

Figura 8.28 Paralelo de transformadores "conexión incorrecta"

$$U_{2A} + U_{2B} \neq 0$$

Quiere decir que previamente a efectuar la instalación debemos conocer los bornes con igual polaridad instantánea, o sea lo que se suele llamar "bornes homólogos", para conectar los mismos entre sí.

Los transformadores traen indicados dichos bornes mediante una letra, pero en el caso de tener que individualizarlos se puede recurrir al siguiente método, mediante el uso de 3 voltímetros, uno que mide la tensión del primario, otro la tensión del secundario y un tercero que mide la tensión entre dos bornes uno del primario y otro del secundario, cortocircuitando los otros dos según se muestra en la figura 8.29

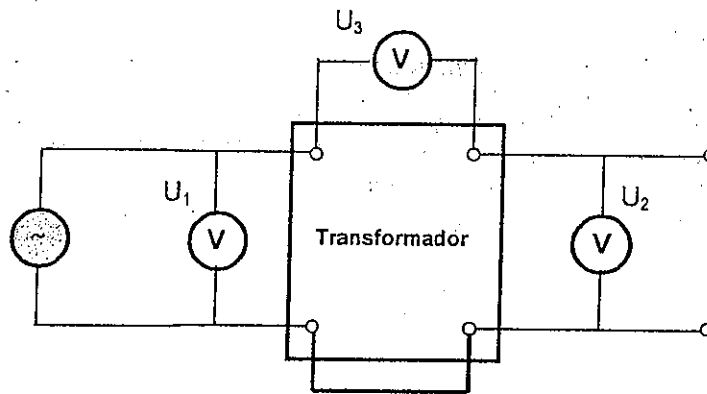


Figura 8.29 Esquema para determinar la polaridad de un transformador

Si $U_3 = U_1 - U_2$ los bornes marcados con un punto son homólogos (Fig. 8.30)

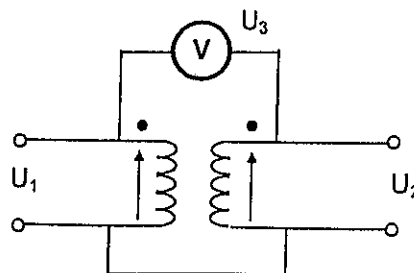


Figura 8.30 Voltímetro conectado en bornes de igual polaridad instantánea

Si $U_3 = U_1 + U_2$ los bornes marcados con un punto son homólogos (Fig. 8.31)

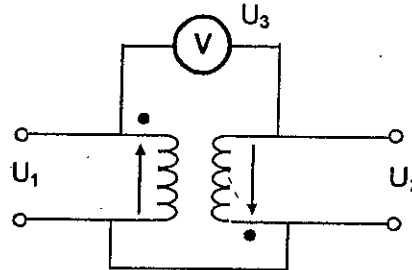


Figura 8.31 Voltímetro conectado en bornes de distinta polaridad instantánea

Distribución de la carga de dos transformadores en paralelo

De acuerdo a la figura 8.27, y reemplazando los transformadores por su circuito equivalente reducido nos queda el esquema de la figura 8.32

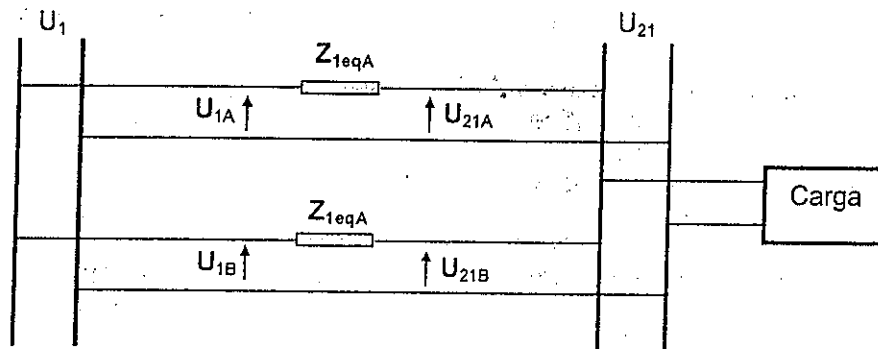


Figura 8.32 Paralelo de transformadores representado por sus impedancias internas

De la figura observamos que las dos impedancias internas de los transformadores quedan en paralelo, con lo cual el esquema anterior se puede dibujar según la figura 8.33., en la cual se han colocado las corrientes en la carga y en los transformadores.

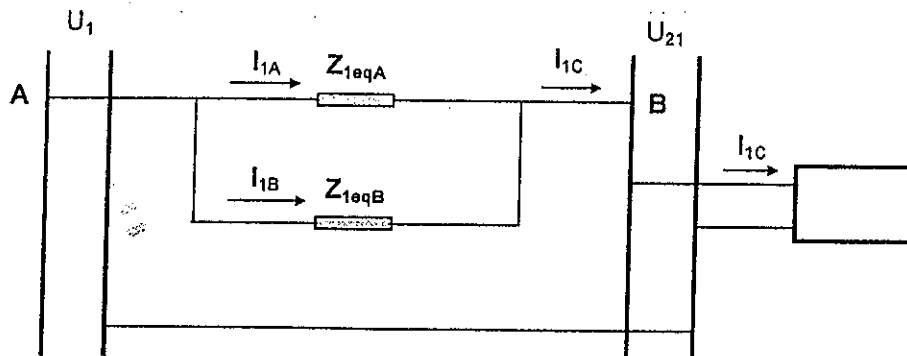


Figura 8.33 Paralelo de transformadores representado por sus impedancias internas en forma simplificada

Entre A y B la diferencia de potencial está dada por:

$$U_{AB} = Z_{1eqA} I_{1A} = Z_{1eqB} I_{1B} \quad \text{o también:}$$

$$U_{AB} = \frac{Z_{1eqA} \cdot Z_{1eqB}}{Z_{1eqA} + Z_{1eqB}} I_{1C}$$

Resolviendo estas ecuaciones nos queda:

$$I_{1A} = \frac{Z_{1eqB}}{Z_{1eqA} + Z_{1eqB}} I_{1C}$$

$$I_{1B} = \frac{Z_{1eqA}}{Z_{1eqA} + Z_{1eqB}} I_{1C}$$

La potencia aparente de cada transformador es:

$$S_A = U_1 \cdot I_{1A} = U_1 \frac{Z_{1eqB}}{Z_{1eqA} + Z_{1eqB}} I_{1C}$$

$$S_B = U_1 \cdot I_{1B} = U_1 \frac{Z_{1eqA}}{Z_{1eqA} + Z_{1eqB}} I_{1C}$$

Relacionando ambas ecuaciones nos queda:

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{Z_{1eqB}}{Z_{1eqA}}$$

Esto nos indica que las potencias que van a entregar los transformadores, están en relación inversa con sus impedancias.

Otro punto a tener en cuenta, es que para que las corrientes estén en fase y tengan el mínimo valor, se debe cumplir:

$$\frac{R_{1eqA}}{X_{1eqA}} = \frac{R_{1eqB}}{X_{1eqB}}$$

En la figura 8.34, se analizan ambas situaciones:

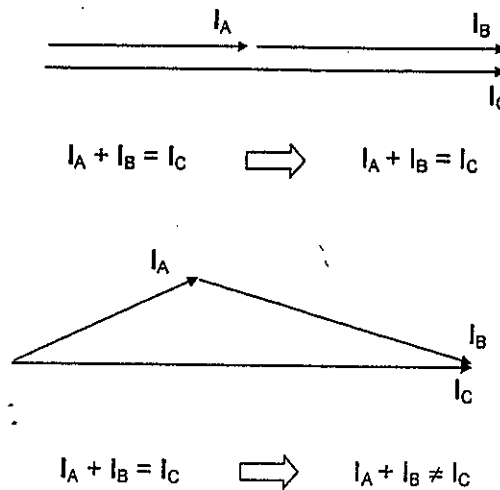


Figura 8.34 Análisis de la sumatoria de las corrientes de cada transformador

De cumplirse las situaciones analizadas, los transformadores se repartirán la carga con el mismo factor de carga.

De no cumplirse las dos últimas relaciones, la potencia con que contribuye cada uno, puede dar lugar a que uno de ellos se pueda sobrecargar, aunque la suma de potencias que entregan, no supere la suma de las potencias nominales de las unidades.

Transformadores en paralelo con distinta relación de transformación

Cuando la relación de transformación no es igual en ambos transformadores, la tensión de los secundarios es de distinto valor en cada uno, ya que la del primario está impuesta por el sistema de alimentación. En este caso aunque no haya carga, va a existir una corriente de circulación entre los transformadores, que estará limitada por la impedancia interna de los mismos.

En la figura 8.35 se muestra esta situación, y en la misma se encuentran graficados los transformadores, con su impedancia interna reducida al secundario.

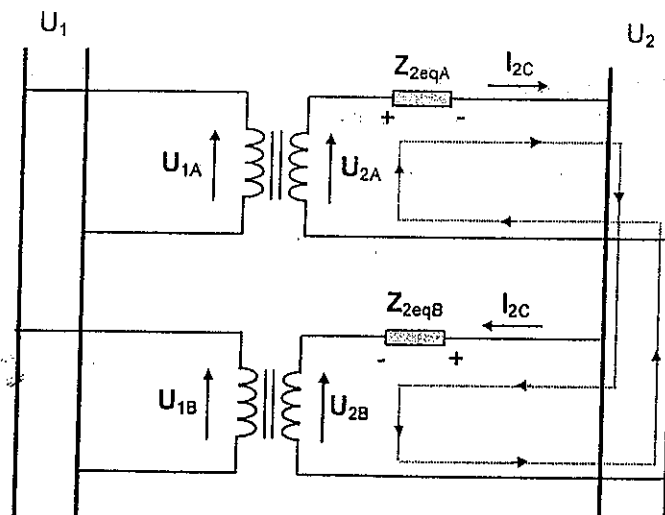


Figura 8.35 Paralelo de transformadores con distinta relación de transformación

Haciendo una circulación como la indicada, y sumando los potenciales nos queda:

$$U_{2A} - Z_{2eqA} I_{2C} - Z_{2eqB} I_{2C} - U_{2B} = 0$$

$$I_{2C} = \frac{U_{2A} - U_{2B}}{Z_{2eqA} + Z_{2eqB}}$$

Vemos que si las tensiones, son iguales, la corriente de circulación es cero.

La tensión en vacío de salida del paralelo, será un valor intermedio entre ambas tensiones de acuerdo a:

$$U_2 = U_{2A} - Z_A I_{2C} = U_{2B} - Z_B I_{2C}$$

De esta manera, cuando se establezca la carga, aquel transformador cuya tensión de salida sea mayor, sumará su corriente a la de carga y en el otro será la diferencia, con lo cual el primero puede llegar a trabajar sobrecargado. Un esquema circuital equivalente se muestra en la figura 8.36, tal que los transformadores están representados por una fuente en serie con su impedancia interna.

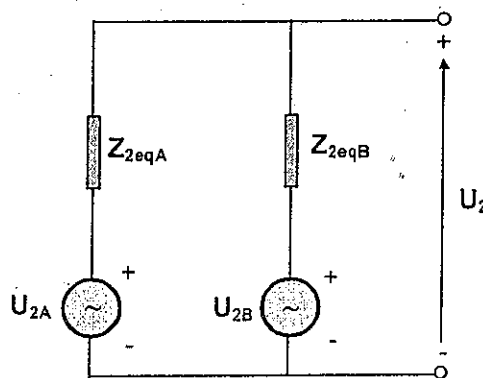


Figura 18.35 Esquema circuital de dos transformadores en paralelo

Resumiendo, para que se puedan instalar dos transformadores en paralelo, se debe cumplir:

- Igualdad de tensión primaria y secundaria.
- Conexión de bornes homólogos entre sí
- Relación de potencia aparentes, inversamente proporcional a la relación de las impedancias
- Igual relación resistencia reactancia.

Dado que las dos últimas condiciones son de difícil cumplimiento, debido a que los transformadores pueden ser de distintos fabricantes, o de distinto año de fabricación, se debe prever que la suma de las potencias de los transformadores sea superior a la del consumo.

8.3 Transformadores trifásicos

A partir de ciertas potencias, los transformadores son trifásicos, pudiéndose armar un conjunto o "banco" trifásico, mediante el uso de tres transformadores monofásicos o bien un solo transformador trifásico, el cual se forma mediante un núcleo magnético y las bobinas necesarias para armar tres fases, tal como se observa en la figura 8.37

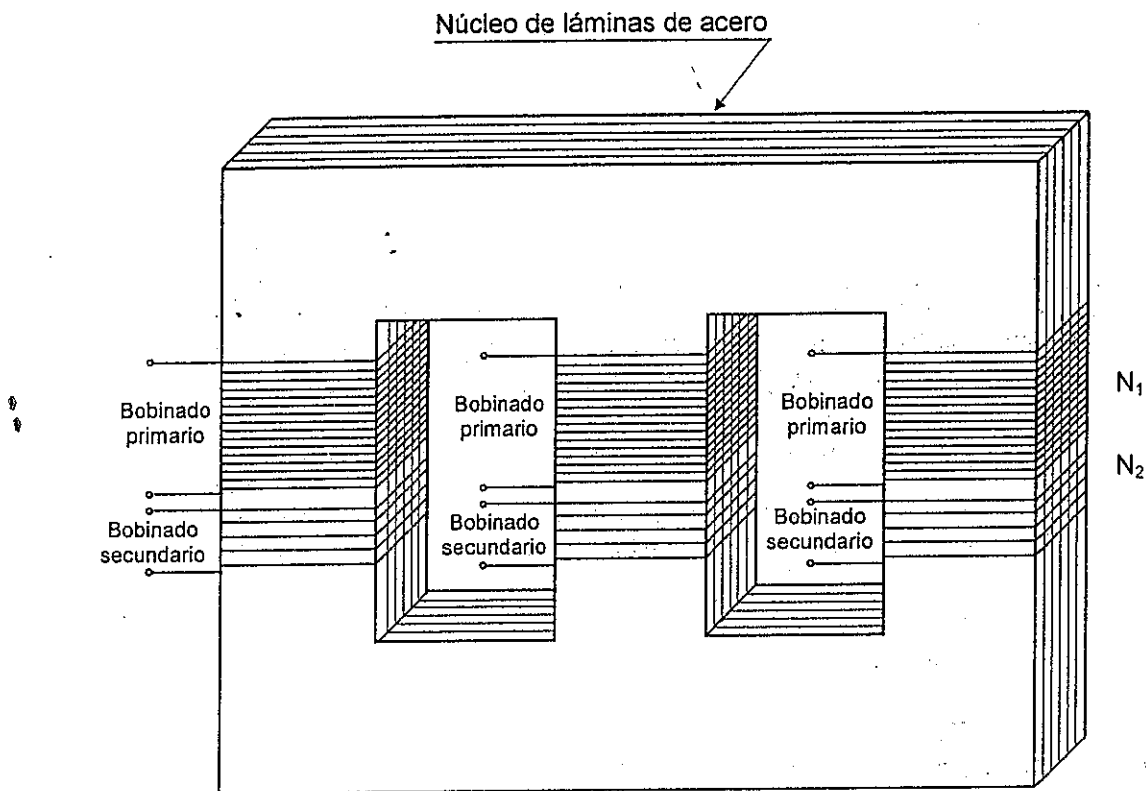


Figura 8.37 Esquema de un transformador trifásico

De acuerdo a este esquema, las bobinas tanto primarias como secundarias, pueden ser conectadas en forma de estrella ó triángulo, con lo cual se obtienen diferencias de fase entre las tensiones primarias y secundarias.

8.3.1 Conexiones normalizadas

De acuerdo a la forma en que se conectan los bobinados, los conjuntos trifásicos, están definidos por un grupo de conexión que los identifica mediante una nomenclatura que se determina por dos letras y un número según el siguiente detalle:

- La primera letra **mayúscula**, define la forma de conexión de los bobinados de **alta tensión**, la cual puede ser **D** (Triángulo) o **Y** (Estrella).
- La segunda letra **minúscula**, define la forma de conexión de los bobinados de **baja tensión**, la cual puede ser **d** (Triángulo) o **y** (Estrella).
- El número multiplicado por 30, define el ángulo de desfasaje entre las tensiones de fase equivalentes de alta y baja tensión.

Las conexiones normalizadas más utilizadas pertenecen a los grupos **0** (0°), **5** (150°), **6** (180°) y **11** (330°)

Grupos de conexión 0

Por ejemplo si conectamos los bobinados de alta y baja tensión en estrella de acuerdo al esquema de la figura 8.38.

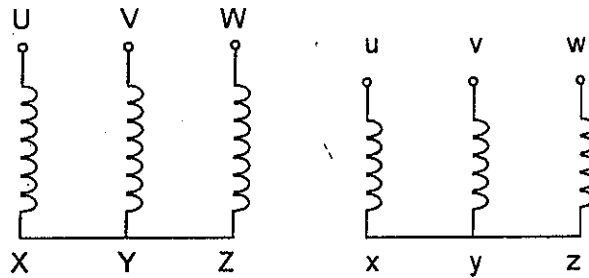
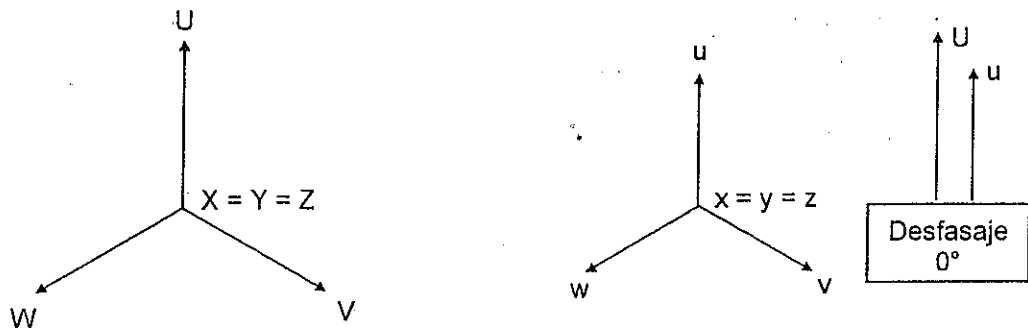


Figura 8.38 Conexión de los bobinados en estrella en alta y baja tensión

Los fasoriales correspondientes son los de la figura 8.39, los cuales se ejecutan teniendo en cuenta que cada tensión de fase del lado de baja tensión se corresponde con el de alta tensión, de acuerdo a las polaridades indicadas por las letras correspondientes.



Grupo de conexión Y y 0

Figura 8.38 Diagramas fasoriales para conexión estrella – estrella

En forma análoga en la figura 8.40 se conectan ambos bobinados en triángulo y en la figura 8.41 se muestran los fasoriales correspondientes.

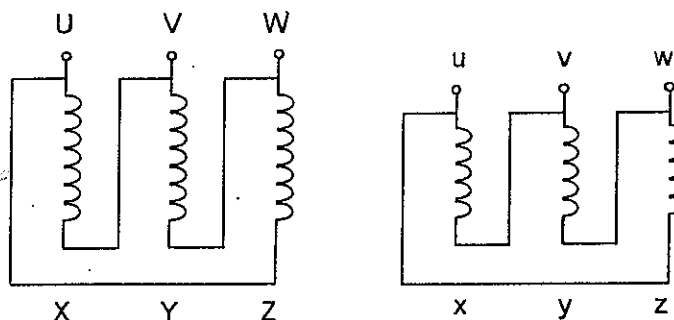


Figura 18.40 Conexión de los bobinados en triángulo en alta y baja tensión

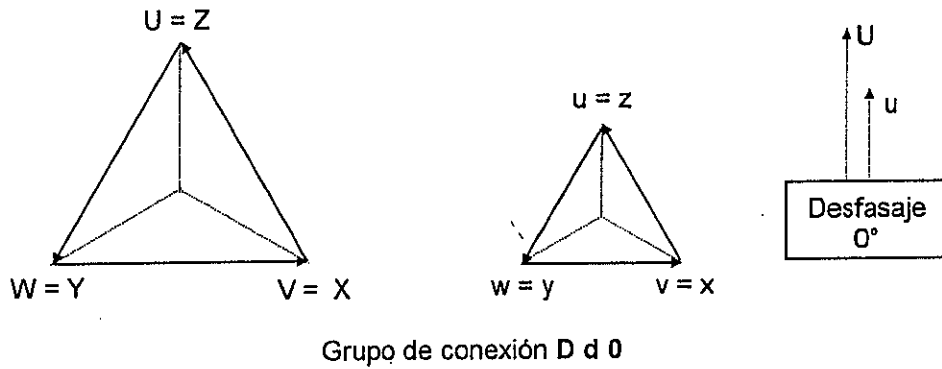


Figura 8.41 Diagramas fasoriales para conexión triángulo – triángulo

Grupos de conexión 5

En las figuras 8.42 y 8.43 se analizan las conexiones triángulo estrella con sus fasoriales, para este tipo de grupo.

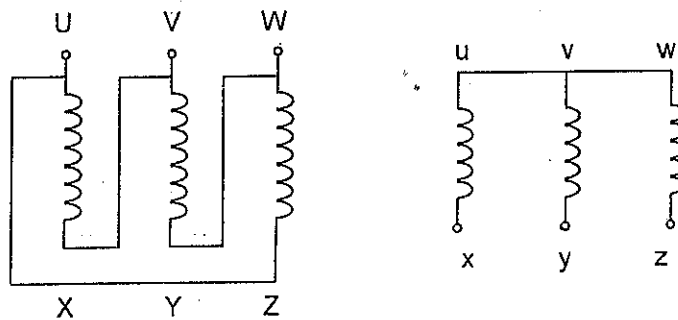


Figura 8.42 Conexión de los bobinados en triángulo del lado de alta y estrella del lado de baja tensión

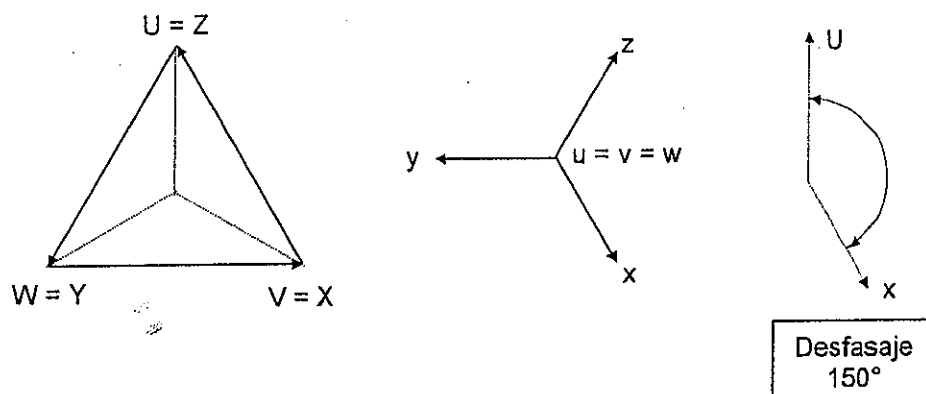


Figura 8.43 Diagramas fasoriales para conexión triángulo - estrella

En las figuras 8.44 y 8.45 se analizan las conexiones y fasoriales para el caso de los bobinados conectados en estrella triángulo.

