constante. Esta velocidad, conocida como velocidad síncrona, depende de la frecuencia de la red y del número de polos del estator (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

La expresión de la velocidad síncrona se incorpora aquí como nueva ecuación de la guía y se presenta en la Ecuación (16):

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (16)$$

donde n_s es la velocidad síncrona en revoluciones por minuto, f la frecuencia de suministro y p el número total de polos del estator. Esta ecuación constituye la base para analizar tanto motores síncronos como motores de inducción.

4.2 Motores síncronos

4.2.1 Estructura y componentes

El motor síncrono opera a velocidad constante igual a la velocidad síncrona. Su construcción incluye un estator trifásico que genera el campo giratorio y un rotor que puede ser de polos salientes o de rotor cilíndrico, ambos excitados mediante corriente continua para crear un campo magnético propio. El rotor

requiere suministro de corriente de excitación, que puede proporcionarse mediante anillos rozantes o mediante sistemas brushless (Fitzgerald et al., 2003).

4.2.2 Condición de sincronismo y operación estable

La operación del motor síncrono requiere que el rotor se mantenga en perfecta sincronía con el campo giratorio. Si se produce un desfase excesivo entre el rotor y el campo, el par desarrollado disminuye abruptamente y el motor pierde sincronismo. Por esta razón, los motores síncronos se utilizan en aplicaciones donde se requiere velocidad constante aún bajo variaciones de carga (Chapman, 2012).

La sincronización depende del ángulo de carga, que representa el desfase entre el eje del rotor y el campo del estator. A medida que se incrementa la carga mecánica, el ángulo aumenta hasta un valor máximo antes de perder estabilidad.

4.2.3 Requisitos de arranque

Los motores síncronos no pueden arrancar directamente bajo sincronismo debido a que el rotor se encuentra inicialmente en reposo y no puede seguir el campo giratorio desde cero velocidad. Por ello, requieren métodos auxiliares como motores de arrastre, devanados amortiguadores o variadores electrónicos de frecuencia. Una vez que el rotor alcanza una velocidad cercana a la síncrona, se aplica excitación de corriente continua para establecer el estado estable (Wildi, 2006).

4.2.4 Aplicaciones comunes

Los motores síncronos se utilizan en sistemas que requieren velocidad constante, corrección de factor de potencia y alta eficiencia. Se emplean en compresores, maquinaria de procesos continuos, accionamientos industriales de precisión y sistemas eléctricos donde pueden funcionar como motores o como compensadores sincrónicos.

4.3 Motores de inducción

4.3.1 Principio de deslizamiento

A diferencia del motor síncrono, el motor de inducción requiere un deslizamiento entre el rotor y el campo giratorio para inducir corriente en los conductores del rotor. El deslizamiento se define como la diferencia relativa entre la velocidad síncrona y la velocidad real del rotor. La expresión general del deslizamiento se presenta como nueva ecuación secuencial en este capítulo, mostrada en la Ecuación (17):

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (17)$$

donde n_s es la velocidad síncrona y n_r la velocidad del rotor. El deslizamiento permite la inducción de corriente en el rotor y la consiguiente producción de torque (Del Toro, 1985).

4.3.2 Construcción básica

Los motores de inducción pueden tener rotor en jaula de ardilla o rotor devanado. El diseño en jaula es robusto y requiere poco mantenimiento, mientras que el rotor devanado permite control más preciso del torque mediante resistencias externas. El estator presenta devanados trifásicos distribuidos que generan el campo magnético giratorio.

4.3.3 Aplicaciones típicas

Los motores de inducción se utilizan en ventiladores, bombas, bandas transportadoras, elevadores y una amplia gama de aplicaciones industriales donde la robustez y el bajo mantenimiento son prioritarios.

4.4 Ensayos básicos de motores de corriente alterna

4.4.1 Ensayo en vacío

El ensayo en vacío permite determinar las pérdidas magnéticas del núcleo y las pérdidas mecánicas, operando el motor sin carga mecánica. Se registran corriente, potencia y velocidad, comparándose con valores nominales para detectar desbalance, fricción excesiva o saturación del núcleo (Wildi, 2006).

4.4.2 Ensayo con rotor bloqueado

Este ensayo permite estimar pérdidas en cobre y parámetros de dispersión. Al bloquear mecánicamente el rotor y aplicar una tensión reducida, se miden corriente y potencia, obteniendo parámetros equivalentes para análisis de desempeño (Chapman, 2012), ver Figura 11 y Figura 12.

