



Cuaderno del Instructor

Módulo 3: “Motores y Generadores Eléctricos”.

PFMEI-3-01/V.1[PE01-M03/v.1]

Una iniciativa de:



Con la asesoría experta de:



Equipo Consejo Minero

Joaquín Villarino H., Presidente Ejecutivo
Carlos Urenda A., Gerente General
Christian Schnettler R., Gerente del Consejo de Competencias Mineras
José Tomás Morel L., Gerente de Estudios
María Cecilia Valdés V., Gerente de Comunicaciones
Sofía Moreno C., Gerente de Comisiones y Asuntos Internacionales
Claudia Díaz R., Jefe de Proyectos

Equipo Innovum Fundación Chile

Hernán Araneda D., Gerente
Diego Richard M., Director Programa Fuerza Laboral Minera
Rafael Pizarro G., Jefe de Proyecto Empresas
Susana Gallardo S., Especialista de Formación
Eduardo Soto S., Consultor Senior
Ignacio Riffo C., Consultor Senior
Álvaro Aguilar H., Consultor de Proyectos
Carolina Gutiérrez M., Consultor de Proyectos

Consejo Minero
Dirección: Apoquindo 3500, Piso 7, Las Condes, Santiago.
Teléfono: (562) 2347 2200
www.ccm.cl

Propiedad del Consejo de Competencias Mineras (CCM) del Consejo Minero:

Este material es propiedad del Consejo de Competencias Mineras (CCM) del Consejo Minero. Está disponible para instituciones que imparten formación en el ámbito minero en Chile, a las que se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos de este material para fines de formación, citando siempre al Consejo de Competencias Mineras del Consejo Minero y pudiendo incluso adaptarlo para satisfacer los requerimientos de los participantes. Se prohíbe la reproducción o adaptación con fines comerciales.

El uso del género masculino en esta publicación no constituye discriminación; tiene el sólo propósito de aligerar el texto cuando la redacción así lo exige.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS, QUEDA AUTORIZADA SU REPRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN CITANDO LA FUENTE. © Anglo American Norte S.A., Anglo American Sur S.A., Anglo American Chile Ltda.; Antofagasta Minerals S.A.; BHP Chile Inc.; Compañía Minera Barrick Chile Ltda.; Compañía Minera Cerro Colorado Ltda., Minera Escondida Ltda., Minera Spence S.A.; Compañía Minera Zaldívar Ltda.; Corporación Nacional del Cobre de Chile; Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM; Compañía Contractual Minera Candelaria, Sociedad Contractual Minera El Abra; FreeportMcMoran South America Inc.; Glencore Chile S.A.; SCM Minera Lumina Cooper Chile; Sierra Gorda SCM; Teck Resources Chile Ltda.; Yamana Chile Servicios Ltda.; 2013.

Consejo de Competencias Mineras – CCM:

El Consejo de Competencias Mineras (CCM) es una iniciativa de articulación entre las empresas mineras, cuyo fin es proveer información sectorial, estándares y herramientas que permitan al mundo formativo adecuar la formación de técnicos a la demanda del mercado laboral minero, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Con la asesoría experta de Innovum Fundación Chile, este organismo genera, con un enfoque sistémico, insumos para el mundo formativo, dando a conocer qué necesidades de capital humano tiene la minería y transfiriendo buenas prácticas para su formación.

El Consejo de Competencias Mineras – el primero de su naturaleza en el país – opera al alero del Consejo Minero. Fue formado en 2012 y cuenta con 12 empresas socias. A tres años de su creación, el CCM ha desarrollado una serie de productos y sistemas que han marcado un cambio de paradigma en la vinculación del mundo productivo con el de la formación para el trabajo, y han significado un aporte de fondo para el mejoramiento y la valoración de la educación técnico-profesional en el país, con un alcance que trasciende ampliamente a la sola industria minera.

Los Paquetes para Entrenamiento, son uno de estos productos. Se han creado además: Estudios de Fuerza Laboral, El Marco de Cualificaciones para la Minería (MCM), Marco de Calidad de Buenas Prácticas Formativas, Marco de Calidad para Instructores e impulsamos el apoyo sectorial al Sistema de Certificación de Competencias Laborales.

Si bien el Consejo de Competencias Mineras es una entidad privada, sus productos están concebidos como bienes públicos y gratuitos, de valor compartido para todos los estamentos de la sociedad en Chile. Toda la información y los productos generados por el CCM, además de un breve video explicativo, están disponibles en el sitio web: www.ccm.cl

El desafío que ahora enfrenta el CCM es que, tanto el mundo formativo como el minero, incorporen los estándares generados a sus procesos de negocio y a su quehacer diario. Esto generará una fuerza laboral más productiva y, por ende, mayor competitividad del país en el contexto internacional.

Contribución del CCM

Para trabajadores actuales y personas interesadas en trabajar en la minería:

- Mejor empleabilidad.
- Aprendizaje adecuado a los requerimientos del mercado.
- Acceso no sólo a un oficio, sino a rutas de formación y aprendizaje.



Para el sector minero:

- Mitigación de la escasez de personal, anticipándose al problema de manera coordinada y con visión de futuro.
- Mejora de productividad, al contar con más trabajadores preparados para los requerimientos de la industria, tanto propios como de proveedores.
- Mayor competitividad de esta industria, que repercute positivamente también en la competitividad del país.

Para las instituciones educativas:

- Mejor empleabilidad de sus egresados.
- Mejor información proyectada a 8 a 10 años, para potenciar programas formativos en los oficios para los cuales se anticipa una mayor brecha de capital humano.
- Oportunidad para el reconocimiento de la industria respecto a su calidad formativa.



Para la comunidad y el país:

- Asignación más eficiente de fondos públicos de educación y capacitación, al tener identificados programas adecuados para satisfacer requerimientos del mercado.
- Disminución de la presión que se ejerce sobre otros sectores productivos por la demanda de trabajadores, al aumentar la cantidad de personas calificadas para la minería.

Índice

Descripción del documento	7
Módulo III: Mantenión de Motores y Generadores Eléctricos	8
1. Análisis de Circuitos Eléctricos.....	9
1.1 Ley de Ohm: Circuito R-L en serie	9
1.2 Resistencia de un inductor	16
1.3 Leyes de Kirchhoff.....	22
1.4 Ley de Joule (Ley de la Conversión Eléctrica)	23
1.5 Circuitos paralelos R-L	37
2. Circuitos trifásicos	71
2.1 Características de los sistemas trifásicos.....	71
2.2 Características de las conexiones en estrella (Y) y en delta (Δ) o triángulo	72
2.3 Calculo de la potencia en los sistemas trifásicos	100
3. Motores de corriente continua.....	109
3.1 Desarrollo del Torque en el Motor CC	109
3.2 Fuerza contra electromotriz en el motor CC.....	114
3.3 Principios Básicos para el Control de Velocidad	116
3.4 Características operativas del motor CC	117
3.5 Reparación de fallas básicas y la mantención de los motores CC.	119
4. Motor jaula de ardilla	121
4.1 Características constructivas del motor de inducción Jaula de Ardilla trifásico	121
4.2 Valores de placa de un motor.....	124
4.3 Características de Velocidad y torque de los motores de inducción jaula de ardilla.....	142
5. Generador Sincrónico	144
5.1 Armadura Giratoria.....	144
5.2 Campo Giratorio	144
5.3 Construcción del campo rotatorio.....	145
5.4 Circuito de descarga de campo	147
5.5 Características de la regulación de voltaje	152
Actividad N°5.....	159

Descripción del documento

El Cuaderno del instructor contiene la totalidad de los contenidos a utilizar por el instructor para el desarrollo del programa de formación de **Mantenedor Eléctrico Avanzado Equipos Fijos**.

El documento está dividido en módulos, los cuales están organizados en secciones de temas y contenidos específicos.

El instructor, podrá, además, sugerir actividades como las que se listan a continuación:

- Charlas y/o reflexiones de seguridad.
- Discusiones o foros de debate.
- Reforzamientos.
- Actividades en terreno.
- Preparación para la evaluación final

Específicamente para las actividades relacionadas a tecnologías de comunicación audiovisual se entregarán links a modo referencial, sin embargo el instructor tendrá la libertad de utilizar los recursos que estime conveniente a fin de lograr los requerimientos de la actividad.

Todo el material es susceptible de ser mejorado, adaptado o modificado en función de las características del grupo con el que se trabaje. Por ello se ha diseñado desde un enfoque flexible, que permite al instructor agregar recursos que enriquezcan algún contenido o posibilitar el aporte de los participantes, cuidando siempre de lograr los aprendizajes esperados de cada módulo.

Respecto a las evaluaciones se sugiere que éstas sean elaboradas por el instructor de acuerdo a los siguientes lineamientos

La evaluación de los módulos y sus contenidos debe estar compuesta por a lo menos 10 preguntas, las cuales deben ser extraídas del documento de evaluación de proceso". Cada pregunta será evaluada con puntajes entre 0 y 10. La escala de calificación será de 0 a 100%. Considerando el 0% cuando el participante no tiene respuestas correctas y el 100% cuando posee la totalidad de respuestas buenas.

La nota de aprobación de las evaluaciones de los distintos módulos corresponderá a un 75%.

Módulo III: Mantenición de Motores y Generadores Eléctricos

1. Análisis de Circuitos Eléctricos.

1.1 Ley de Ohm: Circuito R-L en serie

El circuito mostrado en la fig. 1 tiene 120 V, 60 Hz de suministro CA. Éste contiene una resistencia de 24 ohm y una reactancia de 18 ohm. Su estructura de conexión se conoce como “en serie”

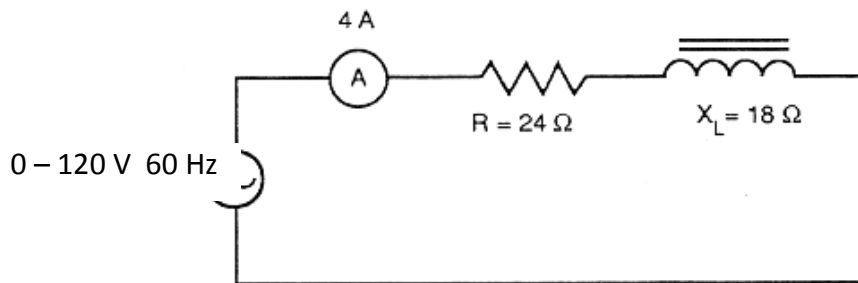


Figura 1

Circuito en serie que contiene resistencia y reactancia inductiva

El amperímetro registra una corriente efectiva (rms) de 4 A. a través de todo este circuito en serie. El voltaje a través del resistor no inductivo está en fase con la corriente. Su valor usando la Ley de Ohm:

$$\begin{aligned}V_R &= I \times R \\&= 4 \text{ A} \times 24 \text{ ohm} \\&= 96 \text{ V}\end{aligned}$$

Como ya se sabe el voltaje inducido a través de la bobina se adelanta a la corriente en 90°. Su valor usando la Ley de Ohm:

$$\begin{aligned}V_L &= I \times X_L \\&= 4 \text{ A} \times 18 \text{ ohm} \\&= 72 \text{ V}\end{aligned}$$

Si se agregan estos dos valores aritméticamente, el voltaje en línea V llega a 168 V, lo que no es posible en este circuito de 120 V. La adición aritmética no se considera debido a que los dos voltajes no están en fase: V_L se adelanta a V_R en 90°. Ellos son vectores con dirección y deben combinarse vectorialmente.

$$\begin{array}{c} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \\ V = V_R + V_L \end{array}$$

La característica principal de un circuito serie es, **la corriente es la misma en todos los puntos de este circuito**, por tal razón, se usa como línea de referencia en el diagrama de vector. En la Figura siguiente, la corriente es usada como vector de referencia

horizontal. El vector de voltaje V_R está en la misma dirección que el vector de corriente y el vector de voltaje V_L está a 90° de éste.

Para agregar los dos vectores, ubique el extremo de V_L en el principio de V_R a 90° en relación a la horizontal, como se muestra en la Figura 2. El voltaje en línea V luego se representa por la línea que une el extremo de V_R con el principio de V_L . Este vector se representa por la hipotenusa de un triángulo de ángulo recto. Use el teorema de Pitágoras para resolver este triángulo rectángulo.

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{V_R^2 + V_L^2} \\ &= \sqrt{96^2 + 72^2} \\ &= 120 \text{ V} \end{aligned}$$

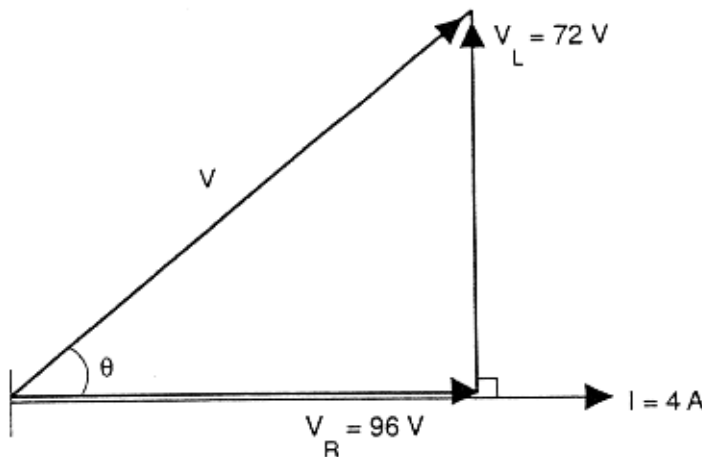


Figura 2

Adición del vector de voltaje en un circuito en serie R-L

Impedancia en un circuito en serie R-L

El término *impedancia* se usa para expresar la oposición total al flujo de corriente en un circuito. Su símbolo es Z y se mide en ohm.

La impedancia es la oposición combinada de resistencia y reactancia al flujo de corriente en un circuito.

Use la Ley de Ohm para calcular la impedancia

$$Z = \frac{V}{I}$$

Donde V es el voltaje de línea e I es la corriente efectiva en un circuito en serie.

Un circuito R-L en serie que contiene una resistencia y un inductor tiene resistencia y reactancia inductiva. Cada una de éstas se opone al flujo de corriente.

La impedancia es un vector. Para obtener el valor de impedancia en un circuito R-L, agregue los vectores R y X_L .

No se puede obtener la impedancia de un circuito simplemente agregando R y X_L aritméticamente, porque eso no considera la diferencia de fase entre la resistencia y la reactancia. Se debe agregar R y X_L vectorialmente:

$$\vec{Z} = \vec{R} + \vec{X}_L$$

Se puede construir un triángulo de impedancia tal como se construyó un triángulo de voltaje descrito previamente. La Figura 2 muestra este triángulo, usando los mismos valores de circuito que en la Figura 1.

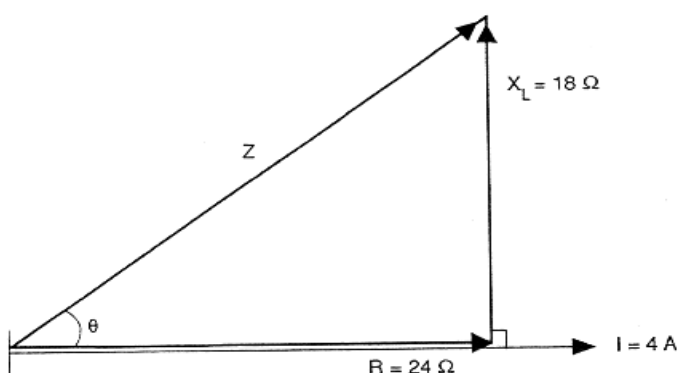


Figura 3

Use el teorema de Pitágoras para resolver este triángulo rectángulo:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{24^2 + 18^2} \\ &= 30 \text{ ohm} \end{aligned}$$

Ya que la corriente es constante a través de todo el circuito, la oposición al flujo de corriente en cada componente del circuito es proporcional a la caída de voltaje a través de ese componente.

En el ejemplo de arriba:

$$\begin{aligned} R &= \frac{V_R}{I} = \frac{96 \text{ V}}{4 \text{ A}} = 24 \text{ ohm} \quad \text{y} \\ X_L &= \frac{V_L}{I} = \frac{72 \text{ V}}{4 \text{ A}} = 18 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\text{También, } Z = \frac{V}{I} = \frac{120 \text{ V}}{4 \text{ A}} = 30 \text{ ohm}$$

Use cualquier combinación de estas ecuaciones y diagramas para analizar y resolver los circuitos serie R-L.

Observe que otra forma de expresar que la corriente se *retrasa* (lags) al voltaje en 90°, es decir que el voltaje se *adelanta* (leads) a la corriente en 90°.

Potencia real o activa

En un circuito resistivo puro, el voltaje y la corriente efectiva están en fase, y su producto es la potencia en watts tomada por el circuito. Esto se llama potencia real o activa. Esta potencia es real en el sentido de que representa energía utilizable y disipada.

En un circuito inductivo puro, la corriente se retrasa respecto al voltaje en 90°. La potencia activa no se calcula simplemente multiplicando el voltaje y la corriente en el inductor. La potencia activa neta en watts es cero para el ciclo CA completo, porque las dos potencias negativas pulsantes balancean y cancelan las dos potencias positivas. *El circuito no usa potencia activa.*

En un circuito en serie que contiene tanto resistencia como reactancia inductiva, la corriente no está ni en fase con el voltaje de línea ni atrasada en 90°. El ángulo de fase (ángulo de retardo) está entre cero y 90°, dependiendo de los valores de R y X_L . El circuito usa algo de potencia activa.

La potencia activa o real, medida en watts, en un circuito R-L es disipada completamente por la resistencia del circuito.

Calcule la potencia real en un circuito R-L en serie usando una de las siguientes fórmulas:

$$W = I^2 \times R \quad \text{o} \quad W = V_R \times I \quad \text{o} \quad W = V_R^2 / R$$

Usando los valores de nuestros ejemplos anteriores:

$$\begin{aligned} \text{Potencia activa} &= I^2 \times R \\ &= 4^2 \times 24 \\ &= 384 \text{ watts} \end{aligned}$$

o

$$\begin{aligned} \text{Potencia activa} &= V_R \times I \\ &= 96 \times 4 \\ &= 384 \text{ watts} \end{aligned}$$

o

$$\begin{aligned} \text{Potencia activa} &= V_R^2 / R \\ &= 96^2 / 24 \\ &= 384 \text{ watts} \end{aligned}$$

Potencia reactiva

Existe una forma de potencia asociada con la reactancia de un circuito. Esta es la potencia reactiva (o cuadrática). Para diferenciarla de la potencia real a menudo se describe como *potencia sin watts*. La potencia reactiva representa el producto de voltaje y corriente que están a 90° fuera de fase y se expresa en volts-amperes-reactivos, habitualmente abreviado como *vars*.

Calcule la potencia reactiva en un circuito R-L en serie, usando la fórmula:

$$\text{Potencia reactiva} = V_L \times I$$

También,

$$\begin{aligned}\text{Potencia reactiva} &= I^2 \times X_L \\ &= (4 \text{ A})^2 \times 18 \text{ ohm} \\ &= 288 \text{ vars}\end{aligned}$$

Y

$$\begin{aligned}\text{Potencia reactiva} &= V_L^2 / X_L \\ &= (72 \text{ V})^2 / 18 \text{ ohm} \\ &= 288 \text{ vars}\end{aligned}$$

Todos estos métodos de cálculo dan el mismo resultado.

Potencia aparente

Los dos componentes de potencia (activa y reactiva) en un circuito serie R-L se combinan para formar la potencia aparente. Se mide en volts-amperes, abreviado como VA.

En cualquier circuito CA, la manera más simple de calcular la potencia aparente es multiplicar el voltaje total en línea por la corriente total en línea. (Esta corriente pasa a través de todos los componentes en un circuito en serie.) En el ejemplo anterior:

$$\begin{aligned}\text{Potencia aparente} &= V \times I \\ &= 120 \text{ V} \times 4 \text{ A} \\ &= 480 \text{ VA}\end{aligned}$$

Ya que todos ellos son vectores, la potencia aparente no puede ser calculada simplemente agregando la potencia real y la potencia reactiva aritméticamente. Los vectores deben ser agregados de una manera en que sus fases sean consideradas.

→→→

$$VA = W + \text{vars}$$

Un triángulo vectorial puede ser dibujado por estos tres vectores de potencia, como se muestra en la Figura 106.

Usando el teorema de Pitágoras en este triángulo de vector de potencia:

$$VA = \sqrt{W^2 + \text{vars}^2}$$

Use esta fórmula para calcular la potencia aparente en el ejemplo anterior:

$$\begin{aligned}\text{Potencia aparente} &= \sqrt{(V_R \times I)^2 + (V_L \times I)^2} \\ &= \sqrt{384^2 + 288^2} \\ &= \sqrt{230400} \\ &= 480 \text{ VA}\end{aligned}$$

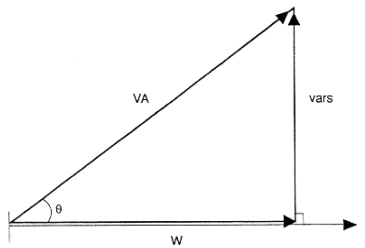


Figura 4

Triángulo de potencia para el circuito en serie R-L

También se puede calcular la potencia aparente usando el valor de la impedancia del circuito. Usando los valores del ejemplo anterior:

$$\begin{aligned}\text{Potencia aparente} &= I_{\text{RMS}}^2 \times Z \\ &= (4 \text{ A})^2 \times 30 \text{ ohms} \\ &= 480 \text{ VA}\end{aligned}$$

Observe que las tres maneras de calcular la potencia aparente dan el mismo resultado.

Factor de potencia

La razón de potencia real (o activa) a potencia total (o aparente) se llama factor de potencia de un circuito.

$$\text{FP} = \frac{W}{VA}$$

La razón se expresa como una fracción decimal o como un porcentaje.

El factor de potencia máximo ocurre cuando las cargas en un circuito son puramente resistivas. El componente reactivo en vars, luego, es cero, de esa manera la potencia aparente es igual a la potencia activa. Bajo estas condiciones, el factor de potencia es 1,0 o 100% o unidad. Ejemplos prácticos de cargas resistivas puras son calefactores e iluminación incandescente.

Las cargas eléctricas tales como motores y los tipos de ballast de iluminación (fluorescentes) tienen un componente inductivo. Este componente contribuye a lo que llamamos *factor de potencia retrasada*. Parte de la potencia usada por estos dispositivos hace el trabajo requerido por este, y parte de esta potencia (el componente de vars inductivo) se usa para magnetizar el dispositivo. Las compañías de distribución eléctrica y la ley de Chile exigen hoy a los clientes tener un factor de potencia de al menos 93%.

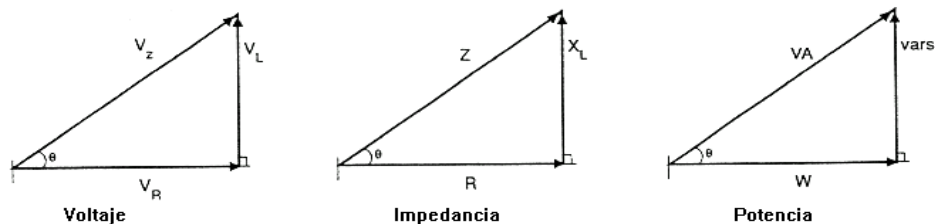


Figura 5

Triángulos vectoriales eléctricos que muestran el ángulo de fase

La Figura 5 muestra uno al lado del otro los triángulos de vector de voltaje, impedancia y potencia para un circuito R-L. Se puede ver que están en la misma proporción y tienen la misma forma. Por supuesto, su tamaño actual depende de la escala escogida para dibujarlos. Observe que el triángulo de impedancia puede obtenerse dividiendo los vectores de voltaje por la corriente.

El ángulo θ puede expresarse en varias y diferentes maneras usando estos tres triángulos:

$$\text{Coseno } \theta = \frac{V_R}{V_z} = \frac{R}{Z} = \frac{W}{VA}$$

Se puede ver que la expresión triángulo de potencia para el $\text{Cos } \theta$ es la misma que la definición de factor de potencia, PF. El coseno del ángulo de fase también es el factor de potencia. Al poner los valores del circuito CA en serie R-L que hemos considerado en estas tres expresiones, obtenemos lo siguiente:

$$\text{Cos } \theta = \frac{96 \text{ V}}{120 \text{ V}} = \frac{24}{30} = \frac{384 \text{ W}}{480 \text{ VA}} = 0,8$$

En otras palabras, el factor de potencia en el ejemplo anterior es de 0,8 o 80% retrasado.

Las formas más comúnmente usadas por el factor de potencia son

$$FP = \cos \theta = \frac{W}{VA}$$

Reordenando esta ecuación y sustituyendo $VA = V \times I$, vemos que

$$\begin{aligned} W &= VA \times \cos \theta \\ &= V \times I \times \cos \theta \\ &= V \times I \times FP \end{aligned}$$

1.2 Resistencia de un inductor

Cuando se analiza la inductancia, es conveniente imaginar una bobina que no tenga resistencia óhmica (R). En la práctica, esto no es posible, ya que incluso los buenos conductores tienen algo de resistencia, y un inductor es una bobina de alambre de conducción. Antes de que se calcule la impedancia, se debe sumar la resistencia óhmica del (los) inductor(es) a la resistencia pura en el circuito.

La resistencia óhmica pura de la bobina es la resistencia que se mediría cuando corriente continua pasa a través de la bobina. Pero la resistencia efectiva de una bobina es una combinación de varios factores. Los inductores se usan en circuitos CA, y la corriente alterna tiene como resultado que su resistencia efectiva aumente en varias formas: a través del efecto piel (efecto Kelvin), a través de las corrientes parásitas de Foucault, a través de la pérdida de histéresis y a través de la pérdida dieléctrica. En cada uno de estos efectos, se usa algo de potencia, disminuyendo la potencia útil disponible en el circuito y aumentando la resistencia efectiva.

Figura de mérito (Q)

En un inductor comercial, el componente útil es la reactancia inductiva. La resistencia efectiva es el componente no deseado y es importante que el valor de reactancia sea un valor alto comparado a la resistencia efectiva. Tales bobinas son asignadas una Figura de mérito, al cual tiene el símbolo Q.

$$\frac{Q}{R} = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f L}{R}$$

Una bobina con una Figura alta de mérito (Q) tiene una reactancia mayor comparada a su resistencia y una pérdida de potencia relativamente pequeña. Las bobinas con un valor Q bajo tienen resistencia efectiva relativamente alta y hay una pérdida de potencia mayor cuando son usadas.

Observe que tanto la reactancia como la resistencia efectiva de la bobina dependen de la frecuencia en el circuito, aunque en diferentes proporciones. Sin embargo, su efecto sobre la reactancia es relativamente mucho más alto. El valor Q debe ser determinado por las frecuencias de banda en la cual será usada la bobina.

Ejemplo 1; Considere la bobina del reactor conectado en el circuito CA como se muestra en la Figura 6. ¿Cuáles son los valores de la resistencia efectiva, reactancia inductiva, impedancia y Figura de mérito de la bobina?

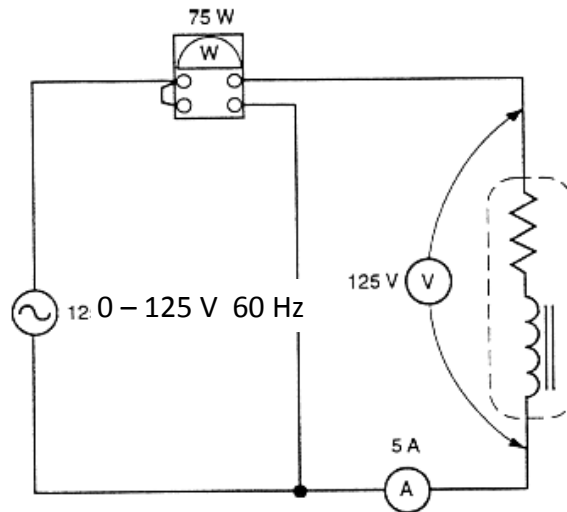


Figura 6

Inductor en un circuito CA (Ejemplo 1)

Aunque no existe una resistencia separada en el circuito, la bobina del inductor tiene una resistencia óhmica efectiva, R_{BOBINA} , que combina con su reactancia, X_L , para producir la impedancia de la bobina, Z_{BOBINA} .

Para calcular la impedancia de la bobina, use el voltaje en línea y la corriente efectiva medida en el amperímetro.

$$Z_{\text{BOBINA}} = \frac{V}{I} = \frac{125 \text{ V}}{5 \text{ A}} = 25 \text{ ohms}$$

La potencia desarrollada y medida en el circuito se debe a la resistencia efectiva de la bobina (no a la reactancia inductiva):

$$R_{\text{BOBINA}} = \frac{W}{I^2} = \frac{75 \text{ W}}{(5 \text{ A})^2} = 3 \text{ ohms}$$

3. Calcule la reactancia inductiva de la bobina usando la fórmula de Pitágoras en el triángulo del vector de impedancia:

$$X_L = \sqrt{Z_{\text{BOBINA}}^2 - R_{\text{BOBINA}}^2} = \sqrt{(25\Omega)^2 - (3\Omega)^2} = 24,8 \Omega$$

$$4. Q = \frac{X_L}{R} = \frac{24,8 \Omega}{3 \Omega} = 8,3$$

Ejemplo 2; Si este mismo reactor ahora se conecta en el circuito mostrado en la Figura 7, resolver el circuito para los siguientes valores:

- La resistencia total del circuito
- La impedancia total del circuito
- La corriente efectiva
- La potencia real tomada por el resistor
- La potencia real tomada por la bobina
- La potencia real en todo el circuito en serie
- La potencia aparente en todo el circuito en serie
- El factor de potencia de la bobina
- El ángulo por el cual la corriente del reactor se atrasa al voltaje del reactor
- El factor de potencia de todo el circuito
- El ángulo por el cual el voltaje en línea se adelanta a la corriente de línea.

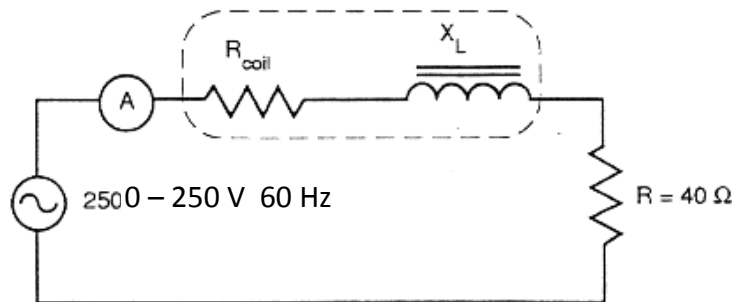


Figura 7
Circuito CA en serie R-L

Los valores óhmicos (X_L , R_{BOBINA} , y Z_{BOBINA}) para la bobina del inductor son los mismos en este circuito que en el Ejemplo 1, porque la frecuencia de 60 Hz es invariable.

- Encontrar la resistencia total del circuito en serie agregando la resistencia individual:

$$R_T = R + R_{COBINA} = 40 \Omega + 3 \Omega = 43 \Omega$$

- Encuentre la impedancia combinando la resistencia y la reactancia inductiva del circuito. Toda la reactancia inductiva del circuito está en la bobina del reactor. Use la fórmula del triángulo del vector de impedancia:

$$Z = \sqrt{R_T^2 + X_L^2} = \sqrt{(43 \Omega)^2 + (24,8 \Omega)^2} = 49,7 \Omega$$

c. La corriente efectiva en el circuito sería registrada por el amperímetro. El voltaje en línea de 250 V está impreso a través de la impedancia total del circuito. Encuentre la corriente efectiva usando la Ley de Ohm para el circuito total:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{250 \text{ V}}{49,7 \Omega} = 5,03 \text{ A} = 5 \text{ A}$$

d. La potencia real desarrollada en el resistor (P_R):

$$P_R = I^2 \times R = (5 \text{ A})^2 \times 40 \Omega = 1.000 \text{ W}$$

e. La potencia verdadera desarrollada en la bobina (BOBINA)

$$P_{\text{BOBINA}} = I^2 \times R_{\text{BOBINA}} = (5 \text{ A})^2 \times 3 \Omega = 75 \text{ W}$$

f. Existen dos formas de calcular la potencia real total (P_T) para todo el circuito. Agregue los valores de potencia desarrollada en el resistor y en el reactor:

$$P_T = P_R + P_{\text{BOBINA}} = 1.000 \text{ W} + 75 \text{ W} = 1.075 \text{ W}$$

O use la fórmula corriente-potencia:

$$P_T = I^2 \times R_T = (5 \text{ A})^2 \times 43 \Omega = 1.075 \text{ W}$$

g. La potencia aparente total (VA_T) para el circuito se mide en volt-amperes. Calcule la multiplicación del voltaje de línea por la corriente efectiva:

$$VA_T = V \times I = 250 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 1.250 \text{ VA}$$

h. Calcule el factor de potencia de la bobina usando sólo los valores óhmicos para la bobina en el Ejemplo 1:

$$FP_{\text{BOBINA}} = \frac{R_{\text{BOBINA}}}{Z_{\text{BOBINA}}} = \frac{3 \Omega}{25 \Omega} = 0,12$$

i. Este valor FP_{BOBINA} es el coseno del ángulo $83,1^\circ$ que es el ángulo de fase por el cual la corriente se retrasa respecto al voltaje a través del reactor.

j. Calcule el factor de potencia para todo el circuito usando la fórmula:

$$FP = \frac{W}{VA} = \frac{1.075}{1.250} = 0,86$$

o

$$FP = \frac{R_T}{Z} = \frac{43 \, \Omega}{49,7 \, \Omega} = 0,86$$

k. Este valor PF es el coseno del ángulo $30,6^\circ$ que es el ángulo de fase por el cual la corriente de línea se retrasa respecto al voltaje de línea. Otra forma de decir esto es que el voltaje de línea se adelanta a la corriente de línea en $30,6^\circ$

Ejemplo 3

Construya un diagrama de vectores de voltaje para el circuito en el Ejemplo 2. El siguiente procedimiento resulta en el diagrama del vector mostrado en la Figura 8.

1. Trace el vector que representa la corriente de línea 5 A horizontalmente, usando una escala conveniente.
2. La caída de voltaje, V_R , a través del resistor de $40 \, \Omega$ es $5 \, A \times 40 \, \text{ohm} = 200 \, V$. Está en fase con la corriente en línea. Trace otro vector horizontal a escala desde el punto cero, para representar $V_R = 200 \, V$.
3. La caída de voltaje $V_{R\text{-BOBINA}}$ a través de la resistencia efectiva de la bobina del inductor es de $5 \, A \times 3 \, \Omega = 15 \, V$. También está en fase con la corriente en línea. Trace otro vector de voltaje horizontal para representar este voltaje, comenzando desde donde el anterior, V_R , termina.

La longitud combinada de los vectores de voltaje trazados en los pasos 2 y 3 representa la caída de voltaje resistivo total ($V_{R\text{-TOT}}$) en este circuito en serie.

Este voltaje es $200 \, V + 15 \, V = 215 \, V$ y está en fase con la corriente en línea.

Trace el vector que representa el componente de voltaje a través de la Reactancia inductiva. Trácelo verticalmente desde el punto de inicio del vector resistivo anterior. Este componente de voltaje avanza la corriente en 90° y tiene el valor de

$$V_X = I \times$$

$$X_L = 5 \, A \times 24,8 = 124 \, V.$$

Trace el vector que representa la caída total del voltaje a través de la bobina, V_{BOBINA} : una el punto de inicio del vector $V_{R\text{-BOBINA}}$ con el extremo del vector V_X .

Observe que V_{BOBINA} debería estar a $83,1^\circ$ en relación al eje horizontal. Su valor es:

$$I \times Z_{\text{BOBINA}} = 5 \text{ A} \times 25 \Omega = 125 \text{ V}.$$

Trace el vector que representa el voltaje total en línea desde el punto cero del diagrama hasta el extremo del vector V_X . Este valor de voltaje es 250 V, y el vector debería estar a $30,6^\circ$ en relación al eje horizontal para mostrar que el voltaje de línea avanza a la corriente de línea en $30,6^\circ$

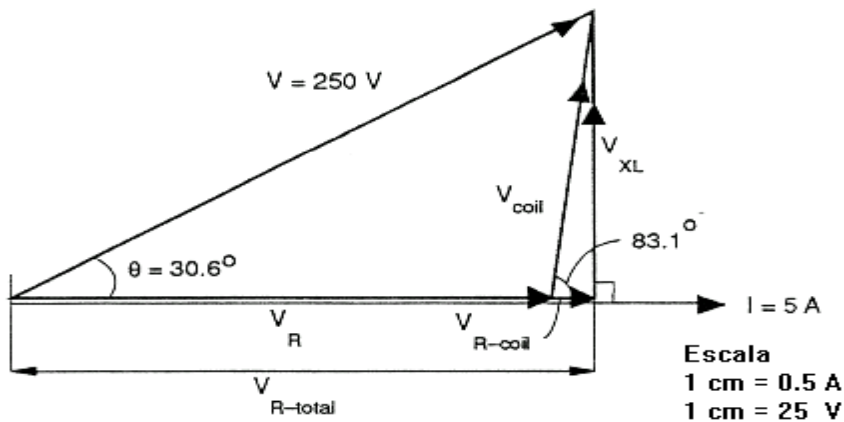
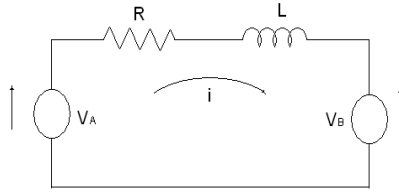


Figura 8

Diagrama del vector para el Ejemplo 3

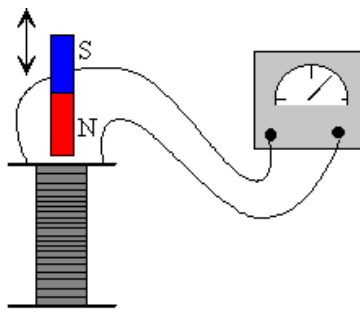
Cuando se calculan, revisan y comparan los valores de circuito se debe tener presente que en este procedimiento se pueden encontrar *pequeños* desacuerdos en los valores debido al redondeo de los valores calculados aquí o en los Ejemplos 1 y 2.

La Figura 9 muestra otra versión del diagrama de vector de voltaje para el Ejemplo 3. La única diferencia es que los dos vectores horizontales están calculados y trazados en orden inverso, y también están ubicados en forma diferente en el diagrama del vector. Los resultados son los mismos en cuanto a las longitudes y ángulos del vector.



Σ subidas de tensión = Σ caídas de tensión
Fuentes de Tensión = Caídas de Tensión

Ley de Lenz (Campos Electromagnéticos)



Ley de Lenz

La variación de flujo magnético a través de una espira de conductor inducirá un voltaje en la espira de tal manera que siempre se opondrá a la variación del flujo que la produce.

Figura 10

1.4 Ley de Joule (Ley de la Conversión Eléctrica)

Cuando la corriente eléctrica atraviesa un conductor, éste se calienta, emitiendo energía, de forma que el calor desprendido es directamente proporcional a la resistencia del conductor, al tiempo durante el que está circulando la corriente y al cuadrado de la intensidad que lo atraviesa.

$$E_{calor} = R \cdot I^2 \cdot t$$

$$P = R \cdot I^2 \quad (\text{Watt})$$

Ejercicio de Laboratorio 1.1: Demostrar cómo sumar caídas de voltaje resistivo e inductivo.

Objetivo;

En este experimento, usted usará un multímetro para medir los voltajes en un circuito R-L en serie simple con un suministro de voltaje variable. También usará un osciloscopio para ver las relaciones de fase en el circuito.

Equipo

Banco de prueba Lab Volt

Multímetro

Osciloscopio

Dos puntas de 10 megaohm

Procedimiento;

1. Contáctese con su instructor para hacer los arreglos para completar este laboratorio y obtener los componentes del circuito. Analice con su instructor cómo será evaluado.
2. Conecte el circuito como se muestra en la Figura 11.

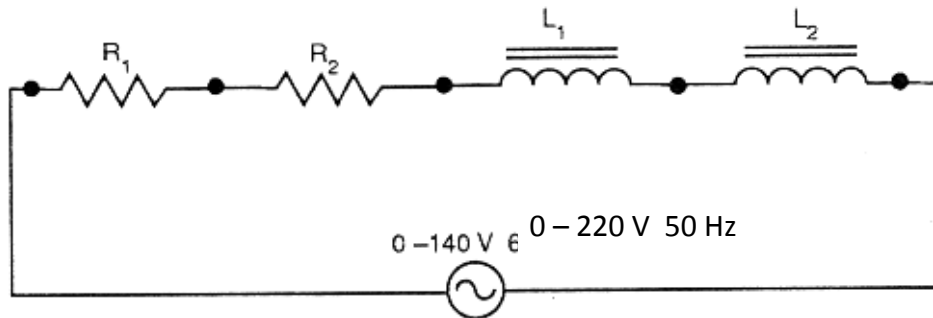


Figura 11

Circuito básico para el Ejercicio de Laboratorio 1.1

Mida los voltajes a través de los componentes

3. Energice el circuito y aumente lentamente el voltaje de suministro V_T a 220 V CA.
4. Use el multímetro para medir la caída de voltaje a través de cada componente. Tome registro de sus resultados como V_{R1} , V_{R2} , V_{L1} y V_{L2} .
5. Desenergice el circuito.
Revise los voltajes y las relaciones de fase a través de los resistores
6. Conecte el circuito como se muestra en la Figura 12. Ubique el interruptor inverso del canal B del osciloscopio en la posición (-).

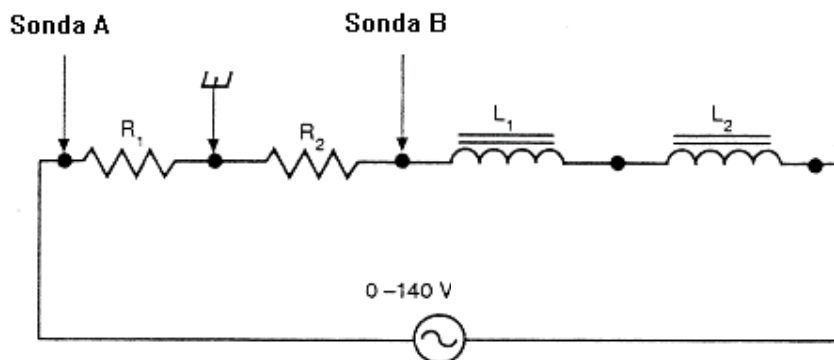


Figura 12

Uso del osciloscopio a través de los resistores

7. Energice el circuito y aumente lentamente el voltaje de suministro a 220 V CA.
8. Observe la relación de fase entre los voltajes como se muestra en el osciloscopio.
9. Use el multímetro para medir los voltajes a través de cada resistor en forma separada (V_{R1} y V_{R2}) y a través de ambos juntos (V_R). Tome registro de sus resultados.
- 10 Desenergice el circuito.
Revise los voltajes y las relaciones de fase a través de los inductores
11. Conecte el circuito como se muestra en la Figura 13. Ubique el interruptor inverso del canal B del osciloscopio en la posición (-).