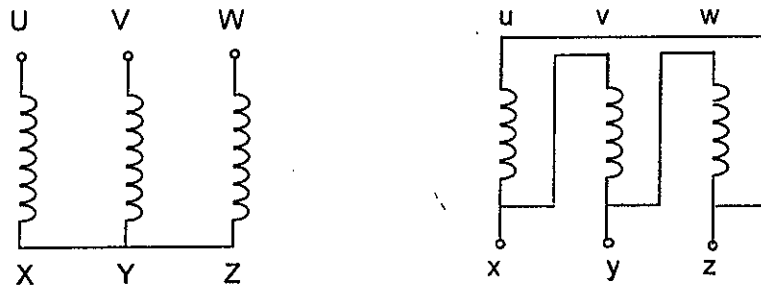
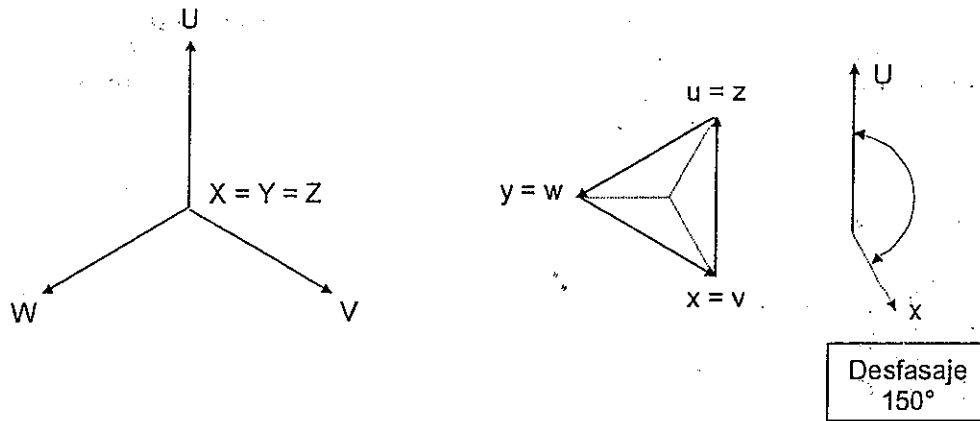


Figura 8.44 Conexión de los bobinados en estrella del lado de alta y triángulo del lado de baja tensión



Grupo de conexión Y d 5

Figura 8.45 Diagramas fasoriales para conexión estrella - triángulo

Grupos de conexión 6

En las figuras 8.46 y 8.47 se analizan las conexiones y fasoriales para el caso de los bobinados conectados en estrella.

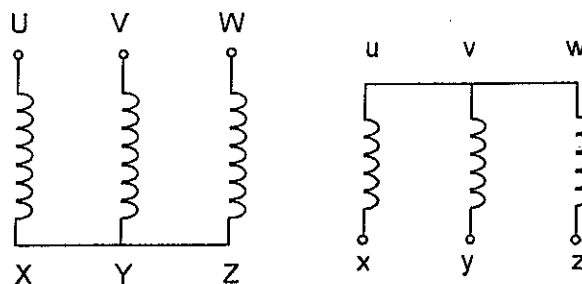


Figura 8.46 Conexión de los bobinados en estrella en alta y baja tensión

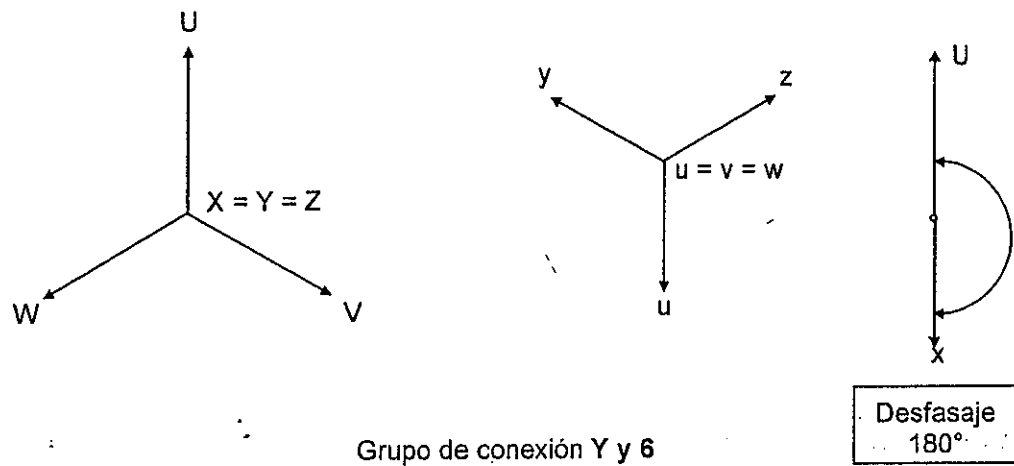


Figura 8.47 Diagramas fasoriales para conexión estrella – estrella

En las figuras 8.48 y 8.49 se analizan las conexiones y fasoriales para el caso de los bobinados conectados en triángulo.

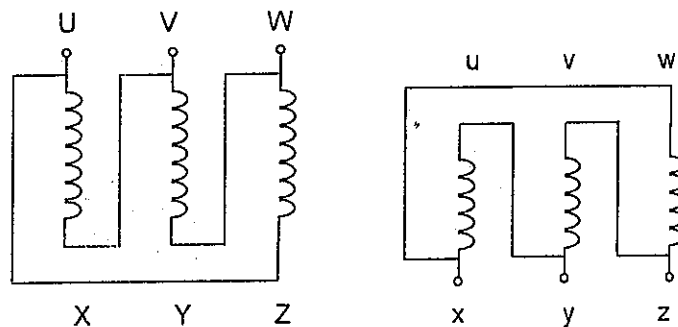
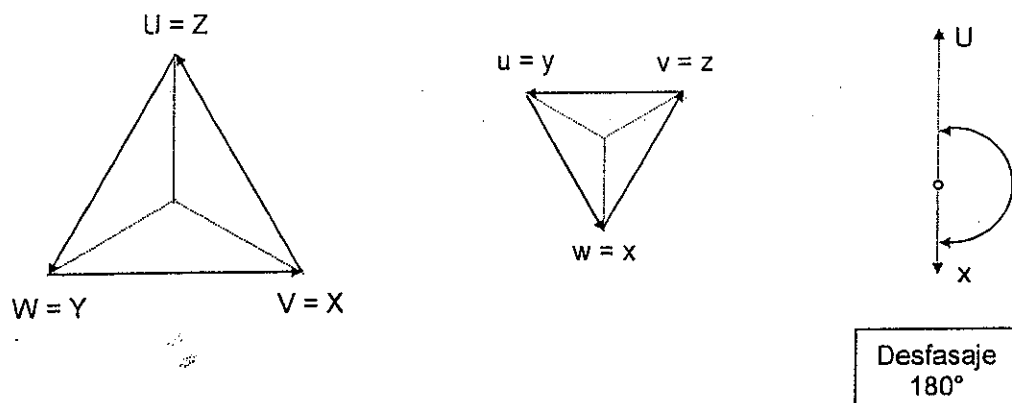


Figura 8.48 Conexión de los bobinados en triángulo en alta y baja tensión



Grupo de conexión D d 6

Figura 8.49 Diagramas fasoriales para conexión triángulo – triángulo

Grupo de conexión 11

En las figuras 8.50 y 8.51 se analizan las conexiones y fasoriales para el caso de los bobinados conectados en triángulo estrella.

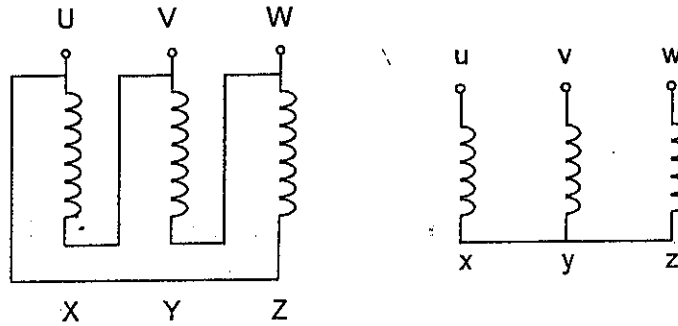
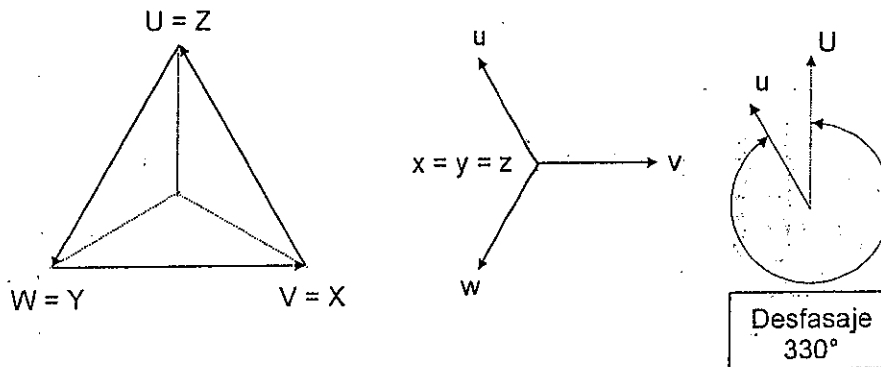


Figura 8.50-Conexión de los bobinados triángulo en alta y estrella en baja tensión



Grupo de conexión D y 11

Figura 8.51 Diagramas fasoriales para conexión triángulo - estrella

En las figuras 8.52 y 8.53 se analizan las conexiones y fasoriales para el caso de los bobinados conectados en estrella - triángulo.

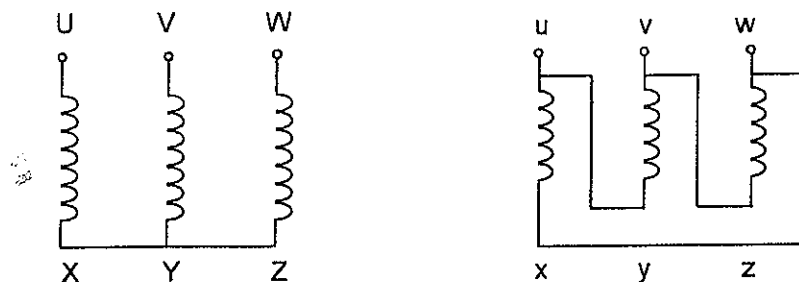
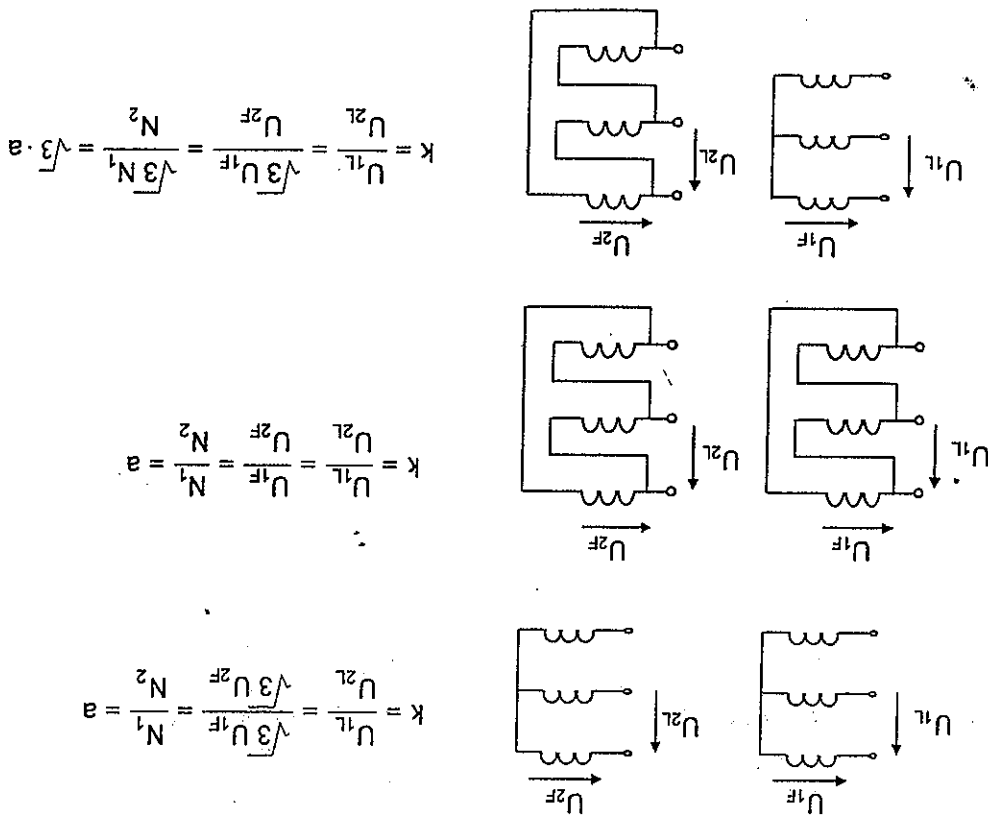


Figura 8.52 Conexión de los bobinados estrella en alta y triángulo en baja tensión



$$k = \frac{U_{2L}}{U_{1L}} = \frac{U_{2F}}{\sqrt{3}U_{1F}} = \frac{N_2}{\sqrt{3}N_1} = \sqrt{3} \cdot a$$

$$k = \frac{U_{2L}}{U_{1L}} = \frac{U_{2F}}{U_{1F}} = \frac{N_2}{N_1} = a$$

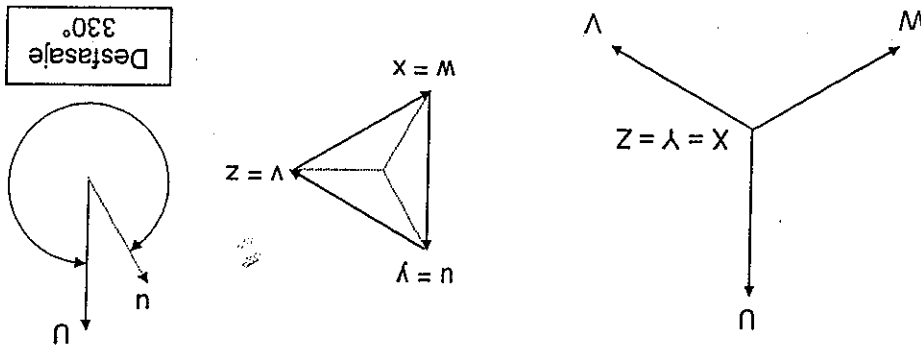
$$k = \frac{U_{2L}}{U_{1L}} = \frac{\sqrt{3}U_{2F}}{\sqrt{3}U_{1F}} = \frac{N_2}{N_1} = a$$

En los transformadores trifásicos la relación de transformación está determinada por la relación entre la tensión primaria de línea y la tensión secundaria de línea, cuando el transformador se encuentra en vacío. Debido a esto la relación puede diferir de la relación entre espiras (Relación entre tensión de fase primaria y tensión de fase secundaria), dependiendo ello de cómo estén conectados los bobinados. En la figura 8.54 Se muestran los esquemas de conexiones y la relación de transformación.

8.3.2 Relaciones de transformación

Figura 8.53 Diagramas fasoriales para conexión estrella triángulo

Grupo de conexión Y d 11



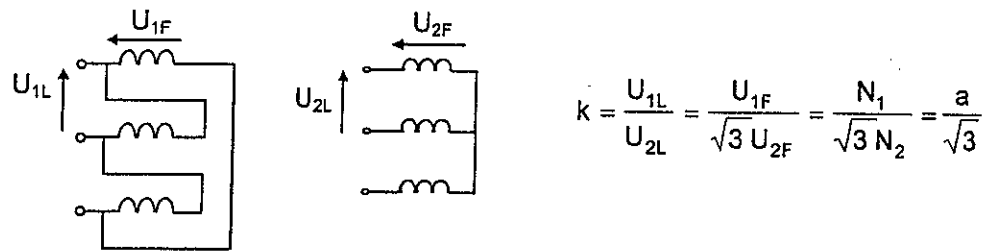


Figura 8. 54 Relación de transformación para los diversos tipos de conexión de los bobinados

8.4 Autotransformador

El autotransformador es una bobina sobre un núcleo magnético, la cual tiene un punto intermedio, según se observa en la figura 8.55.

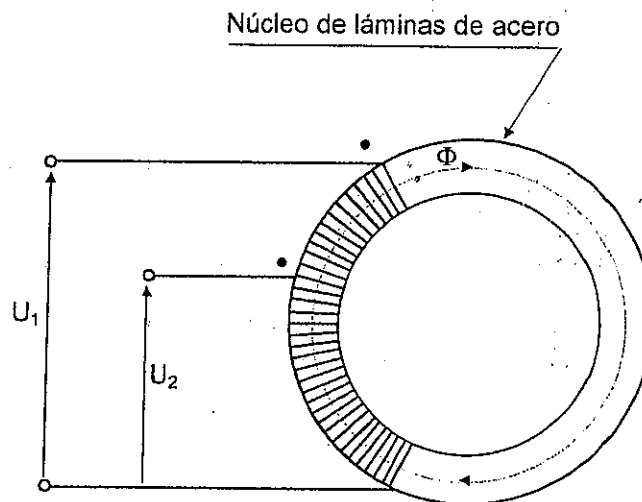


Figura 8.55 Esquema de un autotransformador

El autotransformador utiliza un solo bobinado por fase, por lo tanto se pierde el aislamiento eléctrico entre los circuitos primario y secundario.

Las ventajas que ofrece, con respecto a la utilización de dos bobinados, está en las menores pérdidas en el cobre, menor reactancia de dispersión y menor tamaño.

Su uso se justifica cuando las tensiones primaria y secundaria tienen poca diferencia.

En el esquema de la figura 8.56, vemos un autotransformador reductor, al cual se le aplica una tensión primaria U_1 , que da origen a un flujo magnético que llamaremos Φ .

Dado que este flujo es variable en el tiempo, se inducen fuerzas electromotrices cuyos valores son.

$$E_1 = 4,44 N_1 f \Phi$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f \Phi$$

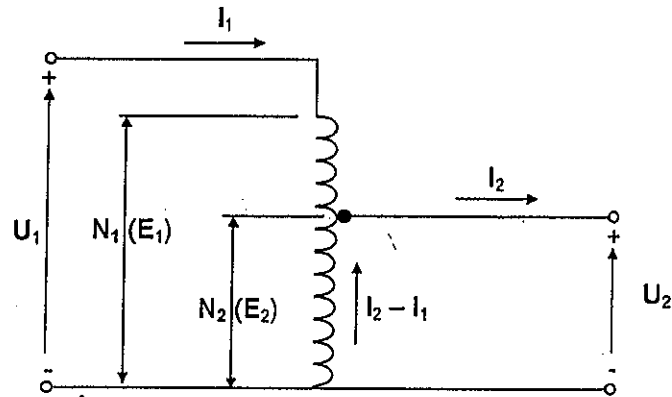


Figura 8.56 Esquema de un autotransformador reductor

Analizando el autotransformador ideal, se cumple:

$$U_1 = E_1 \text{ y } U_2 = E_2 \quad \text{Con lo cual nos queda:}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad \text{Relación de transformación}$$

Si sumamos las fuerzas magnetomotrices en el núcleo magnético nos queda:

$$(N_1 - N_2) I_1 - N_2 (I_2 - I_1) = \mathfrak{R} \cdot \Phi = 0$$

$$N_1 I_1 - N_2 I_1 - N_2 I_2 + N_2 I_1 = 0$$

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

Estos aparatos son también utilizados como autotransformadores variables, ya que haciendo que el punto intermedio pueda variar su posición mediante un contacto deslizante, podemos obtener una tensión de salida mayor o menor que la tensión de entrada según sea la necesidad, lo que puede observarse en la figura 8.57.

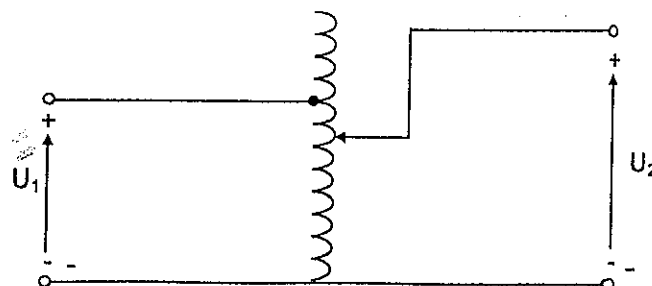


Figura 8.57 Esquema de un autotransformador variable

8.5 Transformadores de medición

8.5.1 Transformador de tensión

Los transformadores de tensión para medición constan de dos bobinas, cuya relación está dada en función de la alta tensión a medir y una tensión que se aplica a los instrumentos. En este tipo de transformador el bobinado primario se conecta en paralelo con el circuito en el que se desea medir la tensión, como observamos en la figura 8.58.

En el bobinado secundario se conectan los instrumentos en paralelo. La relación de transformación está dada por:

$$a = U_1/U_2 = N_1/N_2$$

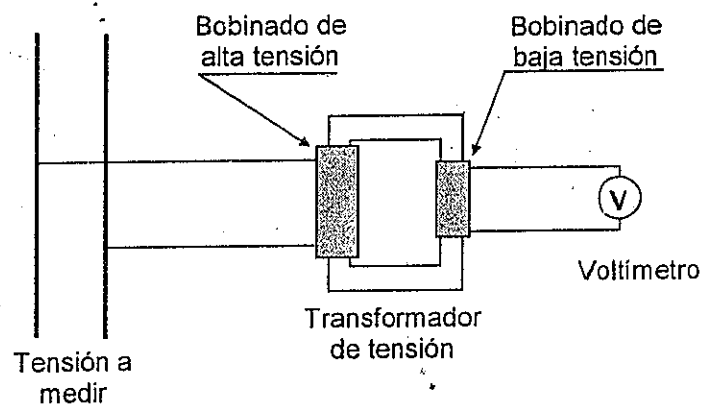


Figura 8.58 Esquema de medición con transformador de tensión.

Dado que los instrumentos que se conectan al secundario tienen valores de impedancia elevada, la corriente que circula es muy pequeña por lo cual el transformador trabaja prácticamente en vacío.

Debido a las pequeñas corrientes, las caídas de tensión internas son muy pequeñas, con lo cual no se cometen grandes errores de relación de transformación.

El secundario de este tipo de transformadores no se debe cortocircuitar, ya que si así sucediera, la elevada corriente que circularía lo destruiría.

En instalaciones fijas de media tensión (13200 V), los mismos deben contar con una protección contra cortocircuitos del lado de alta tensión para su protección (normalmente se utilizan fusibles).

Tensiones nominales

La tensión del primario está dada en función de la tensión del sistema en el cual se va a instalar.

La tensión secundaria está normalizada en $\frac{110}{\sqrt{3}}$ V y 110 V

Potencia nominal

Surge de obtener la potencia en el secundario el cual se puede obtener como la suma de los consumos de cada instrumento colocado.

Los valores más utilizados son: 5 - 10 - 15 - 30 - 60 - 100 VA

8.5.2 Transformador de intensidad

Se utiliza ante la necesidad de medir corrientes elevadas ó en circuitos de alta tensión. En este caso el bobinado primario se conecta en serie con el circuito de carga y en el secundario del transformador se conectan los instrumentos correspondientes (Amperímetro, vatímetro, medidor de energía, etc.) conectados en serie según se muestra en la figura 8.59.