Figura 11. Conexión estrella de un motor de inducción trifásico

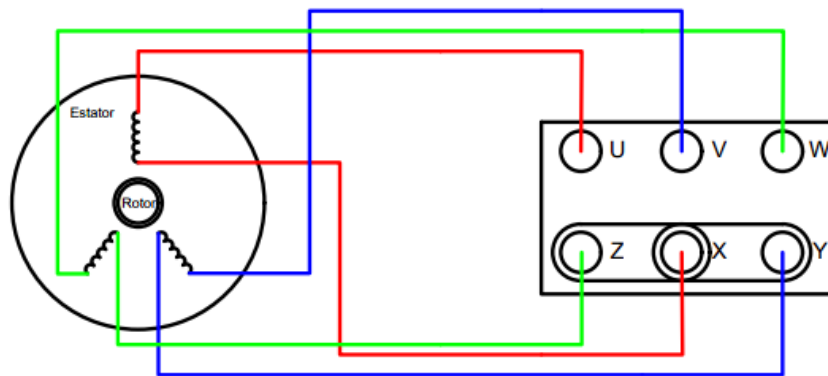
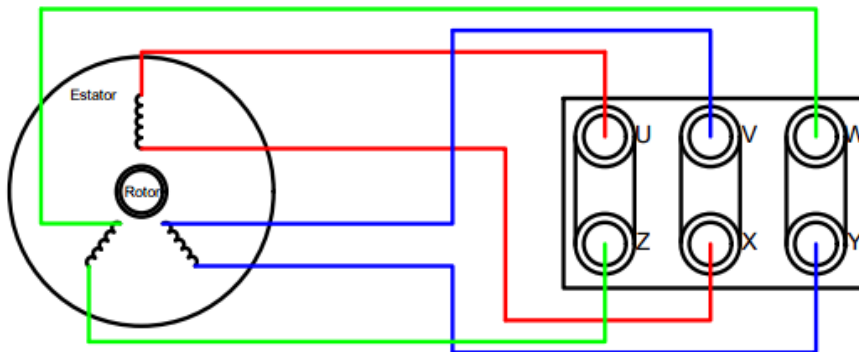


Figura 12. Conexión estrella de un motor de inducción trifásico



UNIDAD 5

5. Generadores eléctricos

5.1 Principios de conversión electromecánica

5.1.1 Fundamento de generación eléctrica

El principio fundamental de un generador eléctrico se basa en la inducción electromagnética: cuando un conductor corta líneas de flujo magnético, se induce en él una fuerza electromotriz. Este fenómeno fue presentado en unidades previas y está regido por la relación definida en la Ecuación (3), que establece la fem inducida en función del flujo y la velocidad angular. En los generadores, este principio se utiliza para convertir energía mecánica proveniente de turbinas, motores o sistemas hidráulicos en energía eléctrica (Fitzgerald, Kingsley y Umans, 2003).

5.1.2 Polaridad y sentido de la fem inducida

La dirección de la corriente inducida depende de la orientación relativa entre campo magnético y movimiento del conductor. Su sentido puede determinarse mediante la regla de la mano derecha o regla de Fleming, que ayuda a establecer la polaridad de la tensión generada. Esta relación orienta el diseño del devanado de armadura en generadores y su conexión con el sistema eléctrico al que alimentan (Chapman, 2012).

5.2 Generadores síncronos

5.2.1 Construcción y componentes principales

El generador síncrono es el principal dispositivo utilizado en la producción de energía eléctrica en centrales hidráulicas, térmicas, eólicas y otras fuentes. Su construcción incluye un estator trifásico que alberga los devanados de armadura y un rotor que contiene el devanado de campo excitado con corriente continua. El rotor puede ser de polos salientes, común en turbinas hidráulicas, o de rotor cilíndrico, frecuente en turbinas de alta velocidad (Fitzgerald et al., 2003).

5.2.2 Velocidad síncrona y frecuencia generada

La frecuencia de la tensión generada en el estator depende directamente de la velocidad del rotor y del número de polos del generador. Esta relación está dada por la Ecuación (16), presentada en la unidad anterior. En los generadores síncronos, esta ecuación se aplica para establecer la velocidad mecánica a la que debe operar la turbina o motor primario. La regulación de velocidad es crítica para garantizar que la frecuencia de salida se mantenga constante y dentro de los valores normativos (Chapman, 2012).

5.2.3 Producción de tensión trifásica

El estator del generador síncrono contiene tres devanados dispuestos espacialmente a 120 grados eléctricos entre sí. Cuando el rotor excitado gira, su campo magnético corta los devanados del estator, induciendo tres tensiones sinusoidales desfasadas 120 grados entre sí. Esta disposición permite obtener un sistema trifásico equilibrado, base de los sistemas modernos de generación y transmisión (Wildi, 2006).