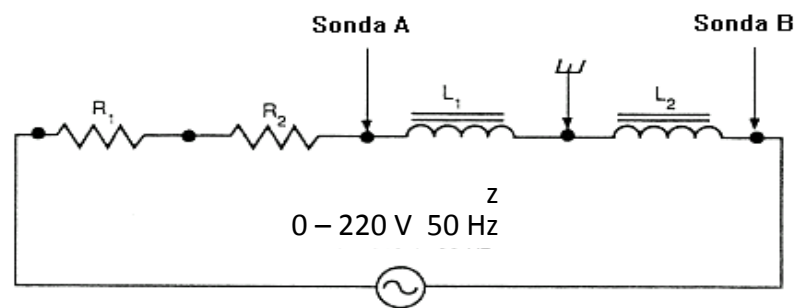


Figura 13

Uso del osciloscopio a través de los inductores

12. Repita los pasos 7) y 8).
13. Use el multímetro para medir los voltajes a través de cada inductor en forma separada (V_{L1} y V_{L2}) y a través de ambos juntos (V_L). Tome registro de sus resultados.
14. Desenergice el circuito.
Revise los voltajes y las relaciones de fase a través de los resistores e inductores
15. Conecte el circuito como se muestra en la Figura 14. Ubique el interruptor inverso del canal B del osciloscopio en la posición (-).

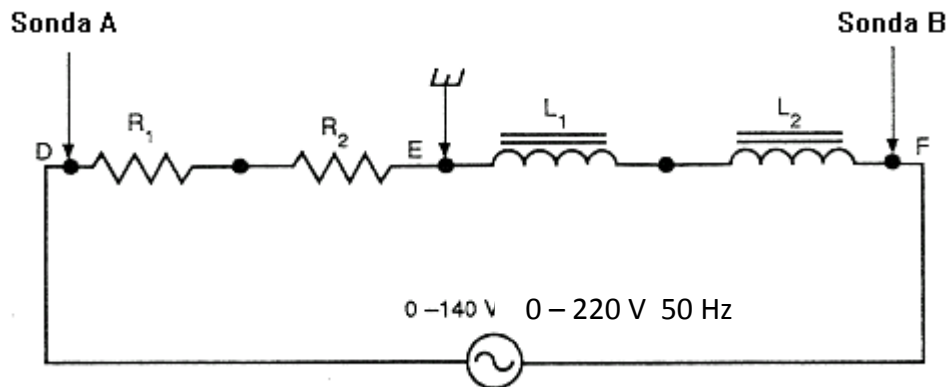


Figura 14

Uso del osciloscopio a través de los resistores e inductores

16. Repita los pasos 7 y 8

17. Use el multímetro para medir y registrar los voltajes a través de

- Ambos resistores (V_R) entre los puntos D y E
- Ambos inductores (V_L) entre los puntos E y F
- Los cuatro componentes $V_{LR} = V_T$) entre los puntos D y F.

18. Desenergice el circuito.

19. Agregue los valores de V_R y V_L aritméticamente.

20. Calcular $\sqrt{V_R^2 + V_L^2}$.

Conclusiones

En este experimento, hemos asumido que el inductor tiene resistencia despreciable.

¿Es $V_{R1} + V_{R2} = V_R$?

¿Estuvieron V_{R1} y V_{R2} en fase?

¿Es $V_{L1} + V_{L2} = V_L$?

¿Estuvieron V_{L1} y V_{L2} en fase?

¿Es $V_R + V_L = V_T$?

¿Es $\sqrt{V_R^2 + V_L^2} = V_T$?

¿Estuvieron V_R y V_L en fase?

Establezca someramente las conclusiones que usted pueda alcanzar acerca del voltaje y relaciones de fase en un circuito R-L en serie CA.

Ejercicio de Laboratorio 1.2: Calcular la impedancia en un circuito en serie R-L usando mediciones de potencia, voltaje y corriente.

Objetivo

En este experimento, usted medirá la corriente en un circuito R-L en serie. También medirá las caídas de voltaje y el desarrollo de potencia a través de los resistores y de una bobina inductiva. Usará estos resultados para calcular la impedancia de la bobina y la impedancia total del circuito.

Equipo

Banco de prueba Lab Volt

Wattmetro

Amperímetro

Voltímetro

Procedimiento

1. Contáctese con su instructor para hacer los arreglos para completar este laboratorio y obtener los valores del componente del circuito a usar. Analice con su instructor cómo será evaluado.

Mida la corriente y el voltaje en la bobina para calcular su resistencia

2. Conecte el circuito con una bobina inductiva conectada a un suministro CA como se muestra en la Figura.

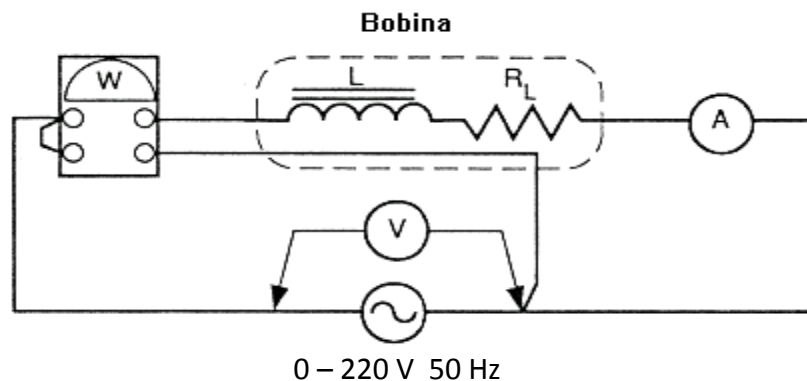


Figura 15

Circuito con inductor para el Ejercicio de Laboratorio 1.2

3. Energice el circuito y aumente lentamente el voltaje de suministro hasta que la corriente registrada por el amperímetro sea 1 A.

4. Tome registro de la lectura del wattmetro.

5. Use la fórmula $W = I^2 \times R$ para calcular la resistencia efectiva CA de la bobina.

Calcule los valores en un circuito R-L en serie

6. Calcular la resistencia total de los dos resistores en paralelo como se muestra en la Figura 16.

7. Calcular la resistencia total del circuito usando la resistencia efectiva de la bobina en serie con el par de resistores paralelos.

8. Use $X_L = 2 \pi$ resistentes en L para calcular la reactancia inductiva de la bobina. (Se le ha dado el valor de inductancia L.)

9. De los valores de resistencia y reactancia total, use la fórmula Pitagórica para calcular la impedancia del circuito.

Mida el voltaje y la corriente, y calcule la impedancia del circuito

10. Conecte el circuito como se muestra en la Figura 16.

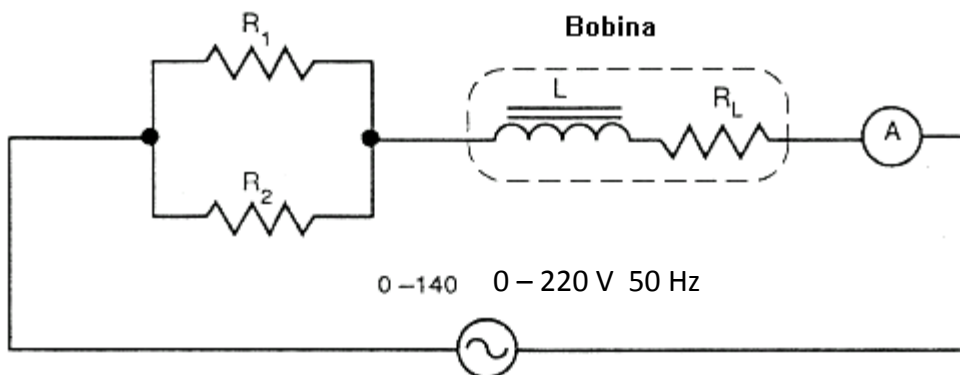


Figura 16

Circuito R-L en serie para el Ejercicio de Laboratorio 1.2

11. Energice el circuito y suba el voltaje a 220 V.

12. Mida y tome registro de la corriente.

13. Desenergice el circuito.

14. Use la Ley de Ohm para calcular la impedancia del circuito. Compare su respuesta con el paso 9.

15. Use el triángulo de impedancia para calcular el ángulo de fase.

Conclusión

En sus propias palabras, defina impedancia.

Ejercicio de Laboratorio 1.3: Demostrar varios métodos para encontrar el factor de potencia de un circuito.

Objetivo

En este experimento, usted usará las mediciones de un wattmetro, voltímetro y un amperímetro de dos circuitos R-L en serie para calcular los factores de potencia de varias formas.

Equipo

Banco de prueba Lab Volt

Wattmetro

Amperímetro

Voltímetro

Procedimiento

1. Contáctese con su instructor para hacer los arreglos para completar este laboratorio y obtener los valores del componente del circuito a usar.
Analice con u instructor cómo será evaluado.

Mida la corriente, el voltaje y la potencia en el circuito

2. Conecte el circuito conectado a un suministro CA como se muestra en la Figura 17.

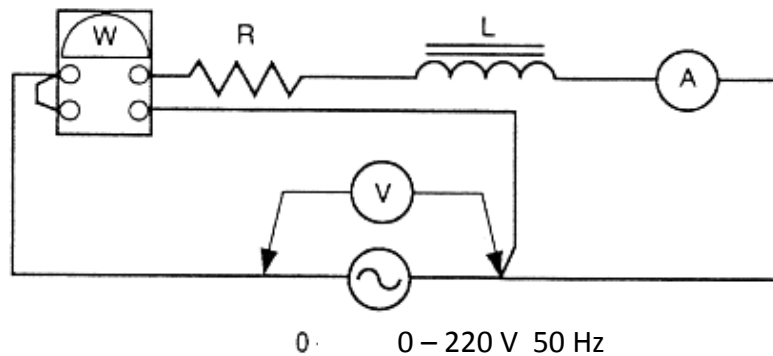


Figura 17

Circuito con inductor para el Ejercicio de Laboratorio 1.3

3. Energice el circuito y aumente lentamente el voltaje de suministro a 220 V CA.
4. Tome registro de las lecturas del voltamperímetro, amperímetro y voltímetro.
5. Desenergice el circuito.
6. Para calcular la potencia aparente, multiplique el voltaje de línea por la corriente de línea.
7. Para calcular la potencia activa, eleve al cuadrado la corriente y multiplique el resultado por la resistencia del circuito. (Asuma que la resistencia efectiva de la bobina es despreciable.) Compare su resultado con la medición del wattmetro.
8. Para calcular el factor de potencia del circuito, divida la potencia real por la potencia aparente. Use el valor de potencia real medido con el wattmetro. Exprese FP como porcentaje.
9. Conecte el circuito mostrado en la Figura 18.

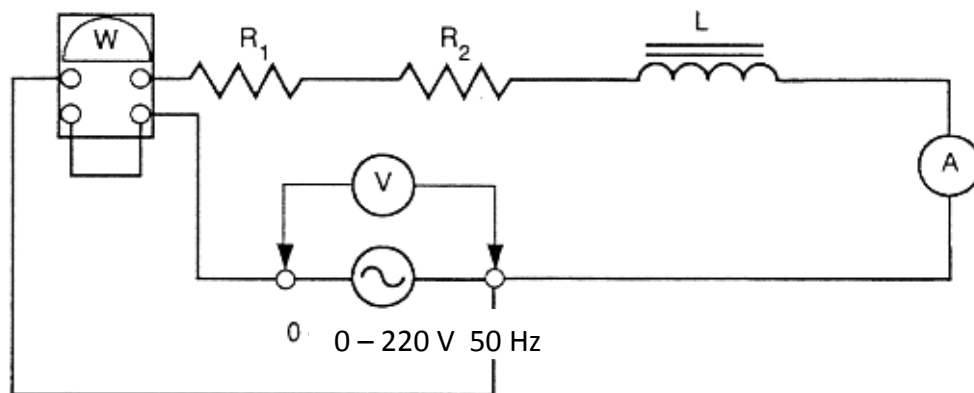


Figura 18

Segundo circuito R-L en serie para el Ejercicio de Laboratorio 1.3

10. Repita los pasos 3 a 8.

11. Desenergice el circuito y limpie su área de trabajo, ponga todos los componentes a su lugar.

Conclusiones

¿Encontró alguna diferencia entre los valores calculados y medidos de la potencia real?

Si existe una diferencia, ¿qué podría causar esta diferencia?

Cuando calcula FP, ¿por qué usa el valor medido en vez del valor calculado de la potencia real?

¿Cuál es el efecto de agregar más resistencia en el circuito R-L en serie?

¿Qué indica un FP alto en un circuito o una carga?

Ejercicio de Laboratorio 1.3: Demostrar varios métodos para encontrar el factor de potencia de un circuito

Objetivo

En este experimento, usted usará las mediciones de un wattmetro, voltímetro y un amperímetro de dos circuitos R-L en serie para calcular los factores de potencia de varias formas.

Equipo

Banco de prueba Lab Volt
Wattmetro
Amperímetro
Voltímetro

Procedimiento

1. Contáctese con su instructor para hacer los arreglos para completar este laboratorio y obtener los valores del componente del circuito a usar.

Analice con u instructor cómo será evaluado.

Mida la corriente, el voltaje y la potencia en el circuito

2. Conecte el circuito conectado a un suministro CA como se muestra en la Figura 19.

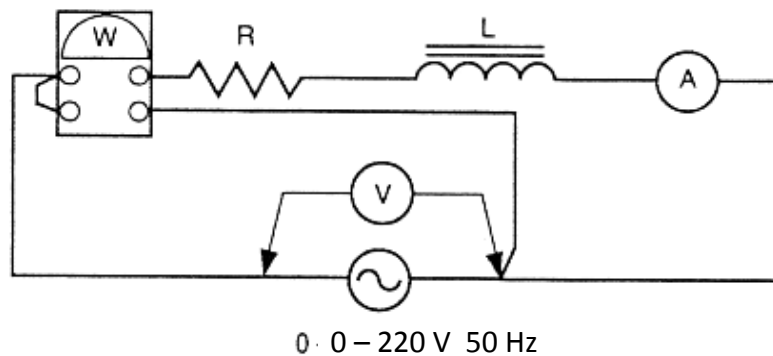


Figura 19

Circuito con inductor para el Ejercicio de Laboratorio 1.3

3. Energice el circuito y aumente lentamente el voltaje de suministro a 220 V CA.

4. Tome registro de las lecturas del voltamperímetro, amperímetro y voltímetro.

5. Desenergice el circuito.

Para calcular la potencia aparente, multiplique el voltaje de línea por la corriente de línea.

7. Para calcular la potencia activa, eleve al cuadrado la corriente y multiplique el resultado por la resistencia del circuito. (Asuma que la resistencia efectiva de la bobina es despreciable.) Compare su resultado con la medición del wattmetro.

8. Para calcular el factor de potencia del circuito, divida la potencia real por la potencia aparente. Use el valor de potencia real medido con el wattmetro. Exprese FP como porcentaje.

9. Conecte el circuito mostrado en la Figura 20.

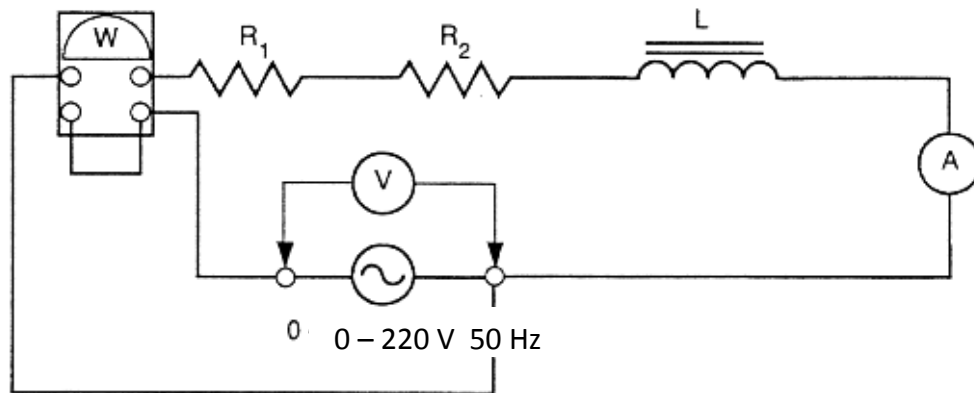


Figura 20

Segundo circuito R-L en serie para el Ejercicio de Laboratorio 1.3

10. Repita los pasos 3 a 8.

11. Desenergice el circuito y limpie su área de trabajo, ponga todos los componentes a su lugar.

Conclusiones

¿Encontró alguna diferencia entre los valores calculados y medidos de la potencia real?

Si existe una diferencia, ¿qué podría causar esta diferencia?

Cuando calcula FP, ¿por qué usa el valor medido en vez del valor calculado de la potencia real?

¿Cuál es el efecto de agregar más resistencia en el circuito R-L en serie?

¿Qué indica un FP alto en un circuito o una carga?

Ejercicio de Laboratorio 1.4: Muestre las similitudes entre los triángulos de vectores para un circuito R-L en serie

Objetivo

En este experimento, usted usará las mediciones de un wattmetro, amperímetro y multímetro para calcular los triángulos de vector de voltaje, impedancia y potencia para el circuito R-L en serie.

Equipo

Banco de prueba Lab Volt

Multímetro

Wattmetro

Voltímetro
Amperímetro
Procedimiento

1. Contáctese con su instructor para hacer los arreglos para completar este laboratorio y obtener los valores del componente del circuito a usar. Analice con su instructor cómo será evaluado.
2. Conecte el circuito conectado a un suministro CA como se muestra en la Figura 21. No energice el circuito.

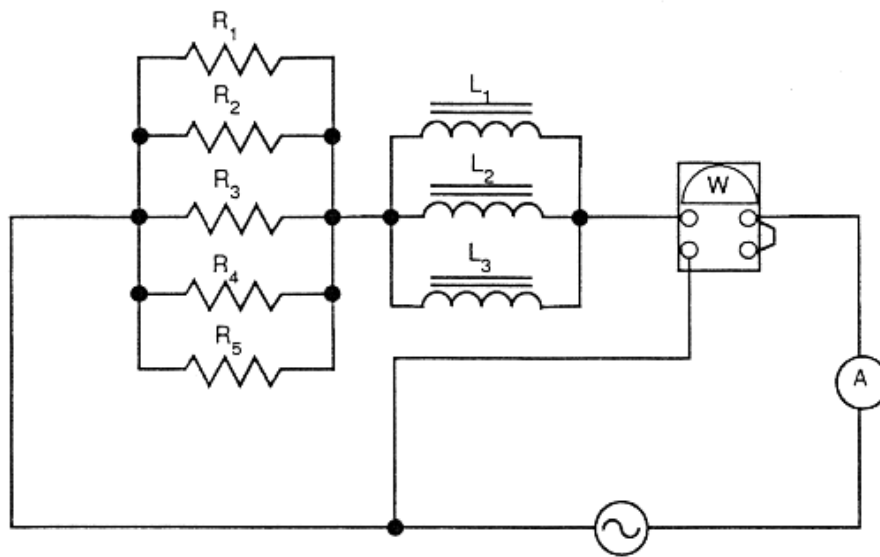


Figura 21

Circuito con resistores e inductores para el Ejercicio de Laboratorio 1.4

3. Calcule la resistencia total y la reactancia inductiva total en el circuito. Asuma que la resistencia efectiva de los inductores es despreciable.
4. Usando los valores calculados de R_T y X_{LT} , trace los lados vertical y horizontal del triángulo de impedancia. Complete el triángulo para encontrar los valores de la impedancia, Z .
5. Energice el circuito y aumente lentamente el voltaje a 220 V CA.
6. Tome registro de las lecturas del voltímetro, amperímetro y wattmetro.
7. Use las lecturas del wattmetro y del amperímetro para confirmar el valor de impedancia encontrado en el Paso 4.
8. Use el multímetro para medir la caída de voltaje V_R a través de los resistores.

9. Use el multímetro para medir la caída de voltaje V_L a través de los inductores.
10. Desenergice el circuito.
11. Usando los valores medidos de voltaje de los Pasos 6, 8 y 9, dibuje el diagrama del vector de voltaje para el circuito.
12. Use la lectura del wattmetro del Paso 6 para trazar el vector de potencia real.
13. Use las lecturas del amperímetro y del voltímetro del Paso 6 para calcular la potencia aparente. Use la lectura del multímetro a través de los inductores del Paso 9 con la lectura de corriente del Paso 6 para calcular la potencia reactiva.
14. Dibuje el triángulo del vector de potencia.
15. Resolver los tres triángulos para encontrar el ángulo de fase θ .

Conclusiones;

Sus cálculos y mediciones deberían confirmar que los tres triángulos de vector son similares en forma y pueden ser usados recíprocamente para encontrar los valores del circuito.

Circuitos Paralelos;

La mayoría de los circuitos eléctricos comerciales, industriales y residenciales están conectados en paralelo. Es importante para los trabajadores eléctricos entender los principios de estos circuitos y ser capaces de analizarlos.

Cuando los componentes se conectan en paralelo como muestra la Figura 22, los puntos X e Y son eléctricamente comunes a los tres componentes. La caída de voltaje a través de cada derivación del circuito es igual al voltaje V de la línea. (Asuma que las caídas de voltaje en los cables o alambres de conexión son despreciables.)

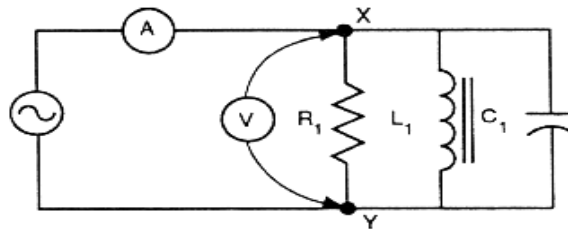


Figura 22
Circuito paralelo CA común

Por esta razón el *voltaje de línea* se usa como *el vector de referencia* cuando se analizan circuitos paralelos. Todos los ángulos se miden desde esta dirección. En contraste a esto está el circuito CA en serie, en el cual la corriente de línea se usa como

el vector de referencia porque es la misma a través de todos los componentes del circuito.

La corriente a través de cada derivación del circuito paralelo depende de la oposición a la corriente en esa derivación. Ésta puede ser resistiva o reactiva, o ambas, por lo tanto las corrientes a través de las derivaciones pueden no estar en fase entre sí o con el voltaje de la fuente. Si las corrientes están en fase, se pueden agregar en forma aritmética. Pero si están fuera de fase, se deben agregar en forma vectorial para tener en cuenta la diferencia de fase.

El efecto de las resistencias en paralelo

En la Figura de la página siguiente se muestran tres resistencias conectadas en paralelo a un suministro CA. No tome en cuenta la resistencia en las líneas de conexión. La resistencia total del circuito, R_T , se calcula usando la ecuación:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Los voltajes a través de cada componente son iguales al voltaje de la línea

$$V_{\text{línea}} = V_1 = V_2 = V_3$$

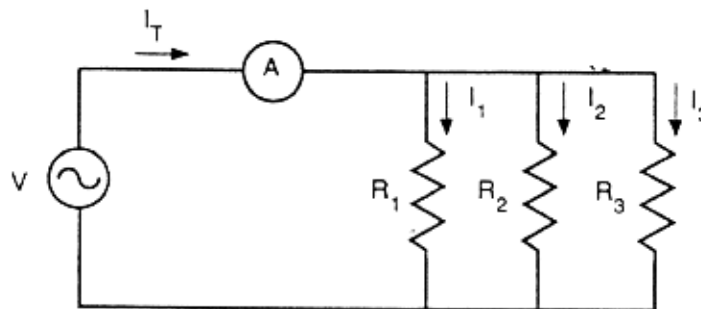


Figura 23
Circuito CA en paralelo resistivo

Calcule la corriente a través de cada derivación usando la Ley de Ohm:

$$I_1 = \frac{V_{\text{línea}}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_{\text{línea}}}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{V_{\text{línea}}}{R_3}$$

Este circuito no contiene nada de reactancia; es puramente resistivo. Las corrientes en las tres derivaciones o ramales están en fase. Calcule la corriente (de línea) total (I_T) usando la Ley de Ohm o sumando las corrientes de los tres ramales:

$$I_T = \frac{V_{\text{línea}}}{R_T}$$

ó

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

Toda la potencia tomada por el circuito es potencia real, medida en watts:

$$P = I_T \times V_{\text{línea}} = I_T^2 \times \frac{R_T}{R_T} = \frac{V_{\text{línea}}^2}{R_T}$$

El ángulo de fase es cero y el factor de potencia es uno. Los vectores de corriente están en fase con el voltaje de suministro y pueden estar representados como se muestra en la Figura 25.

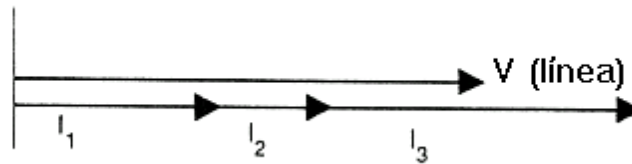


Figura 24

Vectores de corriente y voltaje para un circuito en paralelo CA

1.5 Circuitos paralelos R-L

La Figura muestra un circuito en paralelo con resistencia pura en una derivación y reactancia inductiva pura en la otra. Para mayor simplicidad, asuma que la bobina inductiva no tiene resistencia. Los dos componentes paralelos están conectados al voltaje de línea V . El voltaje a través de cada uno de estos componentes es igual al voltaje de la línea.

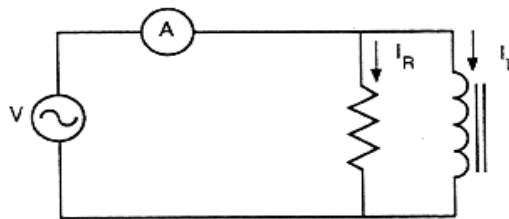


Figura 25

Circuito R-L en paralelo ideal

Corriente

En el ramal puramente resistivo de este circuito, la corriente está en fase con el voltaje de línea. Calcúlela usando la Ley de Ohm:

$$I_R = \frac{V}{R}$$

En la derivación inductiva, la corriente y el voltaje están fuera de fase, y la corriente se retrasa al voltaje de línea en 90°. (Si es necesario, revise la Habilidad E-5 para un análisis más acabado de esto). Calcule la corriente usando la Ley de Ohm:

$$I_L = \frac{V}{X_L} = \frac{V}{2\pi fL}$$

La corriente en la derivación inductiva se le conoce también como el componente de corriente *cuadrática*.

Las corrientes en los dos ramales de este circuito están fuera de fase en 90°, por lo tanto no se les puede sumar en forma aritmética para encontrar la corriente total de la línea, como midió con el amperímetro. Calcule la corriente total de la línea sumando las dos corrientes de los ramales vectorialmente.

Para hacer esto, dibuje un triángulo de vectores y use la Fórmula de Pitágoras:

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

Impedancia

La impedancia del circuito se calcula mejor usando la Ley de Ohm con el voltaje de la fuente y la corriente total de la línea:

$$Z = \frac{V}{I_T}$$

Se puede encontrar también Z dividiendo la ecuación de corriente Pitagórica por V:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z} &= \frac{I_T}{V} = \frac{\sqrt{I_R^2 + I_L^2}}{V} \\ &= \frac{\sqrt{I_R^2 + I_L^2}}{V^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}\right)} \end{aligned}$$

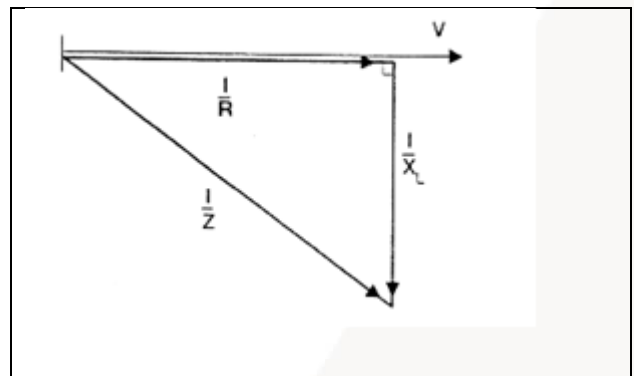


Figura 26

Triángulo de impedancia para un circuito paralelo R-L

El triángulo de impedancia para este circuito (Figura 26) se obtiene dividiendo los vectores de corriente por el voltaje de línea común a todos los componentes. Los lados del triángulo están a escala para representar $1/R$, $1/X_L$, y $1/Z$. Es difícil trabajar con estas ecuaciones y con el triángulo de impedancia debido a los recíprocos, por eso habitualmente se usa la Ley de Ohm.

Observe que un circuito paralelo, cada derivación inductiva o resistiva paralela adicional *disminuyen* la impedancia general. (Esto contrasta con un circuito en serie, en el cual cada inductancia o resistencia adicional *aumenta* la impedancia del circuito.)

Potencia

La potencia real (watts) en este circuito se desarrolla sólo en la derivación resistiva del circuito:

$$P = I_R \times V = I_R^2 \times R = \frac{V^2}{R}$$

La potencia aparente (entrada en voltios-amperes) depende de la corriente total de línea y del voltaje de la fuente:

$$VA = I_T \times V = I_T^2 \times Z = \frac{V^2}{Z}$$

La potencia reactiva (vars magnetizantes) es la energía almacenada en el campo magnético de la bobina:

$$\text{Vars} = I_L \times V = I_L^2 \times X_L = \frac{V^2}{V_L}$$

Observe que: $VA = \sqrt{P^2 + \text{vars}^2}$

El factor de potencia del circuito se expresa como una de dos razones:

$$FP = \frac{W}{VA} = \frac{I_R}{I_T}$$

El factor de resistencia depende del ángulo de fase:

$$FP = \cos \theta$$

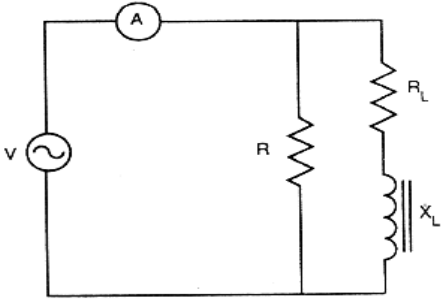


Figura 27

Circuito R-L en paralelo con resistencia de bobina

Resistencia del inductor

Frecuentemente, se puede ignorar la resistencia de la bobina del inductor. En la mayoría de los circuitos prácticos, la resistencia en la bobina afecta la corriente en la rama inductiva pero no en las otras ramas.

En efecto, una rama inductiva con resistencia significativa es un circuito serie R-L como se puede observar en el.

Circuito R-L en paralelo con resistencia de bobina

Esta derivación tiene impedancia (Z_L) y su propio ángulo de fase. Esta impedancia es la suma vectorial de la resistencia y la reactancia inductiva de la bobina.

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2}$$

Los voltajes a través de la resistencia e inductancia en este ramal están 90° fuera de fase, pero el voltaje total a través de la derivación aún es igual al voltaje de la línea. El vector de la corriente total de línea es la suma vectorial de las corrientes de las derivaciones resistiva e inductiva.

Problemas de ejemplo

Ejemplo 1: Analice el circuito R-L en paralelo de la Figura 28.

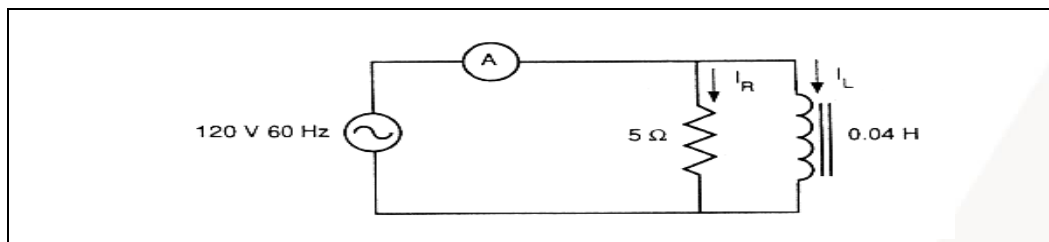


Figura 28

Circuito R-L para el Ejemplo 1

Calcule:

- a. El voltaje a través de cada derivación
- b. La corriente en cada derivación
- c. La corriente total en línea
- d. Impedancia del circuito
- e. La potencia usada en el todo el circuito
- f. El factor de potencia del circuito
- g. El ángulo de fase

Dibuje un diagrama de vector de corriente para el circuito

- a. El voltaje a través de cada derivación o ramal es igual al voltaje de línea:

$$V_T = 120 \text{ V}$$

- b. Para calcular la corriente en la derivación resistiva, use la Ley de Ohm:

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{V_T}{R} \\ &= \frac{120}{5} = 24 \text{ A} \end{aligned}$$

Esta corriente está en fase con el voltaje de línea.

Calcule la corriente en la derivación inductiva de la misma manera:

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{V_T}{X_L} = \frac{V_T}{2\pi fL} \\ I_L &= \frac{120}{2 \times 3,142 \times 60 \times 0,04} \\ &= \frac{120}{15,1} = 8 \text{ A} \end{aligned}$$

Esta corriente está a 90° fuera de fase con el voltaje de la línea.

- c. La corriente total en línea es la suma vectorial de I_R e I_L :

$$\begin{aligned} I_T &= \sqrt{I_R^2 + I_L^2} \\ &= \sqrt{24^2 + 8^2} \\ &= 25,3 \text{ A} \end{aligned}$$

d. Encuentre la impedancia del circuito usando la Ley de Ohm con la corriente de línea y el voltaje de la fuente:

$$Z = \frac{V_T}{I_T} \\ = \frac{120}{25,3} = 4,74 \, \Omega$$

e. La potencia usada en el circuito (potencia real) se desarrolla completamente en la derivación resistiva del circuito:

$$P = I_R \times V_T \\ = 24 \times 120 = 2.880 \text{ watts} \\ = 2,88 \text{ kW}$$

f. El factor de potencia es la razón entre la potencia real y la potencia aparente:

$$FP = \frac{2.880}{I_T \times V_T} \\ = \frac{2.880}{25,3 \times 120} = \frac{2.880}{3.036} = 0,9486 \text{ retrasada}$$

Observe que el factor de potencia también es la razón entre I_R e I_T :

$$FP = \frac{24}{25,3} = 0,9486 \text{ retrasada}$$

g. El ángulo de fase de este circuito es $\cos^{-1} 0,9486 = 18,4^\circ$

Para construir el diagrama del vector de corriente como se muestra en la Figura 29, use el vector del voltaje de línea como eje de referencia horizontal X. Siga el procedimiento:

Dibuje un vector horizontal proporcional a la corriente I_R .

Comience en el extremo del vector anterior, dibuje un vector vertical que apunte hacia abajo y proporcional a la corriente I_L .

Una el punto de inicio del primer vector con el punto final del segundo vector. Esta línea representa la corriente total en línea del vector I_T .

Marque el ángulo de fase θ , que es el ángulo entre los vectores I_R e I_T . (Sí los vectores están bien dibujados a escala, este ángulo es de $18,4^\circ$).

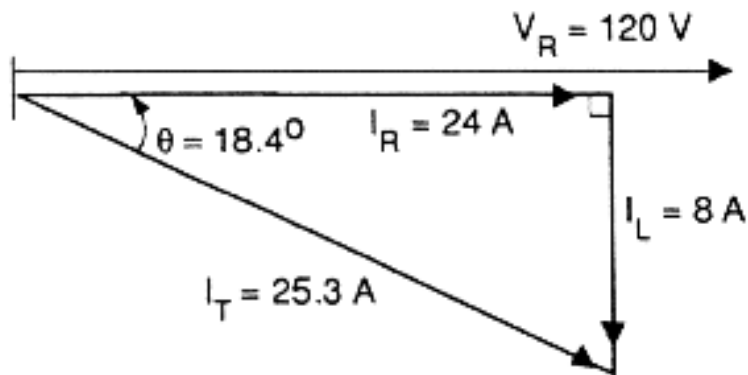


Figura 29

Diagrama del vector de corriente para el Ejemplo 1

Ejemplo 2 En la Figura 30, la corriente en la derivación inductiva del circuito es 6

A. Calcule:

- el voltaje de línea
- la corriente a través de la resistencia
- la corriente total en línea
- la impedancia del circuito
- la potencia reactiva en el circuito
- el factor de potencia del circuito
- el ángulo de fase

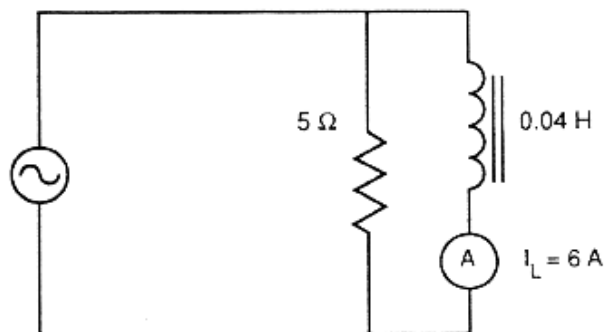


Figura 30

Diagrama del circuito para el Ejemplo 2

- El voltaje de línea es igual al voltaje a través de cada derivación del circuito paralelo. Nosotros no conocemos la corriente en la derivación resistiva pero si conocemos la corriente en la derivación inductiva. La ley de Ohm nos da el voltaje requerido de la corriente y reactancia en esta derivación.

$$\begin{aligned}X_L &= 2\pi fL \\&= 2 \times 3,1416 \times 50 \times 0,04 \\&= 12,56 \text{ ohm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_T &= V_L = I_L \times X_L \\&= 6 \text{ A} \times 12,56 \Omega \\&= 75,4 \text{ V}\end{aligned}$$

b.
$$I_R = V_T / R$$
$$= 75,4 \text{ V} / 5 \Omega = 15,1 \text{ A}$$

c. La corriente total en línea es la suma vectorial de I_R e I_L

$$\begin{aligned}I_T &= \sqrt{I_R^2 + I_L^2} \\&= \sqrt{15,1^2 + 6^2} \\&= 16,23 \text{ A}\end{aligned}$$

d. Use la Ley de Ohm para encontrar la impedancia del circuito:

$$\begin{aligned}Z &= V_T / I_T \\&= 75,4 / 16,23 \\&= 4,64 \Omega\end{aligned}$$

e. La potencia reactiva se usa en el campo magnético del inductor. Se mide en voltamperios reactivos.

$$\begin{aligned}\text{Vars} &= I_L \times V_L \\&= 6 \text{ A} \times 75,4 \text{ V} \\&= 452 \text{ vars}\end{aligned}$$

f. El factor de potencia del circuito es la razón de la corriente resistiva con la corriente total:

$$\begin{aligned}\text{FP} &= I_R / I_T \\&= 15,1 / 16,23 \\&= 0,93 \text{ (que es coseno } \theta \text{)}\end{aligned}$$

g. El ángulo de fase $\theta = 21,5^\circ$ retrasado

Ejercicio de Laboratorio 1.1: Demostrar cómo sumar corriente resistiva e inductiva en un circuito en paralelo

Objetivo:

En este experimento, usted usará un amperímetro para medir las corrientes en un circuito R-L en paralelo simple con una fuente de voltaje variable.

Equipo;

Banco Lab Volt

Amperímetro

Procedimiento

Contáctese con su instructor respecto de los arreglos para completar este laboratorio y obtener los componentes del circuito. Analice con su instructor la manera en que será evaluado.

Conecte el circuito como se muestra en la Figura 31.

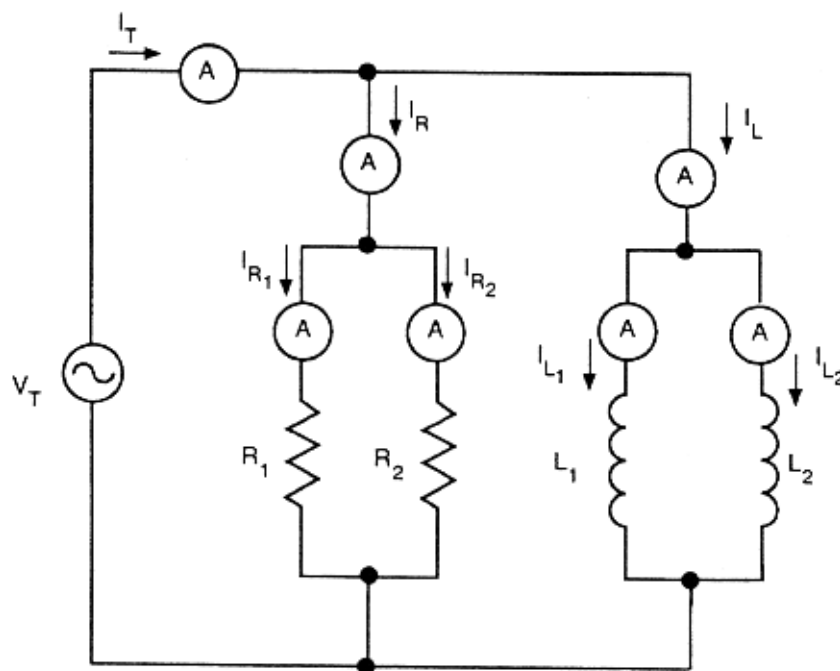


Figura 31

Circuito básico para el Ejercicio de Laboratorio 1.1

Mida los voltajes a través de los componentes

3. Energice el circuito y aumente lentamente el voltaje de suministro V_T a 220 V CA.

4. Use el amperímetro para medir la corriente a través de cada componente. Tome registro de sus resultados de I_{R1} , I_{R2} , I_{L1} e I_{L2}

5. Desenergice el circuito.

Revise las corrientes a través de las resistencias

6. Use el amperímetro para medir las corrientes a través de cada resistor en forma separada (I_{R1} y I_{R2}) y a través de ellos (I_R). Tome registro de sus resultados.

7. Desenergice el circuito.

Revise las corrientes a través de los inductores

8. Use el amperímetro para medir las corrientes a través de cada inductor en forma separada (I_{L1} e I_{L2}) y a través de ellos (I_L). Tome registro de sus resultados.

9. Desenergice el circuito.

Revise las corrientes a través de las resistencias e inductores

10. Mida y registre las corrientes a través de

Ambos resistores (I_R)

Ambos inductores (I_L)

Los cuatro componentes (I_T)

11. Desenergice el circuito.

12. Desmantele el circuito, limpie su área de trabajo y guarde todo el equipo.

Conclusiones:

En este experimento, hemos asumido que el inductor tiene una resistencia despreciable. Use los valores medidos para responder las siguientes preguntas.

¿Es $I_{R1} + I_{R2} = I_R$?

¿Estuvieron I_{R1} e I_{R2} en fase?

¿Es $I_{L1} + I_{L2} = I_L$?

¿Estuvieron I_{L1} e I_{L2} en fase?

¿Es $I_R + I_L = I_T$?

¿Es $\sqrt{I_R^2 + I_L^2} = I_T$?

¿Estuvieron I_R e I_L en fase?

Establezca en forma simple las conclusiones que usted pueda deducir acerca de las relaciones entre la corriente y la fase en un circuito R-L paralelo CA.

Describa los efectos de un circuito CA paralelo que contiene resistencia y capacitancia

En la Tarea de Aprendizaje anterior examinamos el comportamiento de dos circuitos CA paralelos, uno que contenía solamente resistencia y el otro que contenía resistencia y reactancia inductiva. Otro tipo contiene resistencia y reactancia capacitiva en paralelo, como se muestra en la Figura 32. Asuma que los alambres de conexión y el condensador tienen resistencia despreciable.