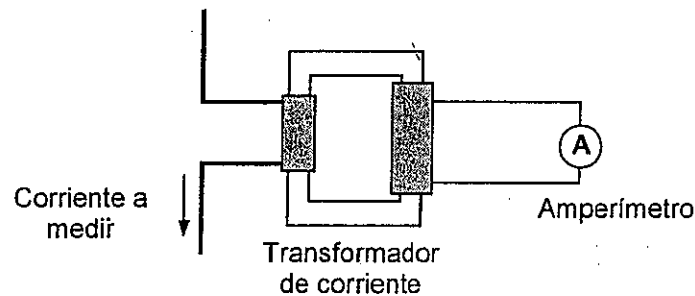


Figura 8.59 esquema de medición con transformador de intensidad

Dado que los instrumentos amperométricos, presentan una impedancia muy pequeña, el secundario de este transformador prácticamente está en cortocircuito. La corriente que pasa por el primario depende exclusivamente de la corriente del circuito en el cual está instalado.

En un transformador ideal las fuerzas magnetomotriz del primario y del secundario son iguales y se compensan o sea:

$$N_1 I_1 = N_2 \cdot I_2$$

La relación de transformación teórica está dada por:

$$a = N_2/N_1 = I_1/I_2$$

En este tipo de transformador el número de espiras del secundario es mayor que las del primario (De acuerdo a la corriente a medir). Por lo tanto si por algún motivo se dejara el bobinado secundario abierto, no habría una fuerza magnetomotriz que se oponga a la del primario, y el flujo en el núcleo magnético, se haría elevado, con lo cual la fuerza electromotriz inducida en el secundario sería muy elevada y se podría dañar la aislación.

Además al crecer el flujo magnético, aumentan las pérdidas en el núcleo (Pérdidas en el hierro), lo cual trae aparejado un calentamiento excesivo que puede dañar el aparato. Por lo tanto es indispensable que antes de desconectar, los instrumentos en el secundario, se deben cortocircuitar sus bornes.

Las corrientes secundarias están normalizadas en 1 o 5 A. La lectura de los instrumentos se debe afectar incrementándola de acuerdo a la relación de transformación.

Corrientes nominales

La corriente nominal del primario es el valor eficaz de la corriente sobre la que se basa la operación del transformador de intensidad. Son valores enteros como ser: 5 - 10 - 15 - 25 - 50 - 100 - - 1000 A. En cambio la corriente nominal secundaria es de 5 A, y cuando los instrumentos a colocar se encuentran alejados ó tienen un consumo importante se utiliza una corriente de 1 A.

MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN

9.1 Campo magnético rotante

Máquina de dos polos magnéticos

Si tomamos un conjunto de chapas magnéticas que tienen la forma mostrada en la figura 9.01 en la cual se ha realizado una serie de ranuras (seis en este dibujo), y las mismas se apilan con un elemento aislante entre ellas, formando un cilindro cuyo eje es perpendicular al plano del dibujo, obtenemos lo que se llama el estator de una máquina eléctrica rotante.

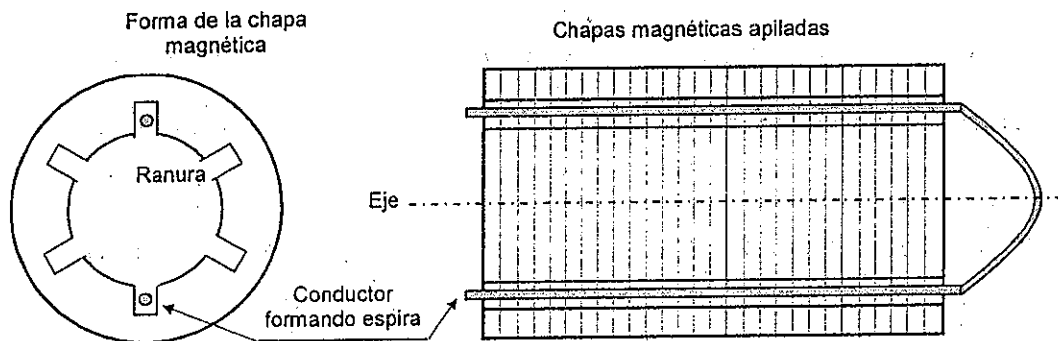


Figura 9.01 Estator de una máquina rotante

Tomemos ahora un par de ranuras opuestas diametralmente como ser la superior y la inferior, y en ellas coloquemos una bobina que llamaremos " $u_1 - u_2$ ", de " N " espiras (En el dibujo se esquematiza un solo conductor a los efectos de simplificar el mismo). La misma tiene un eje magnético perpendicular al plano de la misma y que en este caso su dirección es horizontal, tal como se muestra en la figura 9.02.

Si ahora efectuamos el mismo procedimiento con la bobina " $v_1 - v_2$ ", vemos que su eje magnético forma un ángulo de 120° geométricos con respecto a la anterior, lo cual repetimos con la tercera bobina " $w_1 - w_2$ ". Resumiendo hemos colocado tres bobinas idénticas con su eje magnético desplazado en 120° geométricos, siendo el comienzo de las bobinas las indicadas con el subíndice "1".

Siguiendo con el proceso, unamos las tres bobinas en un punto común ($u_2 = v_2 = w_2$), con lo que las mismas quedan conectadas en disposición estrella, tal como se muestra en la figura 9.02.

Si alimentamos las tres bobinas mediante un sistema trifásico de tensiones, por las mismas circularán corrientes de igual módulo pero desfasadas eléctricamente en 120° , tal como se muestra en la figura 9.03. Las corrientes que circulan dan origen a fuerzas magnetomotrices en cada una de las bobinas, cuya magnitud depende del número de espiras y del valor de la corriente instantánea.

A los efectos de los análisis físico, tomaremos para el estudio dos instantes, como ser las corrientes para un ángulo eléctrico de 90° y 150° .

La convención de signos a adoptar es que las corrientes son positivas si el borne de entrada es u_1 , v_1 o w_1 (negativas si son salientes), tal como se muestra en la figura 9.04.

En el esquema de la máquina las corrientes entrantes se esquematizan con una cruz (+) y las salientes con un punto (\bullet).

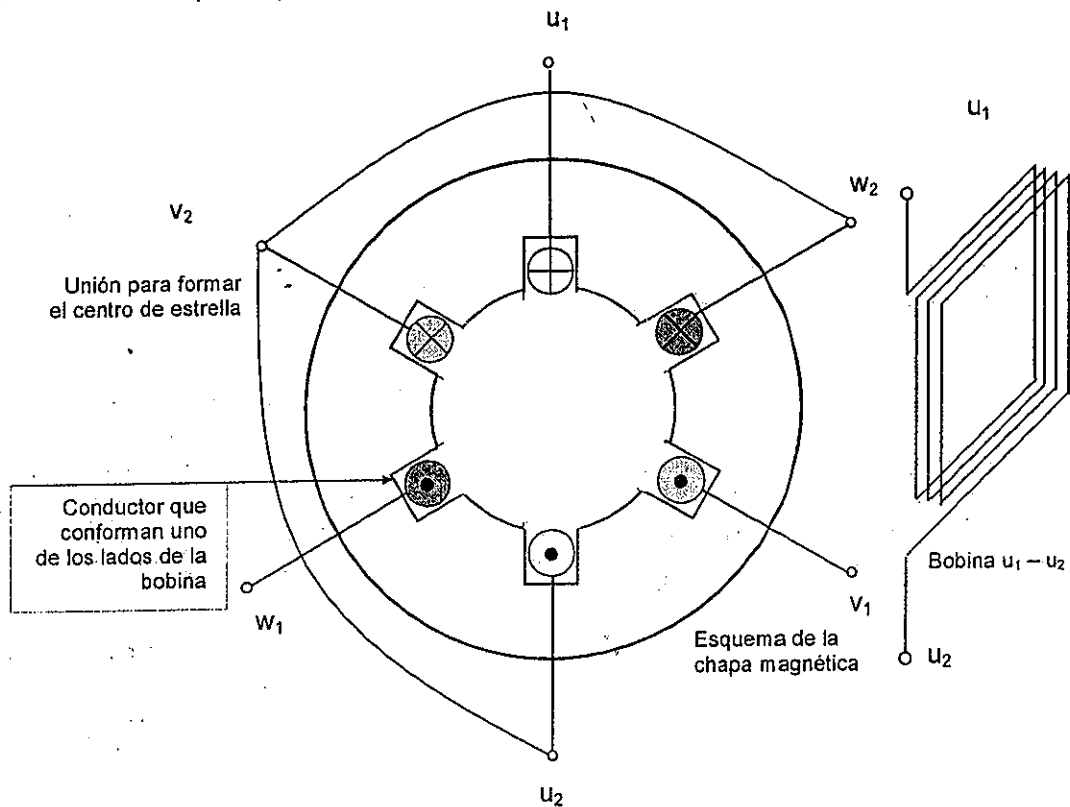


Figura 9.02 Detalle del estator y bobinas de una máquina rotante

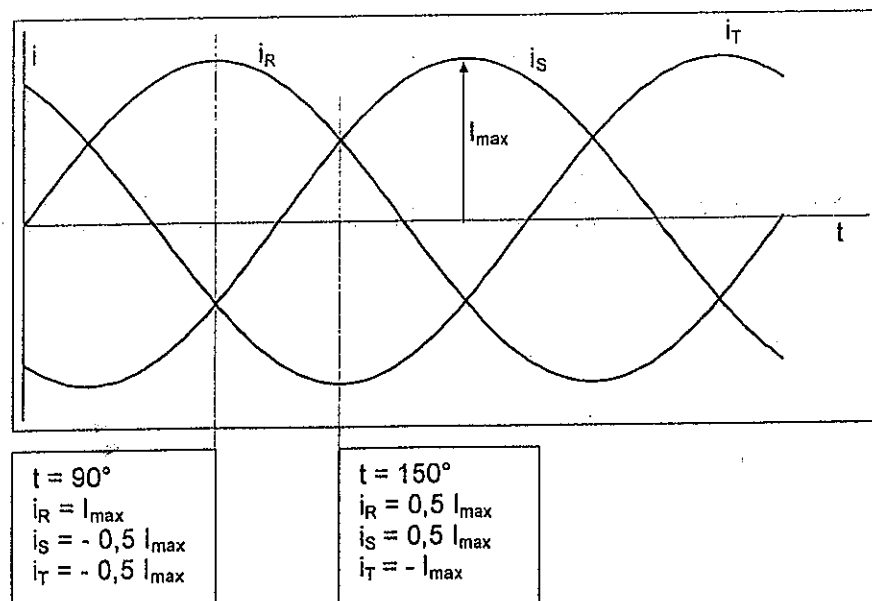


Figura 9.03 Valores instantáneos de las corrientes en los bobinados

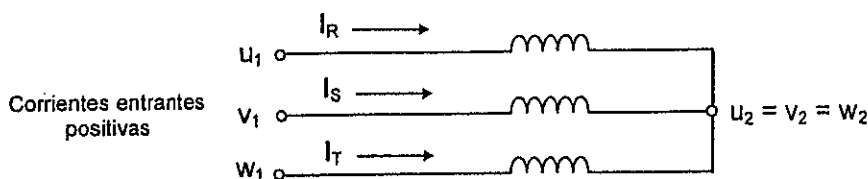


Figura 9.04 Convención de los signos de las corrientes en una máquina de dos polos magnéticos

Luego para el instante en el cual el ángulo eléctrico es 90° , la corriente i_R es positiva (entra por u_1) y las otras dos son negativas (salen por v_1 y w_1), lo cual se observa en las figuras 11.05 y 9.06.

Las corrientes en las bobinas originan fuerzas magnetomotrices cuyas magnitudes y sentidos son los indicados en el esquema de la figura 9.06., en la cual se ha dibujado la resultante de las mismas. Vemos que se obtiene un campo magnético de dos polos. En la figura 9.05 se han dibujado las líneas de campo magnético que abrazan corrientes de igual sentido, y que de acuerdo a lo indicado el esquema corresponde a un sistema de dos polos magnéticos.

Si efectuamos el mismo análisis, pero para el instante de 150° , los sentidos de las corrientes y las fuerzas magnetomotrices resultantes se encuentran dibujados en las figuras 9.07. y 9.08.

De la observación de los dos tiempos estudiados, llegamos a la conclusión que la fuerza magnetomotriz resultante se mantiene constante y que la misma ha girado un ángulo geométrico de 60° ante un avance de las corrientes de 60° eléctricos.

De la misma manera se puede realizar el estudio para otros ángulos, llegando a que el campo magnético resultante obtenido, alimentando un conjunto de bobinas cuyo eje magnético está desplazado 120° geométricos, por medio de un conjunto de corrientes desfasadas 120° en el tiempo, es de módulo constante que gira a razón de una vuelta por cada ciclo que cumplen las corrientes.

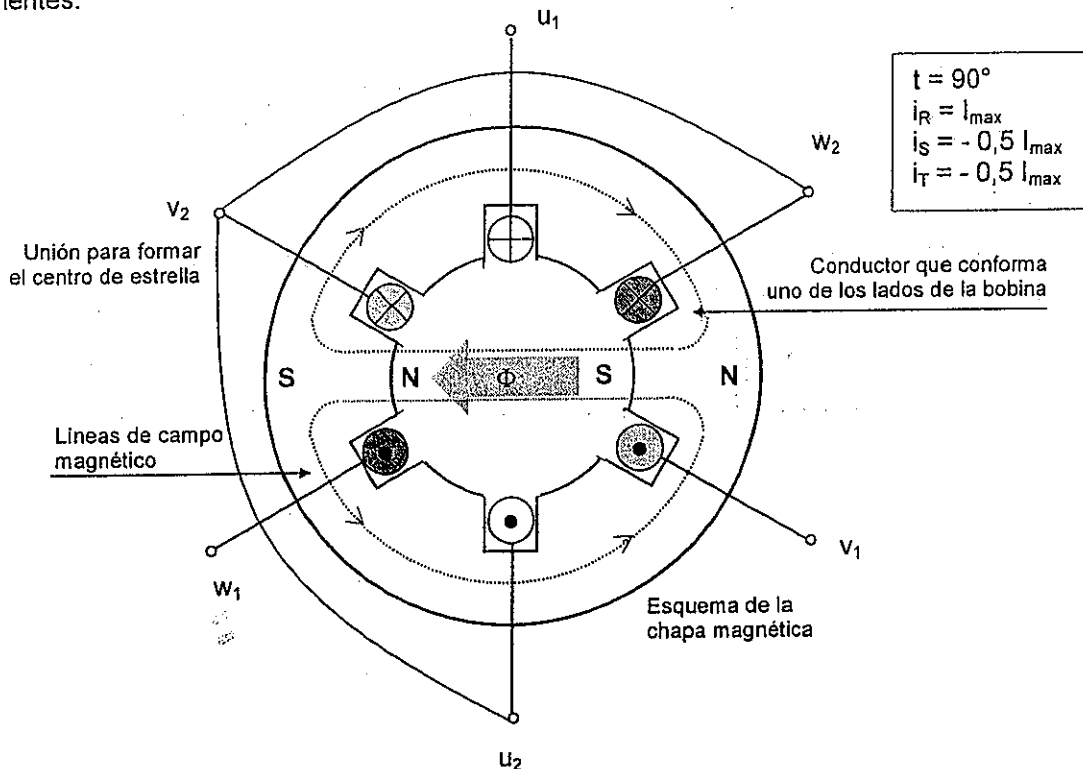


Figura 9.05 Detalle del estator y bobinas de una máquina rotante con dos polos magnéticos y con el sentido de las corrientes para $t = 90^\circ$

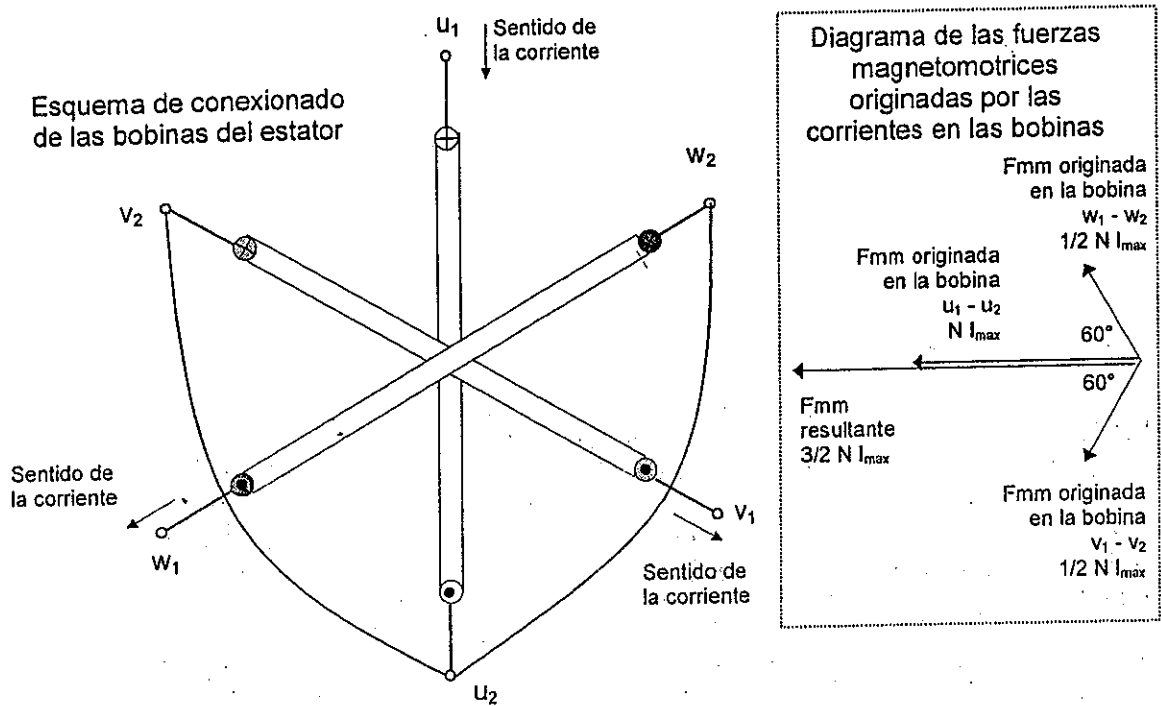


Figura 9.06 Disposición de las bobinas estatóricas y fuerzas magnetomotrices que originan para un ángulo eléctrico de 90°

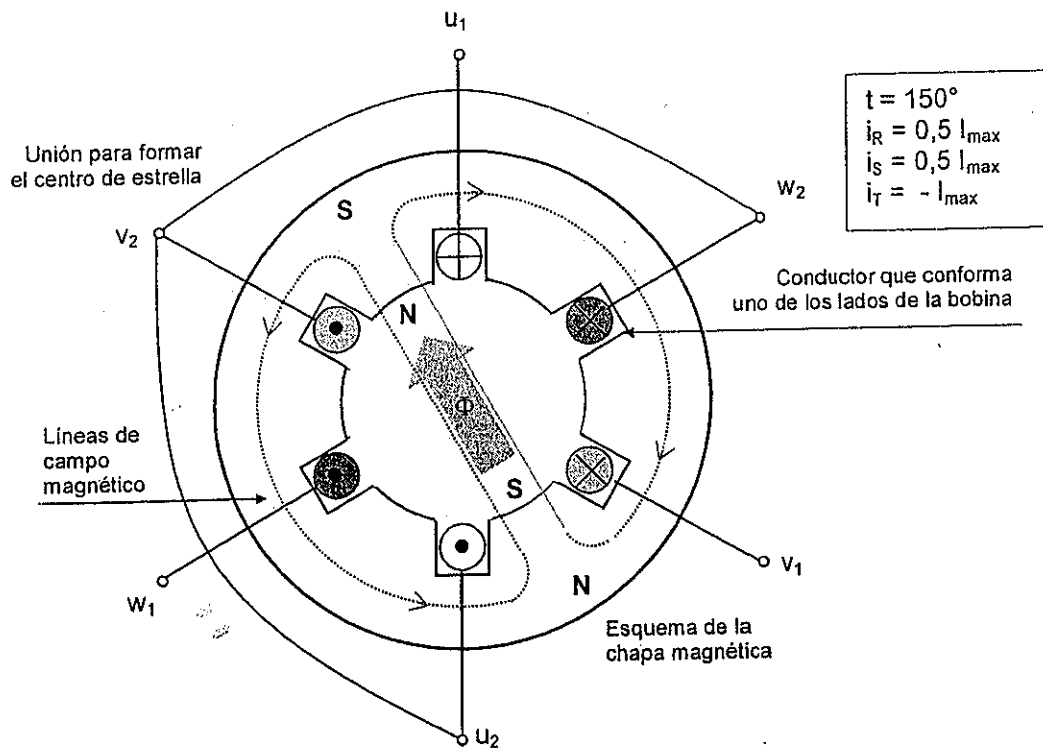


Figura 9.07 Detalle del estator y bobinas de una máquina rotante con dos polos magnéticos y con el sentido de las corrientes para t = 150°

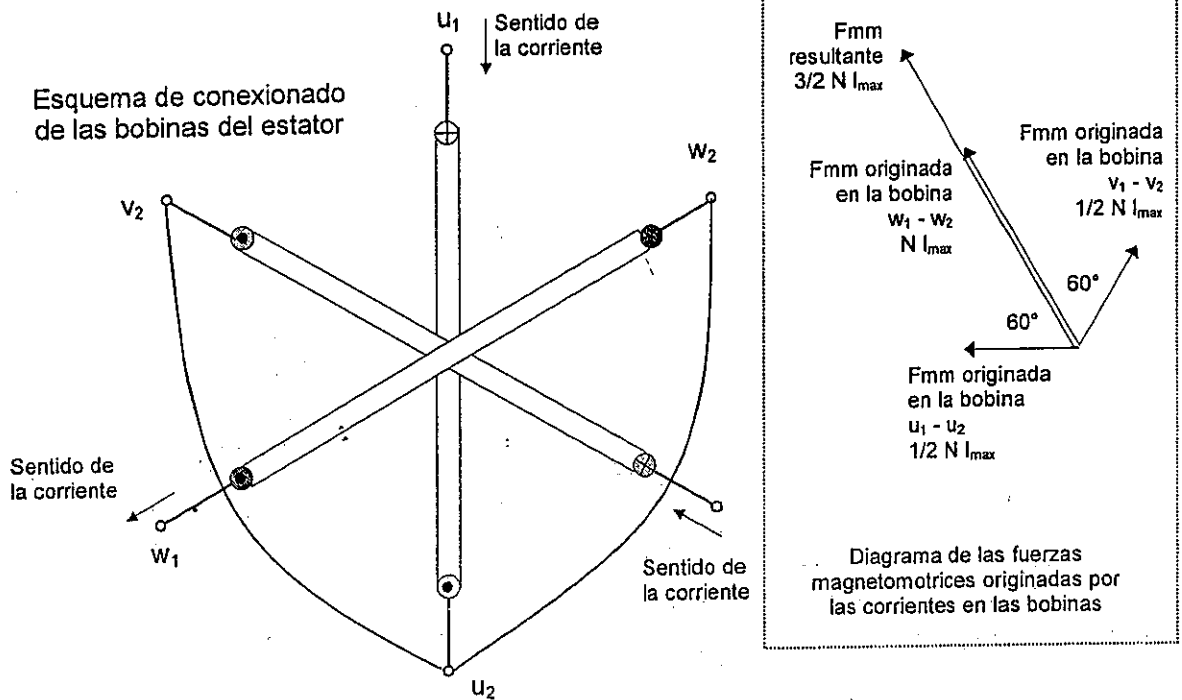


Figura 9.08 Disposición de las bobinas estatóricas y fuerzas magnetomotrices que se originan para un ángulo eléctrico de 150°

Máquina de 4 polos magnéticos

Tomamos un estator similar al anterior, pero con un número doble de ranuras, de forma tal que cada fase este conformada por medio de dos bobinas en serie, las cuales tienen su eje magnético en la misma dirección y ocupan dos ranuras cada una, tal como se muestra en la figura 9.10. y esquemáticamente en la 9.09. Si alimentamos con un sistema trifásico como en el caso anterior, y analizamos los mismos instantes de tiempo, llegamos a que se obtiene también un campo magnético rotante, pero conformado por cuatro polos, y la velocidad del mismo es la mitad que en el caso anterior, o sea que por cada ciclo que cumplen las corrientes el campo gira media vuelta. Esto se puede observar en las figuras 9.10, 9.11, 9.12 y 9.13.