5.2.4 Regulación de tensión y excitación

El nivel de tensión generado depende del flujo magnético del rotor, el cual es controlado por la corriente de excitación. Para mantener la tensión dentro de límites adecuados bajo variaciones de carga, se emplean sistemas automáticos denominados reguladores automáticos de voltaje (AVR). Estos equipos ajustan la corriente de excitación para compensar caídas de tensión en condiciones de carga inductiva o aumentos de tensión ante cargas capacitivas (Fitzgerald et al., 2003).

5.2.5 Curva de saturación del generador

El generador síncrono presenta una relación no lineal entre la corriente de excitación y la tensión generada debido a la saturación del núcleo magnético. Esta curva característica permite determinar el comportamiento del generador ante variaciones de excitación y constituye una herramienta esencial para pruebas en vacío y sincronización con redes eléctricas (Chapman, 2012).

5.3 Sincronización y operación con redes eléctricas

5.3.1 Condiciones de sincronismo

Para conectar un generador síncrono a una red eléctrica existente, deben cumplirse simultáneamente las condiciones de igualdad de frecuencia, magnitud de tensión, secuencia de fases y ángulo de fase. Un desacoplamiento en cualquiera de estas variables puede producir corrientes elevadas o impactos mecánicos en el eje del generador (Del Toro, 1985).

5.3.2 Sincronoscopio y lámparas sincronizadoras

Para evaluar la coincidencia de fase y frecuencia se utilizan equipos como el sincronoscopio y el método de lámparas. El sincronoscopio indica la velocidad relativa de fase entre la red y el generador, mientras que el método de lámparas permite observar la coincidencia visual de la tensión generada con la red.

5.4 Generadores asíncronos

5.4.1 Principio de operación

El generador asíncrono, también denominado generador de inducción, opera de manera similar al motor de inducción, pero en este caso el rotor gira a una velocidad ligeramente superior a la velocidad síncrona. Esto produce un deslizamiento negativo que permite inducir corriente en el estator. El principio de deslizamiento utilizado es el mismo definido por la Ecuación (17) en la unidad anterior (Wildi, 2006).

5.4.2 Generación autónoma y dependencia del banco capacitivo

En operación autónoma, el generador asíncrono requiere un banco de capacitores conectado al estator para suministrar la potencia reactiva necesaria para magnetizar el circuito. Sin este banco, el generador no puede iniciar la producción de tensión. Este tipo de operación se utiliza en sistemas aislados de pequeña escala.

5.5 Aplicaciones y consideraciones generales

Los generadores síncronos constituyen la base de los sistemas de generación eléctrica a gran escala debido a su capacidad de control de tensión y sincronización con redes. Los generadores asíncronos se utilizan con frecuencia en pequeñas centrales eólicas y en sistemas aislados. La elección entre uno u otro depende de requerimientos de estabilidad, regulación, potencia reactiva, complejidad del sistema y costo de operación (Fitzgerald et al., 2003).

Referencias Bibliográficas

- Fitzgerald, A., Kingsley, C., y Umans, S. (2003). *Máquinas eléctricas* (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- Chapman, S. (2012). *Máquinas eléctricas* (5.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Wildi, T. (2006). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (6.ª ed.). Pearson Educación.
- Del Toro, V. (1985). *Fundamentos de máquinas eléctricas*. Prentice Hall.
- Krause, P., Wasynczuk, O., Sudhoff, S., y Pekarek, S. (2013). *Analysis of electric machinery and drive systems* (3rd ed.). IEEE Press y Wiley.
- Boldea, I., y Nasar, S. (2010). *Electric machines dynamics and control*. CRC Press.
- Frailé Mora, J. (2014). *Máquinas eléctricas* (7.ª ed.). McGraw-Hill.
- Guru, B., y Hizioglu, H. (2001). *Electric machinery and transformers* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Sen, P. (2007). *Principles of electric machines and power electronics* (2nd ed.). Wiley.
- Kosow, I. (1991). *Máquinas eléctricas y transformadores*. Reverté.
- Mohan, N. (2012). *Electric machines and drives* (2nd ed.). Wiley.
- Hubert, C. (2002). *Electric machines theory, operation, applications, adjustment, and control* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Stephen, J. (2018). *Fundamentals of electric machines*. Cambridge University Press.
- Mehta, V., y Mehta, R. (2017). *Principles of electrical machines*. S. Chand Publishing.
- Say, M. (2002). *The performance and design of alternating current machines*. CBS Publishers.
- Ionel, D. (2016). *Electric machines and drives for renewable energy systems*. CRC Press.
- Slemon, G. (1992). *Electric machines and drives*. Addison-Wesley.
- Fuchs, E., y Masoum, M. (2011). *Power quality in power systems and electrical machines*. Academic Press.
- Ong, C. (1998). *Dynamic simulation of electric machinery*. Prentice Hall.

SUCRE



ISBN: 978-9942-590-13-8



 SUCREInstitutooficial  @SUCREInstituto  @SUCREInstituto