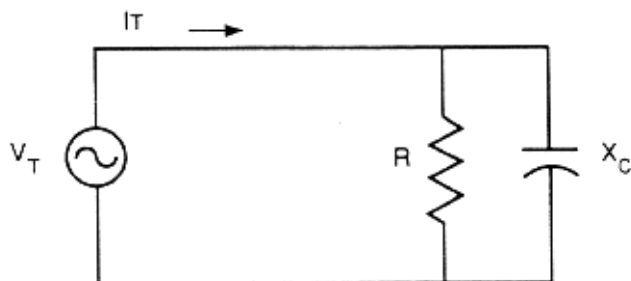


Figura 32
Circuito R-C paralelo

Voltaje

El voltaje a través del resistor es igual al voltaje a través del condensador. Cada uno es igual al voltaje de línea aplicado (V_T). Por lo tanto, es conveniente usar el voltaje de línea V_T como el vector de referencia para el circuito.

Corriente

La corriente (I_R) a través de la resistencia está en fase con el voltaje de línea.

$$I_R = \frac{V_T}{R}$$

Puede existir más de una derivación resistiva. Si es así, sus corrientes están en fase con el voltaje de línea y entre sí.

La corriente (I_C) a través de la reactancia capacitiva se adelanta al voltaje de línea en 90° . Este componente de la corriente también es llamado componente cuadrático de corriente y se calcula:

$$I_C = \frac{V_T}{X_C}$$

La corriente total de línea (I_T) está fuera de fase con el voltaje de línea por el ángulo de fase θ , el cual puede ser calculado a través del triángulo vectorial de corriente y desde el factor de potencia del circuito.

$$FP = \cos \theta$$

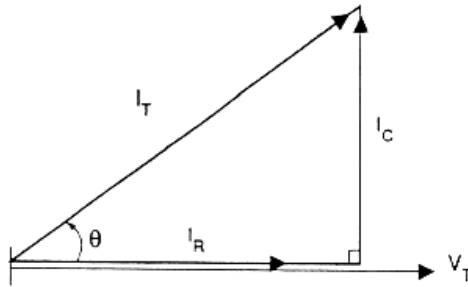


Figura 33

Triángulo vectorial para un circuito R-C paralelo

El triángulo de vectores de corriente es el más conveniente para analizar este tipo de circuito. La Figura 33 es el triángulo vectorial para el circuito en la Figura 32.

La corriente de línea es la suma vectorial de las dos corrientes de los ramales.

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

Impedancia

La impedancia del circuito se calcula de dos maneras: usando la Ley de Ohm, o por adición de vectores para los circuitos paralelos:

$$Z = \frac{V_T}{I_T}$$

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{XC}}$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{(1)^2}{(R)^2} + \frac{(1)^2}{(XC)^2}}}$$

Potencia

La potencia real se desarrolla completamente en la resistencia de este circuito. Las corrientes y el voltaje están 90° fuera de fase en los ramales reactivos, por lo tanto ninguna potencia real se desarrolla en ellos. (Nosotros hemos asumido que este es un circuito ideal sin resistencia en el condensador o en los alambres de conexión.)

$$P = V_T \times I_R$$

$$= I_R^2 \times R$$

$$= \frac{V_T^2}{R}$$

La potencia reactiva se usa en el campo electrostático del condensador y se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Vars} &= V_T \times I_C \\ &= I_C^2 \times X_C \\ &= \frac{V_T^2}{X_C} \end{aligned}$$

La potencia aparente se calcula usando la corriente de línea (I_T) y el voltaje de línea (V_T), o usando el triángulo de potencia.

$$V_A = V_T \times I_T$$

Factor de potencia y ángulo de fase

El factor de potencia del circuito es dado por la razón entre potencia real a potencia aparente. También es dado por la razón de corriente en fase (la resistiva) a la corriente de línea.

$$FP = \frac{P}{V_A} = \frac{I_R}{I_T}$$

La corriente total de línea (I_T) está fuera de fase con el voltaje de línea por el ángulo de fase theta. Como antes, se puede calcular este ángulo desde el triángulo de vectores de corriente o desde el factor de potencia del circuito.

$$FP = \cos \theta$$

Problema de ejemplo

Ejemplo 1 El circuito de la Figura 34 tiene tres derivaciones: dos con solamente resistencia pura, y el otro con reactancia capacitiva pura. Calcule:

- La corriente en cada derivación
- La corriente total en fase
- La corriente cuadrática
- La corriente de línea
- La impedancia de todo el circuito
- La potencia real tomada por el circuito
- El factor de potencia
- El ángulo de fase

Dibuje un diagrama de vector para el circuito

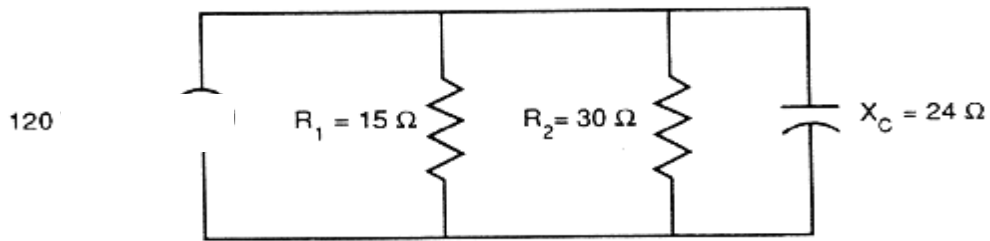


Figura 34
Circuito R-C paralelo para el Ejemplo 1

Use la Ley de Ohm con el voltaje de línea (V_T) para calcular la corriente en cada derivación:

$$I_T = \frac{V_T}{R}$$

$$I_1 = \frac{120}{15} = 8A$$

$$I_2 = \frac{120}{30} = 4A$$

$$I_C = \frac{120}{24} = 5A$$

b. La corriente en fase es la corriente combinada (I_R) en las dos derivaciones resistivas. Debido a que ellas están en fase entre sí, se pueden agregar en forma aritmética.

$$I_R = I_1 + I_2$$

$$= 8 + 4 = 12A$$

c. La corriente cuadrática es simplemente la corriente en la derivación capacitiva. Esta fue calculada anteriormente como $I_C = 5A$. Ésta se adelanta al voltaje en 90°

d. Calcule la corriente total de línea sumando las corrientes en fase y cuadrática en forma vectorial.

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

$$= \sqrt{12^2 + 5^2}$$

$$= 13A$$

e. Calcule la impedancia del circuito total usando la Ley de Ohm.

$$Z = \frac{V_T}{I_T}$$

$$= \frac{120}{13} = 9,23 \Omega$$

En forma alternativa, use la regla para la impedancia en los circuitos paralelos:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_c}\right)^2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{10}\right)^2 + \left(\frac{1}{24}\right)^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{5760}{676}} = 9,23\Omega$$

f. La potencia real se mide en watts y es consumida por la parte resistiva del circuito.

$$P = V_T \times I_R$$

$$= 120 \times 12 = 1440 \text{ W}$$

g. A continuación se muestran dos métodos para calcular el factor de potencia:

Método

$$FP = \frac{I_R}{I_T} = \frac{12}{13} = 0,9231 \text{ adelantado}$$

Método 2

$$VA = V_T \times I_T$$

$$= 120 \times 13 = 1560 \text{ VA}$$

Y

$$FP = \frac{P}{VA} = \frac{1440}{1560} = 0,9231 \text{ adelantado}$$

h. El ángulo fase = $\cos^{-1} 0,9231 = 22,6^\circ$. Este es el ángulo por el cual la corriente de línea se adelanta al voltaje de línea.

Para dibujar el diagrama de vectores:

Trace un vector horizontal que indique hacia la derecha y que represente el voltaje de línea.

Comience en el punto de partida del vector de voltaje, trace un vector de corriente en la misma dirección que el vector de voltaje. Éste representa la corriente I_1 en fase.

Comience en el extremo de I_1 , y trace otro vector de corriente en la misma dirección para representar el vector de corriente I_2 en fase. La longitud total de estos dos vectores combinados representa la corriente total en fase, I_R

Comience en el extremo del último vector, trace un vector vertical (a 90°) hacia arriba para representar la corriente a través de la derivación capacitiva, I_C .

Una el extremo de inicio del primer vector con el extremo más cercano. Este vector resultante representa la corriente total de línea del circuito I_T .

El ángulo entre el vector resultante y el vector de referencia es el ángulo de fase.

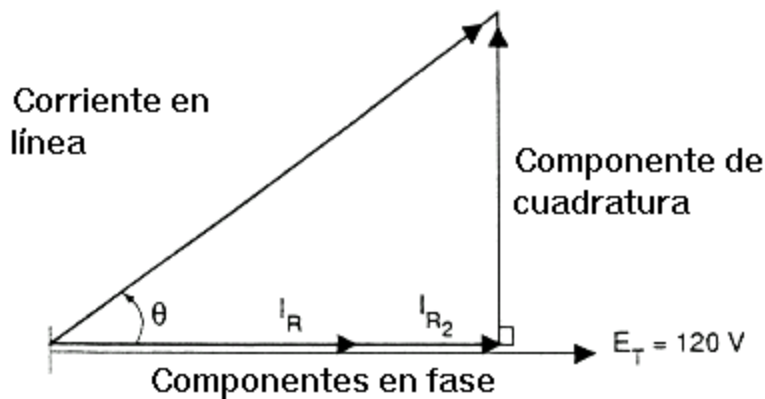


Figura 35

Diagrama de vectores para el Ejemplo 1

Ejercicio de Laboratorio 2.1: Demostrar que las corrientes a través de un condensador y de un resistor en un circuito R-C paralelo están 90° fuera de fase

Objetivo

En este experimento, usted usará un amperímetro para medir las corrientes en un circuito R-C en paralelo simple con una fuente de voltaje variable.

Equipo

Banco de prueba Lab Volt
Amperímetro

Procedimiento

Contáctese con su instructor respecto de los arreglos para completar este laboratorio y obtener los componentes del circuito. Analice con su instructor la manera en que será evaluado.

Conecte el circuito como se muestra en la Figura

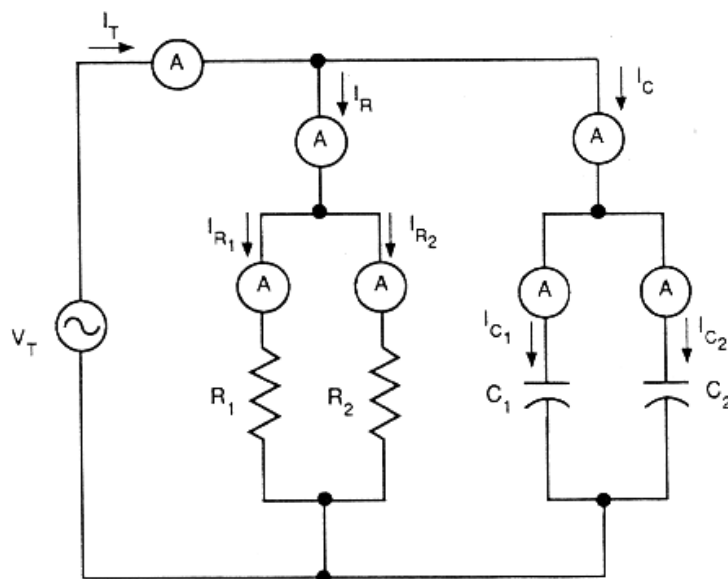


Figura 36
Circuito básico para el Ejercicio de Laboratorio 2.1

Mida los voltajes a través de los componentes

3. Energice el circuito y aumente lentamente el voltaje de la fuente V_T a 220 V CA.

4. Use el amperímetro para medir la corriente a través de cada componente. Tome registro de sus resultados de I_{R1} , I_{R2} , I_{C1} e I_{C2}

5. Desenergice el circuito.

Revise las corrientes a través de las resistencias

6. Energice el circuito y aumente lentamente el voltaje de suministro a 110 V CA.

7. Use el amperímetro para medir las corrientes a través de cada resistor en forma separada (I_{R1} e I_{R2}) y a través de ellos (I_R). Tome registro de sus resultados.

8. Desenergice el circuito.

Revise las corrientes a través de los condensadores

9. Use el amperímetro para medir las corrientes a través de cada condensador en forma separada (I_{C1} e I_{C2}) y a través de ellos (I_C). Tome registro de sus resultados.

10. Desenergice el circuito.

Revise las corrientes a través de los resistores y de los condensadores

11. Use el amperímetro para medir y registrar las corrientes a través de

Ambos resistores (I_R)

Ambos condensadores (I_C)

Los cuatro componentes (I_T)

12. Desenergice el circuito.

13. Desconecte el circuito, limpie su área de trabajo y guarde todo el equipo.

Conclusiones:

En este experimento, nosotros hemos asumido que los alambres y los condensadores tienen resistencia despreciable. Usando sus valores medidos, responda las siguientes preguntas:

¿Es $I_{R1} + I_{R2} = I_R$?

¿Estuvieron I_{R1} e I_{R2} en fase?

¿Es $I_{C1} + I_{C2} = I_C$?

¿Estuvieron I_{C1} e I_{C2} en fase?

¿Es $I_R + I_C = I_T$?

¿Es $\sqrt{I_R^2 + I_C^2} = I_T$?

¿Estuvieron I_R e I_C en fase?

Enuncie en forma simple las conclusiones que usted pueda deducir acerca de la relación entre la corriente y la fase en un circuito R-L en paralelo de CA.

Describir los efectos de un circuito CA en paralelo que contiene resistencia, inductancia y capacitancia

Para mayor facilidad, se asume que los alambres, el inductor y el condensador del circuito mostrado en la Figura 37 tienen resistencia despreciable.

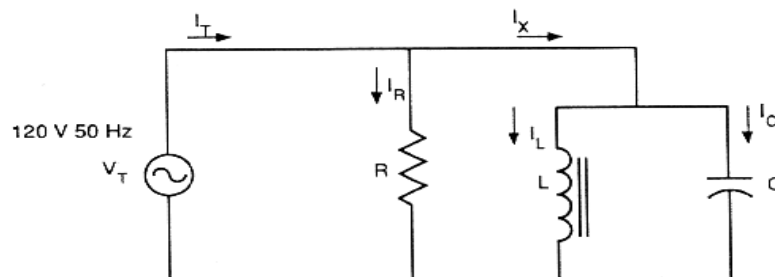


Figura 37
Circuito R-L-C paralelo

Voltaje

El voltaje a través de cada ramal de este circuito es el mismo que el voltaje de línea (V_T). Por lo tanto, es conveniente usar el voltaje de línea V_T , como el vector de referencia para el circuito.

Corriente

La corriente (I_R) a través de la resistencia está en fase con el voltaje de línea.

$$I_R = \frac{V_T}{R}$$

Si existe más de una derivación resistiva, sus corrientes están en fase con el voltaje de línea y entre sí.

La corriente (I_L) a través de la derivación inductiva del circuito retrasa el voltaje de línea a 90° .

$$I_L = \frac{V_T}{X_L} = \frac{V_T}{2\pi fL}$$

La corriente (I_C) a través de la reactancia capacitiva se adelanta al voltaje de línea en 90° .

$$I_C = \frac{V_T}{X_C} = V_T \times 2\pi fC$$

El componente cuadrático de la corriente (I_x) es una combinación de I_L e I_C . Los vectores I_C e I_L están en direcciones opuestas. La magnitud de I_x se encuentra restando la más pequeña con la más grande entre I_L e I_C . La dirección de I_x es la más grande entre I_L e I_C .

El triángulo de corriente es el diagrama de vectores más conveniente para este tipo de circuito. Si nosotros asumimos que I_C es mayor que I_L , la Figura 38 es el triángulo vectorial para el circuito en la Figura 139. Como se muestra, puede ser trazado en dos formas, dependiendo de si se traza I_L o I_C primero. El vector de corriente en línea resultante I_T , es el mismo en cada versión.

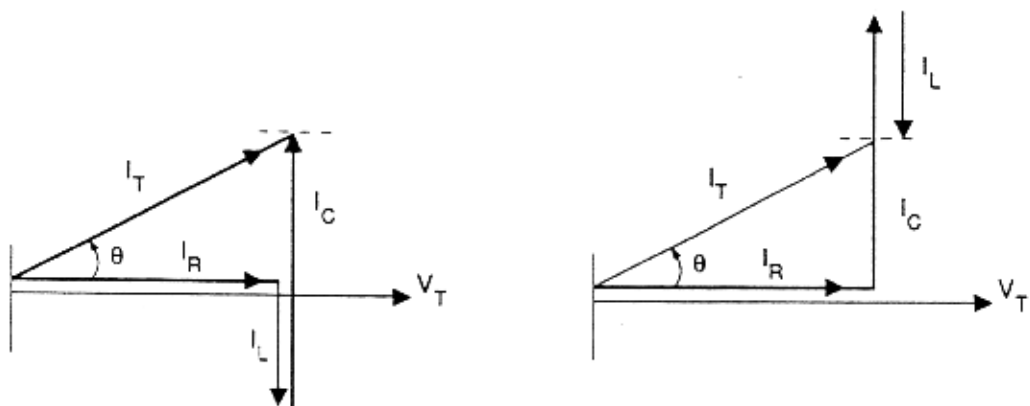


Figura 38

Triángulo vectorial para el circuito R-L-C paralelo con I_C mayor que I_L

La Figura 39: muestra el triángulo vector de la Figura 38 con I_L e I_C omitidos.

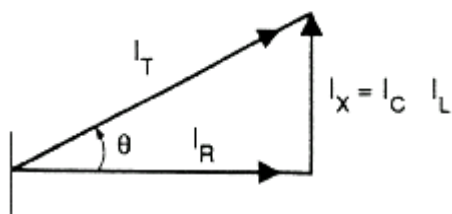


Figura 39

Triángulo vectorial para el circuito R-L-C paralelo que muestra I_X

La Figura 40: muestra dos versiones del triángulo vector de corriente cuando I_L es mayor que I_C .

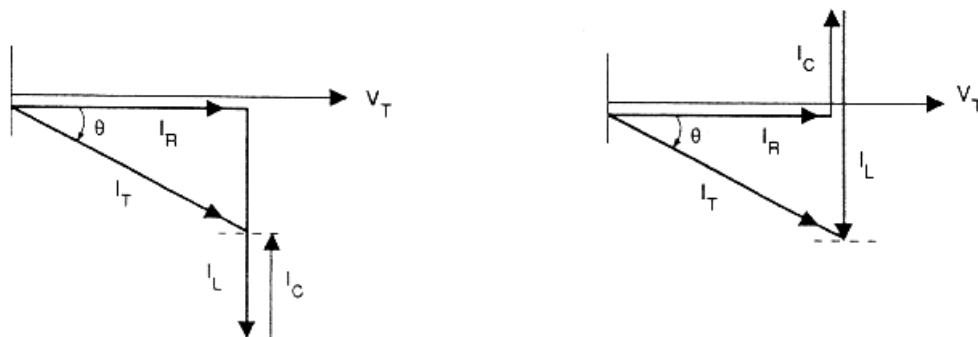


Figura 40

Triángulo vectorial para el circuito R-L-C paralelo con I_L mayor que I_C

La corriente de línea es la suma vectorial de las tres corrientes de rama.

$$IT = \sqrt{I_R^2 + I_X^2} = +\sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$$

Observe que es posible tener valores grandes de I_L e I_C individualmente aunque su efecto neto en el circuito es pequeño.

La Figura 41 muestra cómo el tamaño relativo de los vectores I_L e I_C puede afectar el tamaño y dirección del vector de corriente de línea. En los tres triángulos, el vector I_R es el mismo.

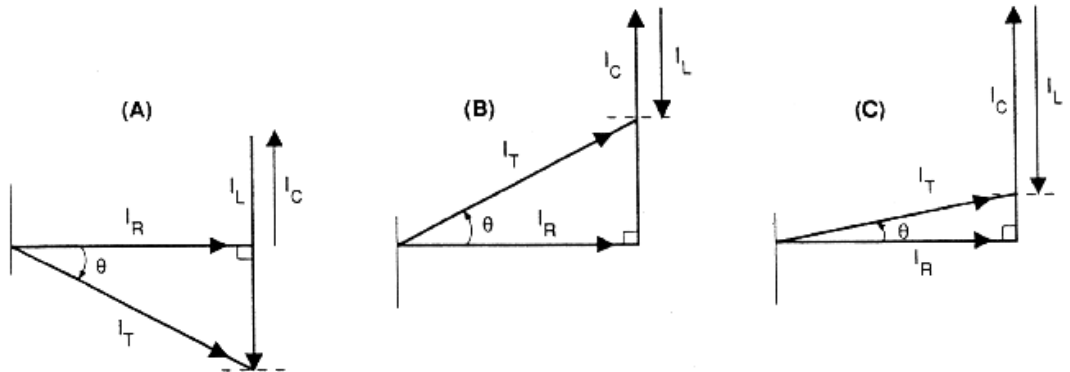


Figura 41
Triángulos de vectores de corriente

En (A), I_L es mucho mayor que I_C .

En (B), I_C es mucho mayor que I_L .

En (C), I_C sólo es levemente mayor que I_L .

Impedancia

La impedancia del circuito se calcula de dos maneras: usando la Ley de Ohm o por suma de vectores de los componentes paralelos.

$$Z = \frac{V}{I}$$
$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}}$$

Esta segunda manera es difícil de usar. Donde usted pueda, use la Ley de Ohm.

Potencia y ángulo de fase

La potencia real se desarrolla completamente en la resistencia del circuito. Las corrientes y el voltaje están 90° fuera de fase en las derivaciones reactivas, por lo tanto no se desarrolla potencia real en ellas. (Nosotros hemos asumido que un circuito ideal es aquel que no tiene resistencia en la bobina o en los alambres).

$$\begin{aligned} P &= V_T \times I_R \\ &= I_R^2 \times R \\ &= \frac{V_T^2}{R} \end{aligned}$$

Como Ud. ya observo en los circuitos R-L-C en serie, la bobina usa algo de energía en su campo magnético, y algo o toda esta energía es suministrada por el condensador, energía que está almacenada en su campo eléctrico.

$$\begin{aligned} \text{Vars}_L &= V_T \times I_L & \text{y} & & \text{Vars}_C &= V_T \times I_C \\ &= I_L^2 \times X_L & & & &= I_C^2 \times X_C \\ &= \frac{V_T^2}{X_L} & & & &= \frac{V_T^2}{X_C} \end{aligned}$$

La energía de magnetización neta suministrada por la línea es la diferencia entre vars_L y vars_C.

La potencia aparente se calcula usando la corriente de línea (I_T) y el voltaje de línea (V_T), o usando el triángulo de potencia. El factor de potencia del circuito es la razón entre la potencia real y la aparente. También es la razón entre la corriente en fase (Resistiva) con la corriente de línea.

$$FP = \frac{P}{VA} = \frac{I_R}{I_T}$$

La corriente total de línea (I_T) está fuera de fase con el voltaje de línea por el ángulo de fase θ . Como antes, usted puede calcular este ángulo desde el triángulo de vectores de corriente o desde el factor de potencia del circuito.

$$FP = \cos \theta$$

Si el ángulo de fase avanza o se retrasa depende de los tamaños relativos de las reactancias inductivas y capacitivas en el circuito. Si la corriente en la derivación capacitiva es mayor (menor reactancia capacitiva), entonces el ángulo de fase avanza. Si la corriente en la derivación inductiva es mayor (menor reactancia inductiva), entonces el ángulo de fase se retrasa.

Efectos de la resistencia del inductor

En la práctica, un inductor tiene resistencia. Como la bobina tiene reactancia y resistencia en serie, éste tiene impedancia (Z_L o Z_{BOBINA}). No confunda esto con la impedancia de todo el circuito (Z_T).

La corriente en la impedancia de la bobina retrasa el voltaje de línea. I_C e I_L ya no están exactamente en 180° fuera de fase. La corriente en la resistencia de la bobina está en fase con el voltaje de línea. La resistencia de la bobina toma algo de la potencia real del circuito, y ésta es tratada como una pérdida de potencia.

La Figura 42 es un circuito R-L-C paralelo que muestra la resistencia de la bobina (R_L). Es un poco más complicado trazar los triángulos de vectores para esta estructura, como se muestra en la Figura 43.

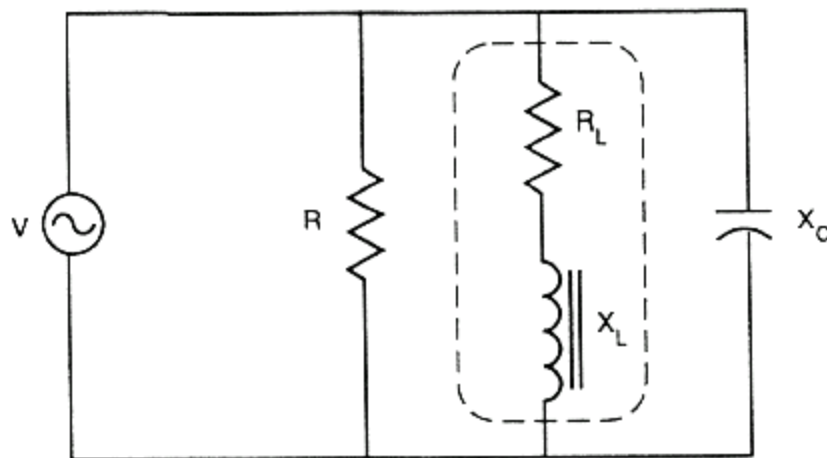


Figura 42

Circuito R-L-C paralelo, que muestra la resistencia de la bobina

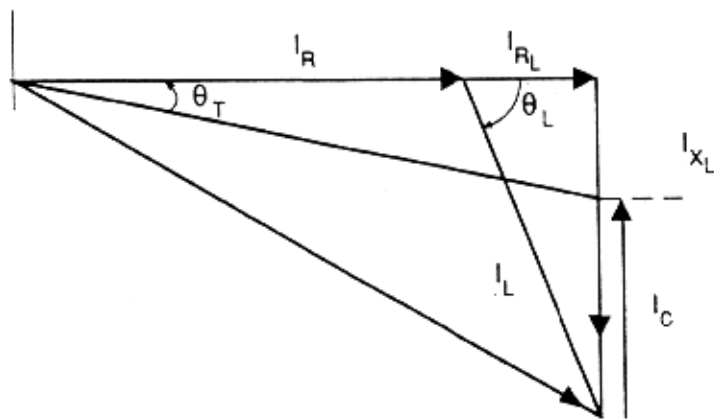


Figura 43

Triángulo de vectores de corriente para el circuito de la Figura 42.

Problema de ejemplo:

Ejemplo 1: Para el circuito de la Figura 44 de la próxima página, calcule

- a. La corriente en cada derivación
- b. La corriente de línea
- c. La impedancia
- d. La potencia real
- e. Los vars de magnetización requeridos por la bobina
- f. Los vars de magnetización suministrados por el condensador
- g. Los vars de magnetización netos.

El factor de potencia y el ángulo de fase del circuito

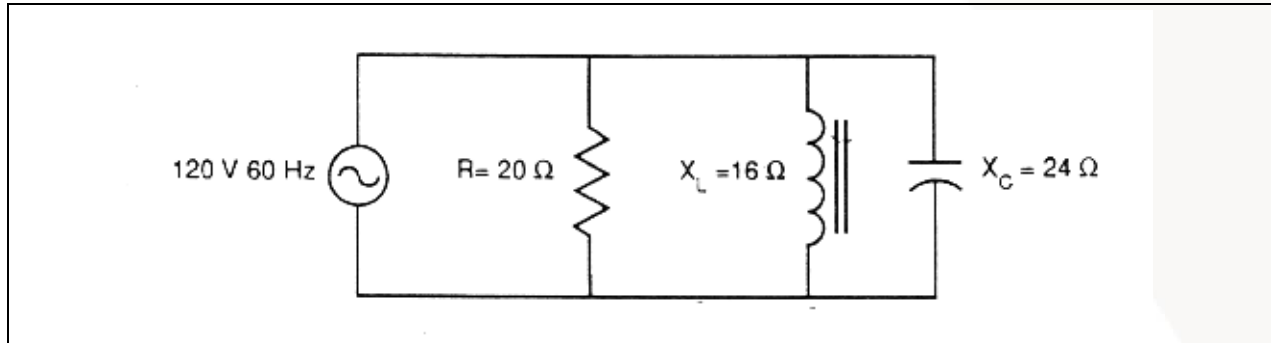


Figura 44
Circuito para el Ejemplo 1

El voltaje a través de cada derivación del circuito es el voltaje de línea (V).

Use la Ley de Ohm para calcular la corriente en la derivación resistiva:

$$I_R = \frac{V}{R} = \frac{120}{20} = 6A$$

Use la Ley de Ohm para calcular la corriente en la derivación inductiva:

$$I_L = \frac{V}{X_L} = \frac{120}{16} = 7,5 A$$

Use la Ley de Ohm para calcular la corriente en la derivación capacitiva:

$$I_C = \frac{V}{X_C} = \frac{120}{24} = 5 A$$

I_L e I_C están 180° fuera de fase entre sí (I_C se adelanta el voltaje de línea en 90° ; I_L se retrasa a el voltaje de línea en 90°).

Por lo tanto la corriente cuadrática neta es $I_L - I_C$.

Calcule la corriente de línea usando la ecuación de Pitágoras:

$$\begin{aligned} I_T &= \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} \\ &= \sqrt{6^2 + (7,5 - 5)^2} = 6,5 A \end{aligned}$$

Use la Ley de Ohm para calcular la impedancia:

$$Z = \frac{V}{I_T} = \frac{120}{6,5} = 18,5 \text{ ohm}$$

d. Use cualquiera de las tres ecuaciones de potencia para calcular la potencia real:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{120^2}{20} = 720 \text{ W}$$

Revise este resultado usando $P = VI_R = I_R^2 R$

e. Use cualquiera de las tres ecuaciones de potencia para calcular los voltamperios reactivos de magnetización para el inductor:

$$\text{Varss}_L = I_L \times V = 7,5 \times 120 = 900 \text{ varss}$$

$$\text{Revise este resultado usando } \text{varss}_L = \frac{V^2}{X_L} = I_L^2 \times X_L$$

Use cualquiera de las tres ecuaciones de potencia para calcular los varss suministrados por el condensador:

$$\text{Varss}_C = I_C^2 \times X_C = 52 \times 24 = 600 \text{ varss}$$

Revise este resultado usando

$$\text{Varss}_C = \frac{V^2}{X_C} = V \times I_C$$

Los vars de magnetización neta suministrados por la línea es la diferencia entre la energía de magnetización requerida por la bobina y la suministrada por el condensador:

$$\text{vars} = \text{varss}_L - \text{varss}_C = 900 - 600 = 300 \text{ varss}$$

Calcule el factor de potencia del circuito usando la razón de corriente o la razón de potencia:

$$FP = \frac{P}{VI_T} = \frac{720}{120 \times 6,5} = 0,923$$

$$FP = \frac{I_R}{I_T} = \frac{6}{6,5} = 0,923$$

Debido a que la corriente a través de la bobina es mayor que la corriente a través del condensador, el ángulo de fase está retrasado.

Use $FP = \cos \theta$ para calcular el ángulo de fase:

$$\theta = \cos^{-1} 0,923 = 22,6^\circ, \text{ retrasado.}$$

Describir los efectos de un circuito en paralelo resonante

En los circuitos R-L-C en paralelo examinados en la Tarea de Aprendizaje 3, los valores de corriente y potencia dependen de los tamaños relativos de las reactancias inductivas y capacitivas. Las corrientes en las derivaciones inductivas y capacitivas están 180° fuera de fase. Sus vectores se oponen entre sí.

Corriente

Las corrientes reactivas (I_L e I_C) a través de cada una de estas derivaciones pueden ser muy grandes, pero si sus magnitudes son similares, su valor combinado en el circuito puede ser muy pequeño.

Como I_L e I_C son iguales, la corriente de línea (I_T) llega a ser casi la misma que la corriente (I_R) en la derivación resistiva del circuito, como se muestra en la Figura 45.

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$$

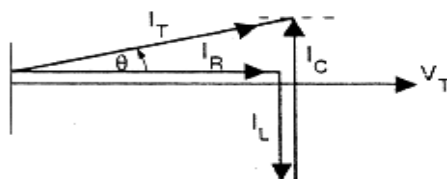


Figura 45

Cancelación de los vectores de corriente

La Figura 45 muestra claramente que I_L e I_C se cancelan entre sí completamente si ambas son exactamente iguales. Esto ocurre cuando las reactancias inductivas y capacitivas son idénticas. (Se asume que la resistencia de los alambres y la bobina en el circuito son despreciables.)

$$I_T = \sqrt{I_R^2} = I_R$$

Luego la corriente de línea tiene la misma magnitud y ángulo de fase que la corriente en la derivación resistiva. El circuito, se dice, es resonante. En resonancia, la corriente de línea y el voltaje de línea están en fase.

Recuerde que las corrientes individuales en las derivaciones reactivas del circuito no son cero. Su efecto en el circuito es cero porque están a 180° fuera de fase y se cancelan entre sí. Estas corrientes de ramal pueden de hecho, ser bastante grandes.

Observe que, en este circuito resonante paralelo, la corriente está en su valor *mínimo*. La impedancia está en su valor máximo. Esto es contrario al circuito resonante en serie, en el cual la corriente está en su valor máximo.

Potencia

En resonancia, los vars_L y vars_C son iguales, y los voltamperios reactivos de magnetización neta es cero. Todos los voltamperios reactivos de magnetización de la bobina son suministrados por el condensador; ninguno es suministrado por el voltaje de línea. En resonancia, el triángulo de vectores de potencia se asemeja al triángulo de corriente. El vector de los voltamperios reactivos neto vertical cae a longitud cero, y el vector de potencia aparente llega a ser exactamente igual al vector de potencia real en magnitud y dirección. Toda la potencia aparente en el circuito se desarrolla como potencia real en la resistencia del circuito.

$$P = VA$$
$$FP = \frac{P}{VA} = 1 \text{ o } 100\%$$

El ángulo de fase del circuito resonante es cero.

Frecuencia

La reactancia inductiva y la reactancia capacitiva dependen cada una de la frecuencia del circuito.

$$X_L = 2\pi fL \text{ y } X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

En resonancia, la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva son iguales. Usted puede transponer esta ecuación para resolver la frecuencia resonante.

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$
$$f = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$
$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

En un circuito R-L-C en paralelo, usted puede llevar la corriente de línea a un mínimo variando la frecuencia, la inductancia o la capacitancia. La nitidez del cambio en la corriente depende de la resistencia del circuito. Esto es útil en los circuitos de sintonización. Los circuitos son escogidos para que tengan un flujo de **corriente mínimo** definido nítidamente a la frecuencia resonante requerida.

El trazar una curva de corriente contra la frecuencia para valores fijos de R, L y C resulta en curvas como las de la Figura 46.

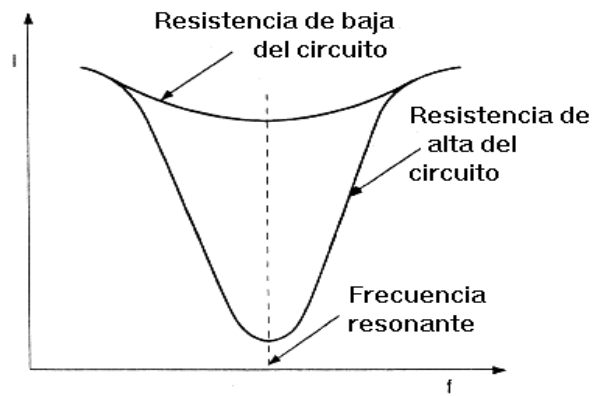


Figura 46

Curvas de resonancia para un circuito de ajuste a resonancia.

Problemas de ejemplo

Ejemplo 1: El circuito en la Figura 47 está en resonancia. Calcule lo siguiente:

- la capacitancia (C)
- la reactancia inductiva y capacitiva (X_L y X_C)
- las corrientes (I_L e I_C) en las derivaciones inductivas y capacitivas
- la corriente de línea (I_T)
- la impedancia del circuito (Z)
- la potencia aparente en el circuito el factor de potencia y el ángulo de fase

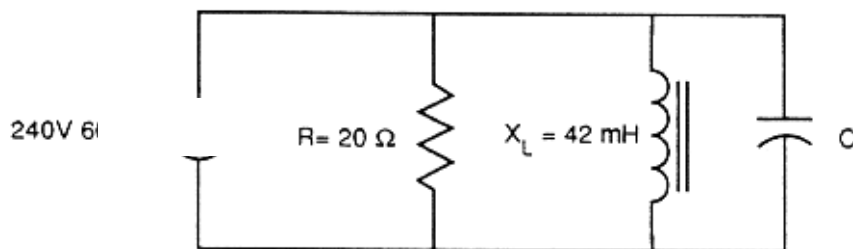


Figura 47

Circuito resonante para el Ejemplo 1

a. En resonancia, $X_L = X_C$

$$\begin{aligned} 2\pi fL &= \frac{1}{2\pi fC} \\ C &= \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \\ &= \frac{1}{4 \times 3,142^2 \times 60^2 \times 0,042} = 167 \mu F = 170 \mu F \end{aligned}$$

b. También,

$$\begin{aligned} X_C &= X_L = 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,142 \times 60 \times 0,042 = 15,8 \text{ ohm} = 16 \text{ ohm} \end{aligned}$$

c. Usando la Ley de Ohm,

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{V}{X_L} \\ &= \frac{240}{16} = 15 \text{ A} \\ &= I_C = I_L = 15 \text{ A} \end{aligned}$$

d. La corriente de línea es la misma que la corriente en la derivación resistiva:

$$\begin{aligned} I_T &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{240}{20} = 12 \text{ A} \end{aligned}$$

e. La impedancia del circuito es completamente resistiva, 20 ohm.

f. En resonancia, la potencia aparente es la potencia real del circuito, medida en watts.

$$\begin{aligned} V_A &= V_T I_T \\ &= 240 \times 12 = 2.880 \text{ W} \\ P &= I_T^2 R \\ &= 12^2 \times 20 = 2.880 \text{ W} \end{aligned}$$

g. El factor de potencia (P/A) es 100% o 1

El ángulo de fase ($\cos^{-1}\theta$) es cero.

Ejemplo 2 Para el circuito de la Figura 48 calcule lo siguiente:

- La corriente en cada derivación
- La potencia real (P_R) desarrollada en la resistencia
- La potencia real (P_L) desarrollada en el ramal de la bobina

- d. La resistencia efectiva (R_L) de la bobina
- e. La reactancia (X_L) de la bobina
- f. los rangos en microfaradios y voltamperios reactivos del condensador necesarios en la tercera derivación paralela para poner el circuito a resonancia.

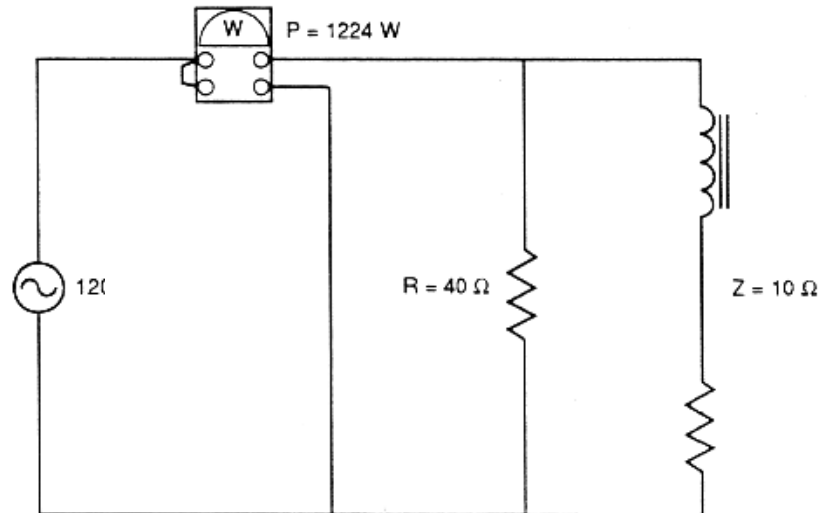


Figura 48
Circuito para el Ejemplo 2

Use la Ley de Ohm para encontrar las corrientes derivadas. El voltaje a través de cada derivación es el voltaje de línea.

$$I_R = \frac{V}{R} = \frac{120}{40} = 3 \text{ A}$$

$$I_L = \frac{V}{Z_L} = \frac{120}{10} = 12 \text{ A}$$

- b. La potencia desarrollada en la derivación resistiva del circuito es:

$$P_R = I_R V$$

$$= 3 \times 120 = 360 \text{ W}$$

El wattmetro mide 1.224 W de potencia en el circuito. La parte no desarrollada en la derivación resistiva se desarrolla en la resistencia de la bobina.

$$P_L = 1.224 - 360 = 864 \text{ W}$$

- d. Use este valor para calcular R_L .

$$R_L = \frac{P_L}{I_L^2}$$

$$= \frac{864}{12^2} = 6 \text{ ohm}$$

Use la ecuación de Pitágoras para calcular X_L

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}$$

$$\sqrt{10^2 - 6^2} = 8 \text{ ohm}$$

f. Para resonancia, $X_C = X_L = 8 \text{ ohm}$

Los rangos del condensador necesitado son:

$$\text{Vars} = \frac{V^2}{X_C}$$

$$= \frac{120^2}{8} = 1.800 \text{ varss}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

$$= \frac{1}{2 \times 3,142 \times 50 \times 8} = 398 \mu\text{F}$$

Ejercicio de Laboratorio 4.1: Demostrar que la impedancia es casi igual a la resistencia en un circuito paralelo resonante

Objetivo

Es este experimento, usted usará mediciones de voltaje y corriente simples para examinar la impedancia y resistencia en un circuito resonante R-L-C paralelo.

Equipo

Banco de prueba Lab Volt

Voltímetro

Amperímetro

Procedimiento

1. Contáctese con su instructor como hacer los arreglos para completar este laboratorio y obtener los componentes del circuito que usted usará. Analice con su instructor cómo será evaluado.

2. Conecte el circuito como se muestra en la Figura 49.

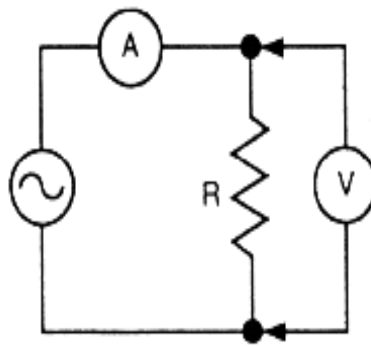


Figura 49

Diagrama del circuito para el Ejercicio de Laboratorio 4.1

3. Energice el circuito y aumente lentamente el voltaje a 220 V CA
4. Mida y tome registro de la corriente.
5. Desenergice el circuito.
6. Use la Ley de Ohm para calcular la resistencia. Compárela con el valor medido.

Vuelva a conectar el circuito como se muestra en la Figura 50. Use sólo un condensador (C_1) en paralelo con el inductor (L).