La velocidad del campo rotante se denomina velocidad sincrónica, y su valor en revoluciones por minuto está dada por la siguiente expresión:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

En la cual:

n_s : velocidad sincrónica [r.p.m.]

f : frecuencia de las corrientes estatóricas [Hz]

p : pares de polos magnéticos

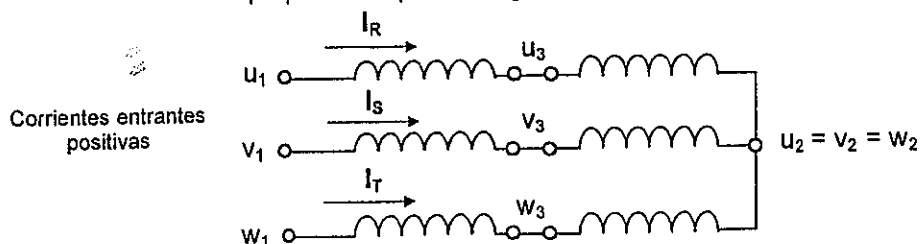


Figura 9.09 Convención de los signos de las corrientes máquina de cuatro polos

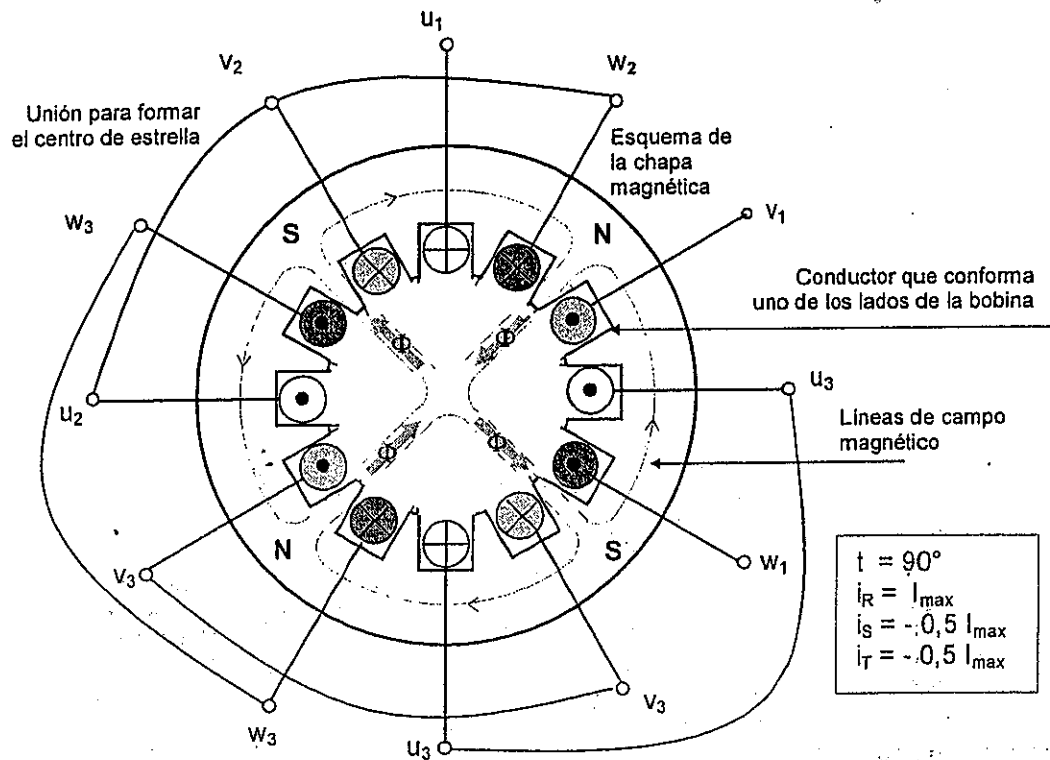


Figura 9.10 Detalle del estator y bobinas de una máquina rotante con cuatro polos magnéticos y con el sentido de las corrientes para $t = 90^\circ$

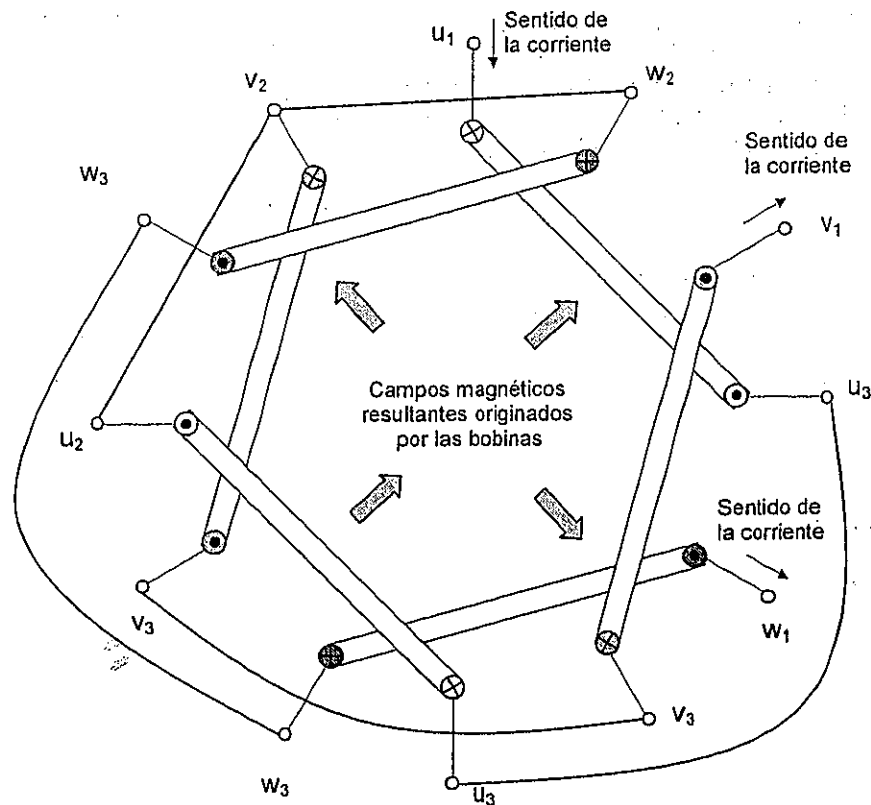


Figura 9.11 Disposición de las bobinas estatóricas y fuerzas magnetomotrices que se originan para un ángulo eléctrico de 90°

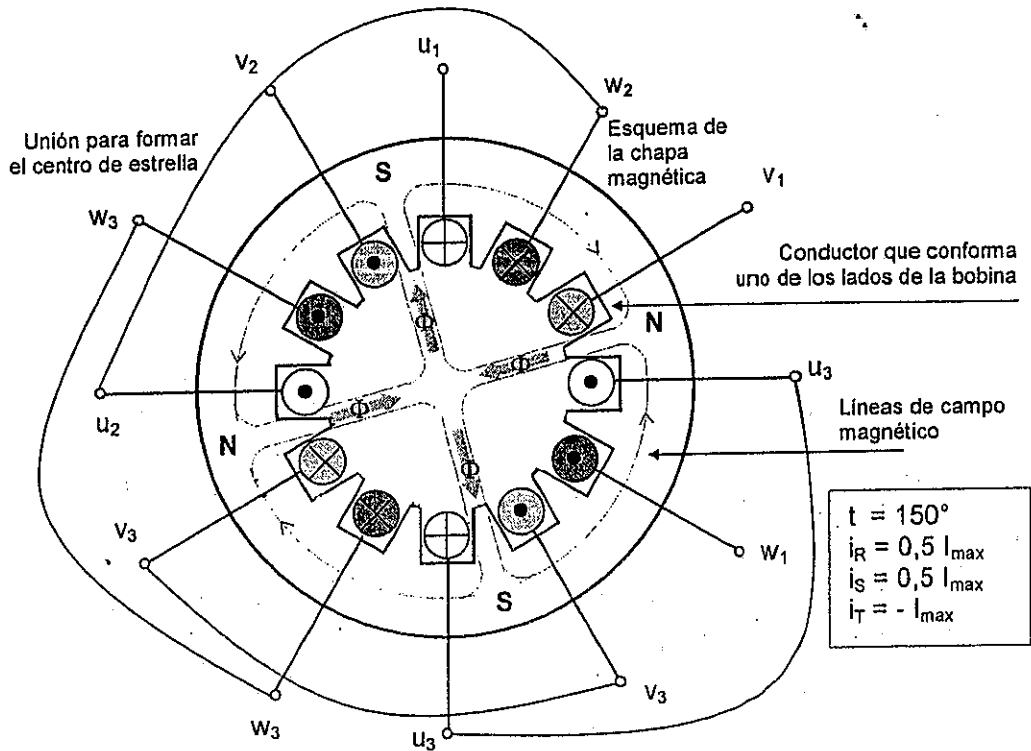


Figura 9.12 Detalle del estator y bobinas de una máquina rotante con cuatro polos magnéticos y con el sentido de las corrientes para $t = 150$

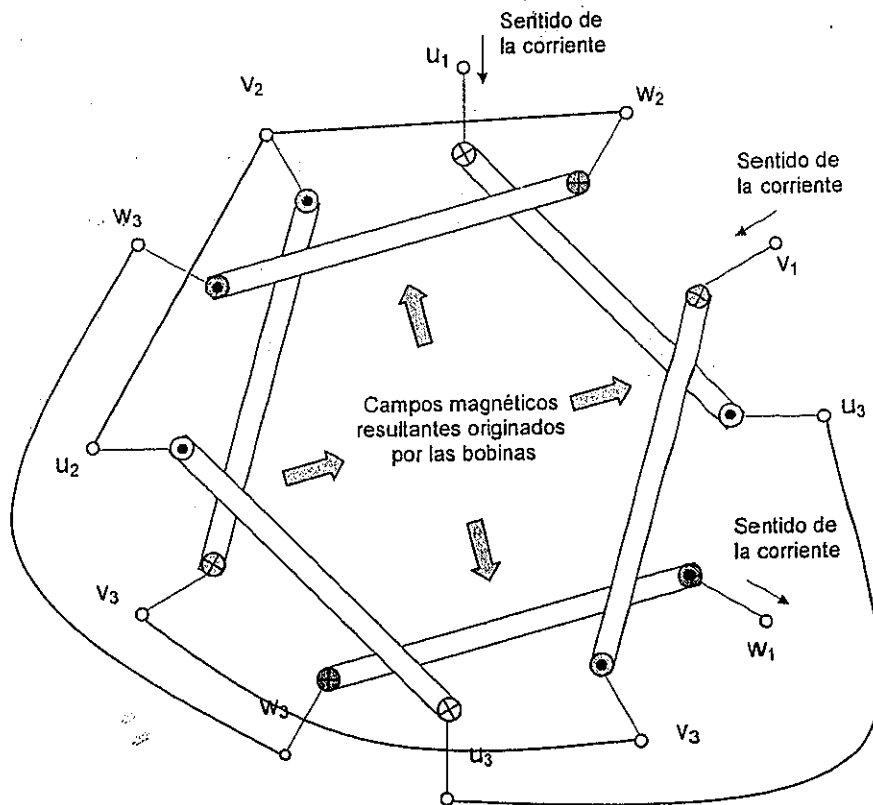


Figura 9.13 Disposición de las bobinas estatóricas y fuerzas magnetomotrices que se originan para un ángulo eléctrico de 150°

9.2 Principio de funcionamiento del motor trifásico de inducción

Los motores de inducción ó asíncronos, son los más utilizados debido a su robustez, sencillez constructiva y poco mantenimiento.

La utilización de los mismos, es apta para aquellos requerimientos en los cuales no se deba mantener una velocidad constante, ya que este tipo de motores, disminuye ligeramente su velocidad con el aumento de la carga en su eje.

El estator de un motor trifásico de inducción está formado por un conjunto de tres bobinas, las cuales son alimentadas por un sistema trifásico de corrientes, lo cual da origen a un campo magnético giratorio de módulo constante, según se ha estudiado anteriormente.

Este campo magnético gira a la velocidad que llamamos de sincronismo.

Coloquemos dentro del estator una espira, montada sobre un eje, cuyo único movimiento permitido es el de rotación tal como se muestra en la figura 9.14. En esta situación, en la cual tenemos un campo magnético de módulo fijo girando alrededor de la espira mencionada, está concatenará un flujo magnético que varía con el tiempo, lo cual dará origen a una fuerza electromotriz inducida (Ley Faraday).

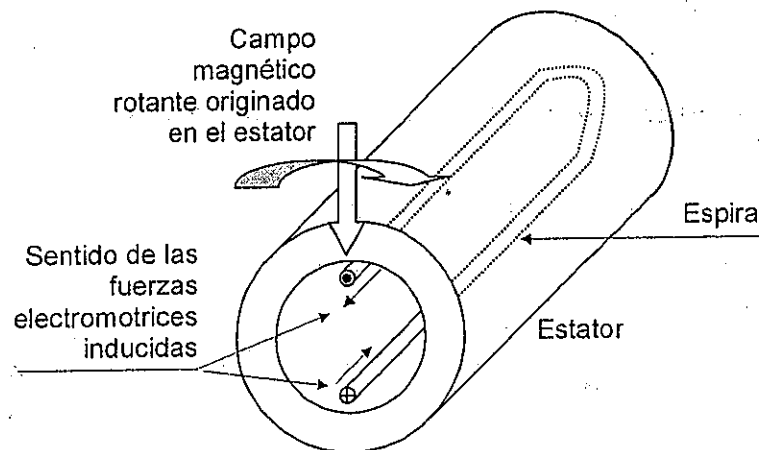


Figura 9.14 Fuerza electromotriz inducida en una espira

El sentido de la fuerza electromotriz inducida se puede obtener de acuerdo a la siguiente regla de la mano derecha:

- Se coloca la palma de la mano derecha recibiendo en forma perpendicular el flujo magnético.
- Se coloca el pulgar en dirección contraria al sentido del movimiento del campo magnético (en este caso en sentido antihorario).
- El sentido del resto de los dedos nos indica el de la fuerza electromotriz inducida.

En la figura 9.15 se muestra un detalle de lo analizado.

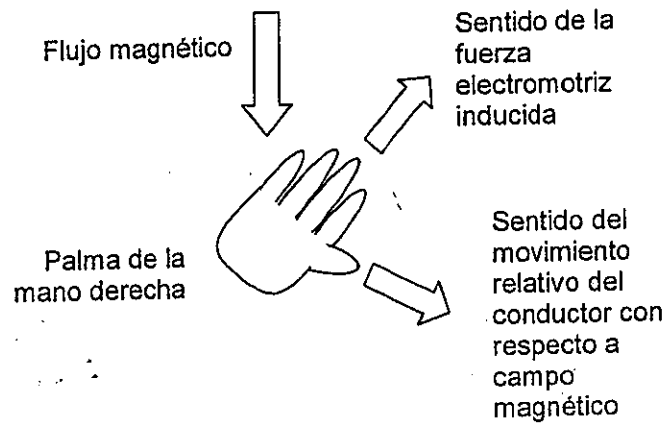


Figura 9.15 Regla práctica para la obtención del sentido de la fem inducida

Si ahora cerramos la espira por ejemplo cortocircuitándola, tal como se muestra en la figura 9.16, circulará una corriente en el mismo sentido de la fuerza electromotriz inducida, cuyo valor dependerá de dicha fem y de la impedancia que presente dicha espira.

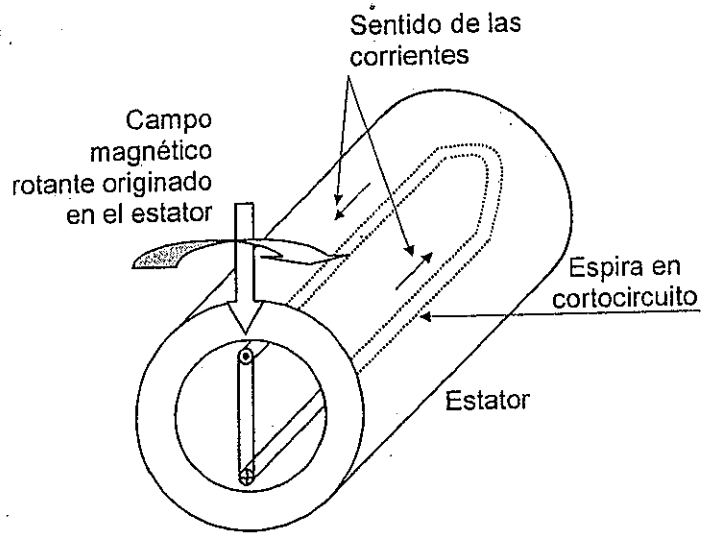


Figura 9.16 Circulación de corrientes con la espira en cortocircuito

En esta situación nos encontramos, con un conductor por el cual circula corriente y se encuentra en presencia de un campo magnético, lo cual da origen a fuerzas en los conductores, pudiendo determinar el sentido de las mismas mediante la mano izquierda de acuerdo a la figura 9.17.

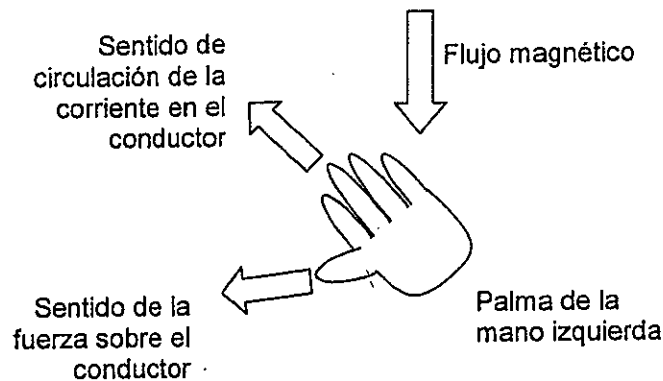


Figura 9.17 Regla práctica para la obtención del sentido de la fuerza sobre conductores

Para determinar el sentido de las fuerzas se sigue el siguiente proceso:

- Se coloca la palma de la mano izquierda recibiendo en forma perpendicular el flujo magnético.
- Se colocan los dedos en el sentido de la corriente.
- El pulgar nos indica el sentido de la fuerza.

En nuestro caso, en el conductor superior la fuerza es hacia la derecha, y en el inferior hacia la izquierda, como se observa en la figura 9.18.

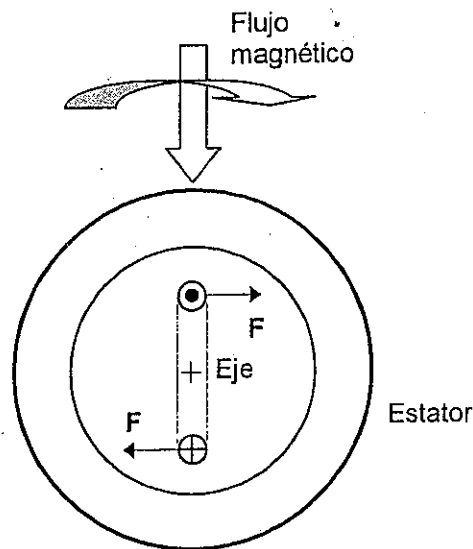


Figura 9.18 Sentido de las fuerzas sobre los conductores

Dado que las fuerzas se originan, únicamente, a lo largo de los conductores paralelos al eje (Corriente perpendicular al flujo magnético), y estando estos separados, se produce una cupla que hace mover la espira, y estando esta montada sobre un eje, comienza a girar, siguiendo el movimiento del campo magnético rotante.

La espira aumenta su velocidad hasta llegar a una velocidad levemente inferior a la del campo magnético, ya que de alcanzar la misma, la espira no cortaría líneas de campo magnético, con lo cual no habría flujo concatenado variable lo cual llevaría a la desaparición de las fuerzas mencionadas, tendiendo la espira a disminuir su velocidad, con lo que volvería a aparecer la cupla.

La velocidad a la que gira es levemente inferior a la del campo magnético rotante, y la misma está determinada por el equilibrio entre la cupla motora analizada y las cuplas antagónicas o resistentes (debidas a la carga mecánica en el eje y los rozamientos propios).

9.3 Tipo de rotores

Rotor bobinado

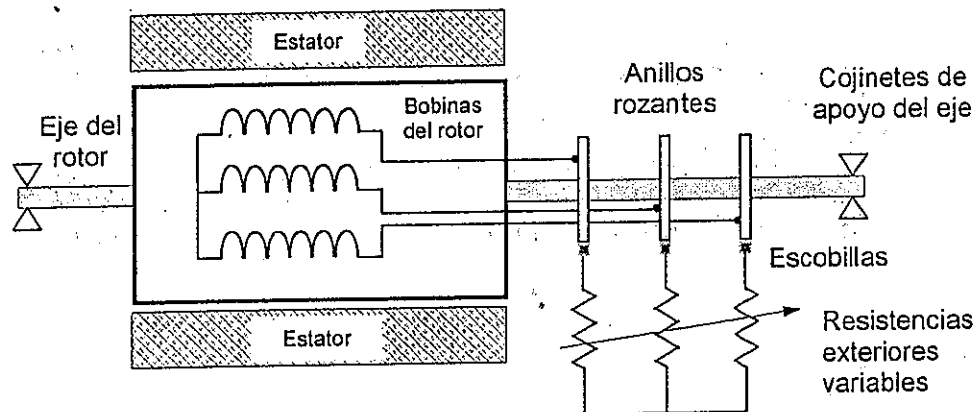
Los motores no cuentan con una sola espira, sino que se forman bobinas para lograr más conductores que aporten cupla. Un tipo de motor es el que tiene 3 bobinas con sus ejes magnéticos desplazados, a los efectos de formar un conjunto trifásico.

Dichas bobinas están unidas en un punto común, formando una conexión del tipo "estrella", mientras que los otros terminales de las bobinas se conectan al exterior de la máquina mediante unos anillos rozantes, tal como se muestra esquemáticamente en la figura 9.19.

Estos anillos están aislados eléctricamente entre si y también del eje del rotor, y cada uno de ellos conectado a cada terminal de las bobinas.

La conexión al exterior se efectúa, mediante escobillas o carbones que se deslizan sobre los anillos, efectuando la continuidad eléctrica entre una parte móvil y una parte fija.

Mediante estas escobillas se pueden conectar en serie con cada bobina una resistencia o bien cortocircuitar los tres extremos.



9.19 Esquema de conexionado de las bobinas del rotor

Rotor en cortocircuito o jaula de ardilla

Si colocamos en el rotor de la máquina una serie de conductores paralelos a su eje, tal como se muestra en la figura 9.20, en los mismos vamos a tener fuerzas electromotrices inducidas, cuyo valor depende de la magnitud la inducción magnética, de la longitud de los conductores y de la velocidad con que el campo magnético pasa frente al conductor analizado.