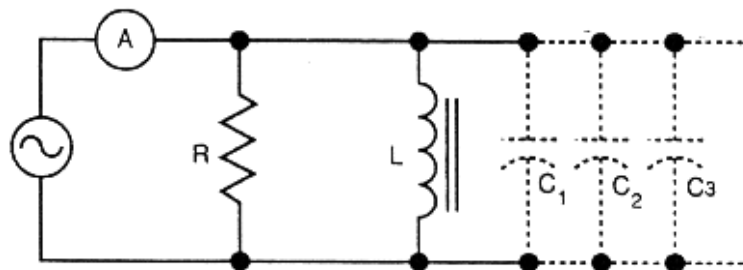


Figura 50

Circuito R-L-C paralelo para el Ejercicio de Laboratorio 4.1

Mida la corriente para varios valores de capacitancia

8. Repita los pasos 3, 4 y 5
9. Conecte otro condensador en paralelo con el primero.
10. Repita los pasos 3, 4 y 5.

11. Conecte otro condensador en paralelo con los dos primeros.

12. Repita los pasos 3, 4 y 5.

13. Conecte otro condensador en paralelo con los tres primeros.

14. Repita los pasos 3, 4 y 5.

15. Conecte otro condensador en paralelo con los cuatro primeros.

16. Repita los pasos 3, 4 y 5.

17. Conecte otro condensador en paralelo con los cinco primeros.

18. Repita los pasos 3, 4 y 5.

Estime la capacitancia necesaria para obtener resonancia

19. Dibuje un gráfico de sus resultados. Ponga la corriente en el eje Y, y la capacitancia en el eje X.

20. Desde el gráfico, estime la capacitancia que daría la corriente mínima del circuito.

21. Compare este valor mínimo de corriente con la corriente medida en el paso 4.

Compare la impedancia en resonancia con la resistencia

22. Use la Ley de Ohm para calcular la impedancia del circuito en resonancia.

23. Compare esto con la resistencia medida en el paso 6.

Conclusiones;

De sus resultados, identifique tres condiciones que existan en un circuito CA resonante paralelo.

Compare el valor de impedancia calculado en el paso 21 con la resistencia del resistor. ¿Qué podría causar una diferencia en estos valores? ¿Puede usted pensar en una manera simple de revisar esto?

2. Circuitos trifásicos

2.1 Características de los sistemas trifásicos

Ventajas de los sistemas trifásicos

Hasta hoy, Ud. Ha aprendido solo acerca de los sistemas monofásicos. Esta es la forma más fácil para comenzar a aprender los conceptos y análisis de circuitos. Sin embargo, los sistemas trifásicos (también conocidos como 3Φ o de tres fases) se usan ampliamente para la generación, transmisión, y distribución de la potencia eléctrica porque son superiores a los sistemas monofásicos en muchas formas.

Algunas de las ventajas son:

Es posible producir máquinas más pequeñas con la misma capacidad de KVA. Un generador trifásico o motor construido en el mismo tamaño de estructura NEMA que un motor monofásico puede tener un rango nominal en KVA hasta 1,5 veces superior al de la máquina monofásica.

Un sistema de distribución trifásico requiere alrededor de un 75% del cobre requerido por un sistema monofásico para distribuir igual cantidad de energía con la misma eficiencia y tensión.

Un sistema trifásico produce tres ondas sinusoidales espaciadas entre sí en 120 grados eléctricos. Debido a esto, la potencia entregada a una carga equilibrada trifásica es constante todo el tiempo, mientras que la potencia entregada a una carga monofásica es pulsante. Esto significa que las características de funcionamiento de las máquinas trifásicas son muy superiores a las máquinas monofásicas similares.

El diseño de los motores trifásicos es mucho más simple que los motores monofásicos. Los motores trifásicos son de arranque automático y no requieren de un devanado de arranque.

Generación de las tensiones trifásicas

Usted recordará que un alternador monofásico genera una tensión de onda sinusoidal cuando los conductores del inducido son cortados por un campo magnético giratorio. Si se coloca un segundo conjunto de devanados en el inducido de un alternador, desplazado del primer devanado por un número dado de grados eléctricos, el alternador producirá un segundo voltaje alternante. Esta segunda tensión de onda sinusoidal alcanzará sus valores máximos o pico en tiempos diferentes que el voltaje producido por el primer conjunto de devanados

Cada uno de los dos voltajes generados con formas de onda sinusoidal se denomina *fase*. Los sistemas polifásicos son sistemas que tienen dos o más fases. El sistema polifásico más común es el sistema trifásico.

Los alternadores trifásicos se construyen con tres conjuntos separados de devanados colocados en el inducido separado por 120 grados eléctricos entre ellos. Por

simplicidad, cada conjunto de devanados en la Figura 51, contiene solamente una vuelta. A medida que el campo gira produce tres ondas sinusoidales de igual frecuencia y magnitud, todas fuera de fase 120 grados entre ellas.

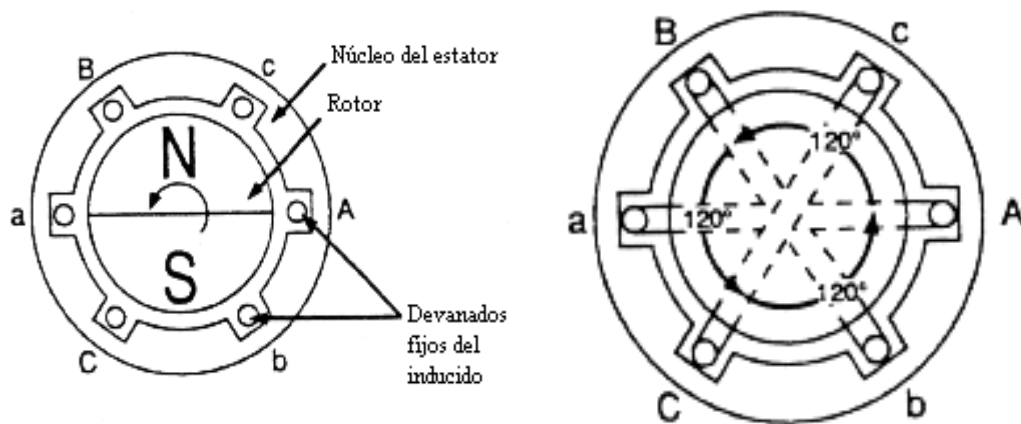


Figura 51
Alternador trifásico. Devanados fijos del inducido

Observe que en este alternador de dos polos, los dos lados de cada devanado de fase están separados 180° . Por ejemplo, el devanado rotulado **A** hacia **a** entra en el diagrama en el punto identificado **A**, cruza por detrás del diagrama y sale del diagrama en el punto identificado **a**. Vea la Figura 51. Esto significa que el voltaje que se mide entre los dos extremos de este devanado igualará la suma del voltaje inducido en la parte **A** más el voltaje inducido en la parte **a**.

El voltaje inducido en cada devanado depende de la tasa de cambio del flujo magnético que rodea al conductor del inducido. Esta tensión alcanza su valor máximo cuando el centro del polo del rotor se encuentra adyacente al devanado del inducido.

La Figura 52 muestra la posición del rotor cuando produce los valores máximos positivos de tensión en cada una de las tres fases. Siga la línea segmentada a través de los gráficos para ver dónde están las otras dos fases durante su ciclo cuando una de las fases está en su máximo valor positivo. Se puede usar una línea vertical dibujada en cualquier parte en el gráfico para comparar las tensiones de las tres fases en relación una de la otra para un momento determinado.

2.2 Características de las conexiones en estrella (Y) y en delta (Δ) o triángulo

Las tres espiras que conforman los devanados del inducido en el alternador de la Figura 51 están orientados 120° entre sí. Si obviamos las otras partes del alternador y mostramos solo la orientación física de los tres devanados de vueltas múltiples en un alternador trifásico similar, se parecerá algo a la Figura 53.

Si se sacaran hacia fuera del alternador las seis conexiones terminales para alimentar a tres circuitos monofásicos por separado, se anularían las ventajas del sistema trifásico.

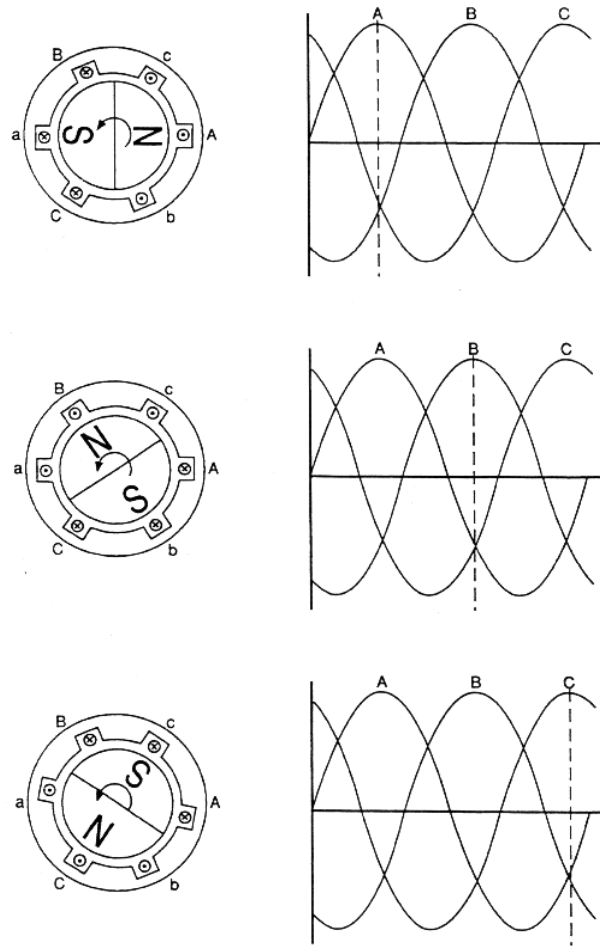


Figura 52

Los devanados de un alternador trifásico generalmente se llevan hacia afuera (a su caja de terminales) en una de las dos configuraciones: la configuración **Y** (o estrella) o la configuración **Δ**. “**Y**” a veces se escribe como estrella. La configuración triángulo “**Δ**” se conoce también como delta.

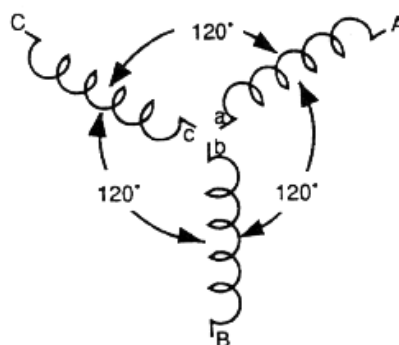


Figura 53
Orientación del devanado trifásico

Devanados conectados en y o estrella

Si los tres extremos de los devanados identificados con las letras minúsculas se unen en un punto común, llamado el punto estrella, se dice que el alternador está conectado en Y o estrella. La Figura 54 muestra esta configuración con el punto estrella identificada N. Un alternador que se conecta en esta configuración tiene cuatro terminales de inducido. El terminal del punto estrella es el neutro y está identificado como N. Los otros tres terminales son los terminales de línea y se marcan como A, B, y C. En otras ocasiones, se marcan L1, L2 y L3. Estas son configuraciones norteamericanas. En Europa y América del Sur, se denominan R, S y T respectivamente.

Devanados conectados en triángulo Δ o delta

La otra forma común de conectar internamente los terminales del alternador es la configuración Δ (delta). La Figura 55 muestra una representación esquemática de esta configuración.

El extremo identificado con la letra minúscula **b** del devanado B se conecta al extremo identificado con la letra mayúscula **A** del devanado A; luego, el extremo identificado con la letra minúscula **c** del devanado C se conecta al extremo identificado con la letra mayúscula **B** del devanado B; y finalmente, el extremo identificado con la letra minúscula **a** del devanado A se conecta al extremo identificado con la letra mayúscula **C** del devanado C. Esto forma una vuelta completa del inducido. Un alambre terminal se agrega a cada unión y sale del alternador hacia la caja de conexión. Estos tres terminales de línea se marcan como A, B, C.; o con R, S, T.

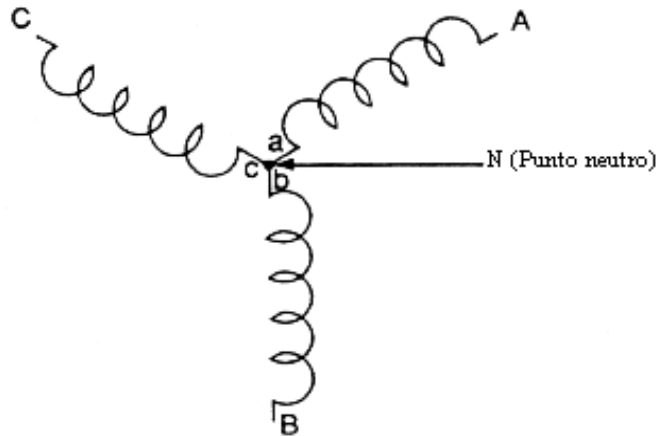


Figura 54
Configuración Y

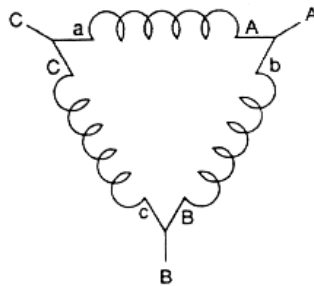


Figura 55
Configuración Δ
Secuencia de fases

Secuencia de fase es el orden en el cual las tres fases alcanzan sus máximos valores positivos. Las dos secuencias de fase son A-B-C o C-B-A. La secuencia de fases se puede invertir mediante uno de los dos métodos:

El sentido de giro de la fuente motriz (motor diésel) que mueve el generador se puede invertir de manera que el rotor gire en sentido contrario; o cualquiera de dos de los terminales de línea se puede intercambiar. Por ejemplo, el terminal identificado A puede intercambiarse con el terminal identificado B, de manera que B se convierta en A y A se convierta en B. Esto también se puede hacer intercambiando A y C o B y C. El Código Eléctrico Canadiense requiere que las tres fases se identifiquen mediante un código de colores. Los colores son los siguientes:

Fase A = Rojo

Fase B = Negro
Fase C = Azul
Neutro = Blanco o gris natural

En contraposición, el Código Eléctrico de Chile, en su sección 8.0.4.15. Decreta el siguiente código de colores:

Fase A (R) = Azul
Fase B (S) = Negro
Fase C (T) = Rojo
Neutro o tierra de servicio = Blanco o gris natural

Es importante que Ud. conozca ambos sistemas, dado que muchos equipos importados vienen con las configuraciones de fábrica, que no corresponden a lo que ordena la ley local.

Representación de tensiones y corrientes trifásicas mediante fasores.

Los fasores son vectores giratorios que se usan para representar cantidades que pueden variar con el tiempo. Los voltajes y las corrientes sinusoidales son cantidades cuyas magnitudes varían con el tiempo, de manera que pueden representarse mediante fasores.

Se debe recordar que existen ciertas convenciones a observar cuando se trabaja con los fasores.

Estas son:

La longitud del fasor se usa más frecuentemente para representar el valor efectivo (RMS) de la onda sinusoidal, pero a veces se le utiliza para representar el valor máximo o pico (peak) de la onda sinusoidal.

El álgebra de fasores se efectúa de la misma forma que el álgebra vectorial.

La dirección positiva de rotación del fasor es en dirección contraria a los punteros de reloj desde la referencia de cero grado ubicada en el eje X de las coordenadas, o posición 3 en punto del reloj.

Cuando se muestran dos fasores en un mismo diagrama de fasores, se dice que el fasor que está más hacia la izquierda contra el reloj se *adelanta* al segundo fasor. Eso quiere decir que está más avanzado en su ciclo. Además, se dice que el fasor que está *más hacia la derecha en el sentido del reloj* está *retrasado* respecto del otro fasor. Eso significa que no está tan avanzado en su ciclo respecto del fasor con el que se compara.

Las formas de onda de los fasores en un mismo diagrama de fasores deben ser sinusoidales y tener la misma frecuencia. Esto es porque cuando se suman dos ondas sinusoidales de igual frecuencia, el resultado es siempre una tercera forma de onda de igual frecuencia.

Para dibujar fasores, se deben congelar en el tiempo. Normalmente, se selecciona uno de los fasores como *fasor de referencia*, y se dibujará sobre el eje de referencia X de 0° , o posición 3 en punto del reloj. Esto hace el trabajo con los fasores menos complicado.

En los circuitos en serie, la corriente es la misma en todas partes del circuito, de manera que el fasor de corriente se dibuja normalmente sobre el eje de referencia X.

En circuitos paralelos, el voltaje es el mismo en todas partes del circuito, de manera que el fasor de voltaje normalmente se dibuja sobre el eje de referencia X.

En los circuitos trifásicos, la fase A se utiliza generalmente como fasor de referencia.

Se deben dibujar formas de onda sinusoidales similares en el mismo diagrama de fasor a igual escala. (Por ejemplo, dos formas de onda de voltaje, dos formas de onda de corriente o dos formas de onda de potencia en el mismo diagrama). Sin embargo, si dos formas de onda distintas se dibujan en el mismo diagrama, sus escalas pueden diferir. (Por ejemplo, una forma de onda de corriente y una forma de onda de voltaje).

Los fasores de corriente se muestran normalmente con puntas de flechas cerradas y los voltajes normalmente se muestran con puntas de flechas abiertas.

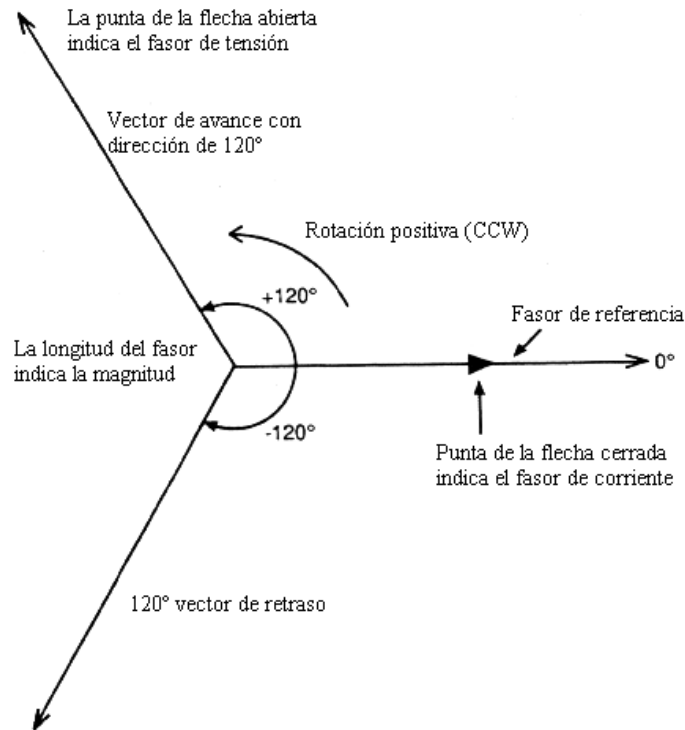


Figura 56
Convenciones o reglas de fasores

Anotación de Subíndice

Los fasores se marcan frecuentemente con un doble subíndice. El orden de los dos subíndices es muy importante. Mucha gente se confunde cuando analizan los circuitos trifásicos porque no entienden completamente la importancia de este orden.

Los dos subíndices indican los dos puntos entre los cuales existe un voltaje. Cuando se aplica una anotación de doble subíndice a un circuito de CA, la secuencia de los subíndices indica la dirección en la que la corriente, la fem y la diferencia de potencial se asumen como positivas.

La fem se asume es un aumento de voltaje y la diferencia de potencial se asume es una caída de voltaje. El aumento de voltaje se produce cuando el circuito recibe energía desde algo externo al circuito. La caída de voltaje se produce cuando el circuito disipa la energía hacia algo fuera del circuito.

Fuente	Carga
Se considera que <i>el voltaje</i> a través de la fuente (un aumento de tensión) es positivo cuando va desde positivo a negativo.	<i>El voltaje</i> a través de una carga (una caída de tensión) se considera positivo cuando va desde negativo a positivo.
Vale decir, la fem o un aumento del potencial tiene lugar cuando un electrón se mueve desde un punto más positivo a un punto más negativo.	Vale decir, una caída en potencial ocurre cuando un electrón se mueve desde un punto más negativo a un punto más positivo.
El primer subíndice es más positivo	El primer subíndice es más negativo
<i>La corriente</i> que fluye a través de una fuente se considera que es positiva cuando está en una dirección que aumenta la energía potencial del electrón.	<i>La corriente</i> que fluye a través de una carga se considera que es positiva cuando está en una dirección que disminuye la energía potencial del electrón.
De este modo, se considera que la corriente es positiva a través de una fuente cuando fluye desde un punto más positivo a un punto más negativo.	De este modo, la corriente se considera que es positiva a través de una carga cuando fluye desde un punto más negativo a un punto más positivo.
El primer subíndice es más positivo.	El primer subíndice es más negativo.

Tabla1

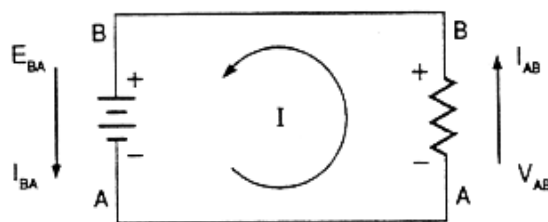


Figura 57

Subíndices de voltaje y corriente.

El primer subíndice siempre representa el extremo del componente del circuito por donde entra la línea de trazado del lazo de corriente.

El segundo subíndice siempre representa el extremo del componente del circuito por donde sale la línea de trazado del lazo corriente. Ver la Figura 57.

Observe que esto permite satisfacer la ley de Voltaje de Kirchhoff.

$$E_{BA} = V_{AB}$$

$$E_{BA} - V_{BA} = 0$$

Aquí se usa la letra E como símbolo para representar una fem (o aumento de voltaje) y se usa la letra V para representar una diferencia de potencial (o caída de voltaje). Revertir el orden de los subíndices significa lo mismo que cambiar la dirección del fasor en 180°.

Trazado de lazos de corriente

Por convención, el trazado de lazos de corriente se dibuja de manera que estos salen desde la fuente a través de las líneas A, B, y C, y vuelven a la fuente a través del neutro.

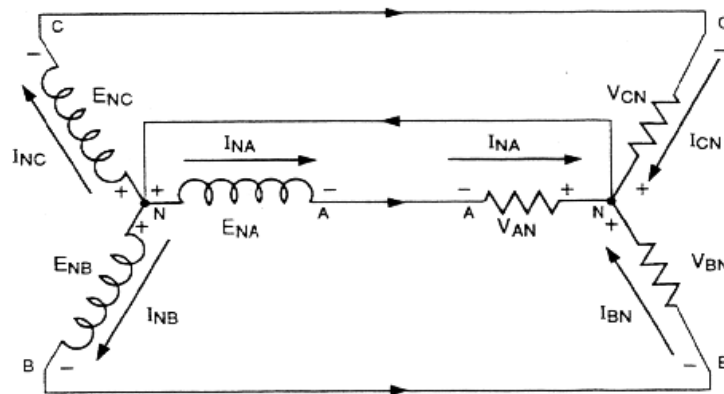


Figura 58

Trazado de lazos de corriente

Para que esto ocurra, los extremos exteriores de los devanados de la fuente deben ser negativos con respecto a los extremos del punto estrella. La Figura 59 muestra los fasores de voltaje y los fasores de corriente para esta fuente conectada en Y.

Tome en cuenta que los fasores de voltaje se dibujan con puntas de flecha abiertas mientras que los fasores de corriente se dibujan con puntas de flecha cerradas.

El fasor de voltaje E_{NA} representa el voltaje a través del devanado A. Ya que la fase A se dibuja en el eje X, ubicado en la posición 3 en punto en la página, es entonces está el fasor de referencia. Esto significa que la onda sinusoidal que representa el voltaje E_{NA} a un ángulo de 0° es positiva partiendo desde cero. (Positivo a partir de cero significa que está al inicio de su ciclo de onda sinusoidal donde N es positivo con respecto a A.)

El fasor de voltaje E_{NB} dibujado en el ángulo de 240° (o - 120°) significa que debe ser positivo a partir de cero, 120° después de E_{NA} .

E_{NC} dibujado en el ángulo de 120° significa que debe ser positivo a partir de cero, 240° después de E_{NA} .

El fasor de corriente I_{NA} representa la corriente que fluye a través del devanado A. Dado que la carga es puramente resistiva, la corriente a través del devanado A está en fase con el voltaje a través del devanado A. Por lo tanto, también se dibuja en el eje X a las 3 en punto en la página. Esto significa que la onda sinusoidal que representa la corriente I_{NA} es positiva partiendo de cero en el ángulo de 0° .

El fasor de corriente I_{NB} es positivo a partir de cero, 120° después de I_{NA} .

I_{NC} es positivo a partir de cero, 240° después de I_{NA} .

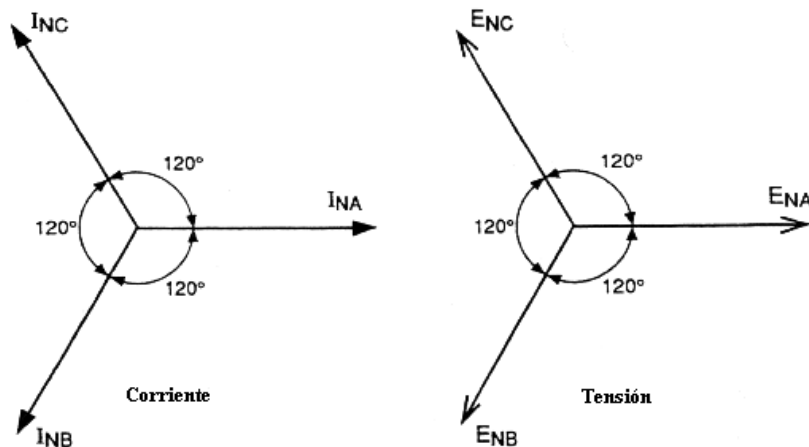


Figura 59
Fasores de corriente y de voltaje



Ahora responda el Auto Examen 1 y revise sus respuestas.

Auto Examen 1

1. ¿Qué significa el término polifásico?
2. Enuncie cuatro ventajas de un sistema trifásico.
3. ¿Cuál es el ángulo de fase entre los tres voltajes generados por un alternador trifásico?

4. ¿Cuáles son las dos posibles configuraciones para los terminales de un alternador trifásico?

5. ¿Qué se quiere decir con el término *secuencia de fase*?

6. ¿Cómo se lleva a cabo normalmente la inversión de la secuencia de fase?

7. El código de Chile establece que los conductores de un sistema trifásico se identifiquen con los siguientes colores:

Fase A:

Fase B:

Fase C:

Neutro _____ o _____

8. La longitud del fasor se utiliza principalmente para representar el valor _____ de la onda sinusoidal.

9. La dirección positiva de rotación del fasor de corriente es _____

10. ¿Es importante que todas las ondas sinusoidales representadas en el mismo diagrama de fasores tengan la misma frecuencia? ¿Por qué?

11. Los fasores de voltaje se dibujan generalmente con puntas de flecha _____.

12. Cuando se usa la anotación de subíndice para representar el voltaje a través de una fuente, el primer subíndice tiene polaridad _____ con respecto al segundo.

13. Cuando se usa la anotación de subíndice para representar el voltaje a través de una carga, el primer subíndice tiene polaridad _____ con respecto al segundo.

14. El primer subíndice siempre representa el extremo del componente del circuito en el cual la corriente _____ al componente del circuito.

15. Invertir el orden de los subíndices hace cambiar la dirección del fasor en _____ grados.

Características de la conexión trifásica en estrella

Voltajes en un sistema conectado en estrella (Y)

La Figura 60 muestra una fuente conectada en Y (estrella), trifásica. El voltaje a través de cada uno de los devanados del inducido se llama *voltajes de bobina*. La magnitud de cada tensión de la bobina que se muestra en la Figura 60 es de 120 VCA. Ya que estos voltajes se generan a través de cada fase del alternador también se les denomina como *voltajes de fase*.

Por lo tanto los tres voltajes de la bobina en el sistema norteamericano son:

Devanado A: $E_{NA} = 120 \text{ V } \angle 0^\circ$

Devanado B: $E_{NB} = 120 \text{ V } \angle 240^\circ$ o $120 \text{ V } \angle -120^\circ$

Devanado C: $E_{NC} = 120 \text{ V } \angle 120^\circ$

Para Chile, los tres voltajes de la bobina en el sistema nacional son:

Devanado A: $E_{NA} = 220 \text{ V } \angle 0^\circ$

Devanado B: $E_{NB} = 220 \text{ V } \angle 240^\circ$ o $120 \text{ V } \angle -120^\circ$

Devanado C: $E_{NC} = 220 \text{ V } \angle 120^\circ$

Para propósitos de análisis, usaremos el sistema explicado en el módulo, pero el método es el mismo

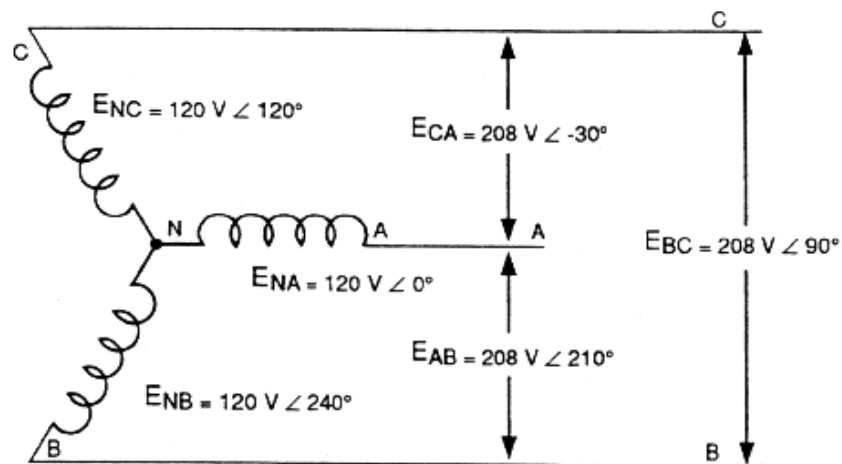


Figura 60

Fuente conectada en estrella o Y

Los voltajes entre cualquiera de dos de los tres terminales de la línea A, B, o C, se denominan *voltajes línea a línea* o simplemente como ***voltajes de línea***. Estos voltajes son iguales a la diferencia fasorial entre los dos voltajes de fase correspondientes. Ya que los dos voltajes de bobina no están en fase entre uno al otro, no se pueden restar algebraicamente, sino deben ser tratadas como fasores.

Calcularemos los tres voltajes de línea que en este caso son:

$$E_{AB} = 208 \text{ V } \angle 210^\circ$$

$$E_{BC} = 208 \text{ V } \angle 90^\circ$$

$$E_{CA} = 208 \text{ V } \angle -30^\circ$$

La Figura 61 muestra la representación fasorial de los seis voltajes. La Figura 61a es la manera normal de mostrar a los fasores, originándose todos desde un punto común. En la Figura 61b los ángulos y magnitudes de los fasores no han cambiado, pero los fasores de los voltajes de línea han sido movidos para mostrar la relación entre los voltajes de línea y los voltajes de fase más claramente.

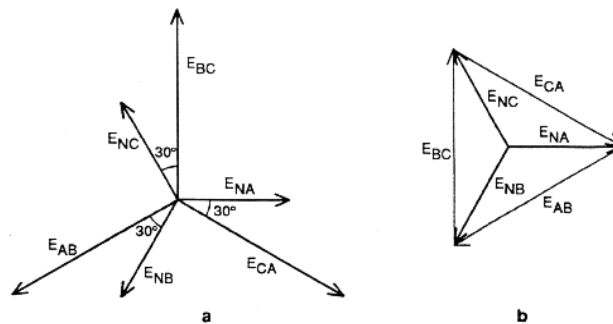


Figura 61

Voltajes para un generador conectado en Y

El voltaje entre cualquiera de los dos puntos se puede encontrar restando el voltaje en un punto (con respecto a una referencia común) desde el voltaje en el otro punto (con respecto a la misma referencia).

El voltaje en el punto B con respecto a A (E_{AB}) se puede encontrar tomando el voltaje en B (E_{NB}) con respecto al neutro, y restando de él el voltaje en A (E_{NA}) con respecto al neutro.

$$E_{AB} = E_{NB} - E_{NA}$$

Pero, el restar un vector es lo mismo que sumar uno en la dirección opuesta, de manera que:

$$\begin{aligned} E_{AB} &= E_{NB} + E_{AN} \\ E_{AN} &= 120 \text{ V } \angle 180^\circ \\ E_{AB} &= 120 \text{ V } \angle 240^\circ + 120 \text{ V } \angle 180^\circ \\ &= (120\cos 240 + j120\sin 240) + (120\cos 180 + j120\sin 180) \\ &= (-60 + -j103,9) + (-120 + j0) \\ &= -180 - j103,9 \\ &= \sqrt{(180^2 + 103,9^2)} \angle \tan^{-1}\left(\frac{-103,9}{-180}\right) \\ &= 208 \text{ V } \angle 210^\circ \end{aligned}$$

En su calculadora puede encontrar que la $\tan^{-1}(-103,9/-180)$ es 30° ; pero puede ver desde los signos menos en las coordenadas X e Y que el ángulo debe estar en el cuadrante 3. Por lo tanto, el ángulo debe ser $180^\circ + 30^\circ = 210^\circ$

La ecuación $E_{AB} = E_{NB} + E_{AN}$ se puede ver gráficamente en la Figura 61b trazando:

Desde A a B (E_{AB})

Desde A a N (E_{AN})

Desde N a B (E_{NB})

El mismo método se puede usar para resolver por E_{BC} y E_{CA} :

$$E_{BC} = E_{NC} - E_{NB}$$

$$E_{BC} = E_{NC} + E_{BN}$$

$$E_{BN} = 120 \text{ V} \angle 60^\circ$$

$$\begin{aligned} E_{CB} &= 120 \text{ V} \angle 120^\circ + 120 \text{ V} \angle 60^\circ \\ &= (120\cos 120 + j120\sin 120) + (120\cos 60 + j120\sin 60) \\ &= (-60 + j103,9) + (60 + j103,9) \\ &= 0 + j208 \end{aligned}$$

$$= \sqrt{(0^2 + 208^2)} \angle \tan^{-1}\left(\frac{208}{0}\right)$$

$$= 208 \text{ V} \angle 90^\circ$$

En su calculadora puede encontrar que obtiene un error cuando trate de dividir 208 por cero.

Pero usted sabe que si la coordenada X es 0 entonces el lado opuesto es igual a la hipotenusa, y esto solamente sucede a 90° y 270° . La coordenada Y es positiva, de manera que el ángulo debe ser 90° .

$$E_{CA} = E_{NA} - E_{NC}$$

$$E_{BC} = E_{NA} + E_{CN}$$

$$E_{CN} = 120 \text{ V} \angle 300^\circ$$

$$\begin{aligned} E_{CA} &= 120 \text{ V} \angle 0^\circ + 120 \text{ V} \angle 300^\circ \\ &= (120\cos 0 + j120\sin 0) + (120\cos 300 + j120\sin 300) \\ &= (120 + j0) + (60 + -j103,9) \\ &= 180 + -j103,9 \end{aligned}$$

$$= \sqrt{(180^2 + 103,9^2)} \angle \tan^{-1}\left(\frac{103,9}{180}\right)$$

$$= 208 \text{ V} \angle -30^\circ$$

La magnitud del voltaje de línea en un sistema conectado en Y equilibrado es siempre $\sqrt{3}$, o 1,73 veces la magnitud del voltaje de la fase. Demos una mirada a como se llega a este número:

La Figura 63 es un triángulo rectángulo de 30° , y la Figura 62 muestra la relación entre E_{NA} , E_{NB} y E_{AB} .

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{3}}{2} = \text{adyacente dividido por la hipotenusa}$$

Bisecte el ángulo entre los dos voltajes de fase en la Figura 62 para crear dos triángulos rectángulos de 30° de igual tamaño.

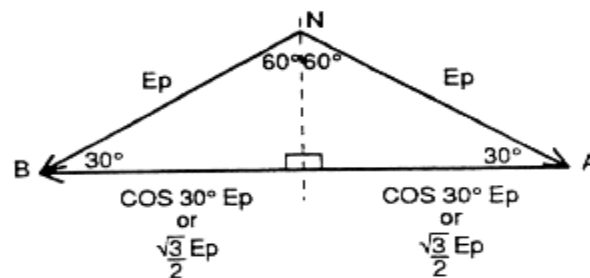


Figura 62
Voltajes de línea y de fase

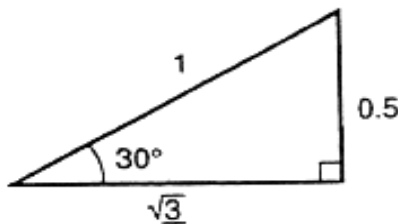


Figura 63
Triángulo rectángulo de 30°

Observe que el fasor E_{AB} es igual a la suma de los dos lados adyacentes a los ángulos de 30° . Por lo tanto, la magnitud de E_{AB} debe ser igual a

$$\begin{aligned} E_{AB} &= 2 \times \cos 30 \times E_{\text{fase}} \\ &= 2 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times E_{\text{fase}} \\ &= \sqrt{3} \times E_{\text{fase}} \quad \text{o} \\ E_{\text{línea}} &= \sqrt{3} \times E_{\text{fase}} = 1,73 \times E_{\text{fase}} \end{aligned}$$

Corrientes en el sistema conectado en Y

Ya que cada bobina del alternador se conecta en serie con una de las tres líneas, la corriente en cada línea debe ser la misma que la corriente en cada fase correspondiente.

Por lo tanto, la corriente de bobina, la corriente de fase y la corriente de línea *son todas iguales* en un alternador trifásico conectado en estrella.

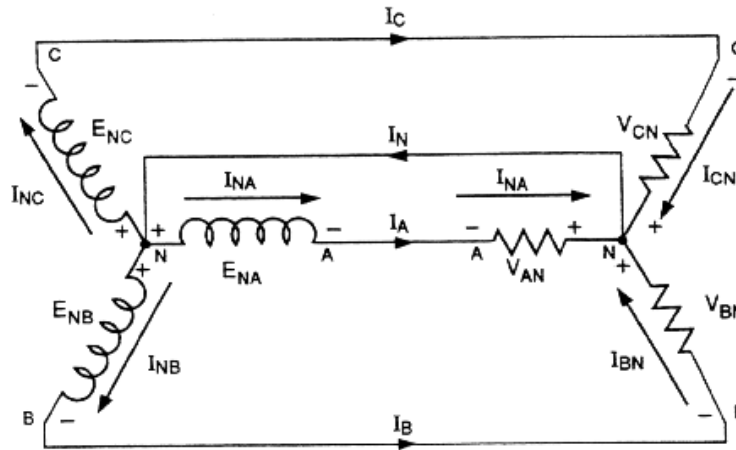


Figura 64

Relaciones de corriente y tensión.

Observe que cada una de las cargas conectadas en estrella está conectada directamente a través del voltaje de fase de la fuente. Para satisfacer la ley de voltaje de Kirchhoff para cada uno de estos lazos, el aumento de voltaje en cada fase de la fuente debe igualar la caída de voltaje en cada fase correspondiente de la carga.

$$E_{NA} = V_{AN}$$

$$E_{NB} = V_{BN}$$

$$E_{NC} = V_{CN}$$

La corriente en cada fase de la carga debe igualar el voltaje de la fase dividida por la impedancia de la fase

$$I_{AN} = \frac{V_{AN}}{Z_{AN}}$$

$$I_{BN} = \frac{V_{BN}}{Z_{BN}}$$

$$I_{CN} = \frac{V_{CN}}{Z_{CN}}$$

Debido a que la fuente y la carga se conectan en serie, la corriente en cada fase de la fuente debe ser igual a la corriente en cada fase de la carga.

Razones para conectar a tierra el punto estrella

A excepción de lo permitido por el Dpto. De Inspección, el Código Eléctrico establece que todos los sistemas de corriente alterna con un neutro se conecten a tierra. El CEC también especifica que conductor del sistema se debe conectar a tierra. El Código de Chile, en la Regla 10.0.1 legisla que el punto neutro de una instalación o transformador será conectado a tierra, denominada tierra de servicio.

El conductor que se conecta a tierra en un sistema trifásico de cuatro hilos es el conductor común a todas las fases - vale decir, el neutro.

Existen varias razones para conectar a tierra el neutro de un sistema trifásico de cuatro hilos:

Ellas son:

Al conectar el neutro a tierra se reduce la magnitud de las sobretensiones transitorias (transientes) causadas por cosas como la conmutación de cargas inductivas y fallas de arco. Esto es porque la conexión a tierra permite un rápido despeje de la carga atrapada en el sistema.

La protección contra rayos y relámpagos es mejorada porque pueden usarse los pararrayos de línea a tierra (line to ground lightning arresters) a voltajes nominales menores. Esto es porque, en el caso de una falla de línea a tierra en un sistema aterrizado, el voltaje máximo de línea a tierra es el voltaje de fase. En un sistema no conectado a tierra sería el voltaje de la línea, 1,73 veces mayor.

Las fallas a tierra se pueden ubicar y eliminar fácilmente. Los dispositivos de protección funcionarán cuando ocurra la primera falla en un sistema de neutro aterrizado. En un sistema no conectado a tierra, se requieren dos fallas, cada una en diferentes líneas, antes que los dispositivos de protección respondan a las condiciones de falla.

Se pueden usar sistemas y equipos más efectivos de protección de fallas. El circuito a tierra de baja impedancia le permite a la corriente de falla elevarse a un valor lo suficientemente alto y activar la respuesta del equipo protector.

La magnitud reducida de las sobretensiones transitorias disminuye el stress en la aislación eléctrica y prolonga la vida del equipo eléctrico. Esto disminuye los costos de servicio y mejora la confiabilidad del sistema.

Cuando se produce una falla entre línea a tierra en un sistema aterrizado, el voltaje máximo a tierra es limitado al valor del voltaje de fase. En un sistema no conectado a

tierra, esta falla puede ser tan alta como el voltaje de línea. El limitar el potencial entre línea y tierra protege tanto al personal de mantención como al equipo.

Laboratorio 2.1: Demuestre la diferencia entre los valores de voltaje, corriente y potencia para fase y línea para una carga equilibrada conectada en estrella

Objetivo

En este experimento usará la medición y cálculos para comparar los valores de voltaje, corriente y potencia de fase y línea para una carga conectada en estrella.

Materiales y equipo

alimentación trifásica	3 resistores
voltímetro CA	amperímetro de tenazas CA
Vatímetro	

Tabla2

Procedimiento

1. Póngase en contacto con su instructor, quien asignará los nominales de los componentes mencionados y hacer los preparativos para que desarrolle este laboratorio. Converse con su instructor acerca de cómo será evaluado.

2. Haga las conexiones del circuito como se muestra en la Figura 65.

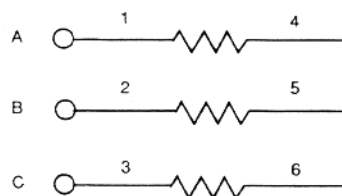


Figura 65

Circuito con carga conectada en estrella

3. Energice el circuito y tome las siguientes mediciones de voltaje:

$E_L (A-B) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$ $E_p (A-N) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$

$E_L (B-C) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$ $E_p (B-N) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$

$E_L (C-A) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$ $E_p (C-N) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$

4. Tome las siguientes mediciones de corriente colocando el amperímetro de tenazas en los puntos indicados del circuito mediante los números:

$I_L (1) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$

$I_p (4) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$

$I_L (2) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$

$I_p (5) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$

$I_L (3) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$

$I_p (6) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$

5. Calcule los siguientes valores de potencia de las lecturas del medidor, y establezca la fórmula utilizada en cada caso:

- a. potencia trifásica usando valores de línea
- b. potencia trifásica usando valores de fase
- c. potencia trifásica usando la corriente de fase y la resistencia de fase

6. Conecte un vatímetro para medir la potencia de cada resistor individual. Compare esto con los valores calculados en el paso 5.

7. Desconecte el circuito.

8. Limpie el área de trabajo y devuelva el equipo y materiales a los lugares correspondientes.

Conclusiones

¿Cuál es la relación matemática entre el voltaje de línea y el voltaje de fase en una carga equilibrada conectada en estrella?

¿Cuál es la relación matemática entre la corriente de línea y la corriente de fase en una carga equilibrada conectada en estrella?

Defina el término “sistema trifásico equilibrado”.

Enuncie los distintos factores que deben existir en un sistema trifásico para calificarlo como un sistema equilibrado.

Dibuje un diagrama de fasores para ilustrar las relaciones corriente/ voltaje entre los valores de línea y de fase en un sistema trifásico, equilibrado conectado en estrella, con factor de potencia unitario.

¿Cuál es la relación matemática entre la potencia en cada fase y el total de la potencia trifásica?

Auto Examen 2

1. Si las magnitudes de los voltajes de fase de un sistema trifásico de cuatro hilos conectado en estrella son 300 voltios RMS, ¿cuáles son las magnitudes de los voltajes de línea?

2. Si las magnitudes de las tensiones de línea de un sistema trifásico de cuatro hilos, conectado en estrella son 400 voltios RMS, ¿cuáles son las magnitudes de las tensiones de fase?
3. En un sistema equilibrado conectado en estrella, puramente resistivo, ¿cuál es la magnitud de los ángulos de fase entre los voltajes de línea y las corrientes de línea?
4. ¿Cuál es la relación matemática entre las corrientes de línea y las corrientes de fase en un sistema conectado en estrella?
5. ¿Cuál es la relación matemática entre los voltajes de línea y voltajes de fase en un sistema conectado en estrella?
6. Mencione cuatro razones para conectar a tierra el neutro de un sistema trifásico de cuatro hilos conectado en estrella.
7. Resuelva el siguiente problema de suma de fasores:

$$277 \text{ V } \angle 120^\circ + 277 \text{ V } \angle 60^\circ$$

Características de la conexión delta o triángulo trifásica
 Voltajes en un sistema conectado en delta

La Figura 66 muestra una fuente trifásica conectada en delta. La magnitud del voltaje a través de cada uno de los devanados de esta fuente es de 120 VCA. La misma teoría es aplicable a un sistema con bobinas de voltajes mayores, tales como 220 V.

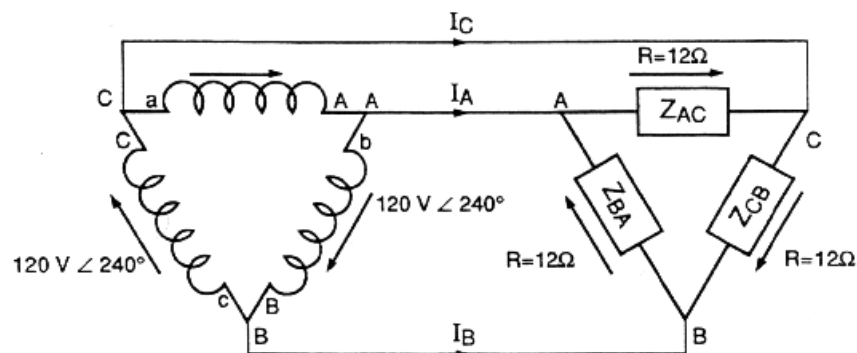


Figura 66
Sistema conectado en delta

Por lo tanto, los voltajes de las tres bobinas son:

- Devanado A: $E_{CA} = 120 \text{ V } \angle 0^\circ$
- Devanado B: $E_{AB} = 120 \text{ V } \angle 240^\circ$ o $120 \text{ V } \angle -120^\circ$
- Devanado C: $E_{BC} = 120 \text{ V } \angle 120^\circ$

Observe que cada bobina se conecta directamente a través de dos conductores de línea. Se deduce entonces que en un sistema conectado en delta, el voltaje de línea es igual al voltaje de fase.

Corrientes en un sistema conectado en delta

Debido a que la impedancia de la carga determina la corriente que fluirá en un circuito, usted debe resolver las corrientes que se producen en el lado de la carga del circuito. El sistema en la Figura 66 contiene tres cargas equilibradas puramente resistivas.

El aumento de tensión desde C a A en la fuente (E_{CA}) debe ser igual a la caída de tensión desde A a C en la carga (V_{AC}) con el fin de satisfacer la ley de voltaje de Kirchhoff.

$$E_{CA} = V_{AC}$$

Igualmente $E_{AB} = V_{BA}$
Y $E_{BC} = V_{CB}$

Ya que los valores óhmicos son iguales, las corrientes en cada una de las cargas de fase deben ser iguales:

$$I_{AC} = \frac{V_{AC}}{Z_{AC}} = \frac{120 \text{ V } \angle 0^\circ}{12 \Omega} = 10 \text{ A } \angle 0^\circ$$

$$I_{CB} = \frac{V_{CB}}{Z_{CB}} = \frac{120 \text{ V } \angle 0^\circ}{12 \Omega} = 10 \text{ A } \angle 120^\circ$$

$$I_{BA} = \frac{V_{BA}}{Z_{BA}} = \frac{120 \text{ V } \angle 240^\circ}{12 \Omega} = 10 \text{ A } \angle 240^\circ$$

Ya que todas las cargas en la Figura 66 son cargas equilibradas puramente resistivas, las corrientes en cada fase son iguales entre ellas y en fase con los voltajes de fase.

Observe que cada punto de unión consta de dos devanados de fase y un conductor de línea. La ley de corriente de Kirchhoff establece que la suma vectorial (fasorial) de las corrientes que salen de cualquier unión en un circuito CA debe ser igual a la suma vectorial de las corrientes que entran a esa unión.

Mire la unión A en el extremo de la carga del sistema. Dos corrientes entran en la unión y una sale. Por lo tanto, la ecuación de la ley de corriente de Kirchhoff es:

$$I_{AC} = I_A + I_{BA}$$

Al resolver por la corriente de línea I_A , la ecuación se convierte en:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{AC} - I_{BA} \\ &= I_{AC} + I_{AB} \\ &= 10 \text{ A } \angle 0^\circ + 10 \text{ A } \angle 60^\circ \\ &= (10 + j0) + (15 + j8,66) \\ &= \\ &= \sqrt{15^2 + 8,66^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{8,66}{15} \right) \end{aligned}$$

$$= 17,3 \text{ A } \angle 30^\circ$$

En forma similar, $I_B + I_{CB} = I_{BA}$

$$\begin{aligned} I_B &= I_{BA} - I_{CB} \\ &= I_{BA} + I_{BC} \\ &= 10 \text{ A } \angle 240^\circ + 10 \text{ A } \angle -60^\circ \\ &= (-5 + -j8,66) + (5 + -j8,66) \\ &= 0 + -j17,3 \\ &= \sqrt{0^2 + 17,3^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{-17,3}{0} \right) \\ &= 17,3 \text{ A } \angle -90^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C + I_{AC} &= I_{CB} \\ I_C &= I_{CB} - I_{AC} \end{aligned}$$

$$= I_{CB} + I_{CA}$$

$$\begin{aligned} &= 10 \text{ A } \angle 120^\circ + 10 \text{ A } \angle 180^\circ \\ &= (-5 + j8,66) + (-10 + j0) \\ &= -15 + j8,66 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{15^2 + 8,66^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{8,66}{-15} \right) \\ &= 17,3 \text{ A } \angle 150^\circ \end{aligned}$$

La Figura 67 muestra la relación entre las corrientes de línea y las corrientes de fase para un sistema conectado en delta, equilibrado, puramente resistivo.

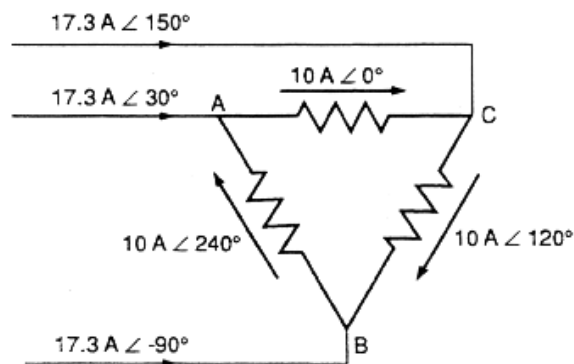


Figura 67

Corrientes para un sistema conectado en delta

En un sistema conectado en delta, la corriente aún se asume que viaja desde la fuente a la carga en las líneas A, B, y C. Ya que no existe un conductor neutro, la suma de las tres corrientes de la línea debe ser igual a cero.

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

Para ilustrar esto, use las corrientes de línea ya calculadas:

$$\begin{aligned} \text{Corriente de línea total} &= 17,3 \text{ A } \angle 30^\circ + 17,3 \text{ A } \angle -90^\circ + 17,3 \text{ A } \angle 150^\circ \\ &= (15 + j8,66) + (0 - j17,3) + (-15 + j8,66) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Las corrientes generadas en los devanados de fase de una fuente delta son siempre iguales a las corrientes que fluyen en las fases correspondientes de la carga delta. La solución de estos problemas significa el uso de vectores algebraicos combinados con ecuaciones simultáneas. Por esta razón no será analizada.

La magnitud de las corrientes de línea en un sistema equilibrado conectado en delta es siempre $\sqrt{3}$ o 1,73 veces la magnitud de las corrientes de fase. Se llega a este número de la misma forma que se usa la $\sqrt{3}$ para los voltajes de línea en un sistema equilibrado conectado en estrella.

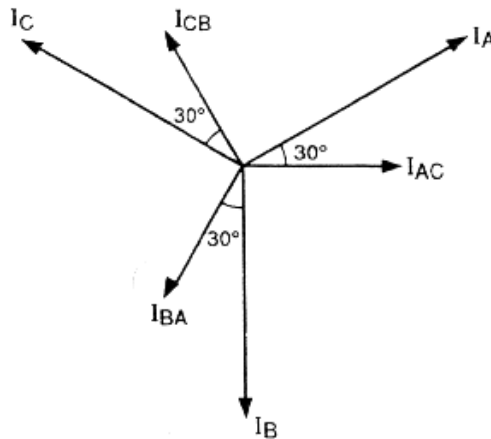


Figura 68
Corrientes de línea y de fase

Recuerde que para las corrientes en el punto A en la Figura 67 $I_A = I_{AC} + I_{AB}$. La Figura 68 muestra más acerca de la relación entre I_{AC} , I_{AB} e I_A .

Si el ángulo entre las dos corrientes de la fase se bisecta, se crean dos triángulos rectángulos de 30° de igual tamaño. Observe que el vector I_A es igual a la suma de los dos lados adyacentes a los ángulos de 30° . Por lo tanto:

$$\begin{aligned} I_A &= 2 \times \cos 30 \times I_{\text{fase}} \\ &= 2 \times \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{fase}} \\ &= \sqrt{3} \times I_{\text{fase}} \end{aligned}$$

$$\text{O } I_{\text{línea}} = \sqrt{3} \times I_{\text{fase}}$$

Sistema trifásico conectado en delta de cuatro hilos

La mayoría de las veces los sistemas trifásicos de tres hilos conectados en delta son sistemas no conectados a tierra. Idealmente, no existe una diferencia de potencial entre cualquiera de los conductores de fase del secundario y la tierra en un sistema no aterrizado. Por lo tanto, si una fase se conecta accidentalmente a tierra, ninguno de los dispositivos de sobrecorriente es activado, y si cualquier otra fase desarrolla una falla a tierra, se producirá un corto circuito.

El Código Eléctrico establece que, para indicar la presencia de una falla a tierra, se instale un dispositivo de detección de falla a tierra en un sistema de alambrado alimentado por una fuente no aterrizada.

La Figura 69 muestra un sistema trifásico de cuatro hilos conectado en delta que proporciona una alimentación monofásica para alumbrado de 120/240 V, aterrizado.

Este sistema se usa en el sistema de alumbrado de las palas y perforadoras mineras. La Figura 70 corresponde a la representación de fasores de la fuente delta de cuatro hilos de la Figura 69.

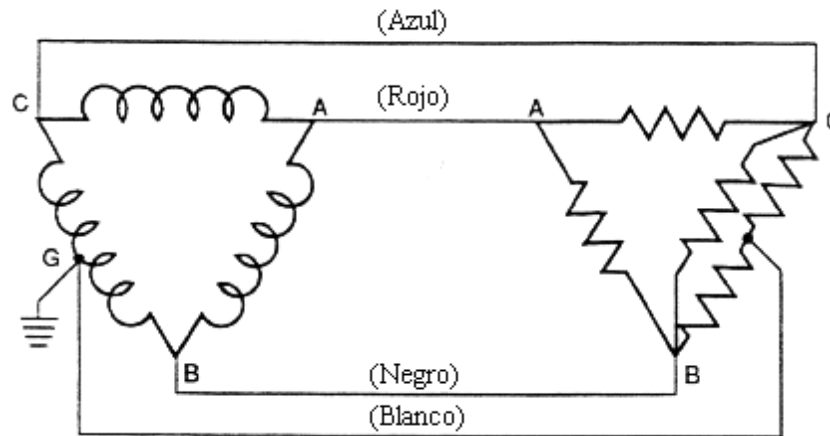


Figura 69

Sistema trifásico de 4 hilos conectado en delta.

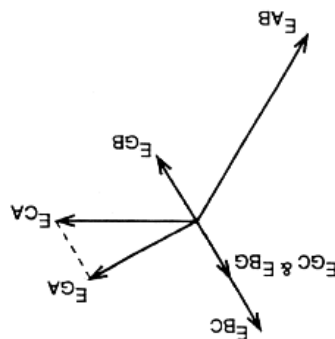


Figura 70

Representación de fasores de una fuente delta de cuatro hilos

La Sección 4 del CEC establece que los cuatro conductores se marquen de color:

- Fase A = Rojo
- Fase B = Negro
- Fase C = Azul
- Neutro = Blanco o gris natural

El Código también establece que el conductor de la fase A tendrá el voltaje de mayor magnitud entre línea a tierra. Observe que el sistema delta de cuatro hilos se conecta a tierra en la mitad de uno de los devanados de fase. Esto significa que los voltajes en las tres líneas con respecto a tierra no son iguales.

Como sabemos que el voltaje de cada fase es 240 V, y que un devanado tiene una derivación en su centro, usted puede calcular los voltajes entre las líneas y tierra.

La derivación en el centro (center tap) crea efectivamente cuatro tensiones en el devanado:

$$\begin{aligned} E_{GC} &= 120 \text{ V } \angle 120^\circ \\ E_{BG} &= 120 \text{ V } \angle 120^\circ \\ E_{AB} &= 240 \text{ V } \angle -120^\circ \\ E_{CA} &= 240 \text{ V } \angle 0^\circ \end{aligned}$$

Al saber estas cuatro tensiones, usted puede calcular las tres tensiones que existen entre los conductores de la línea y tierra:

$$\begin{aligned} E_{GC} &= 120 \text{ V } \angle 120^\circ \\ E_{GB} &= E_{BG} = 120 \text{ V } \angle -60^\circ \\ E_{GA} &= E_{GC} + E_{CA} \\ &= 120 \text{ V } \angle 120^\circ + 240 \text{ V } \angle 0^\circ \\ &= (-60 + j103,9) + (240 + j0) \\ &= 180 + j103,9 \\ &= \sqrt{180^2 + 1103,9^2} \text{ V } \tan^{-1}\left(\frac{103,9}{180}\right) \\ &= 207,8 \text{ V } \angle 30^\circ \end{aligned}$$

Ya que el voltaje en la línea A con respecto a tierra es mayor que las otras dos líneas, la línea A se denomina circuito derivado alto. (High leg)

El CEC establece que el conductor a tierra sea ubicado en un cubículo proporcionado solo para conexiones monofásicas, y que el conductor de fase con el voltaje mayor a tierra (fase A) se separe en forma adecuada del cubículo referido. Esto también significa que el conductor a tierra no debe estar ubicado en un panel junto con los tres conductores de línea. La razón es que alguien puede equivocarse pensando que es una alimentación conectada en estrella de cuatro hilos.

Laboratorio de Ejercicio: Demuestre la diferencia entre los valores de voltaje, corriente y potencia entre fase y línea, para una carga equilibrada conectada en delta
Objetivo

En este experimento usará mediciones y cálculos para comparar los valores de voltaje, corriente y potencia entre fase y línea, para una carga equilibrada conectada en delta

Materiales y equipo

alimentación trifásica	resistores
voltímetro CA	amperímetro de tenazas CA

vatímetro	
-----------	--

Tabla3

Procedimiento

1. Póngase en contacto con su instructor, quien le asignará los valores nominales de los componentes anteriores y efectuar los preparativos para desarrollar este laboratorio. Discuta con su instructor acerca de cómo será evaluado.
2. Conecte el circuito como se muestra en la Figura 71.

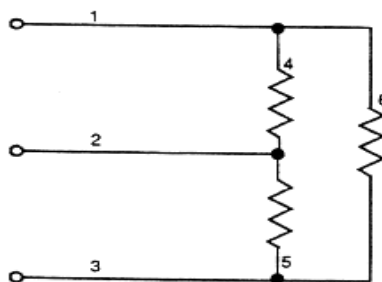


Figura 71

Circuito con carga conectada en delta

3. Energice el circuito y tome las siguientes mediciones de tensión:

$$\begin{aligned}
 E_L (A - B) &= \text{_____} V & E_p (\text{A través de la carga A}) &= \text{_____} V \\
 E_L (B - C) &= \text{_____} V & E_p (\text{A través de la carga B}) &= \text{_____} V \\
 E_L (C - A) &= \text{_____} V & E_p (\text{A través de la carga C}) &= \text{_____} V
 \end{aligned}$$

4. Tome las siguientes mediciones de corriente colocando el amperímetro de tenazas en los puntos indicados en el circuito mediante los números.

$$\begin{aligned}
 I_L (1) &= \text{_____} A & I_p (4) &= \text{_____} A \\
 I_L (2) &= \text{_____} A & I_p (5) &= \text{_____} A \\
 I_L (3) &= \text{_____} A & I_p (6) &= \text{_____} A
 \end{aligned}$$

5. Calcule los valores de potencia de las lecturas del medidor, y establezca la fórmula apropiada para cada una:

- a. potencia trifásica usando los valores de línea
- b. potencia trifásica usando los valores de fase
- c. potencia trifásica usando corriente de fase y la resistencia de fase

6. Conecte un vatímetro para medir la potencia de cada resistor individual. Compare esto con los valores calculados desde el paso 5.

7. Desconecte el circuito

8. Limpie el área de trabajo y devuelva el equipo y materiales al lugar que corresponde.

Conclusiones

¿Cuál es la relación matemática entre el voltaje de línea y el voltaje de fase en una carga equilibrada conectada en delta?

¿Cuál es la relación matemática entre la corriente de línea y la corriente de fase en una carga equilibrada, conectada en delta?

Explique la relación de potencia entre los tres resistores idénticos que se conectan en delta versus los que se conectan en estrella a la misma alimentación trifásica.

Dibuje un diagrama vectorial para ilustrar las relaciones tensión / corriente entre los valores de la línea y de la fase en un sistema equilibrado, trifásico, conectado en delta con el factor de potencia unitario.

¿Cuál es la relación matemática entre la potencia en cada fase comparada con el total de potencia trifásica?

Ahora responda el Auto Examen 3 y revise sus respuestas.

Auto Examen 3

1. Si las magnitudes de los voltajes de fase en un sistema trifásico, conectado en delta de tres hilos son de 240 V, ¿cuáles son las magnitudes de los voltajes de línea?

2. Si las magnitudes de las corrientes de fase en un sistema trifásico, equilibrado, conectado en delta, de tres hilos son 200 amperes, ¿cuáles son las magnitudes de las corrientes de línea?

3. En un sistema equilibrado, conectado en delta, puramente resistivo, ¿cuál es la magnitud de los ángulos de fase entre los voltajes de línea y las corrientes de línea?

4. ¿Cuál es la relación matemática entre las corrientes de línea y las corrientes de fase en un sistema conectado en delta?

5. ¿Cuál es la relación matemática entre los voltajes de línea y los voltajes de fase en un sistema conectado en delta?

6. ¿Normalmente, se conectan o no se conectan a tierra los sistemas delta de tres hilos?

7. En un sistema trifásico, conectado en delta de cuatro hilos, ¿a cuál conductor de fase le corresponde el voltaje mayor entre línea y tierra?

8. ¿Es aceptable instalar el conductor a tierra y la derivación alta de un sistema trifásico delta de cuatro hilos en el mismo panel?

2.3 Cálculo de la potencia en los sistemas trifásicos

Factores de potencia en un sistema trifásico equilibrado

En los circuitos monofásicos CA, el factor de potencia del circuito corresponde a la razón entre la potencia real y la potencia aparente (W/VA). Lo mismo se aplica en los circuitos trifásicos. La razón entre la potencia real y la potencia aparente es igual al coseno del ángulo de fase entre el voltaje de fase y la corriente de fase en cada una de las fases. Normalmente, este ángulo se denota mediante la letra griega θ .

$$FP = \cos \theta$$

Potencia en un sistema equilibrado trifásico

En un sistema trifásico, la potencia total es igual a la suma de la potencia disipada en cada una de las tres cargas.

En un sistema equilibrado trifásico, la potencia en cada fase es la misma. Por lo tanto, la potencia total se puede obtener calculando la potencia en una fase y multiplicándola por tres.

La potencia por fase en un sistema trifásico es:

$$P_p = E_p \times I_p \times FP$$

Por lo tanto, la potencia total en cualquier sistema equilibrado es:

$$P_T = 3 \times E_p \times I_p \times FP$$

Observe que esta ecuación se puede usar solamente para los sistemas equilibrados trifásicos donde la carga en cada fase es de igual magnitud y tiene el mismo factor de potencia. Esta fórmula se puede expresar en términos de voltaje y corriente de línea en vez de voltaje de fase y corriente de fase.

El sistema conectado en estrella

En un sistema conectado en estrella, la corriente de línea es igual a la corriente de fase, y el voltaje de línea es igual a $\sqrt{3}$ por el voltaje de fase, por lo tanto;

$$I_p = I_L \quad \text{y} \quad E_p = \frac{E_L}{\sqrt{3}}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación de potencia total nos da la siguiente ecuación:

$$P_T = 3 \times \frac{E_L}{\sqrt{3}} \times I_L \times FP$$

$$= \sqrt{3} \times E_L \times I_L \times \text{FP} =$$

El sistema conectado en delta

En un sistema conectado en delta, el voltaje de línea es igual al voltaje de fase, y la corriente de línea es igual a $\sqrt{3}$ por la corriente de fase.

Por lo tanto,

$$\underline{E_p = E_L \quad y \quad I_p = \frac{I_L}{\sqrt{3}}}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación de potencia total nos da la siguiente ecuación:

$$P_T = 3 \times E_L \times \frac{I_L}{\sqrt{3}} \times \text{FP}$$

$$= \sqrt{3} \times E_L \times I_L \times \text{FP}$$

Observe que la ecuación para calcular la potencia total en un sistema equilibrado trifásico es la misma tanto para los sistemas estrella como delta.

Problemas resueltos

Ejemplo 1 Qué potencia disipa un sistema equilibrado, conectado en estrella puramente resistivo si la corriente de línea es de 20 A., y el voltaje de línea es de 208 V?

$$\begin{aligned} P_T &= \sqrt{3} \times E_L \times I_L \times \cos 0 \\ &= \sqrt{3} \times 208 \text{ V} \times 20 \text{ A} \times \cos 0 \\ &= 7200 \text{ W} \end{aligned}$$

Ejemplo 2 Una corriente de 30 A fluye a través de los conductores de línea de un sistema equilibrado conectado en delta, de 240 V. El ángulo entre el voltaje de fase y la corriente de fase es de 40°. ¿Cuál es la potencia real y la potencia aparente en este sistema?

$$\begin{aligned} \text{VA}_T &= \sqrt{3} \times E_L \times I_L \\ &= \sqrt{3} \times 240 \text{ V} \times 30 \text{ A} \\ &= 12471 \text{ VA} \\ P_T &= \text{VA} \times \cos \theta \\ &= 12471 \times \cos 40 (0,766) \\ &= 9553 \text{ W} \end{aligned}$$

Ejemplo 3 Un sistema conectado en estrella, equilibrado, puramente resistivo tiene una tensión de fase de 277 V y una corriente de línea de 15 A. ¿Cuál es la potencia en este sistema?

$$P_T = 3 \times E_p \times I_p \times \cos \theta$$
$$I_F = I_L$$

$$P_T = 3 \times 277 \text{ V} \times 15 \text{ A} \times \cos \theta$$
$$= 12465 \text{ W}$$

Medición de la potencia trifásica usando vatímetros

Aunque la potencia trifásica industrial o comercial se puede medir usando los vatímetros trifásicos, lo más probable es que esté usando vatímetros monofásicos para medir el consumo de potencia en los circuitos trifásicos.

Método de tres vatímetros

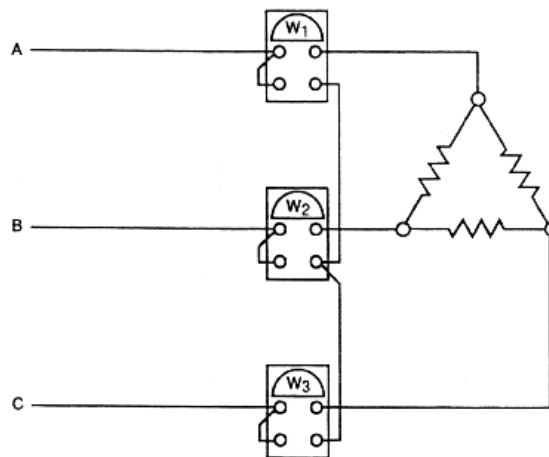


Figura 72

Método de tres vatímetros para la medición de potencia trifásica

Cuando deba examinar la potencia tomada por cada una de las tres fases, use tres vatímetros monofásicos. Conecte las bobinas de corriente de los vatímetros en serie con los *tres* conductores de línea. Conecte las bobinas de voltaje de cada voltamperímetro desde sus respectivas líneas al conductor neutro. Cuando no hay neutro, conecte los extremos comunes (unidos eléctricamente) de las bobinas de voltaje para formar una conexión en estrella como se muestra en la Figura 72.

Para una precisa medición de la potencia, las bobinas de voltaje de cada voltamperímetro deben tener la misma impedancia. Asimismo, cada voltamperímetro

se debe conectar con la polaridad adecuada. La potencia total trifásica es la suma de las tres lecturas individuales de los vatímetros.

$$P_T = W_1 + W_2 + W_3$$

Aunque este método de medición de potencia se usa comúnmente para los sistemas conectados en estrella trifásicos de cuatro hilos, también se puede utilizar para los sistemas conectados en delta, trifásicos, de tres hilos como se muestra.

Método de dos vatímetros

Otro método común de medición de la potencia trifásica utiliza solamente dos vatímetros, y se puede aplicar a las cargas conectadas en estrella o en delta. En este caso, conecte las bobinas de corriente de los vatímetros en serie con dos de los conductores de línea. Conecte cada bobina de voltaje del voltamperímetro entre la Respectiva línea conectada a la bobina de corriente y el conductor de línea sobrante como se muestra en la Figura 73.

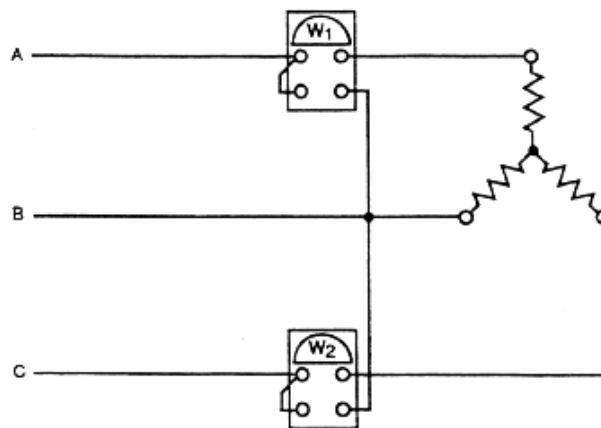


Figura 73

Método de dos vatímetros para la medición de potencia

La potencia total trifásica es la suma de las dos lecturas individuales del vatímetro:

$$P_T = W_1 + W_2$$

Para una carga equilibrada trifásica, el factor de potencia de la carga afecta las lecturas del voltamperímetro de la siguiente manera:

VALOR FP EFECTO EN LAS LECTURAS DEL VATÍMETRO

100% Cada lectura del vatímetro es la mitad del total de la potencia trifásica

$$W_1 = W_2$$

50% a 100% Un vatímetro tiene una lectura más alta que el otro
 $W_1 > W_2$

50% Un vatímetro lee cero, y el otro lee la potencia total.
 $W_1 = 0$ y $W_2 = P_T$

Bajo 50% Un vatímetro tiende a leer hacia abajo de la escala. Para obtener una lectura en la parte superior de la escala, invierta las conexiones en la bobina de voltaje de este vatímetro.

Reste la lectura de este vatímetro con polaridad invertida desde la lectura del otro vatímetro.

$$P_T = W_2 - W_1$$

El método de dos vatímetros para la medición de potencia también le permite a Ud. determinar el factor de potencia de una carga equilibrada, trifásica usando la siguiente fórmula:

$$\tan \theta = 1,732 \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} \right)$$

$$\theta = \tan^{-1} 1,732 \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} \right) \text{ donde } \cos \theta = \text{FP de la carga}$$

Método de un solo vatímetro

Para las cargas trifásicas equilibradas en la cual se pueden hacer conexiones en cada fase, usted puede usar un solo vatímetro. Determine la potencia total multiplicando la lectura del vatímetro por tres. Tome en cuenta que este método de medición de potencia trifásica es de una utilidad limitada.

Ejercicio de laboratorio 4.1: Conecte los vatímetros para la medición de la potencia trifásica

Objetivo

En este experimento usará el método de dos vatímetros para medir la potencia de una carga trifásica CA.

Materiales y equipo

alimentación CA trifásica	tres cargas resistivas
voltímetro CA	amperímetro de tenaza CA
dos vatímetros monofásicos	

Tabla4

Procedimiento

1. Póngase en contacto con su instructor, quien le asignará los valores nominales de los componentes especificados y ordenarlos para efectuar este laboratorio. Discutir acerca de cómo será evaluado.
2. Conecte el circuito como se muestra en la Figura 74.

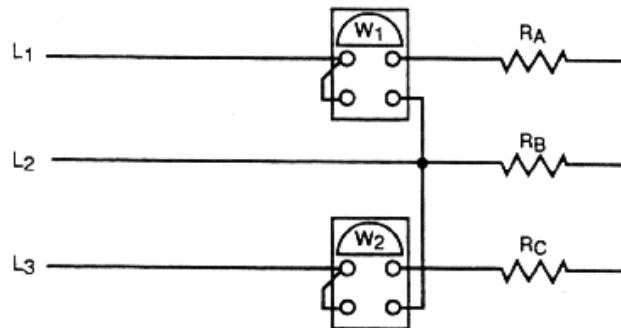


Figura 74

Medición de potencia para una carga conectada en estrella

3. Energice el circuito y tome las siguientes mediciones:

Voltajes de línea	Voltajes de fase	de Corrientes de fase	Lecturas del vatímetro
V_{1-2}	$V_A =$	$I_A =$	$W_1 =$
V_{1-2}	$V_B =$	$I_B =$	$W_2 =$
V_{1-3}	$V_C =$	$I_C =$	

Tabla5

4. Calcule los siguientes valores de potencia desde las lecturas del medidor y enuncie la fórmula usada en cada caso.
 - a. Potencia por fase usando los valores de fase.
 - b. Total de potencia trifásica usando los valores de fase.
 - c. Total de la potencia trifásica usando los valores de línea
 - d. Total de la potencia trifásica usando lecturas de dos vatímetros.
5. Desconecte el circuito.
6. Vuelva a conectar el circuito como se muestra en la Figura 75.

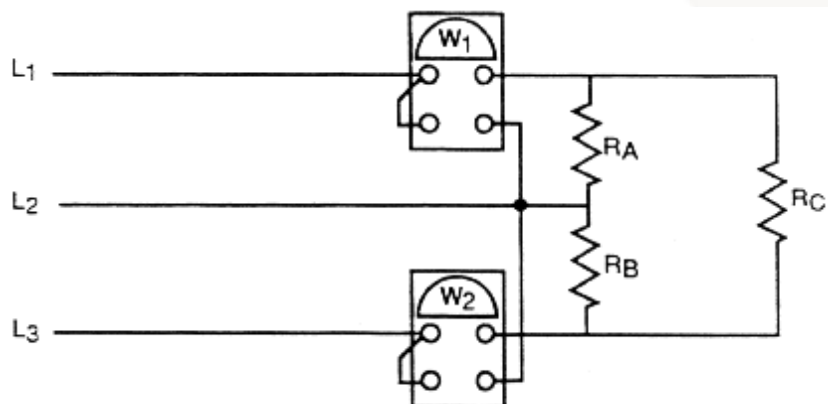


Figura 75

Medición de potencia para una carga conectada en delta

7. Energice el circuito y tome las siguientes mediciones:

Voltajes de línea	Voltajes de fase	de Corrientes de fase	Lecturas del vatímetro
V_{1-2}	$V_A =$	$I_A =$	$W_1 =$
V_{1-2}	$V_B =$	$I_B =$	$W_2 =$
V_{1-3}	$V_C =$	$I_C =$	

Tabla6

8. Calcule los siguientes valores de potencia desde las lecturas del medidor y enuncie la fórmula usada en cada caso.

- Potencia por fase usando los valores de fase.
- Total de potencia trifásica usando los valores de fase.
- Total de la potencia trifásica usando los valores de línea
- Total de la potencia trifásica usando lecturas de dos vatímetros

9. Desconecte el circuito

10. Limpie el área de trabajo y devuelva el equipo y materiales a los lugares correspondientes.

Conclusión

¿Cuál es la relación matemática entre la potencia total de los tres resistores conectados en estrella a una alimentación trifásica, y la potencia total de los mismos tres resistores conectados en delta a la misma alimentación trifásica?

¿Cuál es la relación matemática entre las dos lecturas del vatímetro y la potencia total trifásica en una carga resistiva con un FP del 100%?

Explicar brevemente como se puede determinar el FP de una carga a partir del método de medición de potencia de dos vatímetros.

Auto Examen 4

1. ¿Cuál es la ecuación matemática para calcular la potencia real en un sistema equilibrado, trifásico conectado en estrella?
2. ¿Cuál es la ecuación matemática para calcular la potencia real en un sistema equilibrado, trifásico conectado en delta?
3. ¿Cuál es la relación matemática entre la corriente de línea y la corriente de fase en un sistema equilibrado conectado en delta?
4. ¿Cuál es la relación matemática entre el voltaje de línea y el voltaje de fase en un sistema equilibrado conectado en estrella?
5. Calcule el total de potencia disipada en un sistema equilibrado, conectado en estrella, puramente resistivo cuando el voltaje de línea es de 480 V y la corriente de línea es de 20 A.
6. Calcule la potencia real y aparente de un sistema equilibrado, conectado en delta cuando el voltaje de línea es de 480 voltios y la corriente de línea es de 40 amperes. La corriente de fase en este sistema se retrasa al voltaje de fase en 30° .
7. ¿Cuánta corriente de línea está fluyendo en un sistema equilibrado, conectado en delta, puramente resistivo, si el voltaje de línea es de 480 V y la potencia real en el sistema es de 49883 W?
8. ¿Cuál es el voltaje de fase de un sistema equilibrado, conectado en estrella, puramente resistivo si la corriente de línea es de 25 A y la potencia total es de 20785 W?

Hoja de Respuestas

Auto Examen 1

1. Los sistemas polifásicos son los sistemas que tiene dos o más fases máquinas más pequeñas para la misma capacidad kVA menor cantidad de cobre para alimentar la misma energía potencia constante en vez de la potencia pulsativa de los sistemas monofásicos. Un diseño más simple de motor

3. 120°

4. Y (estrella) o delta
5. La secuencia de fase es el orden en el cual las tensiones trifásicas alcanzan su valor máximo positivo.
6. Intercambio cualquiera de los terminales de la línea
7. Fase A = azul
Fase B = negro
Fase C = rojo
Neutro = blanco o gris natural
8. efectivo
9. en el sentido de giro contrario al de los punteros del reloj
10. sí (dos ondas sinusoidales que tengan la misma frecuencia se suman para formar una tercera onda sinusoidal con la misma frecuencia)
11. abiertas
12. positiva
13. negativa
14. entra
15. 180°

Auto Examen 2

1. 520 voltios
2. 231 voltios
3. 30°
4. $I_{\text{línea}} = I_{\text{fase}}$
5. $E_{\text{línea}} = \sqrt{3} \times E_{\text{fase}}$
6. Cuatro de las siguientes alternativas reducción en la magnitud de las sobretensiones transitorias protección mejorada contra rayos y relámpagos ubicación y corrección más fácil de las fallas a tierra protección más efectivo de fallas en sistemas y equipos vida prolongada de la aislación eléctrica mejoramiento de la seguridad del personal y del equipo.
7. $480 \text{ V} \angle 90^\circ$

Auto Examen 3

1. 240 voltios
2. 346 amperios
3. 30°
4. $I_{\text{línea}} = \sqrt{3} \times I_{\text{fase}}$
5. $E_{\text{línea}} = E_{\text{fase}}$
6. no conectado a tierra, no aterrizado
7. fase A
8. no (el Código Eléctrico establece que la fase con mayor voltaje este separada del conductor a tierra)

Auto Examen 4

1. $\sqrt{3} \times E_L \times I_L \times \text{FP}$
2. $\sqrt{3} \times E_L \times I_L \times \text{FP}$
3. $I_L = \sqrt{3} \times I_p$
4. $E_L = \sqrt{3} \times E_p$

- 5. 16 628 W
- 6. $P_T = 28\,800\text{ W}$
 $V_{AT} = 33\,255\text{ VA}$
- 7. 60 A
- 8. 277

3. Motores de corriente continua

3.1 Desarrollo del Torque en el Motor CC

Antecedentes generales

Los motores son dispositivos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica. La energía mecánica está disponible en la forma de una fuerza giratoria o torque en el eje del motor. Los motores CC se usan comúnmente en aplicaciones de tracción de un alto torque tales como locomotoras y camiones de transporte minero.

Previo al desarrollo relativamente reciente de los variadores de frecuencia para los motores CA, el control preciso de la velocidad se obtenía usando motores CC.

Una buena comprensión de los conceptos a presentarse es importante para el estudio de los motores CC.

CLASIFICACIÓN DE MAQUINAS ELECTRICAS

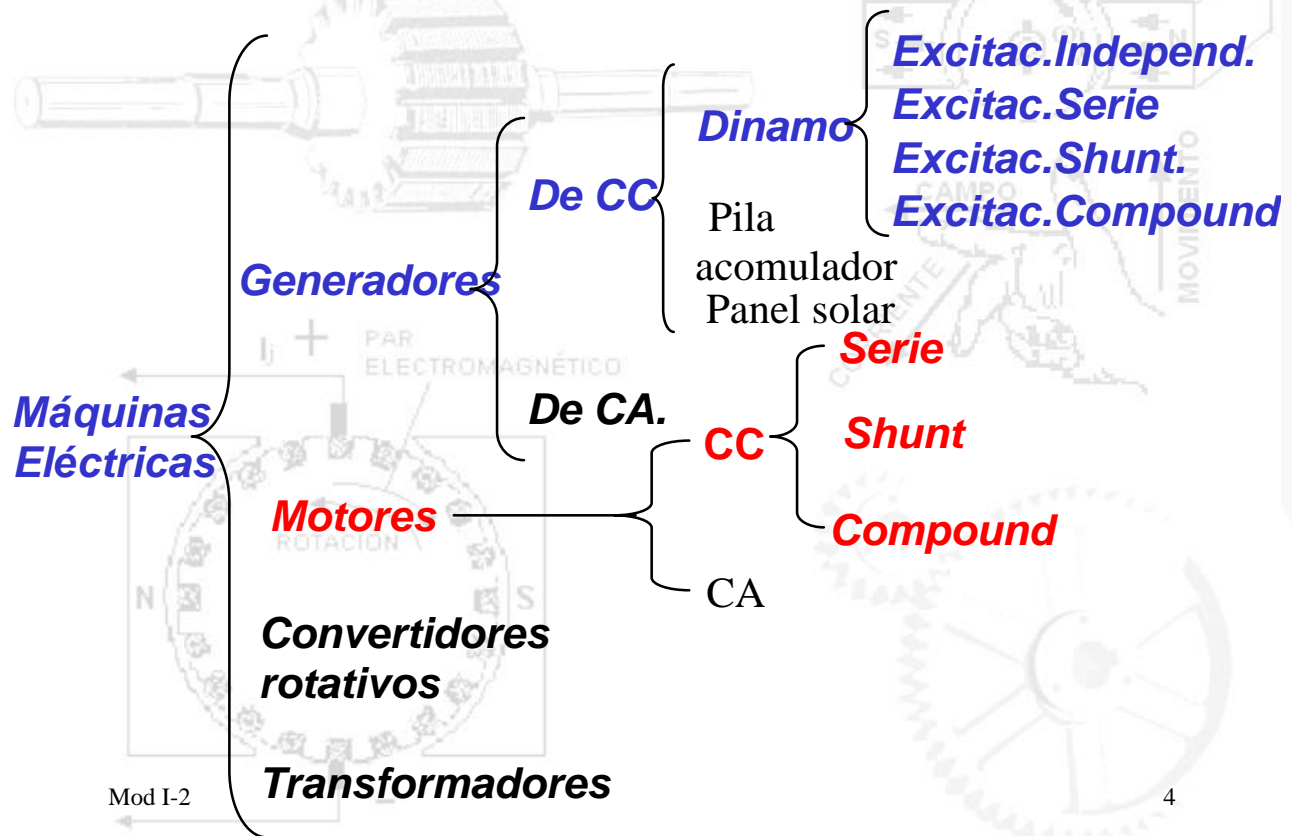


Figura 76

Torque en el Motor de CC.

El torque se define como una fuerza de torsión o de giro capaz de producir la rotación alrededor de un eje.

En un motor, el torque proviene de las fuerzas que actúan sobre los conductores transportadores de corriente de la armadura.

La fuerza en cada conductor de la armadura proviene de la interacción entre el campo magnético principal y el campo que se produce mediante la corriente que fluye en la armadura.

Cada vez que un conductor transporta corriente en presencia de un campo magnético, una fuerza actuará sobre el conductor en ángulos rectos al campo. Este principio de magnetismo se llama el *efecto motor*.