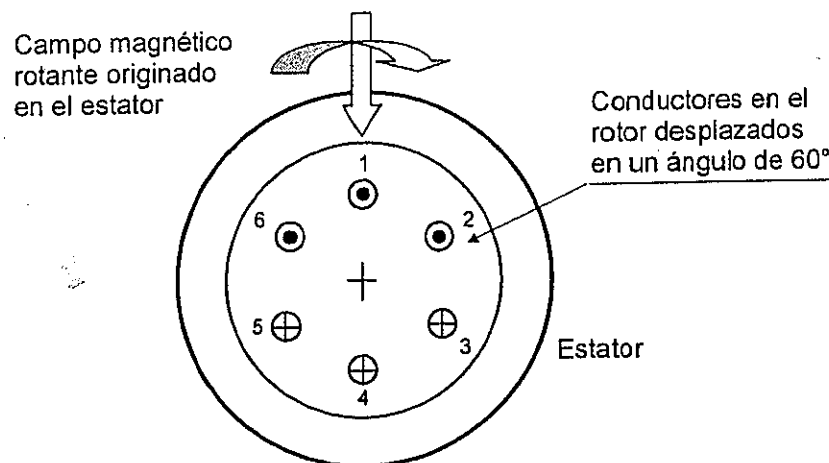


Figura 9.20 Detalle de los conductores en el rotor

En el esquema se han tomado seis conductores desplazados 60° entre ellos, lo cual nos lleva a que las fuerzas electromotrices inducidas en los mismos son de igual módulo pero desfasados en 60° , entre sí. Esto se puede representar fasorialmente, mediante un valor eficaz "E", igual para todos los conductores pero con un desfase de 60° .

De acuerdo a la posición que se dibujó del campo magnético, en ese instante, las fem son salientes en los conductores superiores y entrantes en los inferiores, lo cual surge de aplicar la regla ya estudiada. En esta situación no hay circulación de corriente ya que no se presenta un circuito cerrado.

Si los extremos anteriores y posteriores de los conductores, los unimos mediante una corona, tal como se muestra en la figura 9.21, circulará corriente por los mismos, valor que depende de la impedancia que presente dicho conductor.

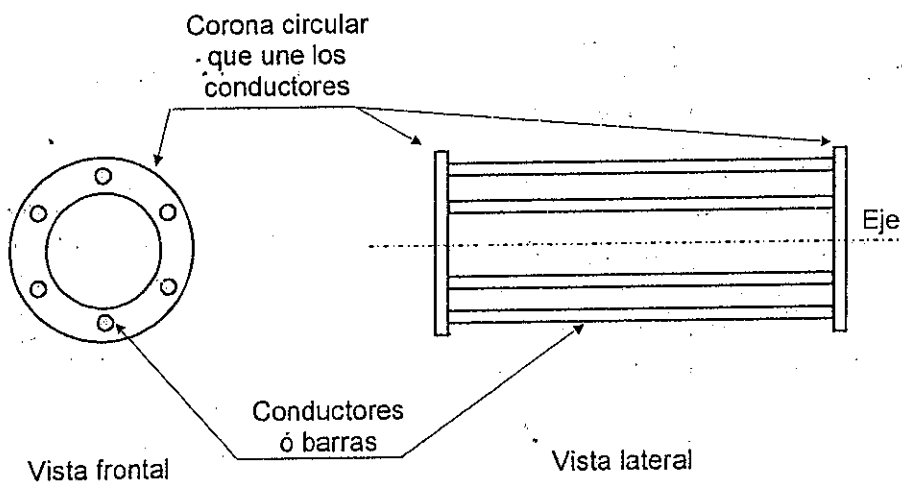


Figura 9.21 Esquema de un rotor con los conductores cortocircuitados formando una jaula de ardilla

Las corrientes que circulan por los conductores, concurren a un "nodo" que son los aros que unen las barras físicamente, siendo la suma de las mismas igual a cero. En esquema eléctrico equivalente se muestra en la figura 9.22.

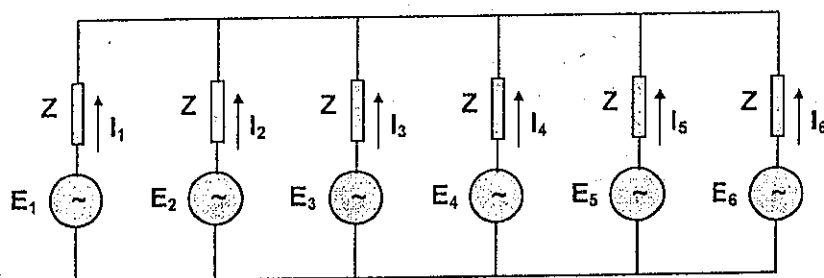


Figura 9.22 Esquema eléctrico equivalente

Las corrientes I_1 e I_4 , tienen el mismo valor instantáneo pero el sentido de circulación es opuesto, debido a la posición que ocupan los conductores en el instante analizado. Por lo tanto las mismas tienen la misma magnitud con un ángulo de desfase de 180° . Lo mismo pasa con las corrientes I_2 e I_5 y con I_3 e I_6 .

La construcción de este tipo de rotor es simple ya que sobre el conjunto de chapas magnéticas, en las cuales se han practicado las ranuras, se funden en las mismas las barras conductoras que por lo general son de aluminio, junto con las coronas. Esta construcción le da una gran rigidez a la jaula, ante los esfuerzos debidos a la fuerza centrífuga ó bien en el caso de los esfuerzos por corrientes de cortocircuito.

9.4 Resbalamiento

La velocidad "n" del rotor, es inferior a la velocidad "n_s" del campo magnético rotante. Dicha diferencia se suele expresar por medio del deslizamiento o resbalamiento de acuerdo a la siguiente expresión:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

De esta expresión, vemos que cuando el rotor está detenido (n = 0), el deslizamiento toma un valor igual a "1";

$$s = \frac{n_s - 0}{n_s} = 1$$

En cambio si el rotor "girara" a la velocidad sincrónica n = n_s (no lo puede hacer por sí mismo) el resbalamiento toma el valor:

$$s = \frac{n_s - n_s}{n_s} = 0$$

9.5 Fuerza electromotriz inducida en el rotor

La "fem" que se induce en el rotor, depende de la velocidad del campo magnético del estator, con respecto a los conductores del rotor. Cuando el rotor está detenido, ve "pasar" al campo magnético a la velocidad sincrónica, lo cual hace que en esta situación la "fem" tenga un valor máximo al cual llamaremos "E₂".

A medida que el rotor comienza a girar y aumentar su velocidad, la velocidad relativa del campo magnético con respecto a los conductores del rotor, disminuye y por lo tanto así lo hace la "fem" inducida, hasta llegar a un valor igual a "cero", si alcanzara la velocidad de sincronismo.

Aceptando que el aumento de la velocidad es lineal, los distintos valores que toma la "fem" se pueden graficar de acuerdo a la figura 9.23.

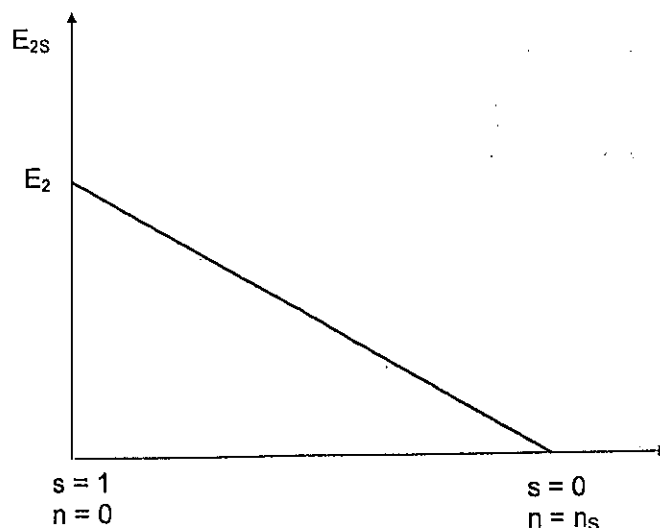


Figura 9.23 Variación de la fuerza electromotriz inducida en el rotor con la velocidad

De aquí surge que: $E_{2s} = s \cdot E_2$

A la situación del rotor detenido también se lo denomina rotor "bloqueado"

9.6 Frecuencia de las corrientes rotóricas

En forma análoga a la variación de la "fem" inducida en los conductores del rotor con la velocidad, podemos decir que cuando el rotor está detenido, la velocidad relativa es la sincrónica y la frecuencia " f_R " de la "fem" es la misma que la de las tensiones estatóricas " f ", y a medida que la velocidad del eje aumenta, la frecuencia disminuye su valor, llegando a cero en el caso de girar a velocidad sincrónica. Por lo tanto en la figura 9.24 se encuentra graficado dicha variación.

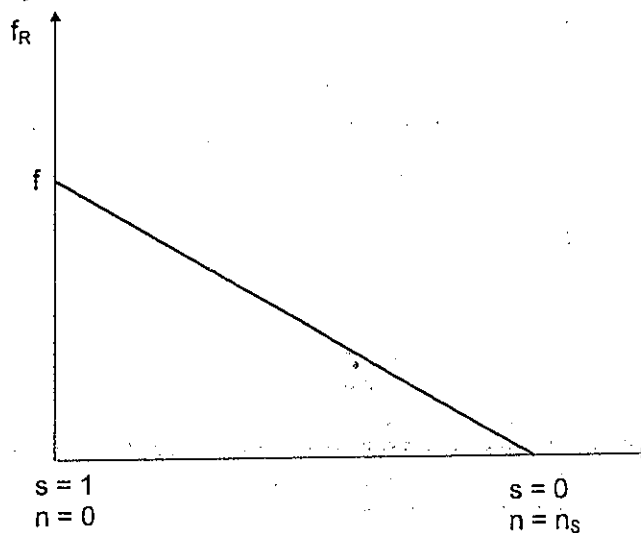


Figura 9.24 Variación de la frecuencia de la corriente en el rotor con la velocidad

En forma análoga: $f_R = s \cdot f$

9.7 Circuito equivalente del motor trifásico de inducción

El circuito equivalente del motor trifásico de inducción o asíncrono, puede asimilarse al de un transformador.

En el estator, tenemos tres bobinas que originan un campo magnético rotante. Las mismas presentan una resistencia óhmica distribuida a lo largo de los conductores que las conforman. Además parte de las líneas de campo magnético se cierran a través del aire, conformando lo que llamamos flujo disperso.

Al igual que en el transformador estos efectos los representamos por una resistencia concentrada y una reactancia de dispersión.

El núcleo magnético está dividido en dos partes, una fija que es el estator y otra móvil que es el rotor, lo cual implica una separación de aire entre ambas (entrehierro).

Por lo tanto, se va a necesitar una corriente magnetizante (bastante mayor que en el caso de un transformador debido al entrehierro mencionado), y además tenemos las pérdidas en el hierro. Ambos efectos los representaremos en forma análoga, mediante una resistencia y una reactancia en paralelo.

Las pérdidas en el hierro del rotor son muy pequeñas, cuando gira a la velocidad de régimen, ya que las frecuencias de las corrientes son pequeñas.

Luego el estator lo podemos representar por el siguiente circuito equivalente:

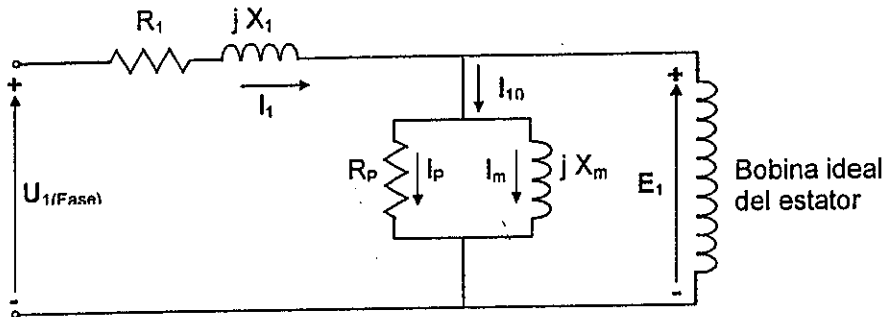


Figura 9.25 Circuito equivalente de una fase del estator

En el circuito los parámetros representan:

- R_1 : La resistencia óhmica de la bobina estatórica de una fase [Ω]
- X_1 : Reactancia de dispersión de la bobina estatórica de una fase [Ω]
- R_p : Resistencia que representa las pérdidas en el hierro por fase [Ω]
- X_m : Reactancia de magnetización por fase [Ω],
- U_1 : Tensión de fase de alimentación al motor [V]
- E_1 : Fuerza electromotriz inducida de fase en la bobina estatórica [V]
- I_1 : Corriente estatórica con carga [A]
- I_{10} : Corriente estatórica del motor en vacío [A]

En el rotor la fem inducida, dependerá de la velocidad del eje y del número de espiras del mismo.

También los conductores presentan resistencia óhmica y hay flujo disperso, el cual lo representaremos por una reactancia de dispersión cuyo valor está dado por:

$$X_{2s} = 2 \pi f_R L_2$$

Siendo el valor de la autoinductancia constante, la reactancia cambia su valor con la velocidad de la máquina, como lo hace la frecuencia f_R .

La reactancia con el rotor detenido ó bloqueado tiene el siguiente valor:

$$X_2 = 2 \pi f L_2 \quad \text{por lo tanto:}$$

$$X_{2s} = 2 \pi s f L_2 = s X_2$$

Dado que normalmente los conductores del rotor están en cortocircuito, el circuito equivalente para el mismo es el de la figura 9.26.

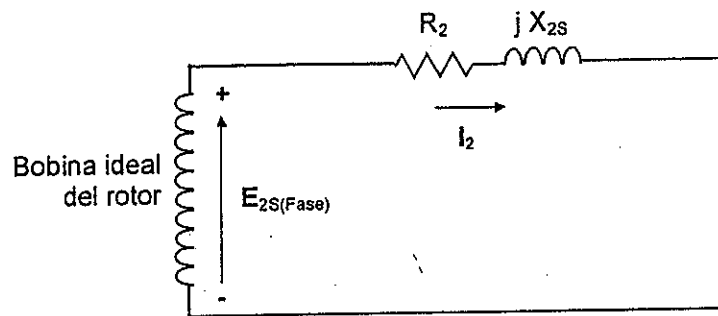


Figura 9.26 Circuito equivalente para una fase del rotor

El valor de la corriente en el rotor de acuerdo al circuito está dada por:

$$I_2 = \frac{E_{2S}}{R_2 + j \cdot X_{2S}}$$

Esta corriente toma valores dependientes de la fem inducida y de la reactancia, si reemplazamos:

$$E_{2S} = s \cdot E_2 \qquad X_{2S} = s \cdot X_2$$

$$I_2 = \frac{s \cdot E_2}{R_2 + j \cdot s \cdot X_2}$$

dividiendo por el resbalamiento nos queda

$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + j \cdot X_2}$$

De esta forma nos queda un circuito equivalente en el rotor, en el cual lo variable con la velocidad es la resistencia (desde el punto de vista matemático, no físico).

Teniendo los dos circuitos equivalentes del estator y del rotor, entre los mismos queda un acoplamiento inductivo, el cual lo podemos excluir, si referimos los valores del rotor al estator teniendo en cuenta la relación del número de espiras del estator y del rotor, igual a lo que se realizó para el transformador. En función de lo analizado el circuito equivalente por fase del motor trifásico de inducción, con sus valores referidos al estator es el de la figura 9.27.

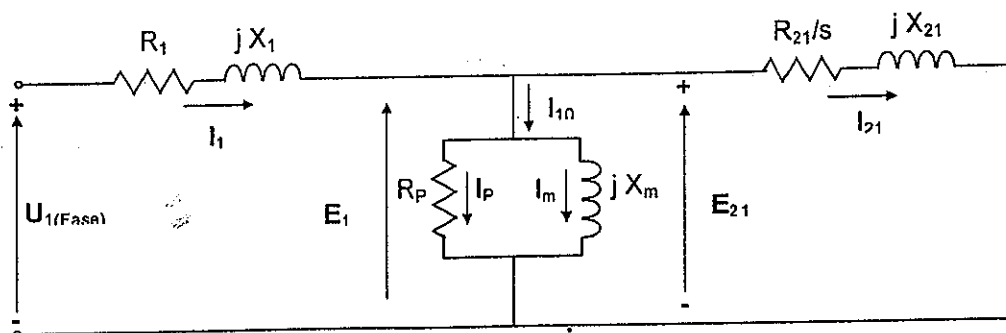


Figura 9.27 Circuito equivalente de una fase del motor trifásico de inducción

La resistencia que aparece como variable en el rotor, la podemos descomponer de la siguiente forma:

$$\frac{R_{21}}{s} = R_{21} + R_{21} \frac{(1-s)}{s}$$

Tomando en cuenta esta descomposición el circuito equivalente nos queda de la forma indicada en la figura 9.28.

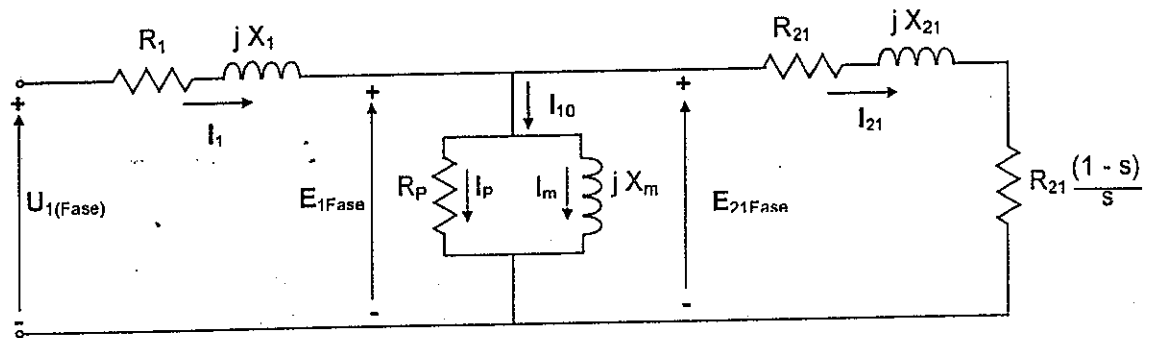


Figura 9.28 Circuito equivalente por fase del motor trifásico de inducción

9.8 Flujo de potencia

Como el circuito equivalente realizado es para una fase del motor, se debe tener en cuenta que la potencia en juego en dicho circuito representa la tercera parte de la del motor. En la figura 9.29 se encuentra graficado el circuito equivalente y el flujo de potencia a través del mismo.

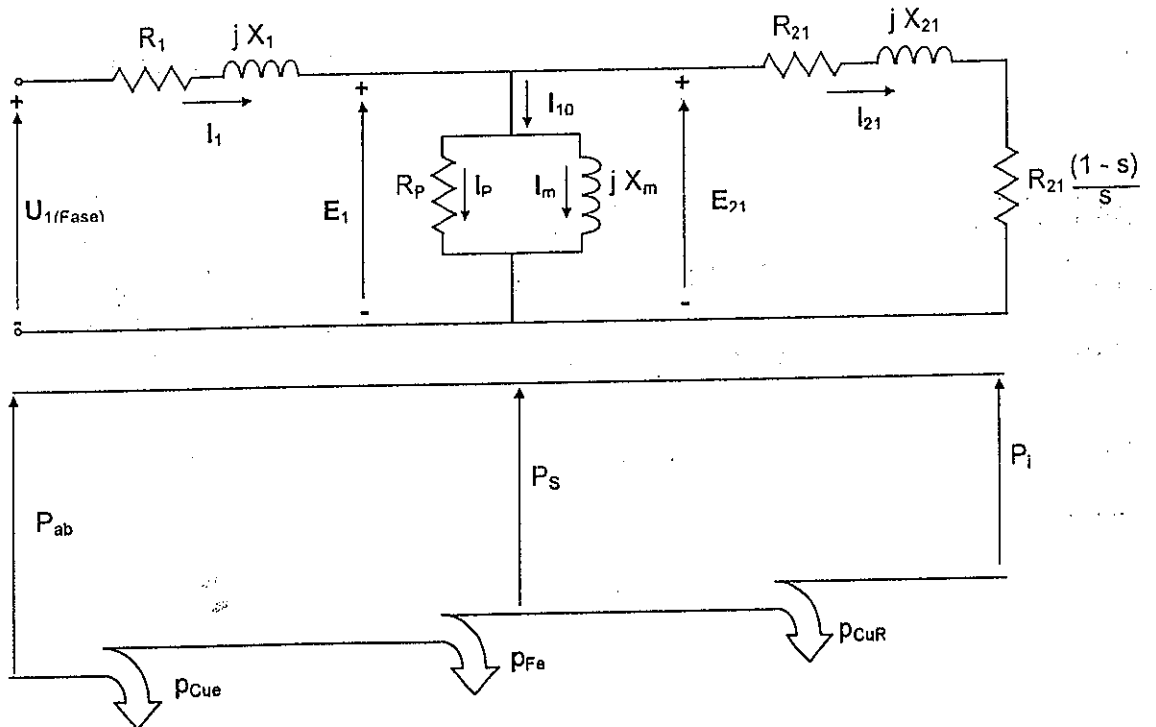


Figura 9.29 Diagrama del flujo de potencia en el motor

De la figura anterior los valores de potencia son los siguientes:

La potencia trifásica absorbida desde la red de suministro eléctrico está dada por:

$$P_{ab} = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{1L} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$$

$$P_{Cue} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad \text{Son las pérdidas en cobre de las tres fases del estator}$$

$$P_{Fe} = 3 \cdot R_p \cdot I_p^2 = 3 \frac{E_1^2}{R_p} = \frac{E_{1L}^2}{R_p} \quad \text{Son las pérdidas en el hierro del motor}$$

$$P_{CuR} = 3 \cdot R_{21} \cdot I_{21}^2 \quad \text{Son las pérdidas en cobre de las tres fases del rotor}$$

$$P_i = 3 \cdot I_{21}^2 \cdot R_{21} \frac{(1-s)}{s} \quad \text{Potencia interna}$$

La potencia que llamamos interna es la potencia que nos queda después de haber quitado todas las pérdidas electromagnéticas que tiene el motor, lo cual nos indica que es la potencia que nos queda para suplir las pérdidas mecánicas y la potencia que entrega en el eje al equipo que impulsa, que se denomina potencia útil.

$$P_i = P_u + p_m$$

La potencia que pasa del estator al rotor a través del entrehierro, mediante el flujo magnético, la llamaremos potencia sincrónica y su valor está dado por:

$$P_s = P_i + P_{CuR} = P_{ab} - P_{Cue} - P_{Fe}$$

$$P_s = 3 \cdot I_{21}^2 \cdot R_{21} \frac{(1-s)}{s} + 3 \cdot I_{21}^2 \cdot R_{21} = 3 \cdot I_{21}^2 \frac{R_{21}}{s}$$

$$P_s = \frac{P_{CuR}}{s} = \frac{P_i}{(1-s)}$$

9.9 Circuito equivalente aproximado

A los efectos prácticos de la resolución del circuito, el mismo suele simplificarse, agrupando las pérdidas en el hierro, junto con las mecánicas (no incluidas en el circuito equivalente, que solo contempla la parte electromagnética), recibiendo el conjunto el nombre de pérdidas rotacionales.

$$P_r = P_{Fe} + p_m$$

De esta forma el circuito equivalente nos queda como el de la figura 9.30.