Para la dirección de corriente que se muestra, el flujo **sobre** el conductor se opone o anula el campo principal. Por **debajo** del conductor, los campos están en la misma dirección y **refuerzan** el campo principal

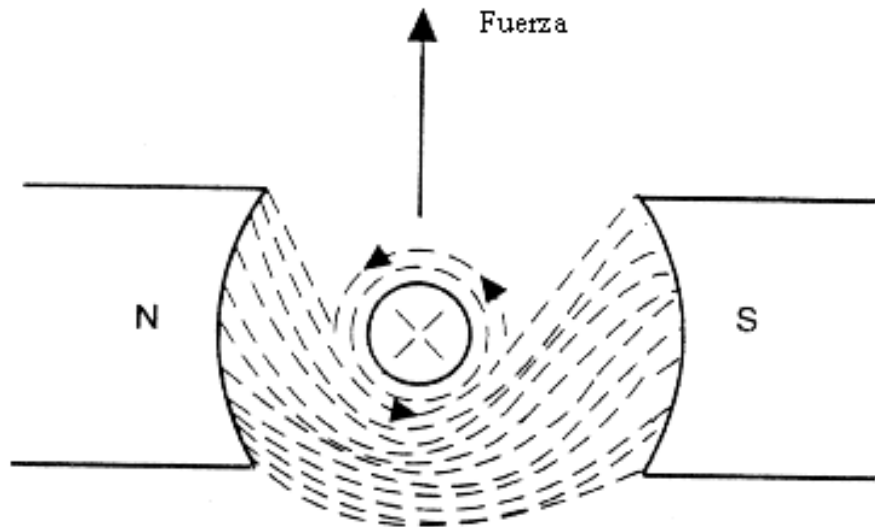


Figura 77

Regla de la mano derecha del motor

La regla del motor, que es similar a la regla de la mano izquierda de Fleming, proporciona una forma simple para determinar la dirección de la fuerza que actúa sobre un



Figura 78

Plano neutro

La fuerza que actúa sobre el conductor al cruzar el plano neutro es cero. Aplicando la regla de la mano derecha del motor a los conductores de la armadura, las fuerzas se observan actuando en direcciones opuestas en cada lado del plano neutro.

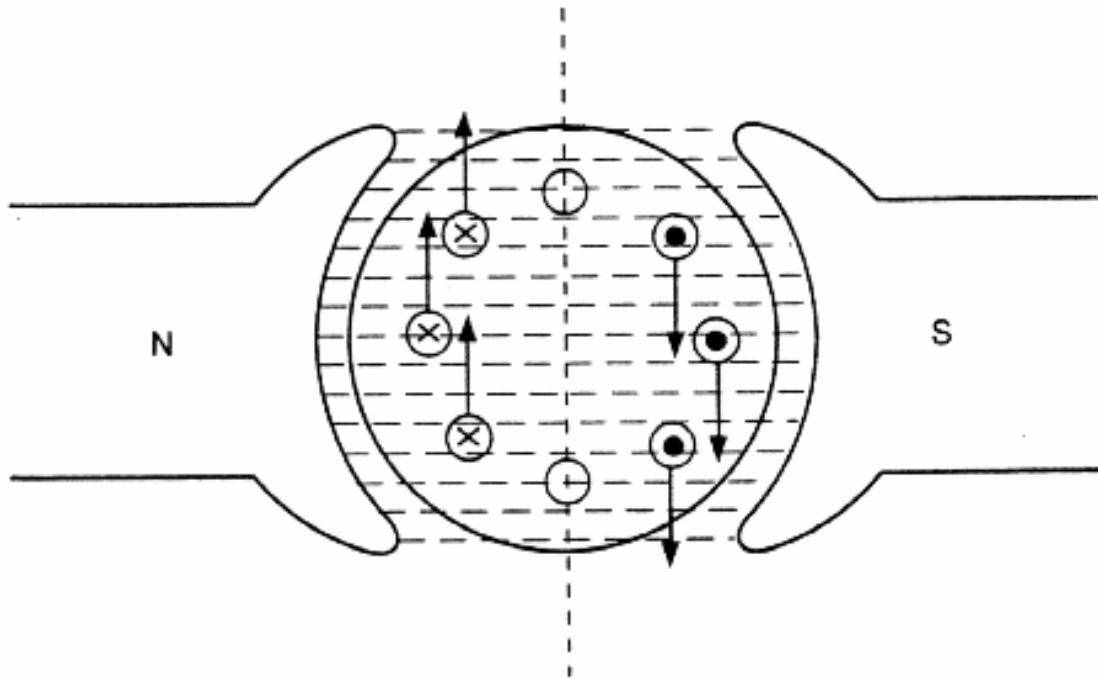


Figura 79

Acción del conmutador

La diferencia principal entre los motores CC y los generadores se encuentra en el funcionamiento de la armadura. En un generador, la armadura o inducido es una fuente de fem que entrega corriente a una carga. La armadura de un motor es una carga que consume corriente desde una fuente externa, como una línea

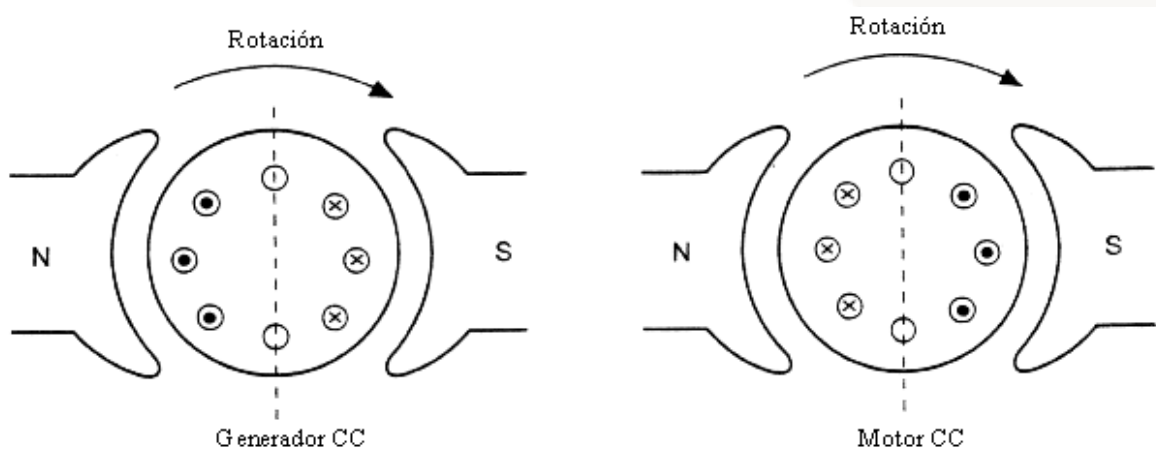


Figura 80

Inversión de marcha

De acuerdo con la regla de la mano derecha del motor, la dirección de la fuerza que actúa sobre un conductor es una función de la dirección del flujo magnético y la dirección de la corriente en la armadura. La dirección de la rotación se puede cambiar mediante una de las siguientes formas:

Variando la dirección de la corriente de la armadura invirtiendo la conexión de los terminales A_1 y A_2 .

Variando la polaridad magnética de los polos del campo invirtiendo la conexión tanto del campo en serie (S_1 y S_2) y del campo en derivación (shunt Field) (F_1 F_2)

Fórmula del torque

La siguiente fórmula muestra que el torque en un motor es directamente proporcional al producto del flujo y la corriente de la armadura:

$$T = k \cdot \Phi \cdot I$$

T = torque en newton - metros

Φ = flujo (excitación) en webers

I = corriente de la armadura en amperios

k = constante de proporcionalidad que incluye factores tales como:

- El número de polos
- El número de trayectos
- El número total de conductores en la armadura

3.2 Fuerza contra electromotriz en el motor CC

El movimiento de los conductores de la armadura, al cortar el campo en un motor CC, tiene como resultado una fem inducida, la que se opone a la fem aplicada que produce la corriente de armadura.

El hecho que la fem inducida se oponga a la fem aplicada origina los términos “fuerza contraelectromotriz” o “contra- fem”. La existencia de la fuerza contraelectromotriz sugiere que no toda la fem aplicada producirá corriente como se determinó mediante la Ley de Ohm.

Por ejemplo, considere un motor CC de 10 HP, 240 voltios con una resistencia de la armadura de 2 ohm. La Ley de Ohm indicará una corriente de la armadura de 120 amperes.

En realidad, el valor de corriente nominal a plena carga para este motor es de 38 amperes.

Usted puede determinar el valor de la fuerza contraelectromotriz a partir de la fórmula de “tensión generada (E_g)”:

$$E_g = k\Phi N$$

El término voltaje efectivo es usado por el producto de la corriente de armadura y la resistencia de armadura (I_R), y representa la diferencia entre el voltaje aplicado y la fuerza contraelectromotriz. Esta relación se puede resumir con la siguiente fórmula:

$$I_A R_A = E_a - E_g$$

Limitando la corriente de arranque

La fórmula para voltaje efectivo se puede usar para examinar las condiciones de arranque de un motor CC. Reordenando la fórmula, la corriente de la armadura I_A es:

$$I_A = \frac{E_a - E_g}{R_A}$$

Detenido, la velocidad (N) del motor es cero, por lo tanto, la fuerza contraelectromotriz ($E_g = k\Phi N$) es igual a cero. En ausencia de una fuerza contraelectromotriz (cfem), el valor total de voltaje aplicado resulta en una corriente extremadamente alta, ya que esta es limitada solamente por la resistencia de la armadura.

Condiciones de rotor trabado (Locked rotor)

Aunque problemas eléctricos tales como conexiones incorrectas o un circuito abierto podrían evitar que arrancara un motor, un rotor trabado en un motor CC generalmente indica problemas mecánicos. El motor falla en el arranque porque es incapaz de proporcionar el torque suficiente para acelerar la carga.

Las causas mecánicas incluyen una carga excesiva, un serio desgaste o rodamientos atascados o agripados.

Un voltaje de arranque inadecuado para las condiciones de carga también evitará que el motor desarrolle un torque suficiente.

La condición de rotor trabado hará que continúe una alta corriente de arranque. El recalentamiento producido daña el motor, con envejecimiento prematuro, largo plazo o características destructivas para un corto plazo

Efecto de la Carga Mecánica en un Motor CC

Consideremos un motor CC que opera a velocidad nominal y con carga inferior a su rango de plena carga. Cuando aumentamos la carga mecánica en el eje del motor, se producen las siguientes condiciones:

Un aumento en la carga mecánica hace que la velocidad del motor disminuya.

La disminución de su velocidad produce una disminución de la fuerza contraelectromotriz ($E_g = k\Phi N$).

La disminución de la fuerza contraelectromotriz produce un aumento del voltaje efectivo ($I_A R_A = E_a - E_g$).

El aumento del voltaje efectivo produce un aumento de la corriente de armadura.

El aumento de la corriente de armadura produce un aumento en el torque, para equilibrar la carga mecánica aumentada sobre el eje ($T = k\Phi I$).

Principios Básicos del Control de Velocidad

Torque y caballos de fuerza

El torque (T) desarrollado por un motor se puede considerar como una fuerza equivalente (F) que actúa a través de la distancia radial (R) de la armadura. El trabajo realizado en una revolución será la fuerza equivalente que actúa a través de la circunferencia ($2\pi R$) de la armadura.

$$\text{Trabajo} = F \times 2\pi R = 2\pi T$$

$$\text{Potencia} = \frac{2\pi T N}{60}$$

Cuando se selecciona un motor CC para una aplicación específica, es importante considerar como la velocidad del motor es afectada por los cambios en la carga mecánica. Esta variación en la velocidad con carga se llama regulación de la velocidad. El cambio en la velocidad se expresa como un porcentaje de la velocidad nominal o velocidad de plena carga.

$$\% \text{ regulación} = \frac{N_{NL} - N_{FL}}{N_{FL}} \times 100 \%$$

3.3 Principios Básicos para el Control de Velocidad

Los motores CC son muy adecuados para aplicaciones que requieren de un control de velocidad suave bajo una amplia variación de las condiciones de carga.

Las características específicas de los motores en serie, en derivación y compuestos se discutirán posteriormente en esta habilidad.

Velocidad base o nominal

Los motores CC tienen una velocidad normal o base en la cual operarán sin contar con dispositivos de control de su velocidad. La velocidad base variará con las condiciones de carga mecánica.

La potencia es proporcional al producto del torque y la velocidad. El operar un motor CC a una velocidad distinta que la de su velocidad base, afectará su capacidad para proporcionar los caballos de fuerza nominales a los niveles de torque requeridos para impulsar la carga mecánica.

Sobre la velocidad base

La corriente que consume un motor CC es una función de la fuerza contraelectromotriz desarrollada por la armadura. Si se coloca un reóstato en el circuito de campo en derivación, la corriente de campo disminuirá.

La disminución en el flujo hará que la fuerza contraelectromotriz disminuya y que la corriente de la armadura aumente.

Contrario a lo que se podría esperar, el aumento de la corriente de armadura es mayor que la disminución de la excitación. En consecuencia, el torque ($T = k\Phi I$) aumenta y el motor se acelera. El insertar resistencia en el circuito de campo en derivación hará que un motor CC funcione “sobre la velocidad base”.

Bajo la velocidad base

Para operar un motor por debajo de su velocidad base, es necesario disminuir la corriente de la armadura, agregando resistencia en serie con la armadura. Los altos niveles de corriente de la armadura requerirán de reóstatos físicamente grandes (y caros) lo que resultará en pérdidas de calor muy altas.

Una solución más práctica para operar por “bajo la velocidad base” involucra el uso de dispositivos electrónicos que son capaces de controlar el voltaje que se aplica a la armadura.

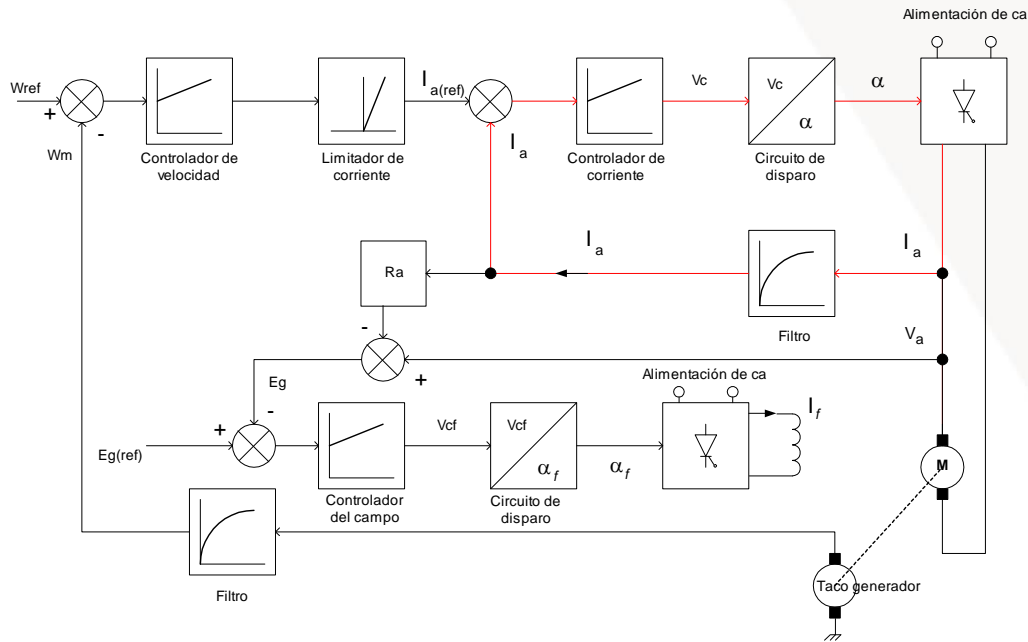


Figura 81

Sistema de Control Electrónico Drive CC Siemens

3.4 Características operativas del motor CC

Control y regulación de velocidad

Las características de velocidad del motor compuesto acumulativo se ubican entre las curvas en serie y en derivación. La posición real de la curva intermedia dependerá del grado de “compuesto” del motor.

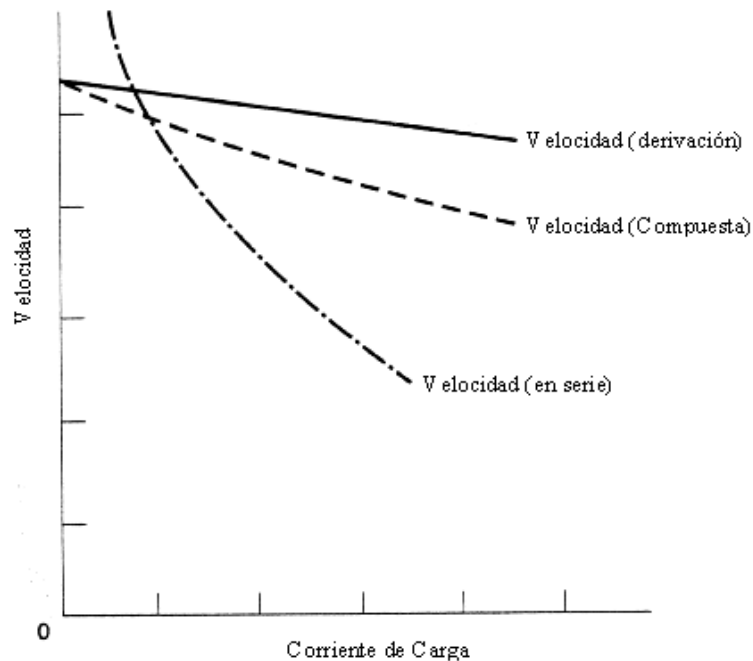


Figura 82

Como se analizó la velocidad de un motor en derivación se puede aumentar insertando un reóstato en el circuito de campo en derivación. Este método de control de velocidad también se puede aplicar al motor compuesto, como se muestra en la Figura 83. La variación más grande de control de velocidad se obtiene mediante variadores de velocidad de estado sólido.

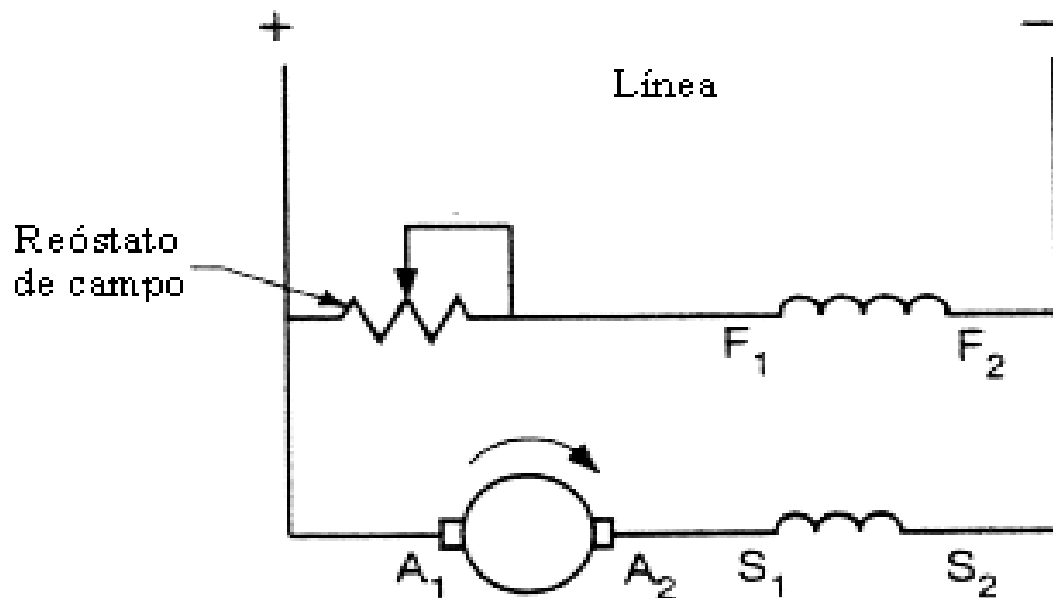


Figura 83

Características de torque

La Figura 84 muestra las curvas de torque de los motores en serie y en derivación sobre el mismo gráfico. Según se espera, la curva de torque para el motor compuesto se ubica entre las curvas para los motores en serie y en derivación. El grado de “compuesto” determina la real posición de esta curva.

En el diseño de los motores compuestos, el grado de “compuesto” puede producir características de torque que van desde en serie a derivación. Se debe tener cuidado para seleccionar un motor con las características de torque y de velocidad que reúna los requerimientos específicos de la aplicación a usar.

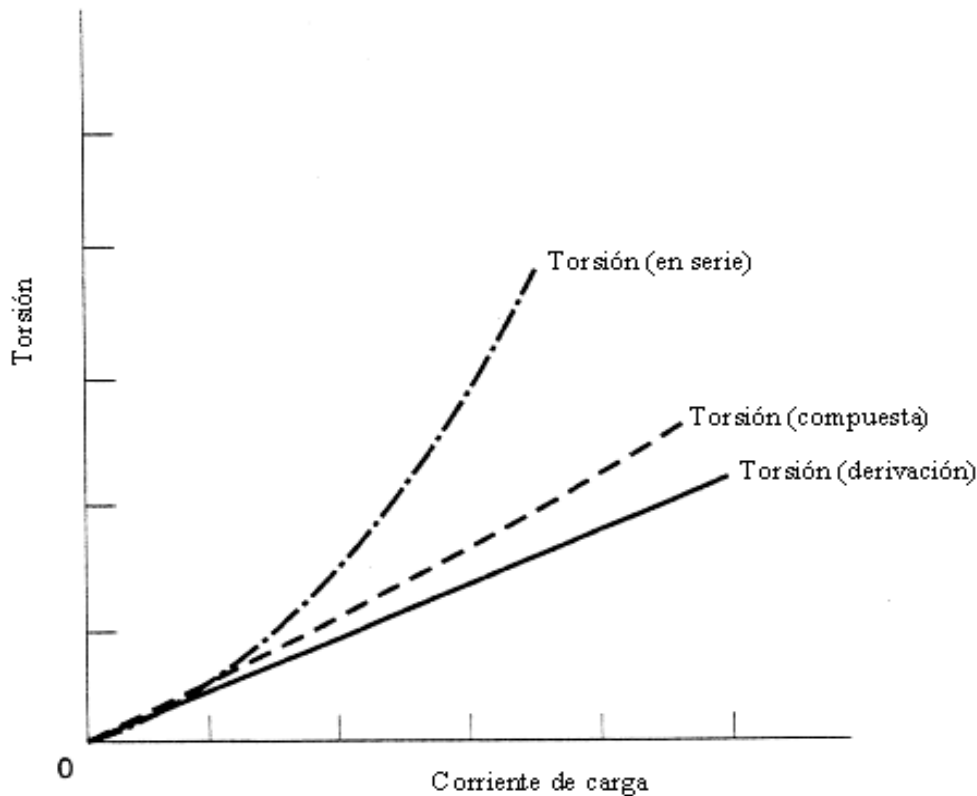


Figura 84

3.5 Reparación de fallas básicas y la mantención de los motores CC.

Cuando se opera correctamente, un motor CC no debiera sobrecalentarse o chisporrotear en las escobillas. Tampoco debe tener una vibración excesiva.

Fallas eléctricas

En general, las fallas eléctricas son el resultado de un circuito abierto, un corto circuito, una conexión a tierra, conexión incorrecta, o voltaje inadecuado. Para un

funcionamiento correcto, mantenga el motor limpio y seco. Efectúe pruebas de aislación a los conductores en forma regular. Si un motor CC no funciona como debiera:

1. Verifique que el suministro de voltaje sea el correcto y asegúrese que la armadura y las bobinas de campo estén conectadas en forma adecuada.

2. Ubique los circuitos abiertos usando pruebas de continuidad del campo y de los circuitos de la armadura.

3. Determine si existen fallas a tierra y deterioro de la aislación usando un megger.

Los cortocircuitos están más propensos a ocurrir en la armadura en sí. Para efectuar las pruebas en la armadura, es necesario sacarlo de la máquina. Una vez removida, efectúe las siguientes pruebas:

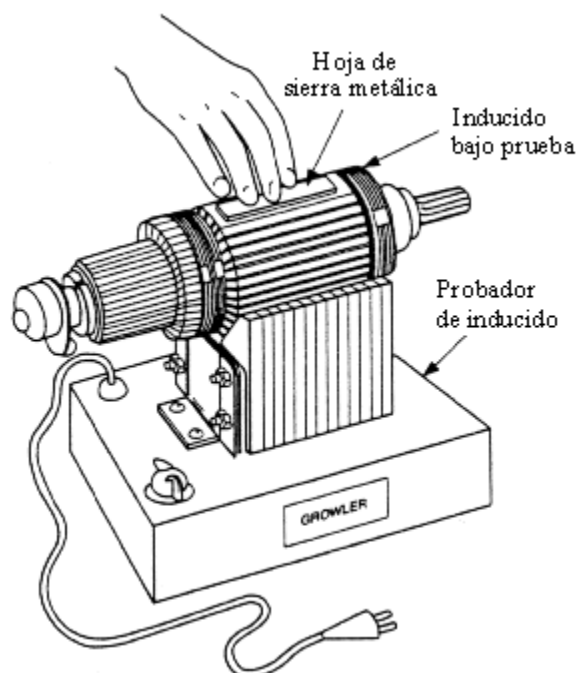


Figura 85

Uso de un probador de armadura (growler) para probar las bobinas en corto circuito

Fallas mecánicas

Las fallas mecánicas pueden producir un recalentamiento o una vibración excesiva. Las fallas mecánicas comunes incluyen:

- Rodamientos desgastados
- Desequilibrio de la armadura
- Alineación incorrecta del motor y de la carga mecánica
- Acoplamiento suelto entre el motor y la carga
- Pernos de montaje o anclaje sueltos y carga mecánica desequilibrada.

La mantención regular incluye la limpieza, lubricación e inspección de rutina de las condiciones mecánicas del motor y la carga.

Alineaciones del eje

Si el eje de la armadura se puede mover hacia arriba o hacia abajo, eso indica un desgaste de los rodamientos. La alineación del eje es crítica para disminuir la vibración y prolongar la vida del rodamiento. La alineación se verifica usando un dispositivo denominado indicador de dial. (dial indicator).

4. Motor jaula de ardilla

4.1 Características constructivas del motor de inducción Jaula de Ardilla trifásico

Aspectos Generales

Como toda máquina eléctrica, los motores asíncronos constan de dos partes fundamentales y distintas:

El estator.- Es la parte fija del motor. Está constituido por una carcasa en la que está fijada una corona de chapas de acero al silicio provistas de unas ranuras. Los bobinados de sección apropiada están dispuestos en dichas ranuras formando las bobinas que se dispondrán en tantos circuitos como fases tenga la red a la que se conectará la máquina.

El rotor.- Es la parte móvil del motor. Está situado en el interior del estator y consiste en un núcleo de chapas de acero al silicio apiladas que forman un cilindro, en el interior del cual se dispone un bobinado eléctrico.

Los tipos más utilizados son:

- o Rotor de jaula de ardilla
- o Rotor bobinado

A este tipo de motores se les denomina motores de inducción debido a que su funcionamiento se basa en la interacción de campos magnéticos producidos por corrientes eléctricas. En el caso de los motores a los que hace referencia estas notas, las corrientes que circulan por el rotor son producidas por el fenómeno de inducción electromagnética, conocido comúnmente como ley de Faraday, que establece que si una espira es atravesada por un campo magnético variable en el tiempo, se establece entre sus extremos una diferencia de potencial dado por la expresión:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

de donde:

e = Diferencia de potencial inducida en la espira en voltios

Φ = Flujo que corta a la espira en Weber

t = Tiempo en segundos

El signo menos de la ecuación es una expresión de la ley de Lenz. Esta establece que la polaridad del voltaje inducido en la bobina es tal que si sus extremos se pusieran en cortocircuito, produciría una corriente que causaría un flujo para oponerse al cambio de flujo original. Puesto que el voltaje inducido se opone al cambio que lo causa, se incluye el signo menos en la ecuación.

Si se distribuye espacialmente alrededor del estator de un motor los bobinados de un sistema de tensiones trifásicos de caladas 120° genera un campo magnético giratorio. La velocidad de giro de este campo magnético, denominada velocidad de sincronismo, viene dada por la expresión:

$$n = \frac{60 * f}{p}$$

De donde:

n = Velocidad de giro del campo magnético en rpm

f = Frecuencia de la corriente eléctrica de alimentación de la máquina

p = Número de pares de polos magnéticos establecidos en el bobinado del estator

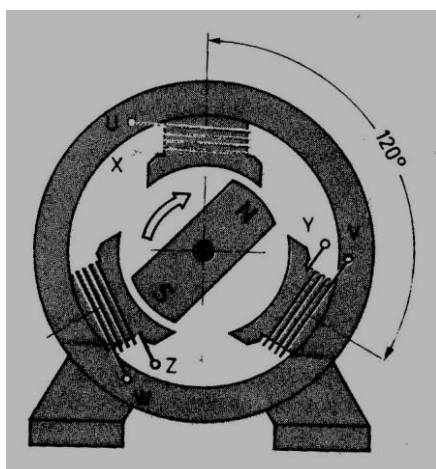


Figura 86

Motor Inducción

MOTORES DE ROTOR JAULA DE ARDILLA

El motor de rotor de jaula de ardilla, también llamado de rotor en cortocircuito, es el más sencillo y el más utilizado actualmente. En núcleo del rotor está construido de chapas estampadas de acero al silicio en el interior de las cuales se disponen unas barras, generalmente de aluminio moldeado a presión.

Las barras del devanado van conectadas a unos anillos conductores denominados anillos extremos. El bobinado así dispuesto tiene forma de jaula de ardilla. Las ranuras del rotor suelen hacerse oblicuas respecto al eje para evitar así puntos muertos en la inducción electromagnética.

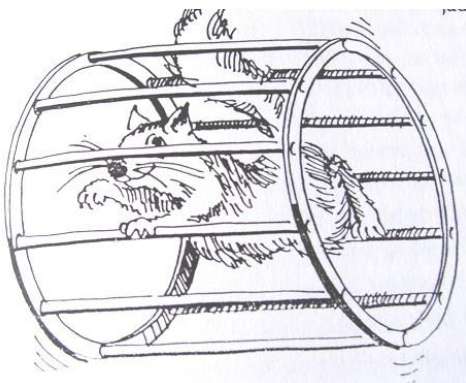
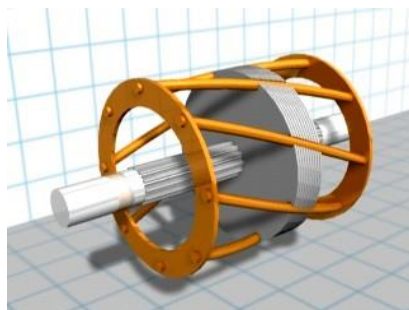


Figura 87

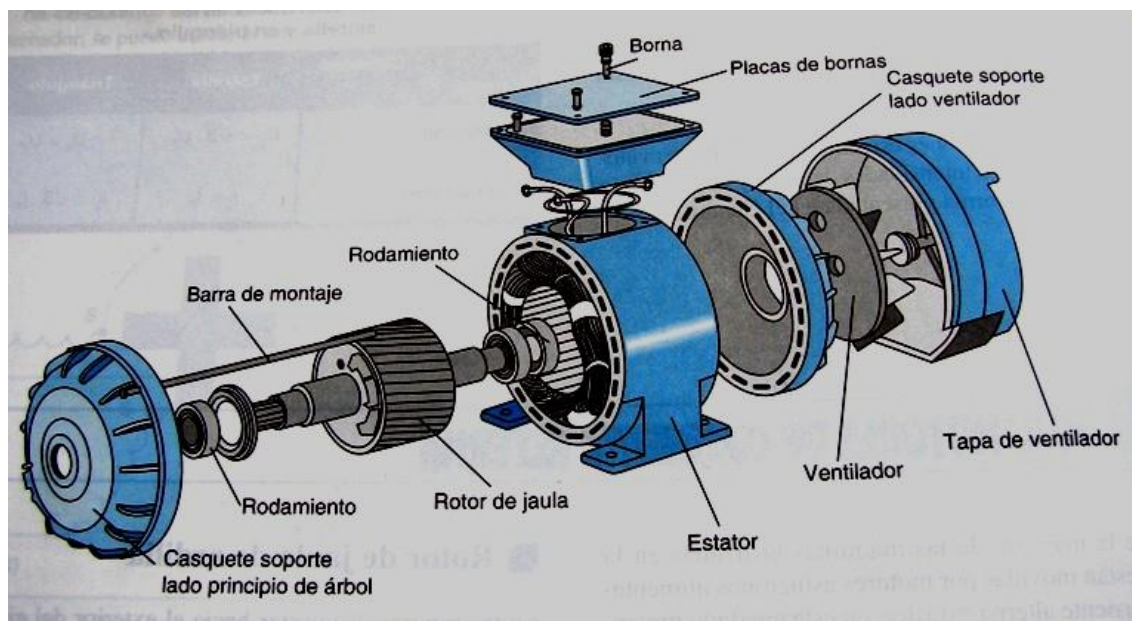


Figura 88

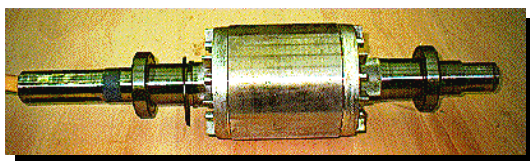


Figura 89

CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES POLIFÁSICOS DE INDUCCIÓN
 Todos los motores polifásicos de inducción pueden clasificarse en:

- a) Motores con Rotor en Jaula de Ardilla
- b) Motores con Rotor Bobinado

Los motores en jaula han sido clasificado además por la National Electrical Manufacturer's Association (NEMA Motor and Generator, Pub. 45-102), como sigue:

Tipo A, motores de par normal y corriente de arranque normal

Tipo B, motores de par normal y corriente de arranque reducida

Tipo C, Motores de par elevado y corriente de arranque reducida

Tipo D, Motores de gran deslizamiento

Tipo F, Motores con par de arranque y corriente de arranque reducido

4.2 Valores de placa de un motor

Como se requiere en otros equipos eléctricos, los motores deben marcarse de acuerdo con la Regla 2-100 del *Código Eléctrico* (CEC), Parte I. Además, el NEMA tiene sus propios requerimientos de qué se debe marcar en la placa de un motor, y estos, junto con los datos del CEC, habitualmente aparecen en lo que se conoce como placa, que se instala directamente en el marco (frame) del motor.

La información de la placa puede usarse con los reglamentos del Código para instalar la fuente de alimentación apropiada y el equipo de control para el motor. También se puede usar para ordenar las partes de repuesto adecuadas o un motor de repuesto completo. La Tabla 7 ilustra una placa de motor común.

Placa común de motor

Nombre del Fabricante		
Cat	#	12 - 34GBC25
Usuario #		
HP 3	Marco (frame) 182T	Modelo JPKL
3 fases	Ciclo 60	K Código Kva rotor bloqueado
Voltios 230/460	Diseño B	B Clase de Aislación.
Amperios 9,9/4,95		40 Máximo Ambiente
Rpm 1735	Valor nominal de tiempo	1,15 Factor de Servicio
Rodamiento del Extremo de Transmisión 30BC02JPP3		
Rodamiento del Extremo Anterior 25BC02JPP3		

S # 12345B6		Ser 0123	
Línea de bajo voltaje	Motor CA		Línea de alto voltaje
			Hecho en Canadá

Tabla7

Información de la placa

La placa del motor contiene la siguiente información:

El nombre del fabricante, el tipo y la designación del marco (frame)

La salida de potencia en caballos de fuerza HP

El valor nominal de servicio (servicio continuo o breve)

La temperatura ambiente máxima para la cual está diseñado el motor

Designación del sistema de aislación

Las revoluciones por minuto a plena carga

La frecuencia del suministro

El número de fases

El voltaje nominal

Los Amperios de plena carga

La letra de código para el rotor frenado en KVA

Para motores equipados con protección térmica, las palabras “protegido térmicamente”

La letra de diseño

La designación de terminales

La evidencia de aprobación

Nombre y tipo del fabricante

La placa incluye dicha información para un motor de inducción CA, un motor en derivación CC y un motor sincrónico CA. Estos datos pueden codificarse en el modelo o número de identificación de la placa.

Designación del marco (frame)

El código que designa el marco (frame) se puede usar para buscar las dimensiones físicas del motor en los estándares de NEMA - por ejemplo, la distancia desde el fondo de los pies a la línea central del eje, o la distancia entre los orificios de montaje.

Potencia (HP)

La potencia es la potencia de salida nominal del motor a plena carga, y este valor nominal se usa para varios propósitos:

Se usa para igualar el tamaño del motor con la carga.

CEC requiere para seleccionar el tamaño apropiado del partidor y el tamaño del desconectador para el motor.

Se puede usar para determinar la corriente de plena carga del motor si no se entrega esa información.

Factor de servicio (FS)

Cuando el factor de servicio se multiplica por la potencia nominal, el producto es la potencia máxima que el motor puede suministrar en forma continua con un voltaje y frecuencia nominales sin dañar el motor.

Valor nominal de tiempo

El valor nominal de tiempo es continuo o de “corto tiempo”. Continuo significa que el motor puede continuar suministrando su valor nominal de potencia de plena carga sin interrupción o cambio. Los valores nominales de corto tiempo se establecen en 5, 15, 30 y 60 minutos. Los motores con estos valores nominales no pueden suministrar su potencia nominal en forma continua. Comienzan su trabajo a una temperatura que está dentro de 5°C de la temperatura ambiente, y pueden suministrar la potencia nominal solo por el tiempo designado en el valor nominal.

Máxima temperatura ambiente

La temperatura ambiente es la temperatura del medio refrigerante circundante que entra en contacto con las partes calientes del motor. Normalmente la temperatura ambiente es el aire circundante.

Designación del sistema de aislación

Los sistemas de aislación se clasifican de acuerdo a su longevidad o aguante térmico. Existen cuatro clases para motores y generadores, y, de acuerdo con el Código, se debe conocer la clase que se usa para seleccionar los conductores de alimentación apropiados para energizar el motor.

Clase A o Clase 105 Este valor nominal se designa para el uso donde un aumento de la temperatura, bajo servicio continuo y de plena carga, no excederá los 55°C sobre una temperatura ambiente de 40°C, y la temperatura de punto caliente no será superior a 10°C sobre el aumento normal. (Esto significa una temperatura de conductor promedio de 95°C, con un punto caliente máximo de conductor de 105°C.)

Clase B o Clase 130 Este valor nominal se designa para el uso donde un aumento de la temperatura, bajo servicio continuo y de plena carga, no excederá los 80°C sobre una temperatura ambiente de 40°C, y donde la temperatura de punto caliente no será superior a 30°C sobre el aumento normal. (Esto significa una temperatura de conductor promedio de 120°C con un punto caliente máximo de conductor de 150°C.)

Clase F o Clase 155 Este valor nominal se designa para el uso donde un aumento de la temperatura, bajo servicio continuo y de plena carga, no excederá los 115°C sobre una temperatura ambiente de 40°C, y donde la temperatura de punto caliente no será superior a 30°C sobre el aumento normal. (Esto significa una temperatura de conductor promedio de 155°C con un punto caliente máximo de conductor de 185°C.)

Clase H o Clase 180 Este valor nominal se designa para el uso donde un aumento de la temperatura, bajo servicio continuo y de plena carga, no excederá los 150°C sobre una temperatura ambiente de 40°C, y donde la temperatura de punto caliente no será superior a 30°C sobre el aumento normal. (Esto significa una temperatura de conductor promedio de 190°C con un punto caliente máximo de conductor de 220°C.)

Revoluciones por minuto (r/min o RPM)

El RPM es la velocidad del motor a su potencia nominal en HP. Está directamente relacionada a la frecuencia del suministro e inversamente relacionada al número de polos en el motor.

Frecuencia (Hz)

La información en la placa entrega la frecuencia del suministro que se Conecta al motor. Si el motor debe operar exitosamente bajo condiciones de trabajo a plena carga, y con el voltaje nominal aplicado, la frecuencia del suministro no debe variar más allá del 5% del valor dado.

Número de fases

El número de fases del motor que se designa para operar debe coincidir con el número de fases en el sistema de suministro.

Voltios

Esta información es el voltaje de operación requerido por el motor. Si el motor debe operar exitosamente bajo condiciones de trabajo a plena carga, y a frecuencia nominal, el suministro de voltaje no debe variar más allá de un 10% del valor dado. *Recuerde que la potencia es proporcional al cuadrado del voltaje.*

Corriente de plena carga (amperios)

La corriente de plena carga es la corriente que el motor consume cuando opera a voltaje nominal, y entrega su potencia nominal en HP. El Código eléctrico requiere la corriente de plena carga inscrita en la placa para determinar los tamaños apropiados y los valores nominales de los conductores y equipos de alimentación, protección, y control.

Letra de código para el rotor frenado en KVA

Esta letra puede encontrarse en la Tabla13 para determinar la relación del rotor frenado KVA con el valor nominal de potencia del motor.

Letra de diseño

La letra de diseño designa la relación entre el torque o par, y la velocidad del motor. Existen cuatro valores nominales de letra de diseño: A, B, C y D. Más adelante en esta habilidad, hay más información acerca sobre esto.

Designación de los terminales

Esta designación a menudo se entrega como diagramas de conexión, que muestra la interconexión de los terminales del motor y la conexión de los terminales al suministro.

Evidencia de aprobación

Todo equipo eléctrico que se instala de acuerdo al Código debe tener la aprobación de una agencia certificada tales como la Asociación de Estándares Canadiense, CSA, UL, NEMA, o CEE.

Estándares de eficiencia de energía

En 1993, la Columbia Británica, Ontario, Quebec, Nueva Escocia y New Brunswick proclamaron legislación que establece los estándares de eficiencia para ciertos productos eléctricos. Incluidos en esta lista se encuentran los motores eléctricos con potencia nominal de 1 a 200 HP, fabricados después del 1° de abril de 1993. Si se venden estos motores en las provincias mencionadas, deben tener la etiqueta de eficiencia de energía de CSA (Figura 90) para verificar que satisfacen los requerimientos del estándar designado por CSA C390-93.

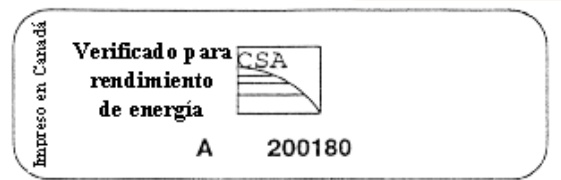


Figura 90
Etiqueta de eficiencia de energía
CSA

Campo magnético giratorio en un bobinado de estator trifásico

Un motor de inducción trifásico produce rotación al crear un campo magnético giratorio en el estator. Esto se hace al poner en el núcleo del estator tres bobinados monofásicos, separados 120° eléctricos uno del otro.

La Figura 91 es un diagrama de un estator trifásico de dos polos conectado en una configuración en estrella. Dos polos significan que cada fase tiene dos polos. Cada bobinado se bobina de tal forma que crea dos polos, cada uno con polaridad opuesta al otro. Por ejemplo, cuando el polo marcado A_1 es un polo norte, el polo marcado con A_2 es un polo sur.

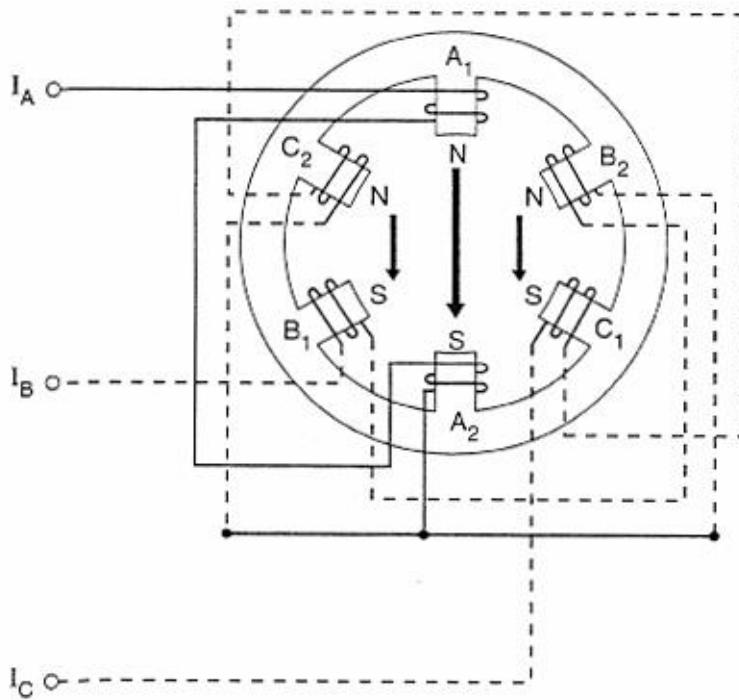


Figura 91

Estator simple trifásico de dos polos conectado en estrella

La Figura 92 ilustra un gráfico de corrientes trifásicas, separadas a 120° entre sí con una rotación de fase ABC. Las líneas verticales muestran donde estará cada fase en su ciclo con respecto a las otras dos fases.

Al examinar el gráfico en cada uno de los siete puntos marcados con las líneas verticales, es posible ilustrar las direcciones y magnitudes de la corriente del diagrama de la Figura 91. Luego se pueden determinar las polaridades del polo y de las líneas de flujo trazadas para mostrar la dirección del campo magnético en el centro del estator.

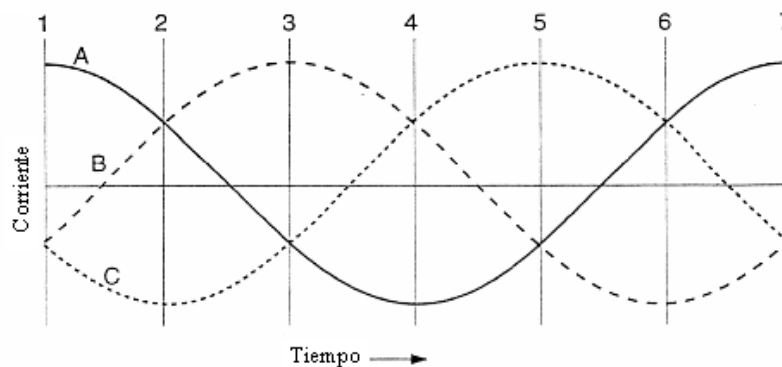


Figura 92

Gráfico de una corriente trifásica

Para determinar las polaridades y trazado de las líneas de flujo, primero se debe asumir la dirección de la corriente positiva y negativa. Para el propósito de esta descripción, se asume que una corriente en la dirección positiva fluye hacia dentro de los bobinados del estator, mientras que una corriente en la dirección negativa fluye hacia fuera de los bobinados del estator.

Dirección del campo en el punto 1 del ciclo

Se puede ver en el gráfico de la Figura 92 que, en el punto 1 del ciclo, la corriente en fase A se encuentra en su pico positivo. Esto significa que la corriente en fase A se encuentra en su máximo y fluye hacia dentro del bobinado del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte poderoso en el polo A_1 y que se forma un polo sur poderoso en el polo A_2 . Esto se ilustra en la Figura 93.

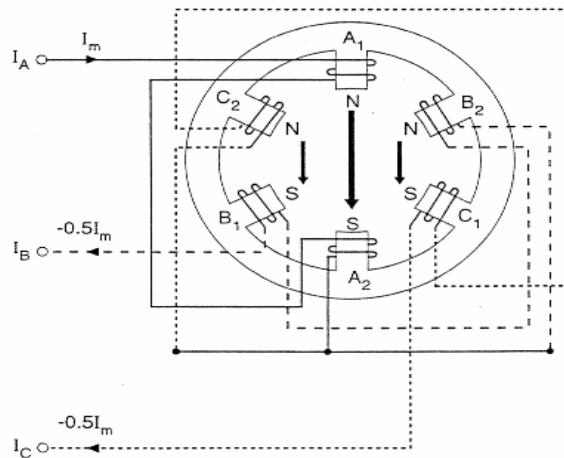


Figura 93
Punto 1 en el ciclo

Al mismo tiempo, las corrientes en fases B y C son iguales a la mitad de su valor máximo y en la dirección negativa. Las corrientes en estas dos fases fluyen hacia fuera de los bobinados del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte más débil tanto en B_2 como en C_2 y que se forma un polo sur más débil tanto en B_1 como en C_1 . Esto también se ilustra en la Figura 93.

Los tres polos norte (A_1 , B_2 y C_2) juntos forman un gran polo norte, que es más poderoso en el centro. Y los tres polos sur (A_2 , B_1 y C_1) juntos forman un gran polo sur, que también es más poderoso en el centro. Por esta razón el motor de inducción trifásico se denomina motor de dos polos en vez de motor de seis polos.

Dirección del campo en el punto 2 del ciclo

Del gráfico de la Figura 92 se puede concluir que, en el punto 2 del ciclo, la corriente en fase C se encuentra en su pico negativo. Se encuentra en su máximo y fluye hacia fuera del bobinado del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte poderoso en el polo C_2 y que se forma un polo sur poderoso en el polo C_1 . Esto se ilustra en la Figura 94.

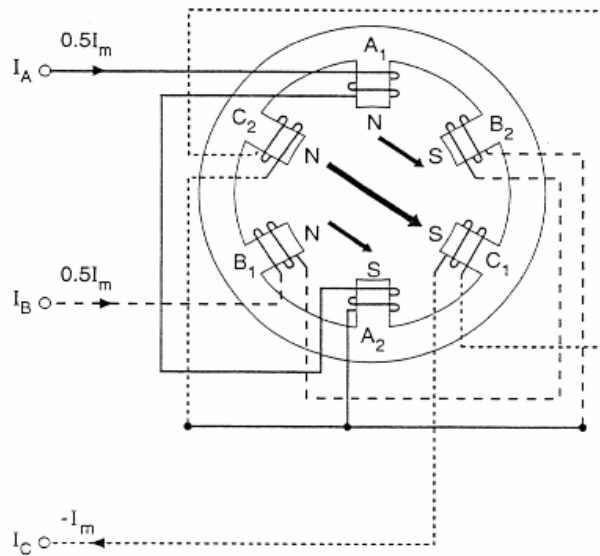


Figura 94
Punto 2 del ciclo

Al mismo tiempo, las corrientes en fases A y B son iguales a la mitad de su valor máximo y en la dirección positiva. Las corrientes en estas dos fases fluyen dentro de los bobinados del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte más débil tanto en A_1 como en B_1 , y que se forma un polo sur más débil tanto en A_2 como en B_2 . Esto también se ilustra en la Figura 94.

Los tres polos norte (A_1 , B_1 y C_2) juntos forman un gran polo norte, que es el más poderoso en el centro. Y los tres polos sur (A_2 , B_2 y C_1) juntos forma un gran polo sur, que también es el más poderoso en el centro.

Observe que, mientras las corrientes de la Figura 92 han desplazado en 60° eléctricos, el centro en los polos magnéticos además se ha desplazado 60° mecánicos.

Dirección del campo en el punto 3 del ciclo

Del gráfico de la Figura 92 se puede concluir que, en el punto 3 del ciclo, la corriente en la fase B se encuentra en su pico positivo. Se encuentra en su máximo y fluye hacia adentro del bobinado del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte poderoso en el polo B_1 y que se forma un polo sur poderoso en el polo B_2 . Esto se ilustra en la Figura 95.

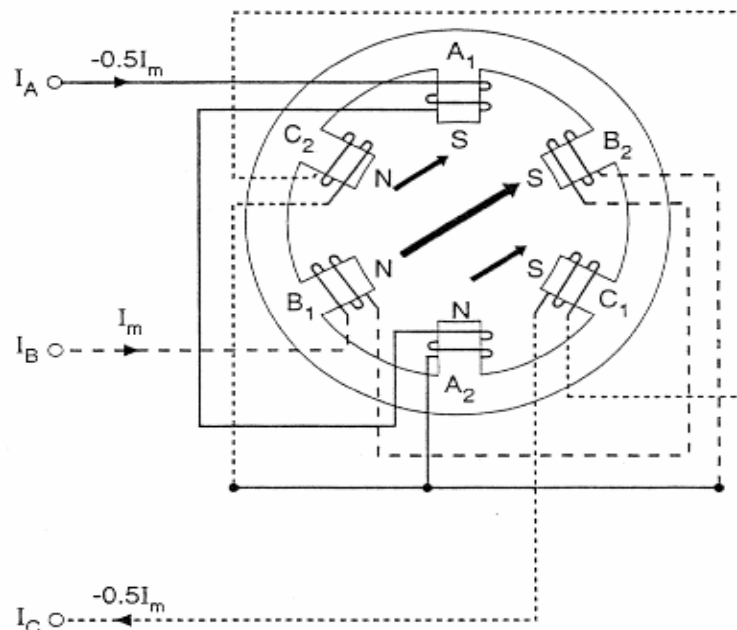


Figura 95
Punto 3 del ciclo

Al mismo tiempo, las corrientes en fases A y C son iguales a la mitad de su valor máximo y en la dirección negativa. Las corrientes en estas dos fases fluyen fuera de los bobinados del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte más débil tanto en A_1 como en C_2 , y que se forma un polo sur más débil tanto en A_1 como en C_1 . Esto también se ilustra en la Figura 95.

Los tres polos norte (A_2 , B_1 y C_2) juntos forman un gran polo norte, que es el más poderoso en el centro. Y los tres polos sur (A_1 , B_2 y C_1) juntos forman un gran polo sur, que es el más poderoso en el centro.

Nuevamente observe que, mientras las corrientes de la Figura 92 han desplazado 60° eléctricos, el centro de los polos magnéticos de la Figura 95 además se han desplazado 60° mecánicos.

Dirección del campo en el punto 4 del ciclo

Del gráfico de la Figura 92 se puede concluir que, en el punto 4 del ciclo, la corriente en la fase A se encuentra en su pico negativo. Se encuentra en su máximo y fluye por fuera del bobinado del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte poderoso en el polo A_2 y que se forma un polo sur poderoso en el polo A_1 . Esto se ilustra en la Figura 96.

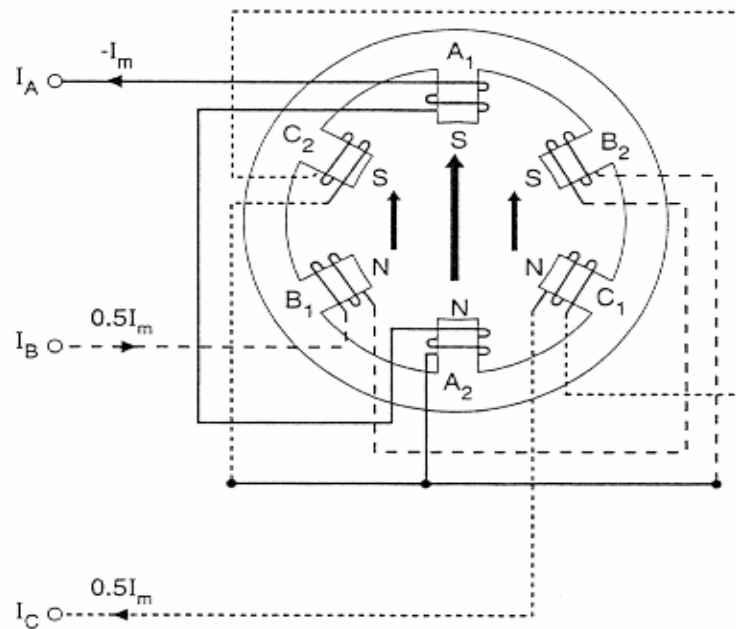


Figura 96
Punto 4 del ciclo

Al mismo tiempo, las corrientes en las fases B y C son iguales a la mitad de su valor máximo y en la dirección positiva. Las corrientes en estas dos fases fluyen por dentro de los bobinados del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte más débil tanto en B_1 como en C_1 , y que se forma un polo sur más débil tanto en B_2 como en C_2 . Esto también se ilustra en la Figura 96.

Los tres polos norte (A_2 , B_1 y C_1) juntos forman un gran polo norte, que es el más poderoso en el centro. Y los tres polos sur (A_1 , B_2 y C_2) juntos forman un gran polo sur que también es el más poderoso en el centro.

Nuevamente observe que, mientras las corrientes de la Figura 92 han desplazado 60 grados eléctricos, el centro de los polos magnéticos además se ha desplazado 60 grados mecánicos.

Dirección del campo en el punto 5 del ciclo

El gráfico de la Figura 92 ilustra que, en el punto 5 del ciclo, la corriente de la fase C se encuentra en su pico positivo. Se encuentra en su máximo y fluye por dentro del bobinado del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte poderoso en el polo C_1 y que se forma un polo sur poderoso en el polo C_2 . Esto se ilustra en la Figura 97.

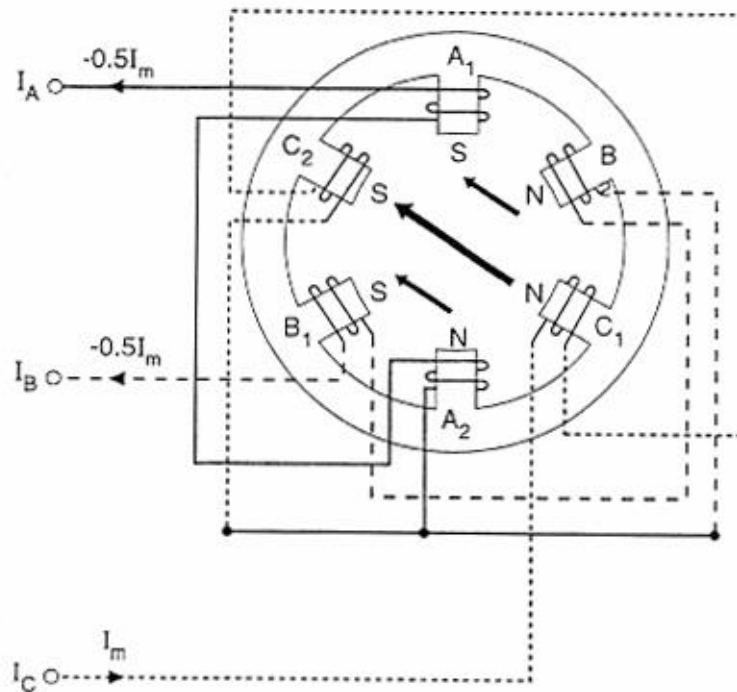


Figura 97
Punto 5 del ciclo

Al mismo tiempo, las corrientes en las fases A y B son iguales a la mitad de su valor máximo y en la dirección negativa. Las corrientes en estas dos fases fluyen hacia fuera de los bobinados del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte más débil tanto en A_2 como en B_2 y que se forma un polo sur más débil tanto en A_1 como en B_1 . Esto también se ilustra en la Figura 97.

Los tres polos norte (A_2 , B_2 y C_1) juntos forman un gran polo norte que es el más poderoso en el centro. Y los tres polos sur (A_1 , B_1 y C_2) juntos forman un gran polo sur, que es el más poderoso en el centro.

Una vez más observe que, mientras las corrientes de la Figura 92 han desplazado 60 grados eléctricos, el centro de los polos magnéticos de la Figura 97 además se ha desplazado 60 grados mecánicos.

Dirección del campo en el punto 6 del ciclo

El gráfico de la Figura 92 ilustra que, en el punto 6 del ciclo, la corriente en la fase B se encuentra en su pico negativo. La corriente en la fase B se encuentra en su máximo y fluye hacia afuera del bobinado del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte poderoso en el polo B₂, y que se forma un polo sur poderoso en el polo B₁. Esto se ilustra en la Figura 98.

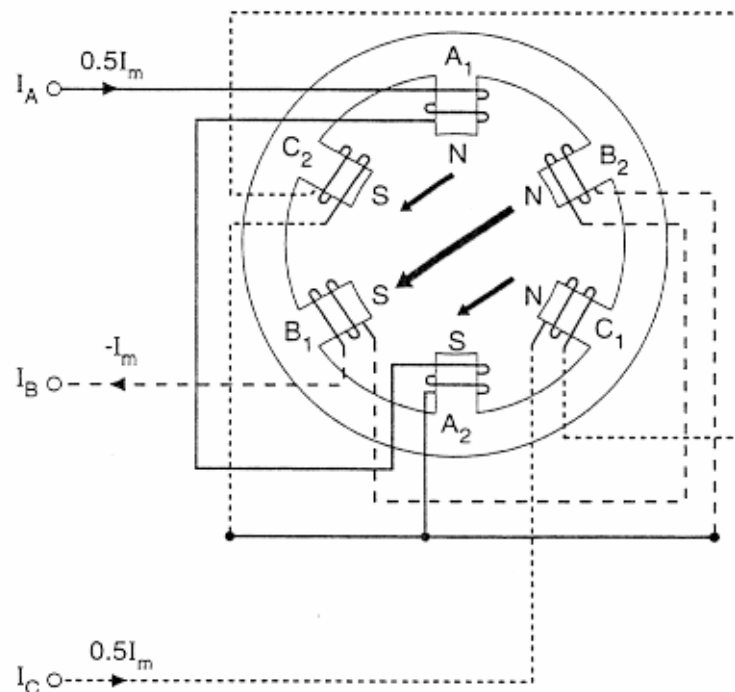


Figura 98
Punto 6 del ciclo

Al mismo tiempo, las corrientes de las fases A y C son iguales a la mitad de su valor máximo y en la dirección positiva. Las corrientes en estas dos fases fluyen hacia dentro de los bobinados del estator. Al aplicar la regla de la mano izquierda para las bobinas se puede observar que se forma un polo norte más débil tanto en A₁ como en C₁, y que se forma un polo sur más débil tanto en A₂ como en C₂. Esto también se puede ver en la Figura 98.

Los tres polos norte (A₁, B₂ y C₁) juntos forman un gran polo norte, que es el más poderoso en el centro. Y los tres polos sur (A₂, B₁ y C₂) juntos forman un gran polo sur, que también es el más poderoso en el centro.

Observe que, mientras las corrientes en la Figura 92 se han desplazado 60 grados eléctricos, el centro de los polos magnéticos de la Figura 98 además se ha desplazado 60 grados mecánicos.

Dirección del campo en el punto 7 del ciclo

El punto 7 del ciclo es el mismo que el punto 1. La dirección del campo se ha trasladado 60° seis veces, devolviéndolo al punto de inicio. Esto significa que en el punto 7 la dirección del campo vuelve a donde comenzó y que el ciclo comenzará de nuevo. Si se trazaron más puntos, éstos mostrarán que el campo no salta entre los pasos, sino que está girando continuamente en el estator.

Velocidad del campo magnético giratorio

El efecto de la frecuencia

Hemos visto que, en un ciclo completo de corriente alterna, el campo magnético gira una revolución mecánica completa. Si la frecuencia del suministro aumenta, la velocidad a la que gira el campo también aumenta. Si la frecuencia del suministro disminuye, la velocidad a la que gira el campo disminuye. Esto significa que la velocidad a la que gira el campo es directamente proporcional a la frecuencia.

La velocidad a la que gira el campo se denomina *velocidad sincrónica* del motor y se mide en revoluciones por minuto (r/min). En el ejemplo usado del motor de dos polos, un ciclo de corriente fue equivalente a una revolución del campo. Una fuente de 50 Hz completa 3.000 ciclos cada minuto, por lo tanto un motor de dos polos que se conecta a una fuente de 50 Hz tendrá una velocidad sincrónica de 3.000 r/min.

El efecto del número de polos

Para simplificar la descripción de lo que ocurre con la velocidad sincrónica cuando el número de polos aumenta, considere sólo los polos de una fase. Con cada inversión de corriente a través del bobinado, la polaridad de los polos también se vuelve inversa. Con un motor de dos polos esto representa un cambio de 180 grados mecánicos en el estator como se ilustra en la Figura 99.

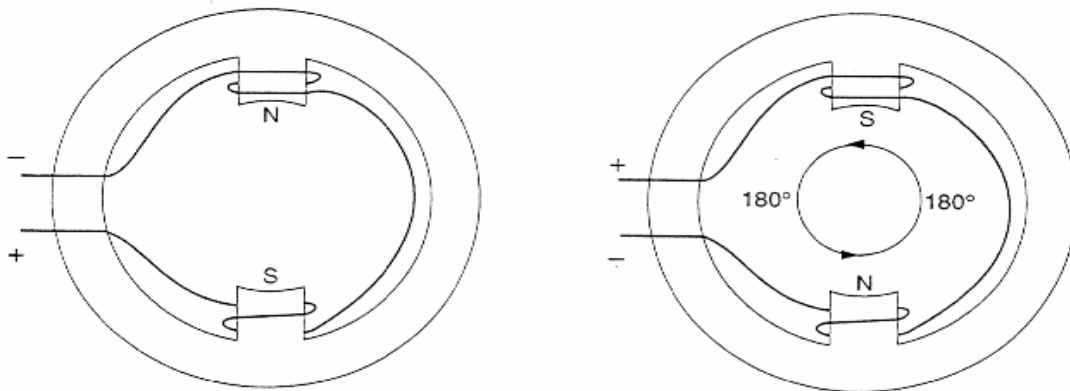


Figura 99

Motor de dos polos

Un motor de cuatro polos se bobina con más grupos de bobinado para formar cuatro polos para cada fase. La Figura 100 ilustra los cuatro polos solamente para una fase. Una vez más, cada vez que la corriente invierte su dirección a través del bobinado, la polaridad de los polos se invierte. Sin embargo, en el caso del motor de cuatro polos, el polo norte que estuvo en el punto máximo ahora cambia al de la izquierda.

Esto representa un cambio mecánico de sólo 90° en el estator, que significa que cada semiciclo de corriente representa un cambio mecánico de 90° . Por lo tanto requiere dos ciclos completos para hacer que el campo gire una revolución. Cuando se conecta a la misma fuente de 50 Hertz, que completa 3.000 ciclos cada minuto, la velocidad del campo del estator será de sólo 1.500RPM ($3.600/2$).

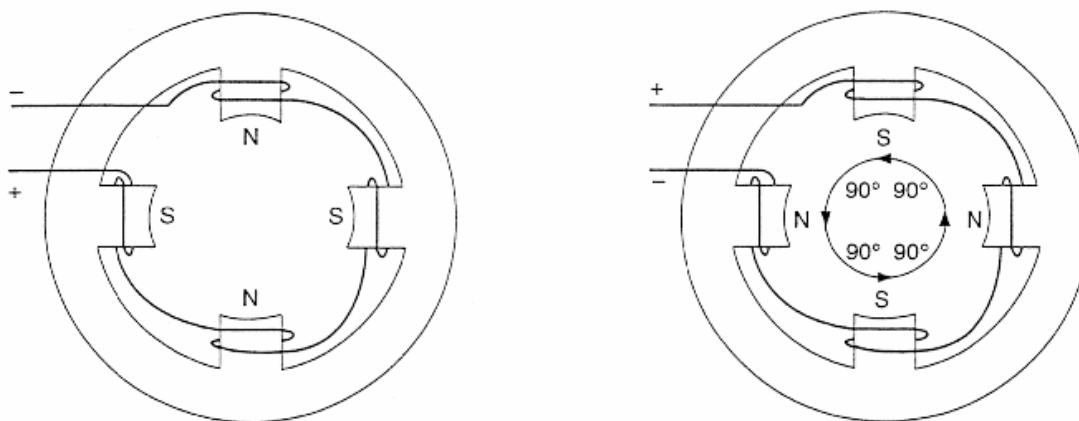


Figura 100

Motor de cuatro polos

Un motor de seis polos se bobina con más grupos de bobinado para formar seis polos para cada fase. La Figura 101 ilustra los seis polos solamente para una fase. Cada vez que la corriente invierte la dirección, las polaridades del polo cambian por un polo. Esto significa que con cada semiciclo el campo cambia solamente 60 grados mecánicos. Por lo tanto requiere tres ciclos completos para hacer que el campo gire una revolución. Cuando se conecta a la misma fuente de 50 Hertz, que completa 3.000 ciclos cada minuto, la velocidad del campo del estator será de sólo 1.000RPM ($3.000 / 3$).

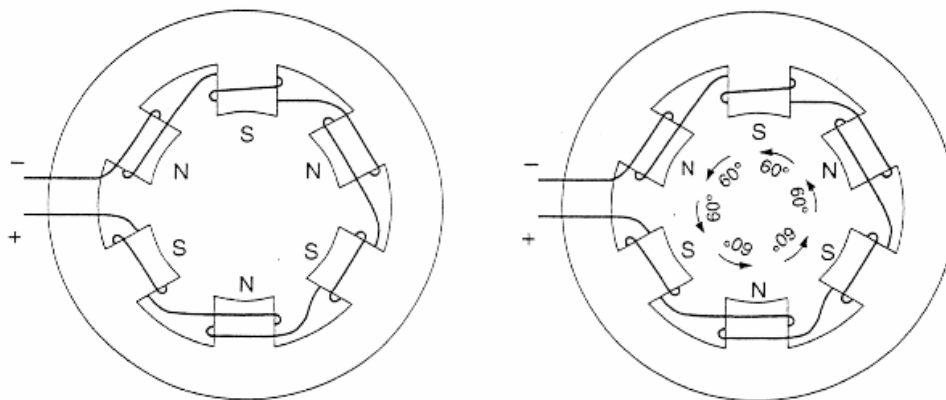


Figura 101
Motor de seis polos

De estos ejemplos se puede concluir que la velocidad sincrónica del campo es inversamente proporcional al número de polos. De hecho, la velocidad sincrónica de un motor puede determinarse usando la siguiente ecuación.

$$n = \frac{f \times 60}{P}$$

Dónde:

n = la velocidad sincrónica del motor en r/min

f = la frecuencia de la corriente de suministro en Hertz

P = el número de pares de polos por fase en el motor

Nota: El 60 que se ve en la ecuación se usa para convertir los ciclos por segundo a ciclos por minuto.

Ejemplo

Como ejemplo, calcular la velocidad sincrónica de un motor de seis polos que opera en un sistema de 60 Hertz.

$$\begin{aligned} n &= \frac{60 \times 60}{3} \\ &= 1.200 \text{ r/min} \end{aligned}$$

Desarrollo del Torque en un rotor jaula de ardilla

Características de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación NEMA.

Clase NEMA	Par de arranque (# de veces el nominal)	Corriente de Arranque	Regulación de Velocidad (%)
A	1.5-1.75	5-7	2-4
B	1.4-1.6	4.5-5	3.5
C	2-2.5	3.5-5	4-5
D	2.5-3.0	3-8	5-8 , 8-13
F	1.25	2-4	mayor de 5

Tabla8

Los voltajes citados son para el voltaje nominal en el arranque.

Motores de inducción de jaula de ardilla clase a

El motor clase A es un motor de jaula de ardilla normal o estándar fabricado para uso a velocidad constante. Tiene grandes áreas de ranuras para una muy buena disipación de calor, y barras con ranuras ondas en el motor. Durante el periodo de arranque, la densidad de corriente es alta cerca de la superficie del rotor; durante el periodo de la marcha, la densidad se distribuye con uniformidad. Esta diferencia origina algo de alta resistencia y baja reactancia de arranque, con lo cual se tiene un par de arranque entre 1.5 y 1.75 veces el nominal (a plena carga). El par de arranque es relativamente alto y la baja resistencia del rotor produce una aceleración bastante rápida hacia la velocidad nominal. Tiene la mejor regulación de velocidad pero su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal normal, haciéndolo menos deseable para arranque con línea, en especial en los tamaños grandes de corriente que sean indeseables.

MOTORES DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA CLASE B

A los motores de clase B a veces se les llama motores de propósito general; es muy parecido al de la clase A debido al comportamiento de su deslizamiento-par. Las ranuras de su motor están embebidas algo más profundamente que en los motores de clase A y esta mayor profundidad tiende a aumentar la reactancia de arranque y la marcha del rotor. Este aumento reduce un poco el par y la corriente de arranque.

Las corrientes de arranque varían entre 4 y 5 veces la corriente nominal en los tamaños mayores de 5 HP se sigue usando arranque a voltaje reducido. Los motores de clase B se prefieren sobre los de la clase A para tamaños mayores.

Las aplicaciones típicas comprenden las bombas centrífugas de impulsión, las máquinas herramientas y los sopladores.

MOTORES DE INDUCCION DE JAULA DE ARDILLA CLASE C

Estos motores tienen un rotor de doble jaula de ardilla, el cual desarrolla un alto par de arranque y una menor corriente de arranque.

Debido a su alto par de arranque, acelera rápidamente, sin embargo cuando se emplea en grandes cargas, se limita la disipación térmica del motor por que la mayor parte de la corriente se concentra en el devanado superior.

En condiciones de arranque frecuente, el rotor tiene tendencia a sobre calentarse se adecua mejor a grandes cargas repentinas pero de tipo de baja inercia.

Las aplicaciones de os motores de clase C se limitan a condiciones en las que es difícil el arranque como en bombas y compresores de pistón

MOTORES DE INDUCCION DE JAULA DE ARDILLA CLASE D

Los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla clase D se conocen también como de alto par y alta resistencia.

Las barras del rotor se fabrican en aleación de alta resistencia y se colocan en ranuras cercanas a la superficie o están embebidas en ranuras de pequeño diámetro. La relación de resistencia a reactancia del rotor de arranque es mayor que en lo motores de las clases anteriores.

El motor está diseñado para servicio pesado de arranque, encuentra su mayor aplicación con cargas como cizallas o troqueles, que necesitan el alto par con aplicación a carga repentina la regulación de velocidad en esta clase de motores es la peor.

MOTORES DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA DE CLASE F

También conocidos como motores de doble jaula y bajo par. Están diseñados principalmente como motores de baja corriente, porque necesita la menor corriente de arranque de todas las clases. Tiene una alta resistencia del rotor tanto en su devanado de arranque como en el de marcha y tiende a aumentar la impedancia de arranque y de marcha, y a reducir la corriente de marcha y de arranque.

El rotor de clase F se diseñó para remplazar al motor de clase B. El motor de clase F produce pares de arranque aproximadamente 1.25 veces el par nominal y bajas corrientes de arranque de 2 a 4 veces la nominal. Los motores de esta clase se fabrican de la capacidad de 25 hp para servicio directo de la línea. Debido a la resistencia del rotor relativamente alta de arranque y de marcha, estos motores tienen menos regulación de voltaje de los de clase B, bajan capacidad de sobrecarga y en general de

baja eficiencia de funcionamiento. Sin embargo, cuando se arrancan con grandes cargas, las bajas de corrientes de arranque eliminan la necesidad de equipo para voltaje reducido, aún en los tamaños grandes.

CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA DE ACUERDO CON EL ENFRIAMIENTO Y EL AMBIENTE DE TRABAJO.

Los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla, y en general todos los motores eléctricos, se pueden clasificar también de acuerdo con el ambiente en que funcionan, sí también como en los métodos de enfriamiento.

La temperatura ambiente juega un papel importante en la capacidad y selección del tamaño de armazón para una dínamo, parte importante del motivo es que la temperatura ambiente influye en la elevación permisible de temperatura por sobre los 40° C normales. Por ejemplo una dínamo que trabaje a una temperatura ambiente de 75° C empleando aislamiento clase B tiene un aumento permisible de temperatura de tan solo 55° C. Si trabajara a su temperatura ambiente normal de 40 ° C se podría permitir un aumento de temperatura de 90° C, sin dañar su aislamiento.

También se hizo notar que la hermeticidad de la máquina afecta a su capacidad. Una máquina con una armazón totalmente abierta con un ventilador interno en su eje, permite un fácil paso de aire succionado y arrojado. Esta caja origina una temperatura final de trabajo en los devanados, menor en comparación que la de una máquina totalmente cerrada que evita el intercambio de aire con el exterior. Esto da como resultado que existe una clasificación de los motores por el tipo de carcasa.

TIPOS DE ENVOLVENTES O CARCASAS

La NEMA reconoce los siguientes:

Carcasa a prueba de agua. Envolvente totalmente cerrada para impedir que entre agua aplicada en forma de un chorro o manguera, al recipiente de aceite y con medios de drenar agua al interior. El medio para esto último puede ser una válvula de retención o un agujero maculado en la parte más inferior del armazón, para conectar un tipo de drenado.

Carcasa a prueba de ignición de polvos. Envolvente totalmente cerrada diseñada y fabricada para evitar que entren cantidades de polvo que puedan encender o afectar desempeño o capacidad.

Carcasa a prueba de explosión. Envolvente totalmente cerrada diseñada y construida para resistir una explosión de un determinado gas o vapor que pueda estar dentro de un motor, y también para evitar la ignición de determinado gas o vapor que lo rodee, debido a chispas o llamaradas en su interior.

Carcasa totalmente cerrada. Envolvente que evita el intercambio de aire entre el interior y el exterior de ella pero que no es lo suficiente mente cerrada para poderla considerar hermética al aire.

Carcasa protegida al temporal. Envolvente abierta cuyos conductos de ventilación están diseñados para reducir al mínimo la entrada de lluvia o nieve y partículas suspendidas en el aire, y el acceso de estas en las partes eléctricas.

Carcasa protegida. Envolvente abierta en la cual todas las aberturas conducen directamente a partes vivas o giratorias, exceptuando los ejes lisos del motor, tienen tamaño limitado mediante el diseño de partes estructurales o parrillas coladeras o metal desplegado etc. Par< evitar el contacto accidental con las parte vivas.

Carcasa a prueba de salpicaduras. Envolvente abierta en la que las aberturas de ventilación están fabricadas de tal modo que si caen partículas de sólidos o gotas de líquidos a cualquier ángulo no mayor de 100° con la vertical no puedan entrar en forma directa o por choque de flujo por una superficie horizontal o inclinada hacia adentro.

Carcasa a prueba de goteo. Envolvente abierta en que las aberturas de ventilación se construye de tal modo que si caen partículas sólidas o gotas de líquido a cualquier ángulo no mayor de 15° con la vertical no pueda entrar ya sea en forma directa o por choque y flujo por una superficie horizontal o inclinada hacia adentro.

Carcasa abierta. Envolvente que tiene agujeros de ventilación que permiten el flujo de aire externo de enfriamiento sobre y alrededor de los devanados de la máquina.

El costo y el tamaño de los motores totalmente cerrados son mayores que el de los motores abiertos, de la misma potencia y ciclo de trabajo y elevación sobre la temperatura ambiente.

4.3 Características de Velocidad y torque de los motores de inducción jaula de ardilla

SELECCIÓN DE VELOCIDADES NOMINALES DE MOTORES DE INDUCCION DE JAULA DE ARDILLA O DE ROTOR DEVANADO.

Dado que el deslizamiento de la mayor parte de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla, a la velocidad nominal en general de alrededor de un 5%, no se pueden alcanzar velocidades mayores a 3600 r.p.m. A 60 Hz, las velocidades son muy múltiplos de los inversos del números de polos en el estator: 1800, 1200, 900, 720 r.p.m. Etc. En general, se prefieren los motores de alta velocidad a los de baja velocidad, de la misma potencia y voltaje, debido a que:

- Son de tamaño menor y en consecuencia de menor peso
- Tienen mayor par de arranque
- Tienen mayores eficiencias
- A la carga nominal, tienen mayores factores de potencia

- Son menos costosos.

Por estas razones se suele dotar de cajas de engranes o embrague a los motores de inducción de jaula de ardilla para permitir velocidades de eje de cerca sobre 3600 r.p.m. y por debajo de 200 r.p.m. En muchos usos o aplicaciones comerciales particularmente en capacidades de menor potencia, la caja de engranes o de embrague va incorporada en la caja del motor, formando unidad integral con este.

EFFECTO DE LA VARIACIÓN DE VOLTAJE SOBRE LA VELOCIDAD DE UN MOTOR DE INDUCIDO DE JAULA DE ARDILLA O DE ROTOR DEVANADO.

Si solo hacemos variar el voltaje del estator no se produce una variación correspondiente en el deslizamiento y la velocidad. Entonces si los demás factores permanecen constantes, el par del motor es directamente proporcional al cuadrado del voltaje. Esto significa que si se aumenta el voltaje en el estator, se produce un aumento mucho mayor en el par y, correspondientemente, una reducción en el desplazamiento, es decir el deslizamiento varía inversamente con el cuadrado del voltaje o en proporción al inverso del par.

Para fines de cálculo, podemos resumir la relación entre par y voltaje de estator como sigue:

En el cual el subíndice "n" representa el nuevo valor.

El subíndice "o" representa el valor original.

El cálculo del deslizamiento con un cambio en el voltaje del estator (y del rotor) es un tanto más complejo, porque el deslizamiento varía también con la resistencia del rotor, el voltaje del estator y/o el par. La relación se puede resumir de la siguiente forma: para la cual se ha definido previamente los símbolos y subíndices.

A la siguiente Figura se muestra el efecto de una reducción en el voltaje del estator sobre la curva característica par- deslizante

De un motor de inducción de jaula de ardilla de propósito general. Al voltaje nominal del estator V_s , el motor entrega el par nominal a un desplazamiento aproximado de 5 %, lo cual se ve en el punto a de la Figura a una reducción del 80 % del voltaje del estator, suponiendo una carga convencional cuyo par varíe con la velocidad, disminuyen tanto el par como la velocidad, con lo cual se tiene un aumento en el deslizamiento, como se muestra en el punto b. Una reducción semejante de voltaje produce tanto la reducción en el par como aumento en el desplazamiento en el punto c. La extrapolación de los puntos a, b, y c produce la línea de carga que aparece punteada para mayores reducciones en el voltaje del estator.

Por tanto si se tiene mayor calentamiento a la menor velocidad, así como una eficiencia reducida, lo cual causa un rápido deterioro en el aislamiento del motor. Por tanto se acostumbra limitar la variación de voltaje sobre el par, el deslizamiento y la velocidad, empleando las ecuaciones 1 y 2.

El siguiente ejemplo muestra que tanto resiste la velocidad de un motor comercial de inducción de jaula de ardilla a un cambio de voltaje en el estator. Como se muestra en la parte (d) de ese ejemplo, cuando se reduce 10 % el voltaje del estator, tan solo produce una disminución de 1.23% en la velocidad!

5. Generador Sincrónico

5.1 Armadura Giratoria

El estator está construido en forma similar al estator de un generador CC, con sus bobinas de campo enrolladas y sujetas a la estructura del estator por piezas de polos. La armadura esta bobinada tal como en un generador CC, excepto que cuenta con anillos deslizantes en lugar de un conmutador. Fig. 102.

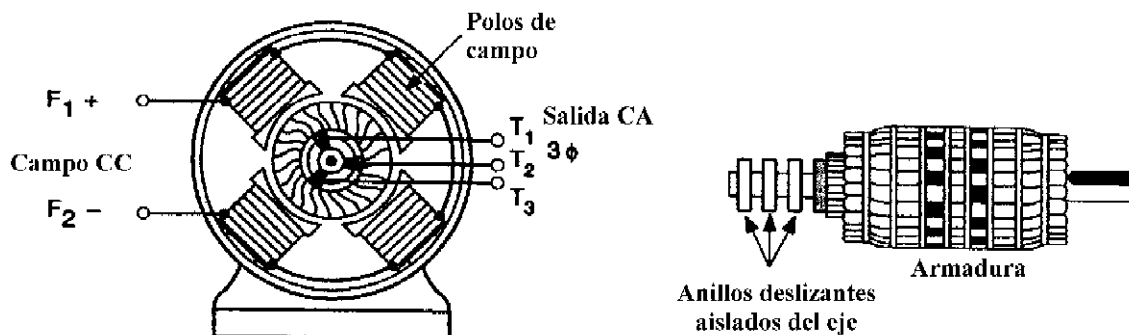


Figura 102

Componentes de un alternador de armadura giratoria.

Este tipo de generador CA no es comúnmente usado. Su limitación fundamental es que su salida de corriente es conducida por medio de contactos deslizantes ubicados en los anillos. Este diseño presenta muchos problemas a valores mayores de voltaje y corriente. En consecuencia, los generadores de armadura giratoria se limitan a aplicaciones de baja corriente y bajo voltaje.

5.2 Campo Giratorio

La mayoría de los alternadores son del tipo campo giratorio, en el cual la estructura de campo giratorio o rotor cuenta con anillos deslizantes y escobillas para entregar la corriente de excitación proveniente de una fuente CC externa. Las bobinas de la armadura son instaladas en ranuras de un núcleo laminado, llamado *estator*. El estator está fabricado con delgadas láminas de acero sujetadas firmemente y mantenidas en su posición en la estructura o marco de acero del generador.

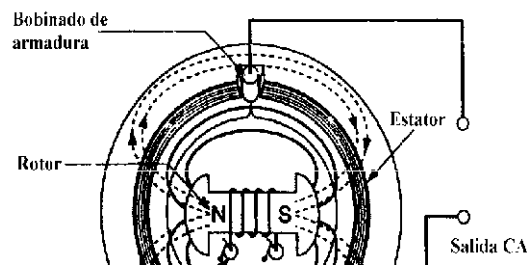


Figura 103

Generador Alterno de Campo Rotatorio

Los anillos deslizantes y las escobillas son adecuados para recibir alimentación desde una fuente externa CC, ya que el nivel de potencia en el campo es mucho menor que aquel del circuito de la armadura.

El alternador de campo giratorio tiene varias ventajas sobre el generador de armadura giratoria:

1. Se pueden generar voltajes tan altos como 13,8 KV, ya que los bobinados de la armadura, al ser estacionarios, no están expuestos a la vibración y otras fuerzas centrífugas.
2. Los rangos nominales de corriente de un alternador pueden ser relativamente altos. Esto se debe a que la salida del alternador va en forma directa (sin el uso de conmutador o anillos deslizantes) desde los bobinados del estator, por medio de cables de gran sección, bien aislados, hacia el circuito externo.

5.3 Construcción del campo rotatorio.

Los alternadores pueden usar dos tipos de estructuras de campo giratorio diferentes: • Polo saliente • Cilíndrico

Polo saliente

El alternador de polo saliente tiene campos de polo proyectados, y es usado con alternadores de baja velocidad (por debajo de 1800 rpm.) Los motores de impulsión típicos para esta clase de alternadores de baja velocidad son las unidades diésel y las turbinas de agua. El motor impulsor es aquel que provee la entrada de energía mecánica al alternador.