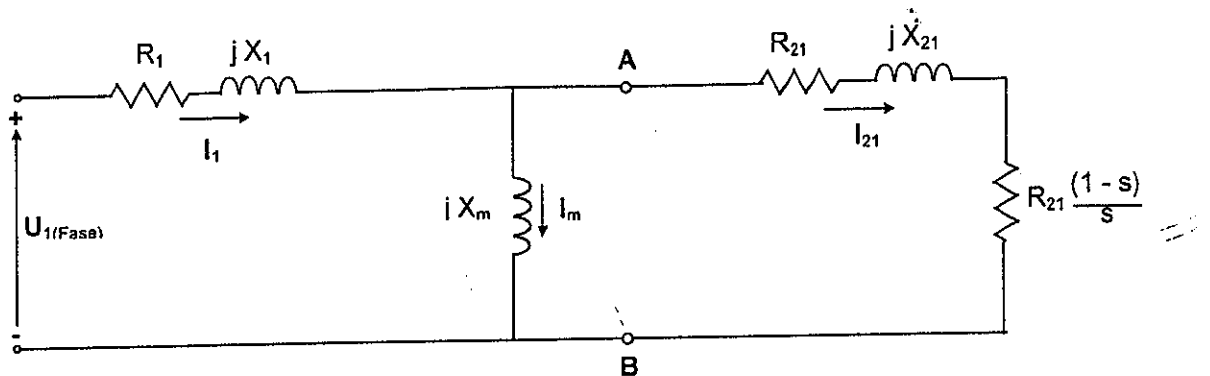


Figura 9.30 Circuito equivalente aproximado de una fase de un motor trifásico de inducción

Otra simplificación que se realiza para trabajar con el circuito equivalente es reemplazar el circuito desde los bornes A - B por una fuente equivalente de Thevenin, la cual tiene los siguientes valores:

$$E_{TH\text{Fase}} = U_{1\text{Fase}} \frac{jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m}$$

La impedancia será:

$$Z_{TH} = \frac{jX_m \cdot (R_1 + jX_1)}{R_1 + jX_1 + jX_m}$$

Operando nos quedan los siguientes valores:

$$R_{TH} = \frac{R_1 \cdot X_m^2}{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}$$

$$X_{TH} = \frac{(X_1^2 \cdot X_m + X_1 \cdot X_m^2) + R_1^2 \cdot X_m}{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}$$

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH}$$

Quedando el circuito equivalente de la siguiente forma:

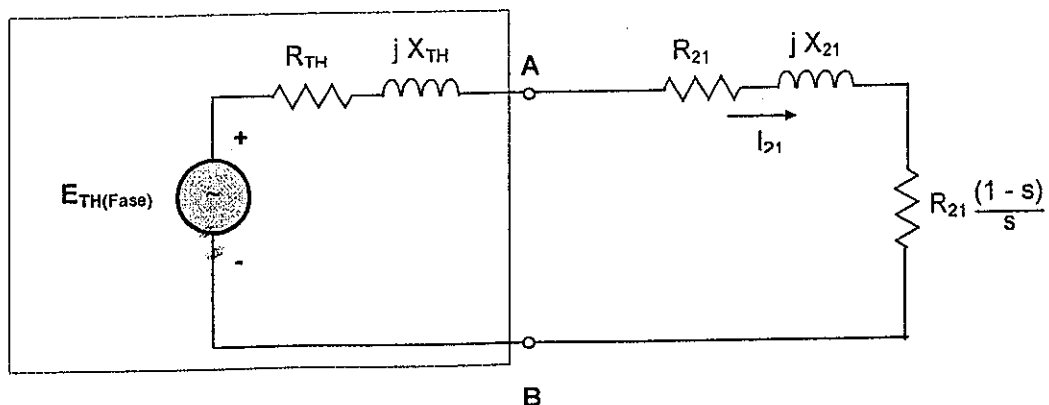


Figura 9.31 Circuito equivalente con fuente de Thevenin

9.10 Potencia y cupla interna

De acuerdo con el circuito equivalente, la potencia interna está representada por la resistencia de carga cuyo valor es:

$$R_{21} \frac{(1-s)}{s}$$

Por lo tanto:

$$P_i = 3 \cdot I_{21}^2 \cdot R_{21} \frac{(1-s)}{s}$$

Siendo:

$$I_{21} = \frac{E_{\text{THFase}}}{\sqrt{\left(\frac{R_{21}}{s} + R_{\text{TH}}\right)^2 + (X_{21} + X_{\text{TH}})^2}}$$

Reemplazando:

$$P_i = 3 \frac{E_{\text{THFase}}^2 \cdot R_{21} \left(\frac{1-s}{s}\right)}{\left(\frac{R_{21}}{s} + R_{\text{TH}}\right)^2 + (X_{21} + X_{\text{TH}})^2}$$

La cupla interna está dada por:

$$T_i = \frac{P_i}{\omega} \quad \text{siendo } \omega \text{ la velocidad angular en radianes sobre segundo}$$

Como la velocidad del eje de los motores está expresada en revoluciones por minuto (r.p.m.), nos queda:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \omega_s (1-s) = \frac{60 \cdot f}{p} (1-s)$$

$$T_i = 3 \frac{E_{\text{THFase}}^2 \cdot R_{21} \left(\frac{1-s}{s}\right)}{\left[\left(\frac{R_{21}}{s} + R_{\text{TH}}\right)^2 + (X_{21} + X_{\text{TH}})^2\right] \omega_s (1-s)}$$

$$T_i = 3 \frac{E_{\text{THFase}}^2 \frac{R_{21}}{s}}{\left[\left(\frac{R_{21}}{s} + R_{\text{TH}}\right)^2 + (X_{21} + X_{\text{TH}})^2\right] \omega_s}$$

La representación de la cupla en función del resbalamiento se muestra en la figura 9.32.

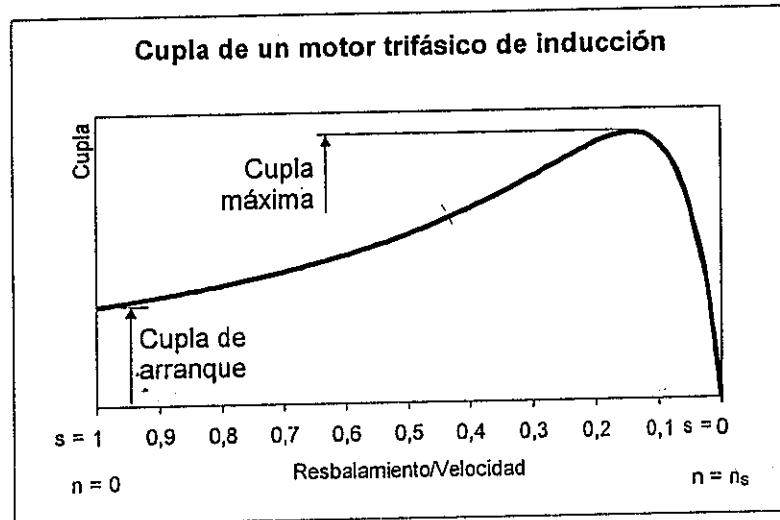


Figura 9.32 Cupla de un motor trifásico de inducción en función del resbalamiento

El valor de la cupla es proporcional al cuadrado de E_{TH} , lo cual equivale a decir a la tensión de alimentación, ya que la diferencia de valores es muy pequeña.

En el momento de arranque, la velocidad vale cero y el resbalamiento toma un valor igual a "1", con lo que nos queda:

$$T_{ia} = 3 \frac{E_{TH\text{fase}}^2 \cdot R_{21}}{\left[(R_{21} + R_{TH})^2 + (X_{21} + X_{TH})^2 \right]} \cdot \omega_s$$

A medida que aumenta la velocidad del rotor, también lo hace la cupla y después de pasar por máximo disminuye bruscamente.

La zona de funcionamiento, es la que se encuentra a la derecha del valor máximo, y a la velocidad en la que se iguala la cupla motora con la cupla resistente de acuerdo a lo mostrado en la figura 9.33.

En esta zona el motor se adapta a pequeños cambios en la cupla resistente, a saber:

- Si la cupla resistente aumenta, el eje del motor tiende a disminuir su velocidad, con lo cual aumenta su cupla motora hasta que ambas se igualan (Punto A), y se mantiene en esa nueva situación.
- Si la cupla resistente se reduce, el eje del motor tiende a aumentar su velocidad, con lo cual disminuye la cupla motora y se equilibra en la nueva situación (Punto B)

En esta zona que es la de funcionamiento estable, la variación de la velocidad con la cupla es muy pequeña.

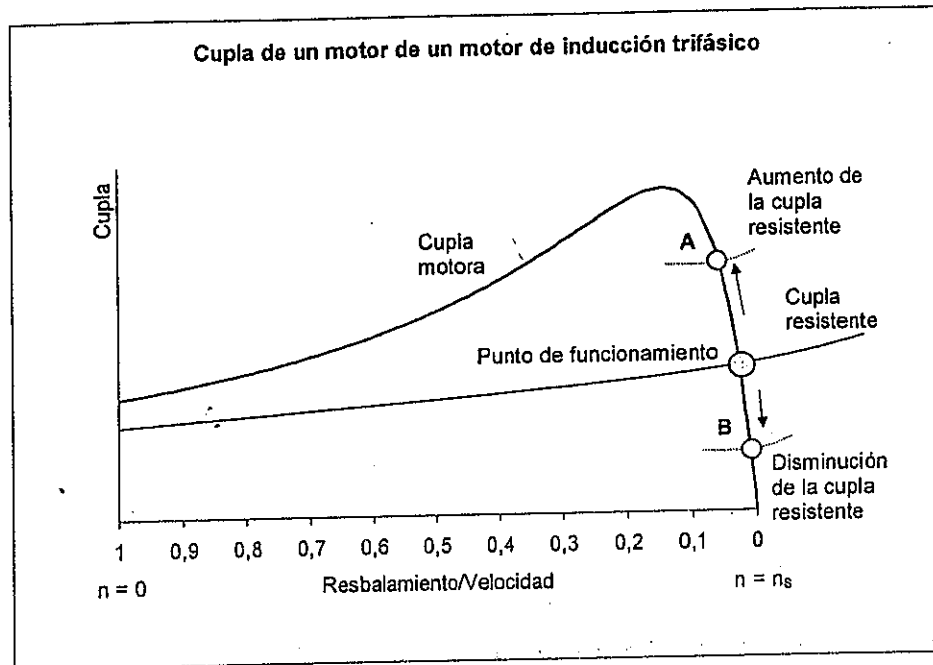


Figura 9.33 Zona de funcionamiento de un motor trifásico de inducción

En esta zona que es la de funcionamiento estable, la variación de la velocidad con la cupla es muy pequeña.

El valor máximo de la cupla se puede obtener, hallando el valor del resbalamiento al cual se produce. Esta cupla será máxima, cuando la potencia que se consume en la resistencia del rotor (R_{21}/s), sea máxima, lo cual sucede cuando se cumple:

$$\frac{R_{21}}{s_{Tmax}} - jX_{21} = R_{TH} + jX_{TH} \quad \text{o sea:}$$

$$\frac{R_{21}}{s_{Tmax}} = R_{TH} + jX_{TH} + jX_{21}$$

Luego:

$$s_{Tmax} = \frac{R_{21}}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_{21})^2}}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación de la Cupla interna nos queda:

$$T_{imax} = \frac{3 \cdot E_{TH}^2}{\omega_s} \frac{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_{21})^2}}{\left[\left(R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_{21})^2} \right)^2 + (X_{TH} + X_{21})^2 \right]}$$

Este valor de la cupla máxima no depende de la resistencia del rotor, por lo cual el mismo se mantiene constante. Lo que se puede modificar es la velocidad a la cual se produce dicho máximo, mediante el agregado de resistencias al rotor, lo cual solamente puede realizarse en el motor con rotor bobinado. Esto hace que el valor de la cupla máxima se traslade a velocidades menores, con lo cual se aumenta el valor de la cupla en el arranque.

En la figura 9.34 se observa las distintas curvas de cupla de acuerdo a distintos valores de resistencias en el rotor.

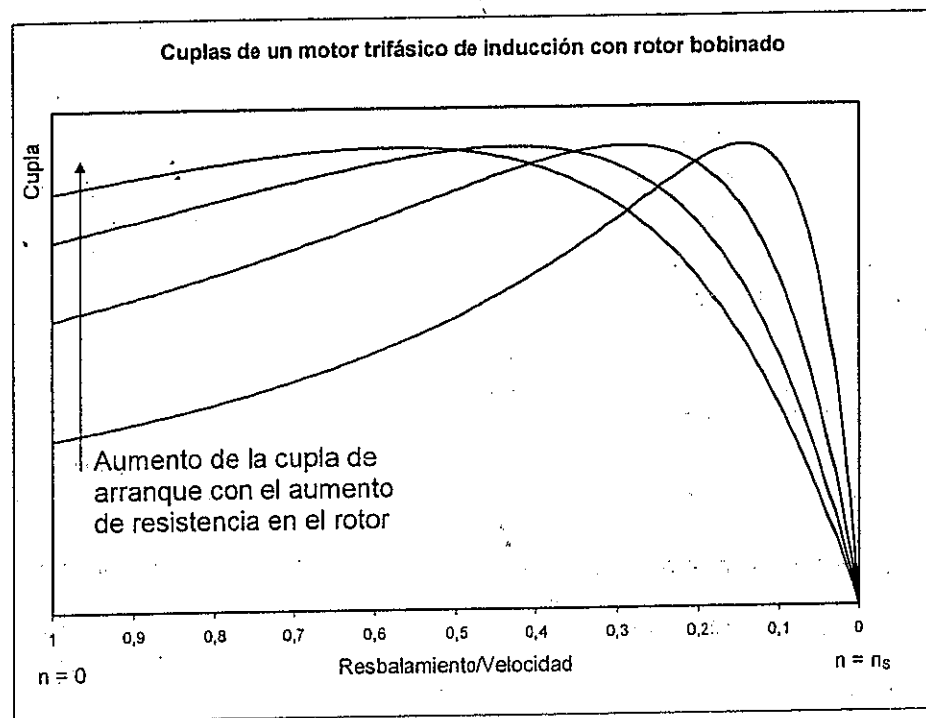


Figura 9.34 Variación de la cupla de un motor trifásico de inducción con agregado de resistencias en el rotor

9.11 Intensidad de corriente

Si analizamos el circuito equivalente, vemos que la resistencia que representa la carga en el eje, en el momento de arranque ($s = 1$), toma un valor igual a cero (cortocircuito) y a medida que aumenta la velocidad va aumentando su valor hasta que en el caso de llegar a velocidad sincrónica su valor sería infinito.

De aquí que la corriente varía entre el momento de arranque y la velocidad nominal o de plena carga.

La corriente que toman estos motores en el momento de arranque es elevada y del orden de 6 a 8 veces la corriente nominal, pudiéndose observar su variación en la curva de la figura 9.35. En la cual se han superpuesto las curvas de potencia y cupla.

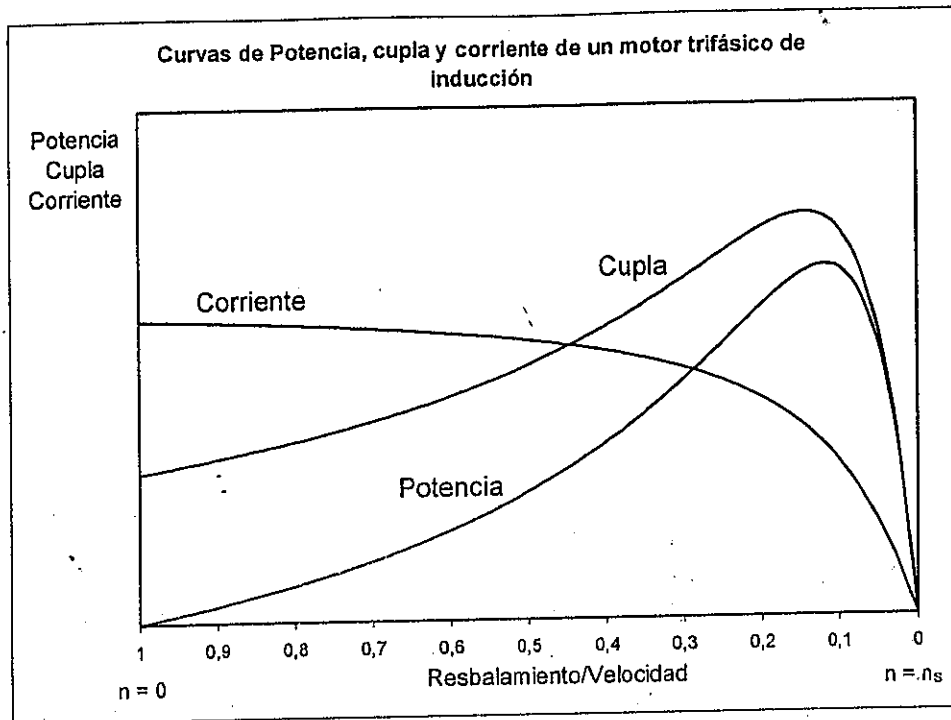


Figura 9.35 Variación de la potencia, cupla y corriente con la velocidad de un motor trifásico de inducción

9.12 Conexión de los bobinados estáticos

Los bobinados del estator pueden ser conectados en estrella o en triángulo, dependiendo de la misma de la tensión de suministro y de lo que soporten dichas bobinas. A tales efectos la bornera con la que viene equipado el motor, trae normalizada su disposición y su esquema es el de la figura 9.36

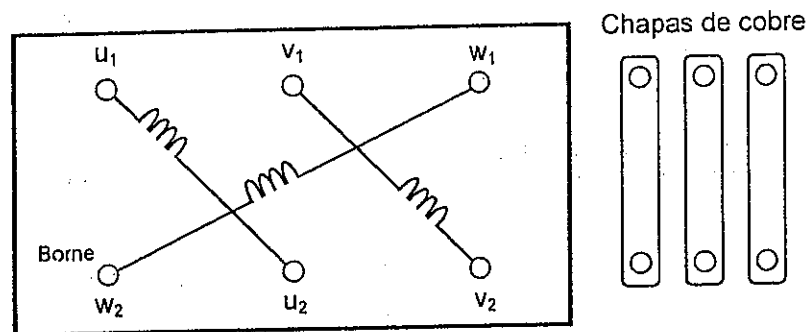


Figura 9.36 Disposición de los bobinados en un motor trifásico de inducción

Las bobinas están conectadas como se muestra en la figura. Las distancia entre los bornes tanto vertical como horizontal son iguales, ya que normalmente cuenta con tres chapas de cobre, con dos agujeros separados por dicha distancia, de forma tal de poder unir eléctricamente con ellas, dos bornes entre sí. De esa forma, los bobinados se pueden conectar en estrella o en triángulo de acuerdo a la disposición mostrada en la figura 9.37

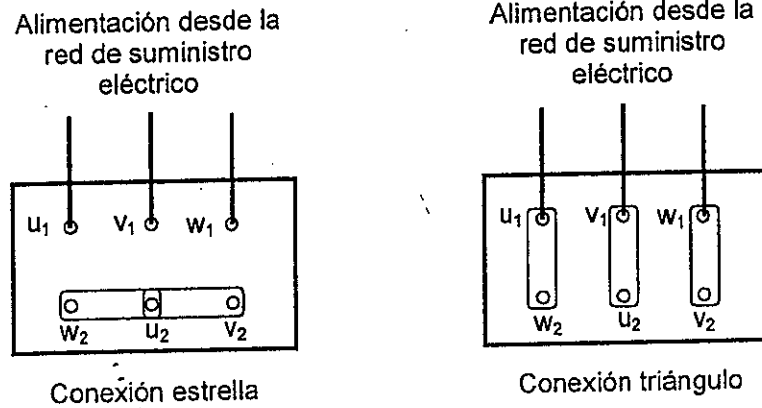


Figura 9.37 Esquema para conectar los bobinados en estrella o triángulo

Para efectuar la inversión del sentido de giro, se debe cambiar el sentido de giro del campo magnético rotante, para lo cual se debe proceder a cambiar la secuencia de alimentación, invirtiendo la conexión de dos de las fases, tal como se muestra en la figura 9.38.

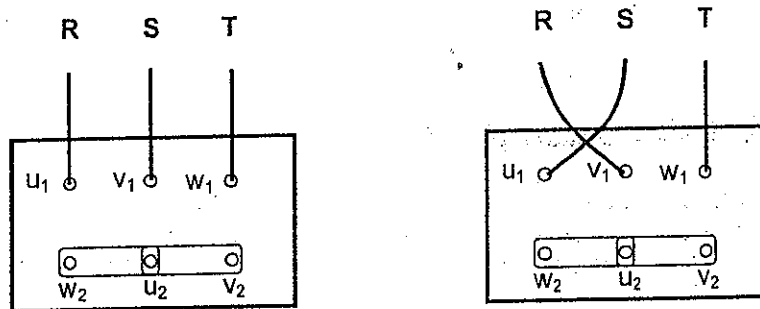


Figura 9.38 Cambio del sentido de giro de un motor de inducción trifásico

9.13 Determinación de los parámetros del circuito equivalente

Ensayo en vacío

Se aplica al motor una tensión igual a la nominal y se lo deja girar libremente, sin ninguna carga acoplada a su eje. En este caso la potencia que absorbe es consumida por las siguientes pérdidas:

- Pérdidas en el cobre del estator
- Pérdidas en el hierro
- Pérdidas mecánicas

Las pérdidas en el cobre y en el hierro del rotor son despreciables, debido a que el flujo magnético que atraviesa el rotor tiene muy poca variación debido a la velocidad del mismo, que es cercana a la del campo magnético rotante. Esto hace que la fem inducida sea muy pequeña y por lo tanto así lo serán las corrientes que se originan en el mismo.

El circuito de ensayo a utilizar es el de la figura 9.39.

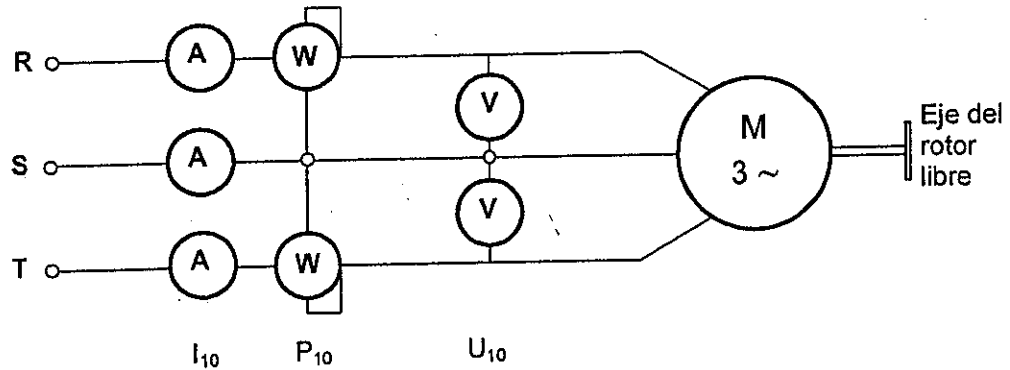
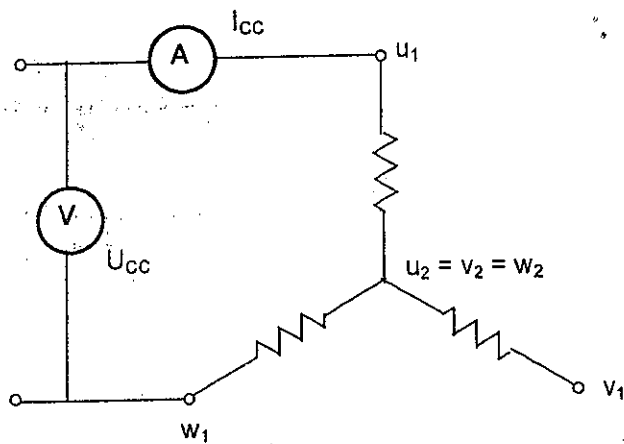


Figura 9.39 Circuito de ensayo en vacío de un motor trifásico de inducción

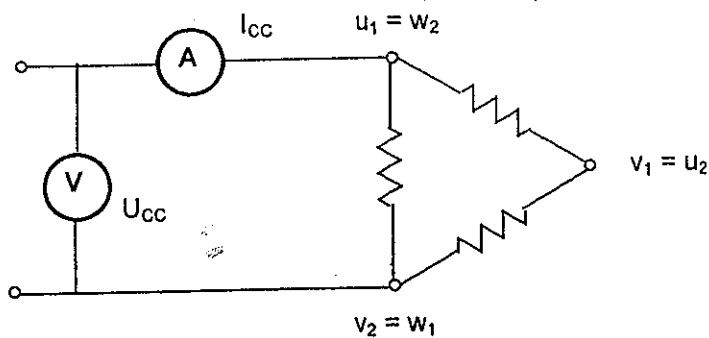
Previo a conectar el motor se deberá medir la resistencia óhmica de los bobinados estáticos aplicando una tensión continua a los bobinados y midiendo la corriente que pasa por los mismos.