La Figura 104 muestra un estator de polo saliente y el rotor usado para un alternador de baja velocidad. Cada polo tiene un campo de hierro laminado para reducir las pérdidas por corrientes parásitas. Los bobinados de campo están montados sobre los polos laminados, y están conectados en serie para entregar polos norte y sur alternados. Dos anillos deslizantes entregan un voltaje bajo de CC desde una fuente externa, con el propósito de magnetizar los polos de campo.

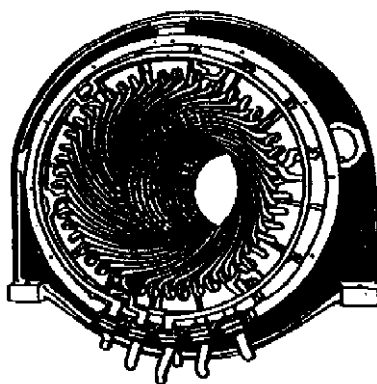
El rotor de polo saliente en la Figura 105(b) muestra las ranuras en cada una de las caras de los polos, en las cuales se instala un bobinado de amortiguamiento (dámper o *amortisseur winding*.) El propósito de este bobinado será discutido más tarde.



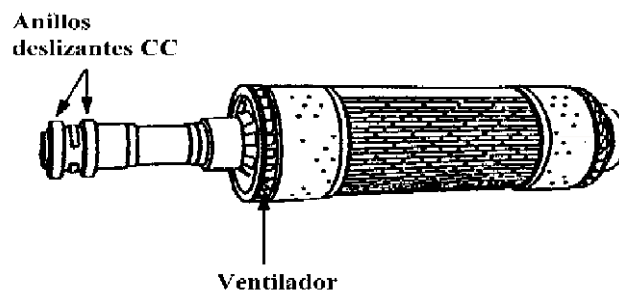
Figura 104
Alternador de polo saliente

Cilíndrico

A menudo se usa una turbina de vapor de alta velocidad para impulsar los alternadores. Pero para alta velocidad es difícil construir un campo rotatorio con polos proyectados lo suficientemente fuerte para soportar las fuerzas centrífugas. Los polos proyectados también causan excesivas pérdidas por resistencia al viento, y hacen el alternador ruidoso. Para superar estas características no deseables, los alternadores que se usan en conjunto con turbinas de vapor son cilíndricos y de tamaño pequeño, con dos o cuatro polos. La Figura 105 muestra el rotor y el estator de este tipo de alternador.



a) ROTOR



b) ROTOR

Figura 105

Alternador cilíndrico

Ya que debe usarse corriente CC en el circuito del campo, todos los alternadores deben contar con una fuente de CC. Esta corriente es típicamente suplida por un generador CC que opera en el mismo eje que el alternador. Este generador CC se denomina excitatriz. Un ejemplo de un alternador *auto-excitado* y su equipo de campo asociado puede observarse en la Figura 106 Hay otras instalaciones donde se requiere de un número de alternadores. En estos casos, la excitación es alimentada desde una barra común por medio de un generador CC y equipo impulsor mecánico independiente.

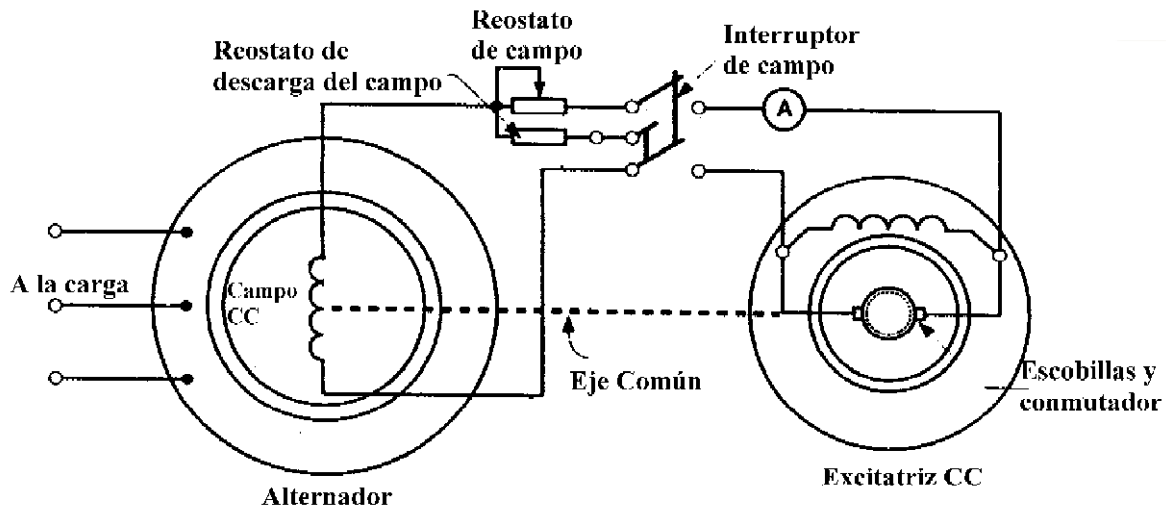


Figura 106

Alternador auto-excitado y sus controles

5.4 Circuito de descarga de campo

Un switch de descarga de campo es usado en el circuito de excitación para eliminar el peligro que representa el alto voltaje inductivo al equipo y las personas, resultante de la apertura del circuito del campo. El switch de descarga del campo tiene un switch de cuchillas auxiliar, el cual está en posición abierta cuando el switch principal está en la posición cerrada. Cuando el switch principal se está abriendo, el switch auxiliar cierra justo antes de que este lo haga. Todos los tipos de alternadores usan tal circuito de campo, o uno que es muy similar. (Figura 106) Una máquina de mayor tamaño podría usar un contactor de campo o un disyuntor de circuito de campo para cumplir el mismo propósito.

Excitatriz sin escobillas (brushless excitors)

La excitación sin escobillas es otro método de excitación del campo usado cuando: Donde hay condiciones ambientales de humedades extremas o explosivas

Donde un bajo nivel de manutención es deseable (este método elimina todo contacto deslizante, y evita los efectos destructivos causados por el arco.

Una característica especial del alternador sin escobillas es el uso de un puente rectificador trifásico de onda completa (Figura 107). Este rectificador va montado en el eje de la maquinaria rotante, y conecta la salida CA de la excitatriz trifásica del alternador rotatorio (exciter *alternator*) al campo rotatorio CC del alternador. El circuito completo de excitación (excitatriz, rectificador, y campo CC) gira como una sola unidad, eliminando la necesidad de anillos deslizantes y escobillas.

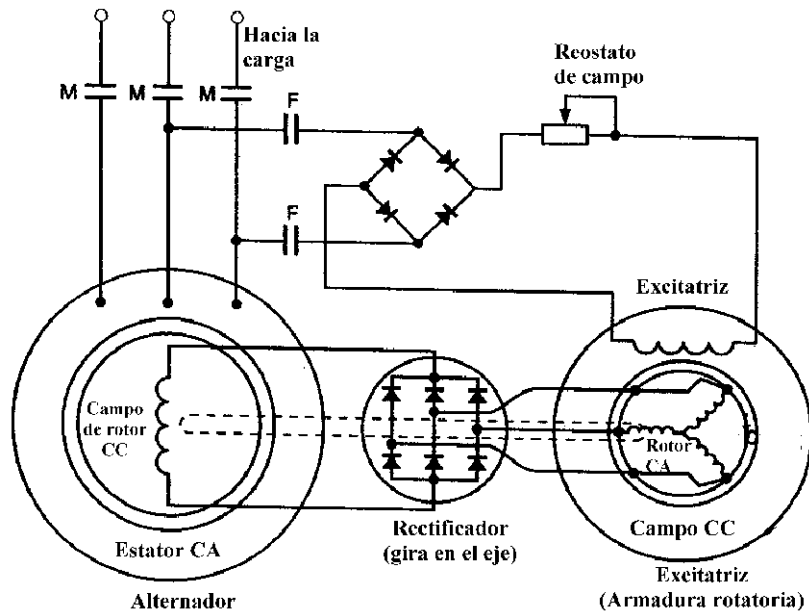


Figura 107

Excitatriz sin escobillas con puente rectificador

La fuente primaria de energía mecánica del alternador es generalmente un motor reciproco (*reciprocating engine*.) Este motor comanda la ensambladura campo-rectificador-excitatriz, mientras que el campo CC estacionario de la excitatriz, energizado desde los terminales de salida del alternador, se acrecienta o fortalece a través del puente rectificador. Un reóstato ubicado en el circuito del campo CC estacionario es usado para ajustar el voltaje de salida de la excitatriz, la cual, en retorno, regula la excitación CC y el voltaje de salida CA del alternador

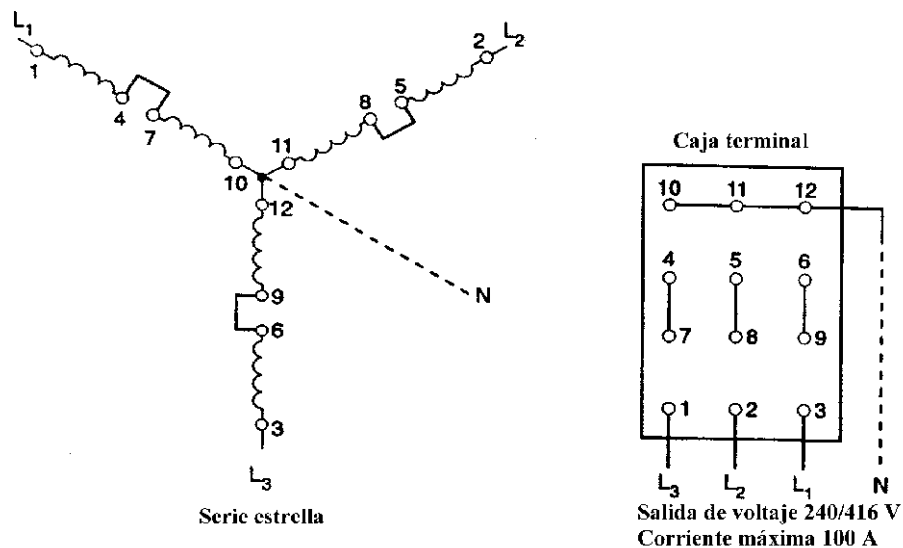


Figura 108
Conexión estrella en serie, voltaje, 240/416 V

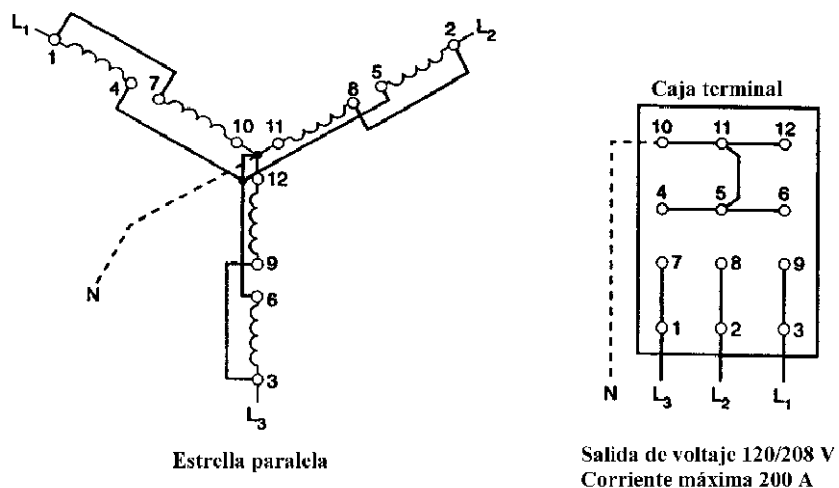


Figura 109
Conexión estrella paralela, voltaje, 120/208 V.

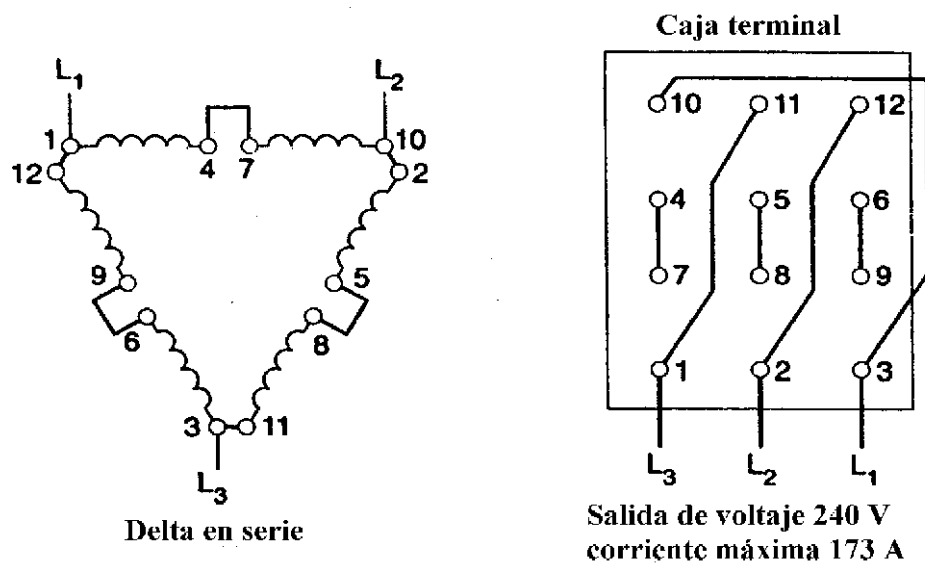


Figura 110
Conexión delta en serie, voltaje, 240 V.

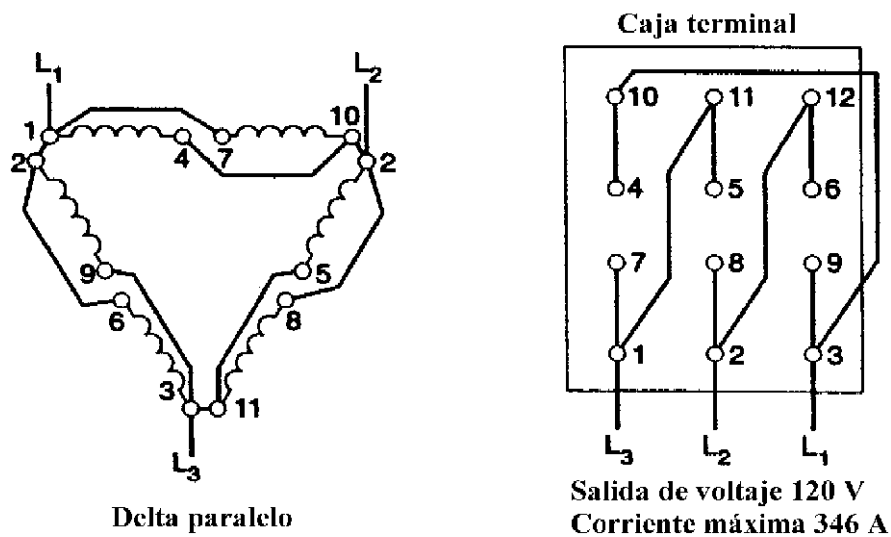


Figura 111
Conexión delta en paralelo, voltaje, 120 V.

Este consciente de ciertas variaciones en las máquinas y sus prácticas de alambrado. Algunas de ellas son:

No todas las máquinas trifásicas en estrella pueden ser reconectadas en delta. Esto se debe a las pequeñas diferencias en las impedancias de las bobinas, las cuales pueden, como respuesta, establecer corrientes circulantes dañinas en el bobinado del estator. (Verifique la placa del alternador, o contacte el fabricante antes de proceder).

El punto estrella no es necesariamente llevado hacia la caja de conexiones en todas las máquinas. Este hecho no evita el ejecutar la conexión en paralelo mostrada en la Figura 109. Los dos puntos de la estrella, si están disponibles, deben conectarse juntos para propósitos de estabilidad del sistema.

Las armaduras de nueve terminales están también comercialmente disponibles para obtener voltajes trifásicos duales. En la configuración estrella esto se logra conectando internamente los terminales 10,11 y 12. En la conexión delta, los terminales 1 y 2 se conectan internamente, así como 2 y 10, y 3 y 11. Eso nos deja con una caja de conexión de nueve terminales.

Características de regulación de la frecuencia y el voltaje

La frecuencia estándar para distribución de energía eléctrica en Norte América es 60 Hz. Europa, Asia y Sur América generalmente operan a una frecuencia de 50 Hz.

Control de la frecuencia

La frecuencia de la fem producida por un alternador depende del número de polos de campo y de la velocidad del rotor. Un ciclo es generado cada vez que un par de polos pasa una bobina. Una fórmula simple para calcular frecuencia es:

$$f = \frac{PN}{120}$$

Dónde:

f = frecuencia en Hz.

P = número de polos del alternador

N = velocidad del rotor en rpm

Las reglas impuestas por las autoridades requieren que las compañías de distribución eléctricas mantengan una frecuencia relativamente constante. La variación máxima permitida es un 3%. En consecuencia, se debe instalar un gobernador en el motor impulsor para mantener la frecuencia requerida (50 Hz. En Chile) bajo condiciones de carga variables.

5.5 Características de la regulación de voltaje

Si no hay una carga conectada al alternador, su voltaje terminal es exactamente el mismo que el voltaje generado, pero cuando se conecta una carga a este, la corriente de la carga fluye a través de las bobinas del estator. Esto hace entrar en escena la impedancia interna del alternador.

Tres factores determinan la impedancia interna:

- La resistencia de los conductores del estator
- La reactancia inductiva de las bobinas del estator
- La reacción de la armadura

Estos factores afectan el voltaje terminal. Como lo hacen depende del factor de potencia de la carga. La Figura 108 muestra los efectos del factor de potencia en el voltaje de salida de un alternador, a un mismo valor de corriente de excitación del campo. A partir de esta información, usted puede ver que tanto la cantidad de carga como el tipo de carga afectan el voltaje de salida.

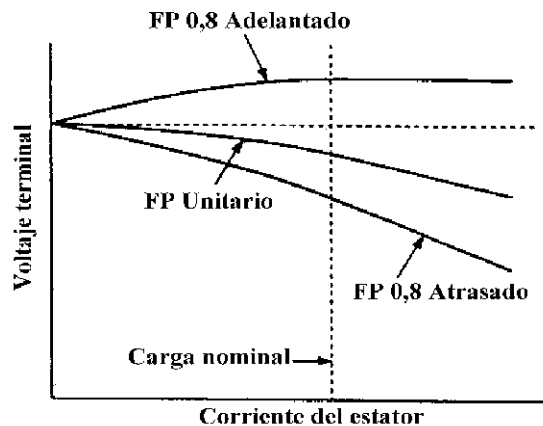


Figura 112

Efectos de la carga y del factor de potencia en el voltaje terminal.

Este cambio en el voltaje terminal, desde condición de plena carga (FL) a sin carga (NL), a velocidad constante y excitación de campo fija, es denominado *porcentaje de regulación de voltaje*.

Porcentaje de regulación de voltaje.

El porcentaje de regulación de voltaje de un alternador es definido como “*el cambio porcentual en el voltaje de salida a medida que la corriente de carga decrece desde plena carga a un valor cero, con velocidad y excitación de campo mantenidas a valores constantes*”

$$\text{porcentaje de regulación de voltaje} = \frac{\text{Voltaje NL} - \text{Voltaje FL}}{\text{Voltaje FL}} \times 100$$

Ejemplo

El voltaje sin carga de cierto generador es 250 V, y su voltaje de plena carga es 220 V.

$$\text{porcentaje de regulación de voltaje} = \frac{250 \text{ V} - 220 \text{ V}}{220 \text{ V}} \times 100$$

$$= 13,6\%$$

Perdidas de voltaje en el estator

En las bobinas de estator de un alternador hay una caída de voltaje provocado por la resistencia efectiva de las bobinas (E_R), y otra caída de voltaje provocado por la reactancia inductiva de las bobinas (E_X). La combinación de estas dos caídas de voltaje es llamada la caída de voltaje por impedancia del estator (E_Z). Para determinar el voltaje inducido en las bobinas del estator (E_G) se debe sumar vectorialmente la caída de voltaje por impedancia en las bobinas del estator al voltaje terminal, como muestra la Figura 113.

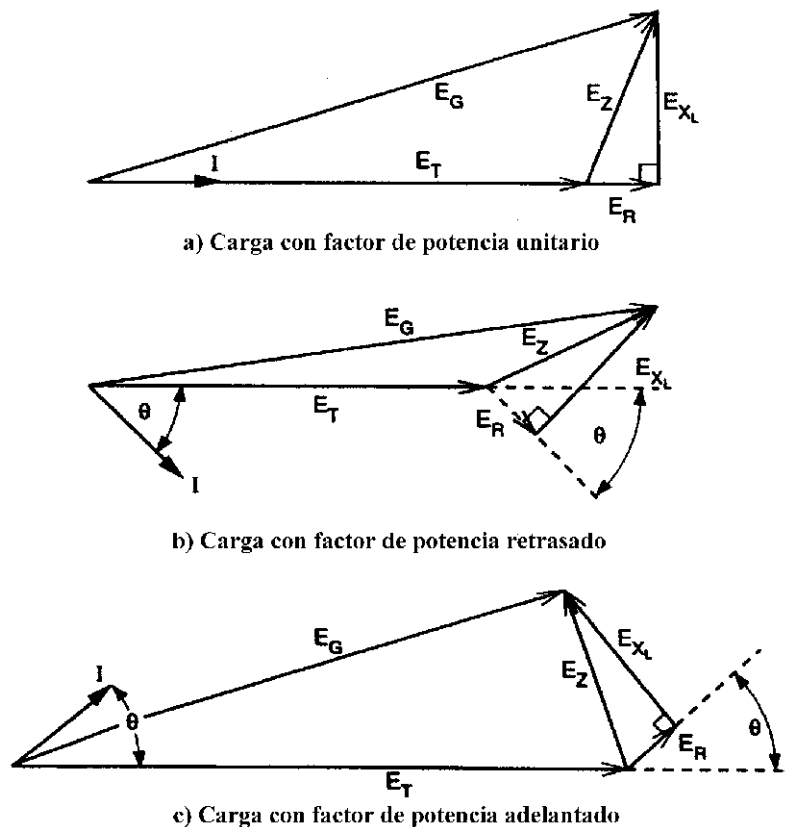


Figura 113

Efecto combinado de la resistencia y reactancia del estator sobre el voltaje de salida del alternador.

Factor de potencia unitario

La Figura 113(a) muestra el diagrama de vectores para un alternador monofásico con factor de potencia unitario. Observe que la bobina del estator es tratada como un circuito serie formado de resistencia y reactancia inductiva, con la corriente de carga (I) usada como línea de referencia.

La corriente de línea está en fase con el voltaje de salida (E_T), y la caída de voltaje (E_R) en las bobinas del estator es provocada por la resistencia. La caída de voltaje (E_{XL}) provocado por la reactancia inductiva de las bobinas del estator se adelanta a la corriente de la carga en 90 grados.

La combinación vectorial de las caídas de voltaje causadas por la resistencia efectiva y la reactancia inductiva es representada como E_Z , o caída de voltaje por impedancia del estator. El resultado neto es que el voltaje terminal (E_T) estará usualmente un 8-20% por debajo de su valor sin carga (E_G)

Factor de potencia retrasado

La Figura 113(b) es un diagrama vectorial para el mismo alternador con una carga a factor de potencia retrasado. La corriente de carga (I) está retrasada respecto del voltaje terminal (E_T) en un ángulo θ (theta). La caída de voltaje por impedancia (E_Z), resultante de E_R y E_{XL} , se suma vectorialmente al voltaje inducido (E_G) para obtener el voltaje terminal (E_T). El diagrama vectorial muestra que cuando la corriente se retrasa al voltaje terminal, el pequeño triángulo de impedancia se desplaza en dirección del sentido del reloj, y da como resultado un voltaje terminal reducido. Un factor de potencia retrasado causará que el voltaje terminal de un alternador caiga un 25-50% por debajo de su valor sin carga (E_G)

Factor de potencia adelantado

En la Figura 113(c) tenemos un ejemplo con la corriente de carga adelantándose al voltaje terminal por un ángulo θ (theta). La relación de fase entre la caída de voltaje por impedancia del estator (E_Z) y el voltaje inducido (E_G) causará que el voltaje terminal (E_T) sea mayor que el voltaje inducido (E_G). A medida que aumenta el ángulo de avance entre la corriente de línea y el voltaje terminal, el triángulo de impedancia del estator se mueve en contra del sentido del reloj, haciendo la magnitud del voltaje terminal mayor para el mismo valor de voltaje inducido.

Reacción de la armadura

Otro factor que afectará la salida de voltaje de un alternador es la reacción de la armadura. A factor de potencia unitario, la reacción de la armadura consiste de una distorsión mínima del flujo del campo principal.

Cuando un alternador opera a un factor de potencia retrasado, una fuerza magneto motriz (fmm) es generada por la corriente en los conductores del estator, la cual se opone a la fuerza de magnetización del campo principal, y causa una disminución en el

flujo del campo principal. Esto, como resultado, resulta en una *disminución del voltaje inducido*. Mientras más bajo sea el factor de potencia retrasado, mayor será la fmm del estator, la que se opondrá y debilitará el campo (Figura 114).

En las escasas ocasiones en que un alternador alimenta una carga con factor de potencia adelantado, la corriente del estator establece una fmm en el estator que ayuda la fmm del campo principal, y causa un incremento del flujo del campo principal. En consecuencia, el voltaje del alternador aumentará con un aumento en la corriente de la carga. Mientras más bajo sea el valor del factor de potencia adelantado, mayor será la ayuda del estator al campo principal para lograr un aumento del flujo del campo principal. Exactamente cuánto subirá o caerá el voltaje terminal dependerá de:

La magnitud de la carga

El factor de potencia actual de las cargas combinadas.

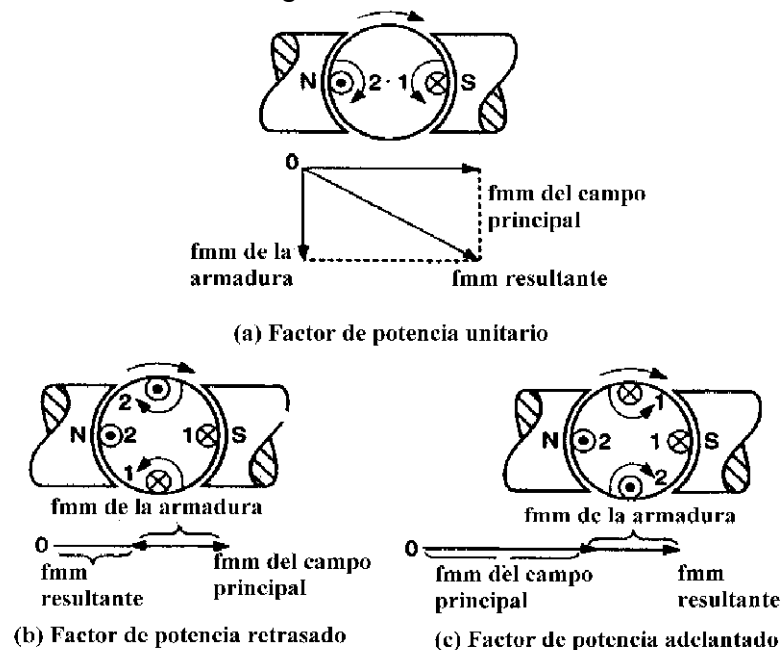


Figura 114

En general:

A mayor carga, mayor el incremento o caída

A menor FP retrasado, mayor será la caída de voltaje

A menor FP adelantado, mayor será la subida de voltaje Control de voltaje automático

Control de Voltaje Automático

Los efectos combinados de la reactancia de la armadura y la reacción de la armadura causan un cambio considerable en el voltaje de salida de un alternador a medida que cambian la corriente y el factor de potencia de la carga. Para mantener un voltaje de salida relativamente constante a diferentes condiciones de carga, se usan los reguladores de voltaje automáticos.

Ellos cambian la corriente de campo del alternador para compensar los cambios en la corriente de carga. Por ejemplo, si el voltaje de salida disminuye, el regulador percibe este cambio y aumenta la corriente del campo. Este aumento en la corriente de campo causa un incremento en el flujo del campo y en el voltaje inducido, de esta manera, el voltaje de salida CA retorna a su valor original.

Mantenión de Motores

Rutinas de Mantenimiento

Medir Calidad de Aislación

Diagnosticar Condiciones de Malla de Tierra

Medida de Resistencia de Aislamiento

Canalizar Montaje Alimentación Motores

Ejecutar la Recepción Técnica de la Obra

Medición Deslizamiento y Calidad de Funcionamiento

Actividad N°5

Introducción a la actividad

Un aspecto importante de la operación del motor de CD, es el contra-fem; el voltaje inducido en el devanado de la armadura debido a que este corta por el campo magnético del estator. Contra-fem se opone a la fuente de FEM; por eso, la corriente que pasa por el devanado de la armadura, es una función debido a la diferencia entre la fem y la contra-fem, o CFEM. Si el voltaje aplicado o la fuente de fem se aumenta, la corriente por la armadura también aumentará y además la velocidad del motor. La cfem es causada por la corriente que pasa por las bobinas de la armadura, cortando por el campo magnético entre los polos del estator.

Estrategias metodológicas para el instructor.

Las estrategias son los procedimientos y/o recursos utilizados para promover el aprendizaje a través de las actividades.

Recurso Plataforma Web	✓
Explicación demostrativa en aula	✓
Recurso Audiovisual	✓
Propuestas de situaciones problemáticas	
Formulación de Preguntas	
Taller de Trabajo	✓

Objetivos del aprendizaje

- Localizar la posición neutra de las escobillas.
- Conocer las conexiones básicas del motor.
- Observar las características de operación de motores conectados en serie y en derivación.

Descripción de la actividad

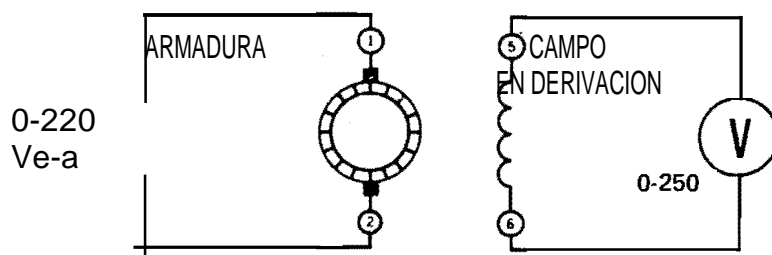
- El instructor podrá realizar esta actividad en grupos o en pares.
- Solicitará a los participantes que observen y cumplan con todas las medidas de seguridad para la tarea.
- Solicitará a los participantes que realicen la recolección de datos de la actividad a realizar.

Materiales y recursos

- Módulo de fuente de energía (0-220 Vc-a, 220 Vc-a, 0-220 Vc-a)
- Módulo de motor/generador de CD
- Módulo de medición de CA (0-250 V)
- Módulo de medición de CD (0-400 V)
- Tacómetro de mano
- Cables de conexión

COMO ENCONTRAR LA POSICION NEUTRA

O I. Ahora se utilizará corriente alterna para determinar la posición neutra de las escobillas del motor de C-d. Con los Módulos EMS de Fuente de Energía, de medición de c-a y de motor/ generador de c-d, conecte el circuito que aparece en la Figura . Las terminales 4 y 5 de la fuente de alimentación proporcionarían un voltaje variable de 0-220 V c-a, conforme se hace girar la perilla de control de la salida de voltaje.



Desprenda el módulo de motor/generador de CD y adelántelo aproximadamente 10 cm. Meta la mano detrás de la placa delantera del módulo y mueva la palanca de ajuste de la escobilla hasta el extremo máximo en el sentido de las manecillas del reloj. No vuelva a poner el modulo en su lugar (tendrá que mover de nuevo las escobillas).

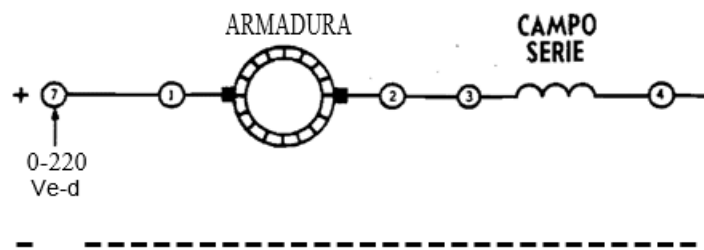
Conecte la fuente de energía; coloque en la posición de c-a el conmutador del voltímetro de la fuente de energía y mueva lentamente hacia adelante la perilla de control de la salida del voltaje hasta que el voltímetro de c-a conectado al devanado de campo en derivación indique aproximadamente 150 Vc-a. (El voltaje de c-a en el campo en derivación se induce por acción de la corriente alterna que atraviesa la armadura).

- a) Meta cuidadosamente la mano detrás de la cara frontal del módulo (cuidando de mantener la otra en el bolsillo) y mueva las escobillas de una posición extrema a la otra. Observara que el voltaje de c-a inducido a través del campo disminuye a cero y luego aumenta nuevamente conforme se llega a la otra posición extrema, siguiendo el sentido contrario al de las manecillas del reloj.

- b) Deje las escobillas en la posición en donde el voltaje inducido es cero. Este punto corresponde al plano neutro del motor/generador de CD. Cada vez que use el motor/generador de CD, las escobillas deben ajustarse a la posición neutra.
- c) Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de energía. Vuelva a colocar el modulo del motor/generador de CD en su lugar y desconecte el circuito.

Conexiones del motor en serie

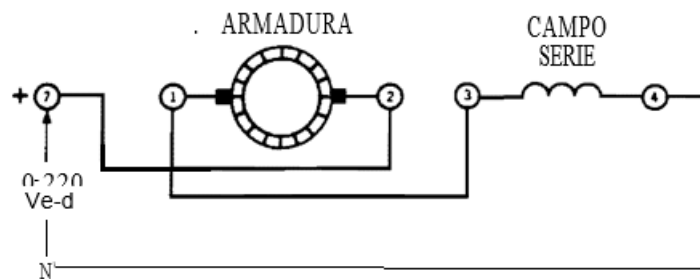
Con los módulos EMS de fuente de energía, de medición de CD y del motor generador de CD, conecte el circuito ilustrado en la Figura. Observe que la armadura está conectada en serie con el devanado de campo en serie, a través del voltaje de entrada.



Conecte la fuente de energía y nuevamente ponga en la posición de c-d el conmutador del voltímetro de la fuente de energía. Ajuste el voltaje de salida a 220 Vc-d.

- a) ¿Gira el motor rápidamente? si
- b) Use el tacómetro manual y mida la velocidad del motor en revoluciones por minuto.
Velocidad en serie = 4.850 r/min
- a) Reduzca el voltaje de la fuente de energía y observe el efecto que se produce en la velocidad del motor. Observaciones:
Al reducir el voltaje de la fuente, se reduce la velocidad del motor.
- b) Reduzca el voltaje hasta que pueda determinar la dirección de rotación (en el sentido de las manecillas del reloj o contrario a este)
Rotación = ESMR
- c) Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.

Vuelva a conectar el circuito de la Figura (El único cambio hecho en relación con el circuito de la Figura, es que las conexiones a la armadura quedaron invertidas.)



Repita los procedimientos 6 al 8 (con las conexiones de la armadura invertidas que se indican en la Figura)

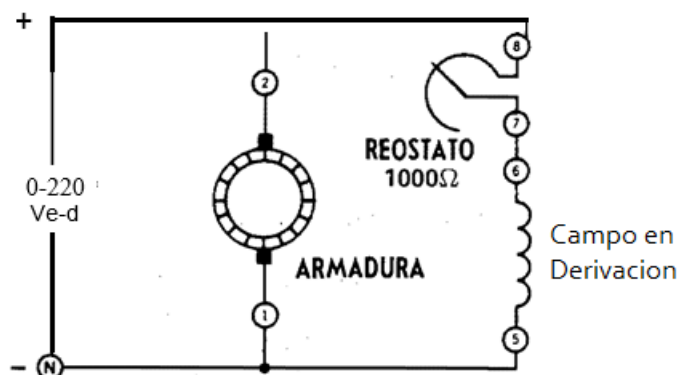
Velocidad en serie (inversión) = 5000 r/min

Rotación = ESCMR

Escriba una regla para cambiar la dirección de rotación de un motor de c-d en serie. La dirección de rotación es invertida si las conexiones de la armadura son invertidas.

Conexiones del motor en derivación

Conecte el circuito que aparece en la Figura. Observe que el reóstato está en serie con el campo en derivación y que esta combinación se conecta en paralelo con la armadura a través del voltaje de entrada.



- Ajuste el reóstato a la resistencia mínima (aproximadamente cero ohm cuando se hace girar a la posición extrema en el sentido de las manecillas del reloj).
- Conecte la fuente de energía y ajústela a 220 Vc-d.
- Mida la velocidad del motor con el tacómetro.
Velocidad en derivación (cero ohm) = 1115 r/min
- Ajuste el reóstato a la resistencia máxima (aproximadamente 1000 ohm) = 2000 r/min.
- Determine la dirección de rotación.
Rotación = ESMR

- a) Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de energía.
- b) Invierta la polaridad del voltaje de entrada intercambiando solo los cables de conexión de la fuente de energía.

Repita el procedimiento tanto y compare los resultados:

- a) ¿cambio la rotación de dirección? no
- b) ¿vario la velocidad? No
- c) Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.

Intercambie los cables de conexión que van a la fuente de energía. El circuito debe quedar igual al que se ilustra en la Figura. Ahora invierta solo las conexiones de la armadura.

Repita el procedimiento tanto y compare la dirección de rotación con la que se encontró en el procedimiento tanto.

Rotación = ESCMR

- a) Mientras el motor siga funcionando, abra momentáneamente el circuito del campo en derivación, quitando el cable de conexión de una de las terminales del devanado de campo en derivación (5 o 6). Tenga mucho cuidado de no tocar ninguna de las otras conexiones de las terminales ni ningún metal mientras efectué este procedimiento. Este listo para cortar inmediatamente la energía aplicada al motor desconectando la fuente de alimentación.

- b) Explique lo que sucede cuando en un motor de c-d se pierde la alimentación al campo en derivación.

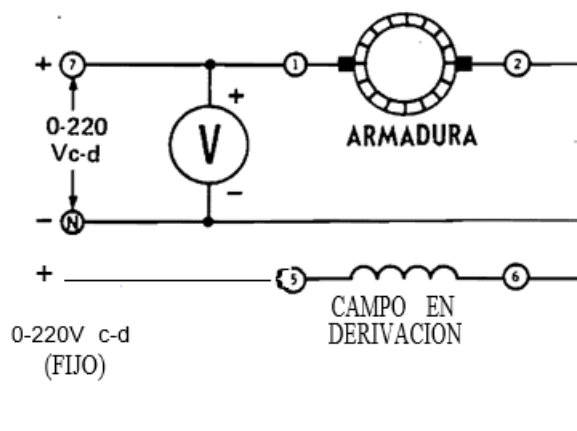
La CFEM se baja debido a la pérdida del campo magnético causando un aumento de la corriente por la armadura, y esto causa aumento de velocidad.

- c) ¿puede ocurrir lo mismo en un motor de c-d conectado con el campo en serie?

No

Explique por qué **Removiendo la potencia del campo también remueve la potencia de la armadura y esto parara el motor.**

Conecte el circuito de la Figura tanto. Observe que la armadura está conectada a la salida variable de 0-220 Vc-a (terminales 7 y N), en tanto que el campo en derivación está conectado a la salida fija de 0-220Vc-d (terminales 8 y N).

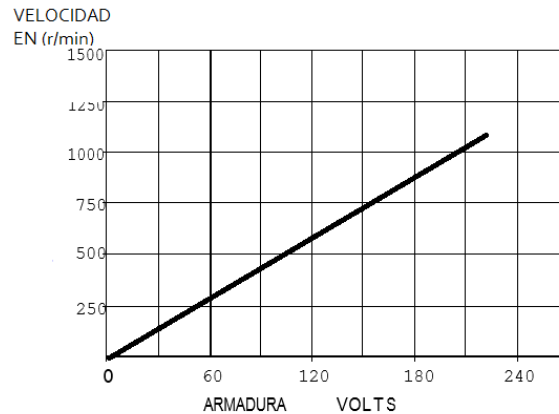


- Conecte la fuente de energía y ajuste el voltaje de la armadura a 60 Vc-d, guiándose por las lecturas que del medidor.
- Use el tacómetro manual para medir la velocidad del motor. Anote en la Tabla las mediciones de velocidad. (Espere hasta que la velocidad del motor se estabilice antes de efectuar la medición).

TABLA

E (VOLTS)	0	60	120	180	220
SPEED (r/min)	0	300	600	900	1110

- Repita (b) para cada uno de los valores de voltaje que se indican en la tabla.
- Marque los puntos obtenidos en la tabla, en la gráfica ilustrada en la Figura . luego trace una línea continua por los puntos marcados.
- ¿es un buen método de control de velocidad el hacer que varié el voltaje de la armadura (manteniendo constante el voltaje del campo en derivación)?



PRUEBA DE CONOCIMIENTOS

1. Explique cómo se localiza la posición neutra de las escobillas en un motor de c-d.
Con CA aplicada a la armadura, ajuste las escobillas para inducir cero CA en la bobina de derivación.
2. ¿Giraría el motor si solo se excitara la armadura (se le aplicara un voltaje)?
No (vea las notas)
3. ¿Por qué es peligroso aplicar energía a un motor de c-d en serie, sin ninguna carga?
El motor puede acelerar y destruirse a sí mismo (vea las notas).
4. ¿Cuáles son las dos formas en que se puede invertir la rotación de un motor de c-d conectado en derivación?
Intercambio de las conexiones de la armadura
Intercambio de las conexiones del campo
(Vea las notas)
5. ¿Por qué se necesitan detectores de pérdida de campo en motores grandes de c-d?
Para prevenir la velocidad excesiva del motor y posible destrucción.
6. En el procedimiento :
 - a) ¿se duplica la velocidad del motor cuando se duplica el voltaje de la armadura? Si
 - b) ¿sería correcto afirmar que “con un voltaje fijo de campo, la velocidad de un motor en derivación es proporcional al voltaje de la armadura? Si
Explique por qué: con la excepción de las pérdidas, la velocidad del motor varía directamente con el voltaje de la armadura.
7. ¿Cuáles son las dos formas en que se puede variar la velocidad de un motor de c-d?
 - a) Varié el voltaje del campo en derivación.
 - b) Varié el voltaje de la armadura.
8. De los dos métodos dados en (7):
 - a) ¿Cuál de los dos da el mayor rango de velocidad? (b) (vea las notas)
 - b) ¿Cuál es el más económico (utiliza menos partes)? (a)

Cierre

- Es importante recordar siempre que en los motores de Corriente continua asegurar la “conectividad del CAMPO” ya que si esta se pierde el motor se puede dañar.
- Todas las conmutaciones siempre se recomiendan por el lado la ARMADURA (Inversiones de giro).
- También es importante mantener en buen estado el sistema del conmutación, plano neutro y evitar anomalías que puedan ocasionar “flashover”
- Con un buen mantenimiento y controlando los parámetros de funcionamiento un motor DC, se convierte en un dispositivo confiable.



Consejo Minero
Dirección: Apoquindo 3500, Piso 7, Las Condes, Santiago.
Teléfono: (562) 2347 2200
www.ccm.cl