Si se puede tener acceso a las bobinas en forma individual la medición es directa pero si solo tenemos los bornes de alimentación se debe tener en cuenta como están conectadas, de acuerdo a la figura 9.40.



Conexión estrella

$$R_1 = \frac{U_{cc}}{2 \cdot I_{cc}}$$



Conexión triángulo

$$R_1 = \frac{3 \cdot U_{cc}}{2 \cdot I_{cc}}$$

Figura 9.40 Medición de la resistencia de las bobinas estáticas

La potencia activa medida mediante los vatímetros, es la suma de las pérdidas mecánicas, en el hierro y las del cobre del estator con la corriente de vacío. Si descontamos estas últimas pérdidas nos queda:

$$P_{Fe} + p_m = P_{10} - 3 R_{10} \cdot I_{10}^2$$

Para poder desglosar las pérdidas en el hierro de las mecánicas, se procede a efectuar el siguiente ensayo:

1. Se procede a medir las lecturas de los instrumentos con el motor en vacío y tensión nominal
2. Se procede a disminuir la tensión aplicada, con lo cual las pérdidas en el hierro disminuyen en forma cuadrática con dicha disminución, mientras que las mecánicas permanecen constantes, ya que la velocidad prácticamente no varía. Se miden los valores.
3. Se traza un gráfico, llevando en abscisas la tensión aplicada y en ordenadas la suma de las pérdidas en el hierro y mecánicas (descontando las del cobre del estator), de acuerdo a la figura 9.41.
4. Con los puntos obtenidos de los ensayos trazamos la curva interpolando, siendo la misma una parábola.
5. Se extrapola hasta el valor de la tensión igual a cero (pérdidas en el hierro nulas), y donde corta al eje de abscisas obtenemos el valor de las pérdidas mecánicas

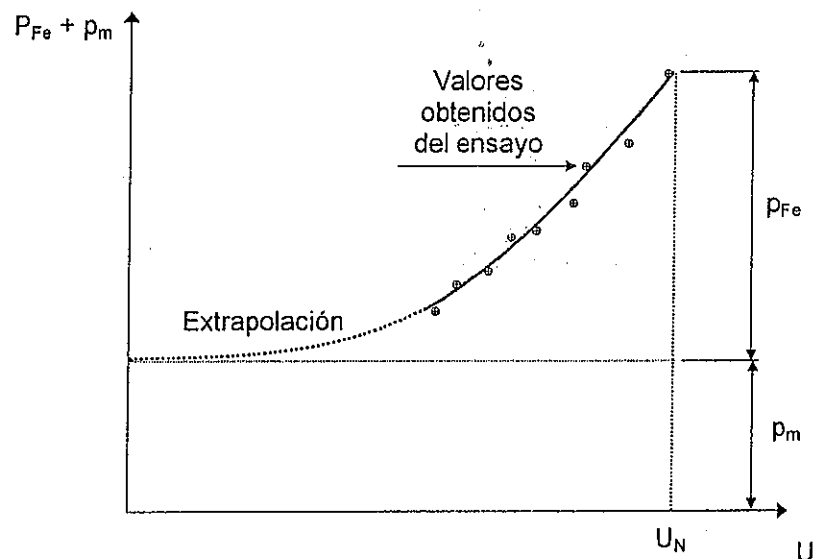


Figura 9.41 Gráfico para desglosar las pérdidas

Como la velocidad del rotor es cercana a la del sincronismo, la resistencia rotórica reflejada en el estator tiene un valor muy grande, estando esta en paralelo con la reactancia de magnetización y con la resistencia de pérdidas en el hierro. Dado que la corriente de magnetización tiene un valor elevado dado el espacio de aire entre estator y rotor (reactancia pequeña), el circuito equivalente para este ensayo nos queda, tal como el mostrado en la figura 9.42.

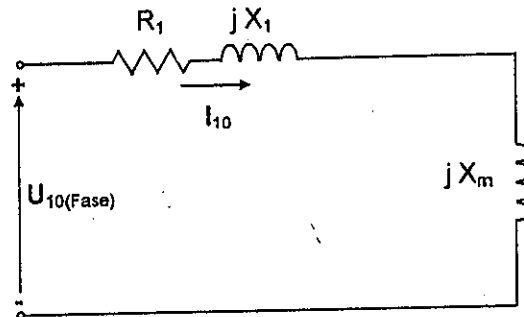


Figura 9.42 Circuito equivalente para el ensayo en vacío

De los valores medidos y en función del circuito equivalente obtenemos:

$$Z_{10} = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2} = \frac{U_{10\text{Linea}}}{\sqrt{3} \cdot I_{10}} = \frac{U_{10\text{Fase}}}{3 \cdot I_{10}} \quad \text{de donde:}$$

$$X_1 + X_m = \sqrt{Z_{10}^2 - R_1^2}$$

También en forma aproximada obtenemos:

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{\sqrt{3} \cdot U_{10\text{Linea}} \cdot I_{10}}$$

$$I_p = I_{10} \cdot \cos \varphi_{10}$$

$$I_m = I_{10} \cdot \sin \varphi_{10}$$

$$R_p = \frac{P_{Fe}}{3 \cdot I_p^2}$$

Ensayo a rotor bloqueado

Este ensayo se efectúa bloqueando el eje de la máquina, con lo cual la velocidad del mismo será nula.

En este caso en circuito de ensayo nos queda según la figura 9.43. Al mismo se le aplicará tensión reducida a los efectos de no superar la corriente nominal o de plena carga del motor, para no sobrepasar su temperatura admisible, aunque el ensayo se debe realizar con rapidez ya que al estar el rotor detenido, no hay ventilación forzada.

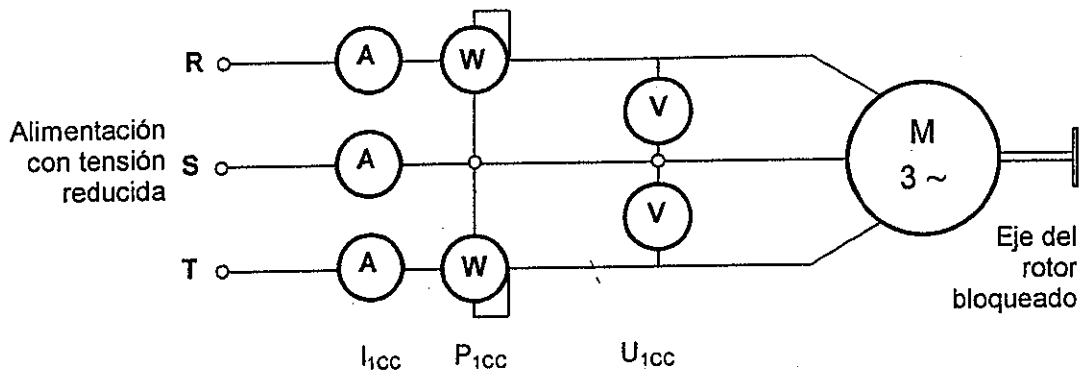


Figura 9.43 Circuito de ensayo a rotor bloqueado

Como el resbalamiento en este caso es igual a la unidad, la resistencia que representa la carga es nula, con lo que el circuito equivalente en esta situación lo aproximamos al de la figura 9.44.

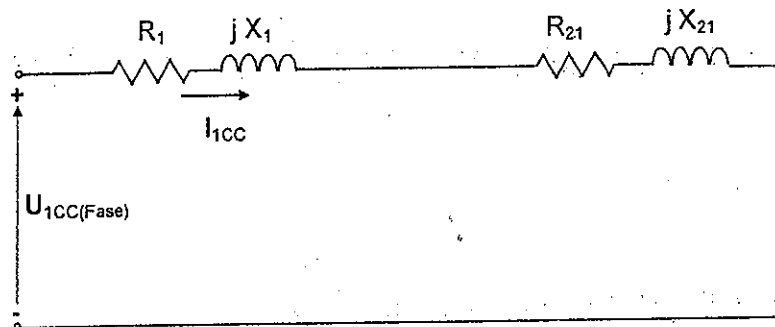


Figura 9.44 Circuito equivalente para ensayo a rotor bloqueado

La medición de potencia activa en esta situación nos indica las pérdidas en el cobre del estator y del rotor, ya que las pérdidas en el hierro a tensión reducida las despreciamos. Luego obtenemos:

$$P_{1CC} = p_{Cue} + p_{CueR} = 3 \cdot I_{1CC}^2 (R_1 + R_{21})$$

Como en el ensayo anterior medimos la resistencia del estator nos queda:

$$R_{21} = \frac{P_{1CC}}{3 \cdot I_{1CC}^2} - R_1$$

$$Z_{1CC} = \sqrt{(R_1 + R_{21})^2 + (X_1 + X_{21})^2}$$

$$X_1 + X_{21} = \frac{U_{1CCLinea}}{\sqrt{3} \cdot I_{1CC}}$$

Adoptando que: $X_1 = X_{21}$ podemos con el valor obtenido del ensayo en vacío:

$$X_m = (X_1 + X_m) - X_1$$

9.14 Arranque de motores

A los efectos de reducir la corriente que toma en el momento de arranque este tipo de motores, la cual puede afectar a las instalaciones anexas al mismo, los sistemas que se utilizan son los siguientes:

Motores con rotor jaula de ardilla

Arranque directo

Se puede realizar siempre que la red pueda suministrar la corriente de arranque, sin afectar otras instalaciones anexas (como computadoras, flujo luminoso en instalaciones de iluminación por efectos de la caída de tensión, etc).

Se utiliza normalmente en motores de pequeña potencia.

Arranque a tensión reducida

Para reducir la corriente de arranque, se aplica a los motores en el momento de arranque una tensión menor a la nominal o de plena potencia. Se debe tener en cuenta que la cupla motora se ve reducida con el cuadrado de la tensión aplicada, por lo que se debe verificar que la cupla resistente sea inferior a esta.

- Arranque estrella-triángulo

El mismo consiste en arrancar el motor con sus bobinados conectados en estrella y luego que alcanza una cierta velocidad, cambiar la conexión a triángulo, recibiendo plena tensión.

Con esto se logra reducir la corriente de la línea a la tercera parte, pero también la cupla se reduce a la tercera parte.

En la figura 9.45 a y 9.45 b se ven las curvas de cupla y corriente en el proceso de arranque.

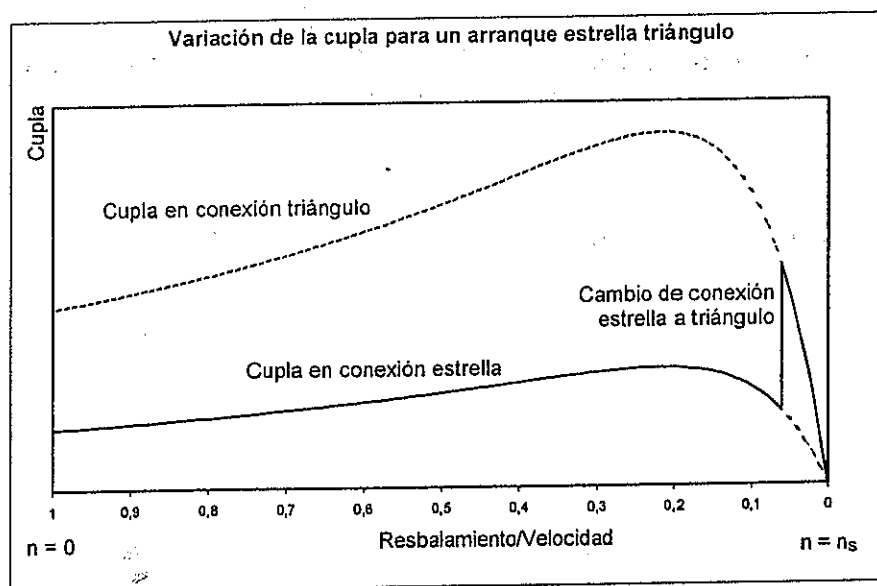


Figura 9.45 a Variación de la cupla en un arranque estrella triángulo

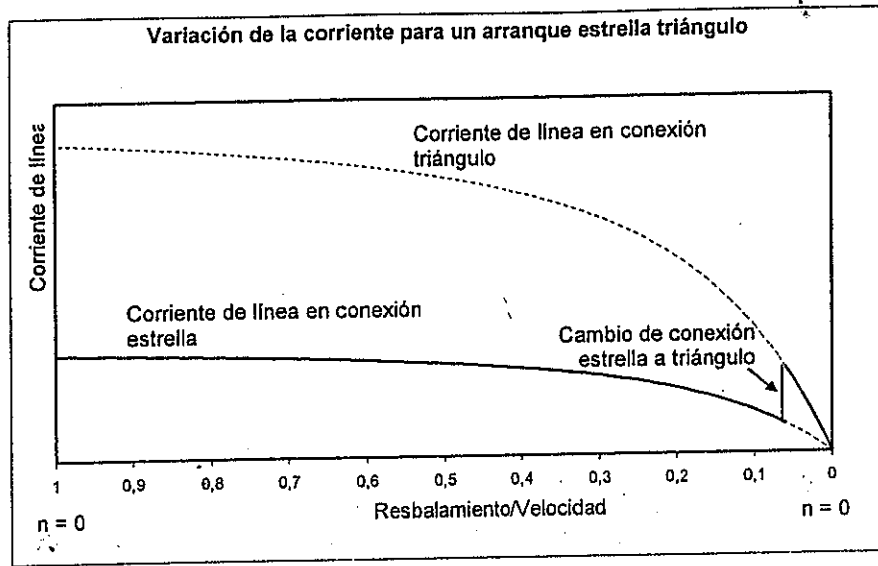


Figura 9.45 b Variación de la corriente en un arranque estrella triángulo

Este sistema se utiliza para arrancar en vacío o con par resistente débil. En la figura 9.46 se presenta el esquema eléctrico de comando con las protecciones correspondientes.

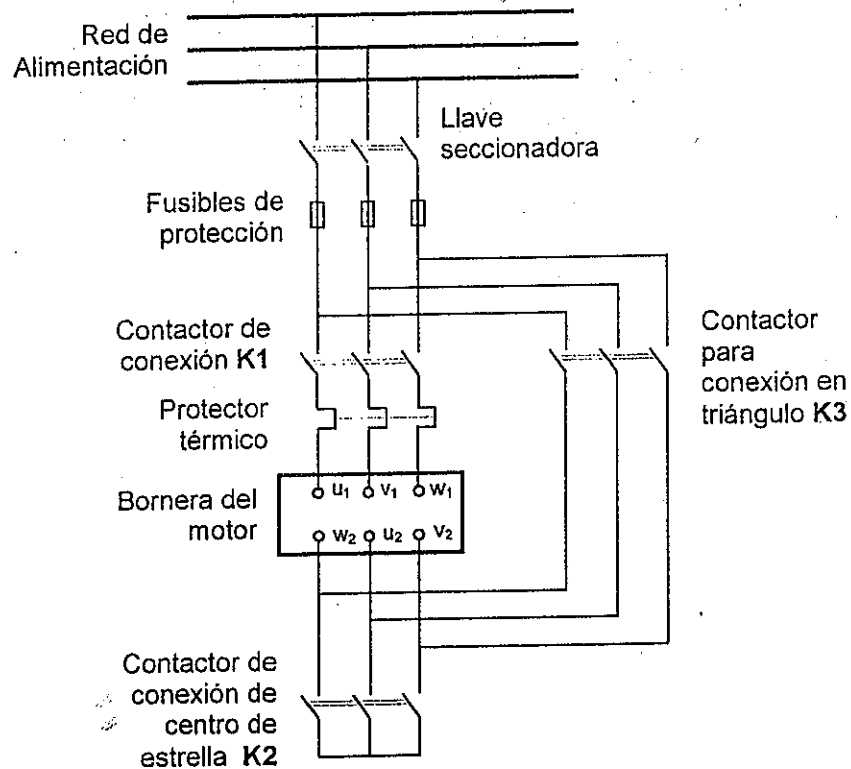


Figura 9.46 Esquema eléctrico de arranque estrella triángulo

La secuencia de arranque es el siguiente:

- a) Se cierra la llave seccionadora para habilitar con tensión al sistema
- b) Se cierra el contactor K2, con lo cual se forma el centro de estrella de las bobinas del motor.
- c) Se cierra el contactor K1 con lo cual el motor recibe tensión del sistema de alimentación y se produce el arranque.
- d) Después de un cierto tiempo predeterminado de acuerdo al tipo de motor, se abre el contactor K2 y se cierra el K3 con lo cual los bobinados se conectan en triángulo y trabaja a plena potencia.

Este proceso se realiza en forma automática y con "enclavamientos" que no permitan efectuar maniobras erróneas que puedan perjudicar el sistema (por ejemplo los contactores K2 y K3 no pueden estar simultáneamente cerrados ya que estaríamos en presencia de un cortocircuito).

Se debe tener en cuenta que para este tipo de arranque, tanto la tensión de suministro como la tensión que soportan las bobinas del motor. En otras palabras la tensión de "línea" del suministro debe ser igual a la tensión que soportarán las bobinas conectadas en triángulo. Por ejemplo si la tensión de alimentación es de 3 x 380 V, la bobina del motor debe ser apta para 380 V. Si en cambio la bobina es apta para 220 V, el motor solo puede trabajar en conexión estrella y no se puede realizar este tipo de arranque.

• Arranque con autotransformador

Mediante este sistema, la tensión de arranque se puede reducir al valor que se desee de acuerdo a las necesidades. En la figura 9.47 se ha dibujado el esquema eléctrico correspondiente.

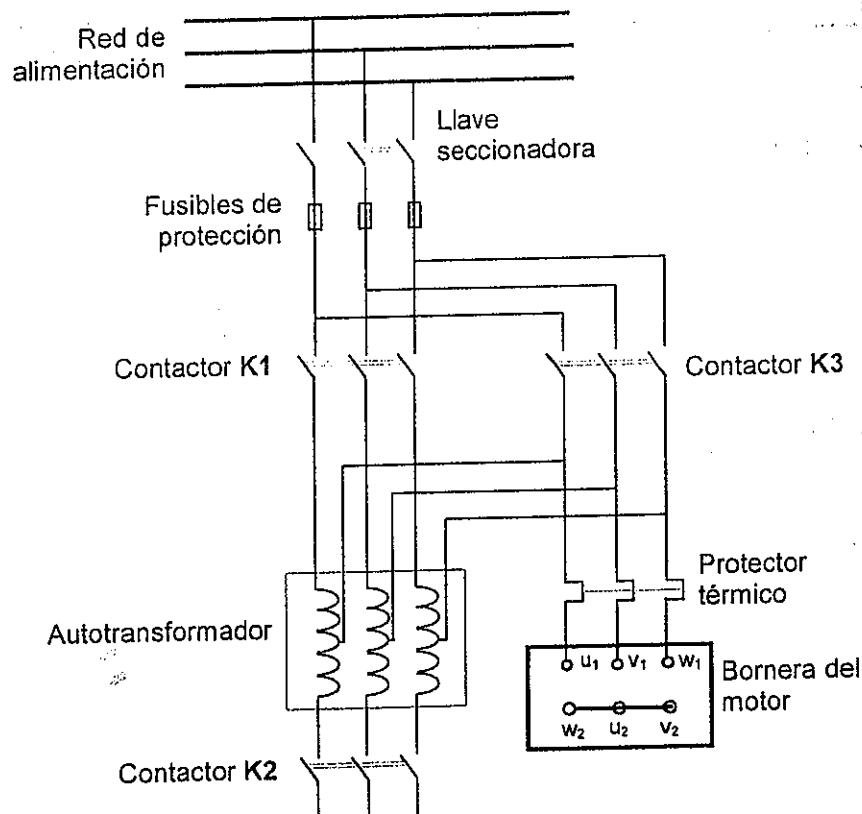


Figura 9.47 Esquema eléctrico de arranque con autotransformador

En este caso al cerrar los contactores K1 y K2, el motor recibe una tensión preestablecida a través del autotransformador, después de un cierto tiempo se abren dichos contactores y se cierra el K3, con lo cual el motor trabaja a plena tensión.

- Arranque con resistencia o reactancias inductivas en serie con el estator

Aquí la tensión se reduce debido a la caída de tensión en la impedancias que colocan en serie con las bobinas estatóricas. En la figura 9.48 se observa el esquema eléctrico de este tipo de arranque.

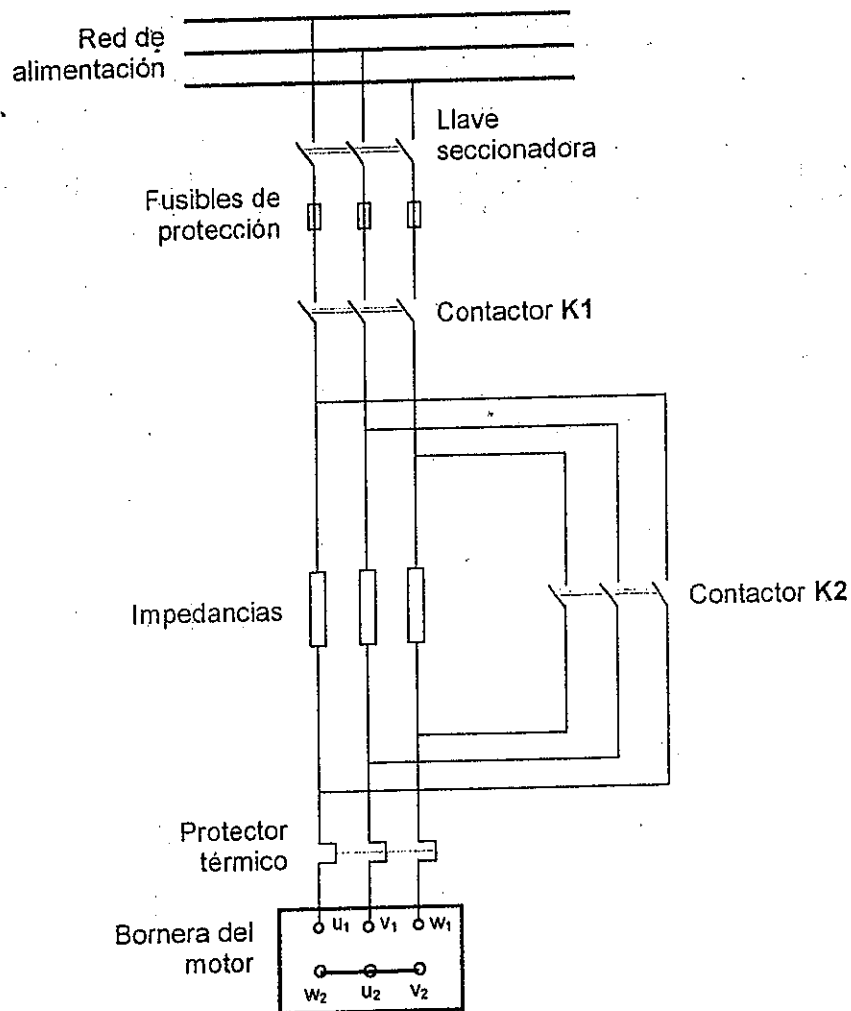


Figura 9.48 Arranque con impedancias

Los pasos operativos son:

Se cierra el contactor K1 y el motor recibe tensión a través de las impedancias, cuyo valor se ha predeterminado, luego de un cierto tiempo el contactor K2 se cierra y cortocircuita las impedancias recibiendo el motor plena tensión.

Motor con doble jaula de ardilla

Hay motores que se fabrican con una doble jaula, a los fines de aumentar en el arranque la resistencia del rotor, con lo que se disminuye la corriente y mejora la cupla.

La forma constructiva, básicamente es la dibujada en la figura 9.49.

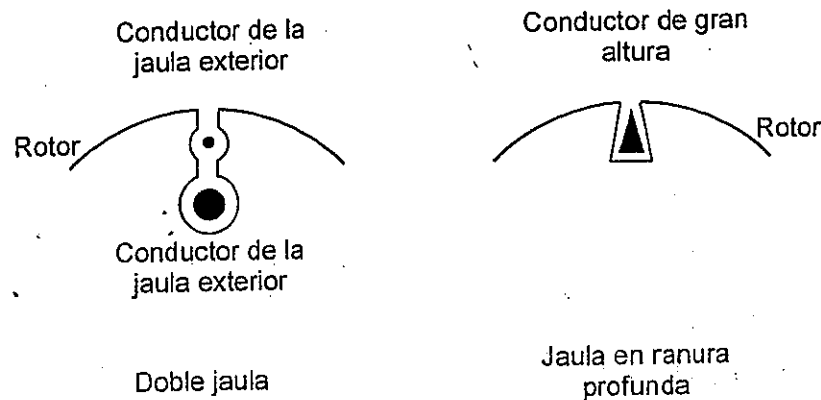


Figura 9.49 Rotores con doble jaula o con ranura profunda

De esta forma, el flujo de dispersión del conductor externo es mayor que la del interno, ya que las líneas de campo magnético del primero, se cierran en gran magnitud por el aire, mientras que la del conductor interno se cierra prácticamente por el núcleo ferromagnético.

Esto hace que la inductancia del conductor exterior (menor sección) sea mayor que la del interior. En cambio la resistencia óhmica del conductor exterior (menor sección) sea mayor que la del interior.

En el momento del arranque la frecuencia de las corrientes rotóricas es máxima, por lo que la jaula exterior presenta una reactancia menor que la interior (y también menor impedancia), lo cual lleva a que las corrientes circulen en su mayor parte por la jaula exterior, lo cual trae aparejado mejor cupla de arranque.

A medida que aumenta la velocidad la frecuencia de las corrientes del rotor disminuyen y la reactancia va tomando menor influencia y las corrientes comienzan a circular en mayor medida por la jaula interior de menor resistencia.

Este tipo de motor tiene la desventaja de su mayor costo, debido a su dificultad constructiva.

Motores con rotor bobinado

En este tipo de motores, el arranque se efectúa agregando resistencias al rotor, con lo cual se reduce la corriente de arranque y además se aumenta la cupla de arranque. Las resistencias se van quitando a medida que el motor toma velocidad, para quedar totalmente excluidas en funcionamiento normal (de lo contrario en las mismas se tendría un valor de pérdidas indeseable). Un esquema eléctrico de este tipo de motor es el de la figura 9.50.

El motor arranca con máxima resistencia incluida en el rotor o sea con los contactores K2 y K3 abiertos y luego se cierran primero el K3 y luego el K2, con lo que quedan totalmente eliminadas.

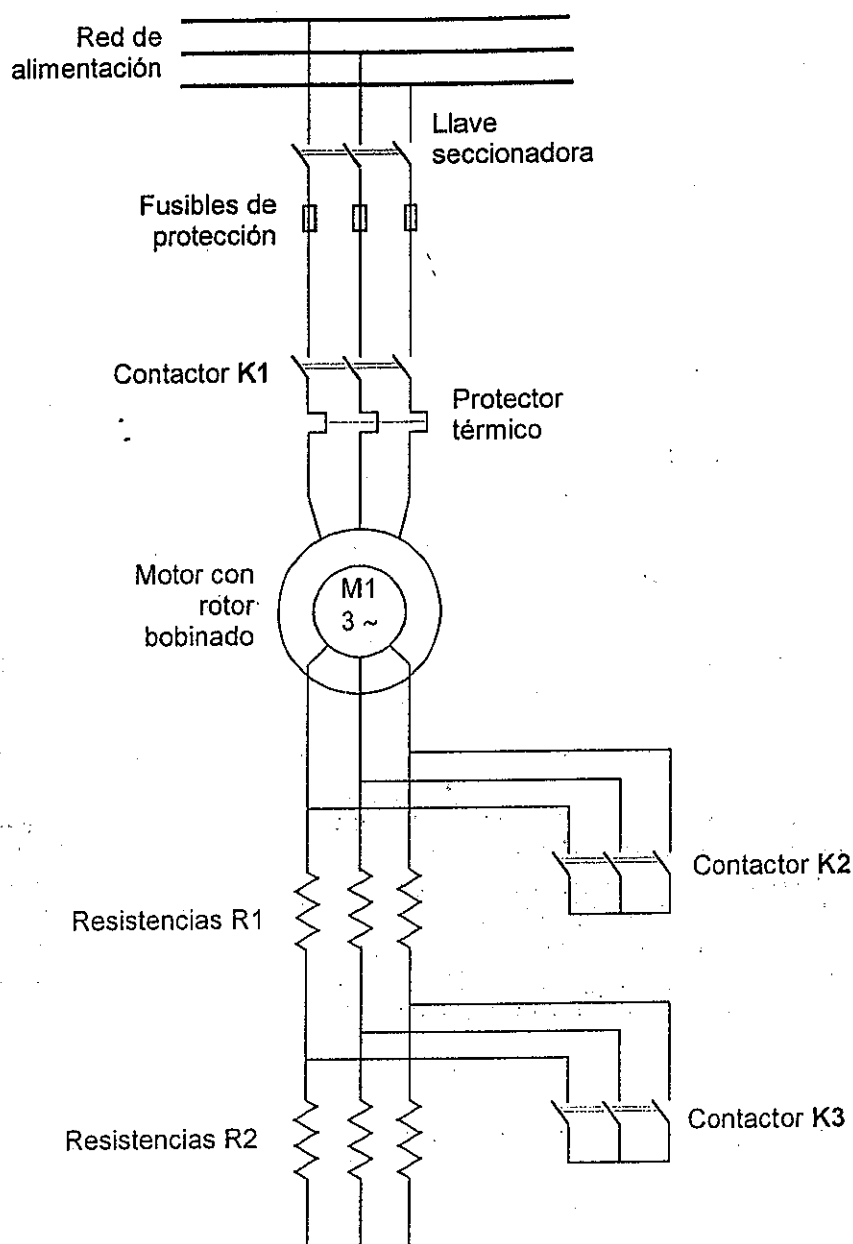


Figura 9.50 Arranque mediante resistencias de motor con rotor bobinado

Arrancadores electrónicos

Este sistema utiliza un juego de tiristores, montados de a pares y en oposición de fase. En función del instante y del ángulo de encendido de los tiristores, se puede variar la tensión aplicada al motor. En la figura 9.51 se muestra la forma de actuar del sistema.

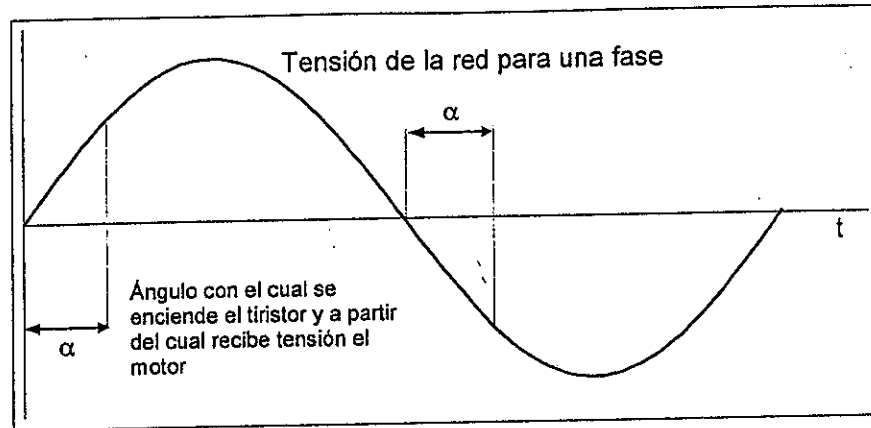


Figura 9.51 Detalle de suministro de tensión al motor, mediante la modificación del ángulo de encendido

9.15 Regulación de velocidad

En la actualidad se realiza con dispositivos de potencia electrónicos, mediante un proceso por el cual la alimentación de corriente alterna con tensión y frecuencia constante se rectifica y por medio de transistores que trabajan en modulación del ancho del pulso, generan corriente trifásica de tensión y frecuencia variable que alimenta el motor. Los tiempos de disparo de los transistores del modulador, los fija un microprocesador, con lo que se logra que el flujo magnético del motor se mantenga constante, independiente de la frecuencia.

MOTOR MONOFÁSICO DE INDUCCIÓN

10.1 Introducción

Son motores de poca potencia, estando los mismos alimentados en su estator por medio de una tensión monofásica senoidal. Debido a esto la bobina que se encuentra desarrollada en el estator da origen a un campo magnético pulsante de eje fijo.

El rotor es similar al de "jaula de ardilla" del motor trifásico de inducción, por lo tanto el campo pulsante induce en las barras o conductores del mismo fuerzas electromotrices, con lo cual circularán corrientes, que en presencia del campo magnético originan fuerzas.

En la figura 10.1. se observa que de acuerdo al sentido que presenta el campo magnético en el instante analizado, en los conductores ubicados a la derecha, las corrientes son entrantes y los de la izquierda salientes (se oponen originando un campo magnético en sentido contrario).

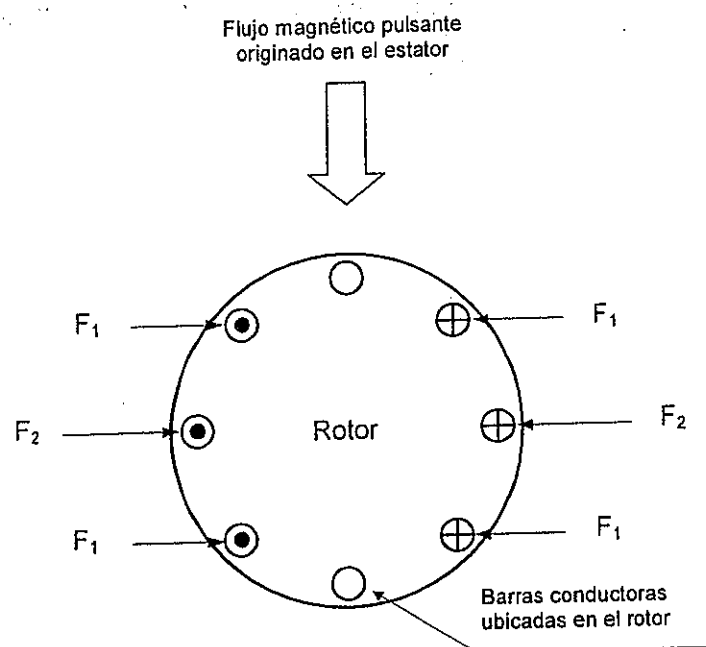


Figura 10.1 Esquema de corrientes originadas en los conductores del rotor

Dado que las corrientes de los conductores opuestos al eje del campo magnético son de igual magnitud, las fuerzas que ellas originan son de igual valor y de sentido contrario, lo cual al estar ubicadas en el mismo plano, se compensan, no produciendo cupla alguna.

Como conclusión en estas condiciones esta máquina no presenta cupla de arranque.

10.2 Principio de funcionamiento

Vimos que el motor analizado no presenta cupla de arranque, pero en la práctica, si se mueve el eje del mismo mediante una acción mecánica, el mismo comienza a girar en el sentido en el cual fue impulsado.

Para poder explicar este efecto, utilizaremos la teoría del doble campo giratorio, la cual establece que un campo magnético alternativo o pulsante se lo puede descomponer en dos campos magnéticos de módulo mitad girando en sentidos contrarios. Esto se puede observar en la figura 10.2, en la cual se ven los campos para distintos instantes.

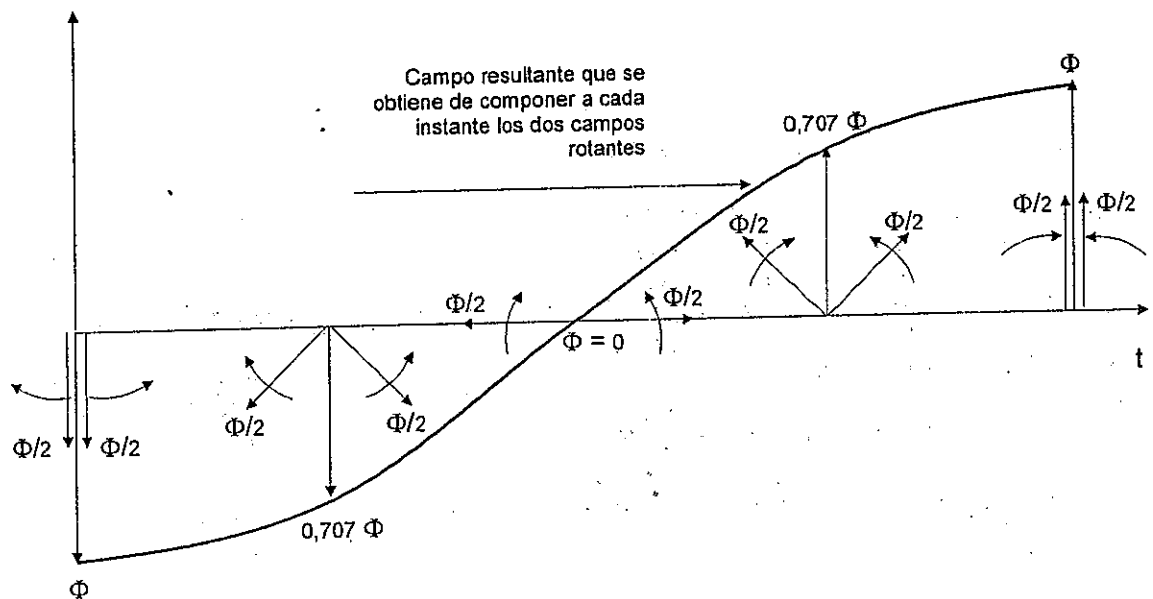


Figura 10.2 Descomposición de un campo pulsante en dos campos rotantes

Basándose en esta teoría, tomemos dos motores trifásicos de inducción idénticos, los cuales se alimentan desde una red trifásica, pero con distinta secuencia, según se muestra en la figura 10.3.

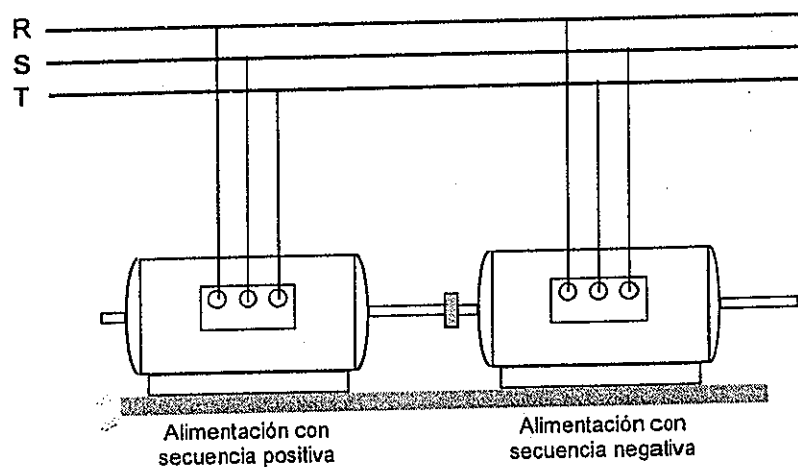


Figura 10.3 Alimentación de dos motores con distinta secuencia

Si analizamos el valor de la cupla para distintas velocidades del rotor, tomando como positivas las del campo rotante de secuencia positiva, nos queda un resbalamiento con los siguientes valores:

Para secuencia positiva:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$n = 0$	$s = 1$	Trabaja como motor
$n = n_s$	$s = 0$	
$n = -n_s$	$s = 2$	Trabaja como freno (el campo gira en sentido contrario del eje)

Para secuencia negativa:

$$s = \frac{-n_s - n}{-n_s}$$

$n = 0$	$s = 1$	Trabaja como motor
$n = n_s$	$s = 2$	
$n = -n_s$	$s = 0$	Trabaja como freno (el campo gira en sentido contrario del eje)

Si efectuamos un gráfico de las cuplas de ambos motores en función del resbalamiento, la misma presenta la forma de la figura 10.4.

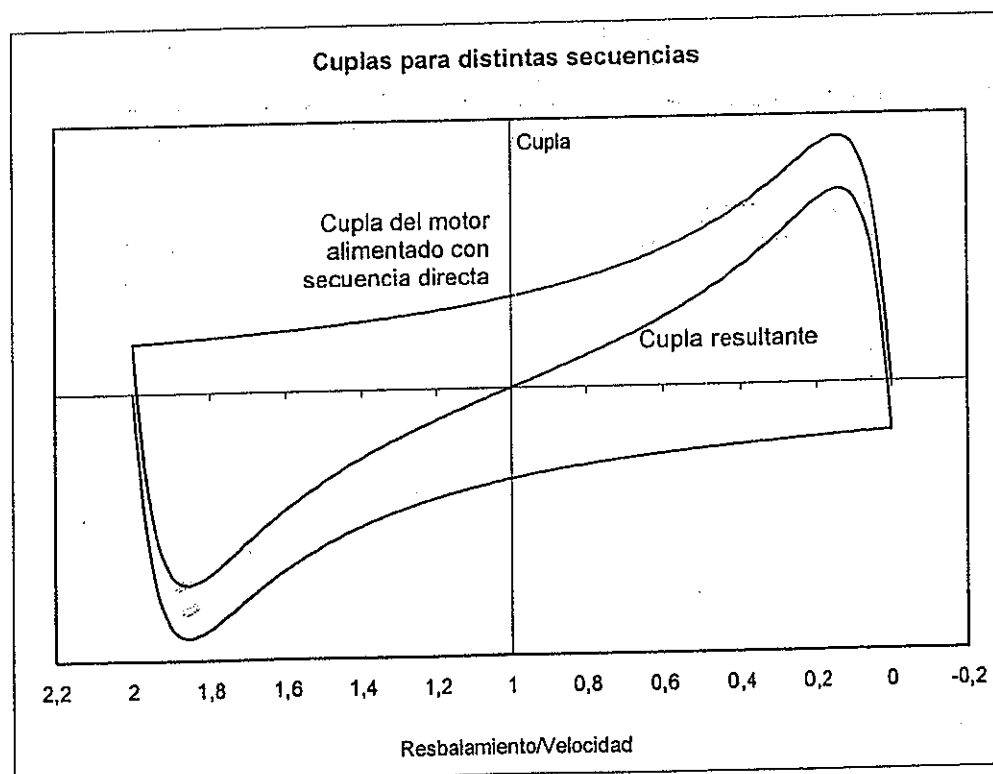


Figura 10.4 Curvas de cupla para distintas secuencias y su resultante

Si acoplamos físicamente los ejes de los mencionados motores, la cúpla sobre los mismos será la resultante de ambas cuplas individuales, tal como se muestra en la figura mencionada.

De aquí podemos observar que cuando la velocidad es cero, no hay cúpla, pero si salimos de esta posición, aparece la misma y en el sentido en el cual fue impulsado.

Dado que este conjunto reemplazaría al motor monofásico, lo que se necesita es un sistema auxiliar que me provoque la cúpla de arranque necesaria.

Los métodos utilizados se basan en la creación de un campo rotante en el momento de arranque, que produzca la cúpla necesaria, utilizándose diversos métodos dentro de los cuales veremos los de principal uso.

10.3 Motor monofásico de inducción de fase partida o con bobina auxiliar

Este motor está formado por dos bobinados estáticos, uno llamado principal y otro auxiliar, que se utiliza para obtener la cúpla de arranque. El rotor de esta máquina es del tipo jaula de ardilla. En la figura 10.5 se ha graficado el esquema eléctrico del mismo.

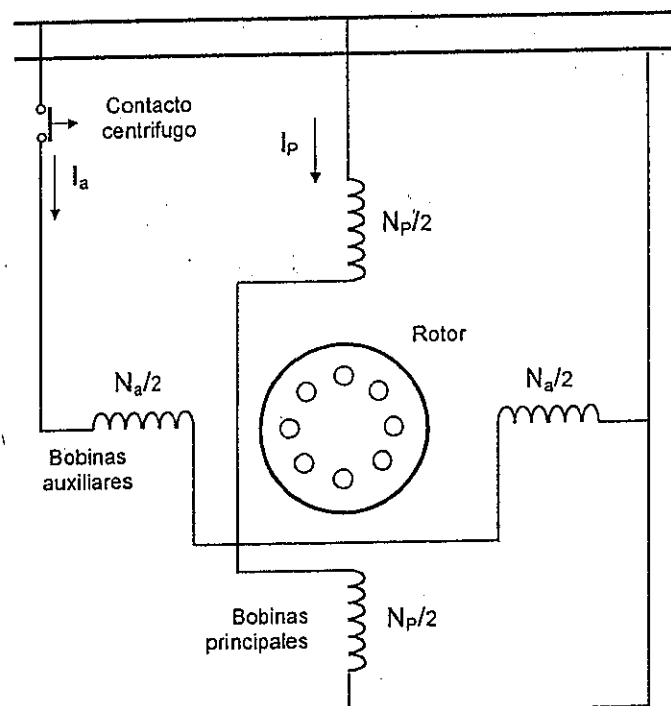


Figura 10.4 Esquema eléctrico de un motor de fase partida

Los ejes magnéticos de ambas bobinas, las cuales están divididas en dos partes, están dispuestos a 90° geométricos, pudiéndose observar en la figura 12.5 un corte de la máquina perpendicular a su eje, donde se muestra la disposición de los conductores en las ranuras del paquete magnético.