
ELECTROTECNIA

PRÁCTICA nº 6

**MÁQUINAS ROTATIVAS: FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR.
MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN.
CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN MOTOR
MONOFÁSICO Y EN MOTOR TRIFÁSICO.**

PRÁCTICA 6

MÁQUINAS ROTATIVAS: FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR. MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN MOTOR MONOFÁSICO Y EN MOTOR TRIFÁSICO.

1.- OBJETO.

En esta práctica se pretende:

1°.- Estudiar el motor trifásico de inducción por ser uno de los motores más utilizados en la actualidad, aunque se dará en primer lugar algunas consideraciones del motor universal utilizado también en bastantes ocasiones. Concretamente en el motor trifásico se pretende:

- a.- Estudiar las conexiones estrella y triángulo.
- b.- Ver lo que ocurre en el momento de arranque del motor.
- c.- Cambiar el sentido de giro del motor.
- d.- Conocer nueva aparatamenta que se utiliza con estos receptores para ayudar en su maniobra, regulación y protección.

2°.- Medir el factor de potencia de :

- a.- Un motor monofásico.
- b.- Un motor trifásico funcionando en estrella y en triángulo.

Y corregirlo con diversas asociaciones de condensadores, viendo así cual de ellas puede ser la más conveniente.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Introducción a la máquinas rotativas funcionando como motor

2.1.1. Motor universal.

El motor universal es fundamentalmente una máquina de c.c. serie. Como sabemos, toda máquina de corriente continua lleva un elemento rectificador que recibe el nombre de colector. Hay que aclarar que algunas máquinas de corriente alterna también disponen de colector, con el fin de participar de las ventajosas características de regulación que presentan las máquinas de corriente continua. Pensemos en cómo trabajan ciertas máquinas herramientas y electrodomésticos, por ejemplo, un taladro. La potencia de corte de la broca mayor que acepta es:

$$P_{\text{máx}} = \Pi \times D \times n \quad \text{Siendo:} \quad \begin{array}{l} P_{\text{máx}}: \text{potencia de corte máxima.} \\ D: \text{diámetro broca.} \\ n: \text{velocidad de corte.} \end{array}$$

Cuando pongamos otra broca menor, la velocidad de corte será superior. Resulta pues, que con una máquina serie en una de estas herramientas no tenemos necesidad de regular la velocidad, ya que ella sola se autoregula.

Luego, tanto en tracción como pequeñas máquinas de la industria y el hogar, pulidoras, taladros, molinillos, ventiladores, máquinas de afeitar, etc., el motor serie presenta más ventajas que

inconvenientes. Sin embargo, en tracción con largas distancias se tiene el grave inconveniente de transporte de potencia en corriente continua. que, como se sabe, no es rentable, prefiriéndose el transporte en corriente alterna. y su posterior rectificación. Pero hace algún tiempo esto no era posible, por lo que los ferrocarriles utilizaron y utilizan, aun hoy, máquinas de corriente alterna. con colector de inducido en serie. En el caso particular del motor monofásico con colector se obtiene el motor universal, llamado así porque puede utilizarse con corriente alterna. o corriente continua.

2.1.2. Motor trifásico de inducción.

Este tipo de motor es el más utilizado en la industria por su sencillez constructiva, su gran eficacia y su fácil mantenimiento.

El principio de funcionamiento de estos motores, es el principio de inducción electromagnética, en virtud del cual al aplicar o alimentar, por un sistema trifásico de corrientes alternas sinusoidales de baja frecuencia, a tres bobinas situadas en el estator y desfasadas 120° eléctricos, se crea un campo magnético giratorio en el circuito magnético de la máquina. Este campo magnético giratorio induce fuerzas electromotrices en los conductores del rotor, constituido por barras conductoras y dos aros (aluminio o cobre) en forma de jaula, que al estar en cortocircuito dan lugar a la circulación de corrientes de cortocircuito en dicho rotor, (ver figura) las cuales a su vez originan un par que trata de oponerse a la causa que lo produce (ley de Lenz), haciendo girar al rotor con una velocidad muy próxima a la del campo magnético creado en el estator.

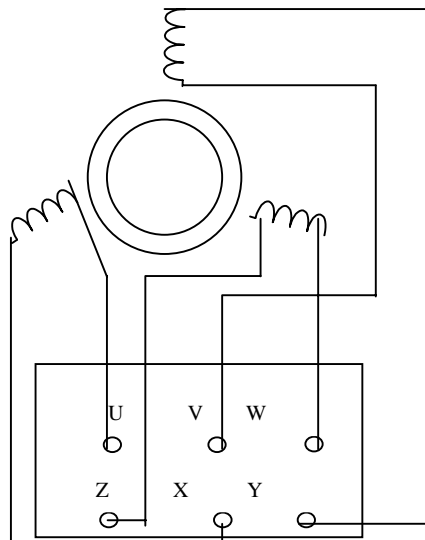


Figura 1. Esquema de motor asíncrono

Designando por n la velocidad del rotor, n_s a la del campo giratorio (velocidad de sincronismo) y por s el deslizamiento de la máquina que es la diferencia porcentual entre ambas, se tiene:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n \times p}{60 \times f} \quad \text{donde: - } p \text{ es el número de pares de polos de la máquina}$$

- f es la frecuencia de la red.

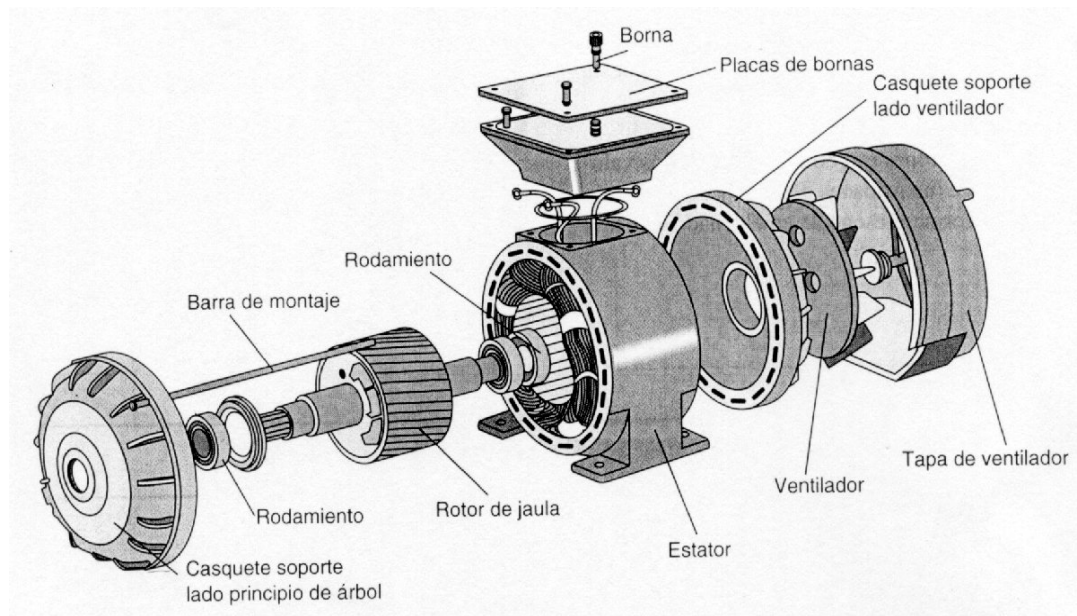
Cuando el deslizamiento varía también el consumo varía. Por ejemplo, para una máquina de 4 polos que, conectada a una red de 50 Hz, girase a 1450 rpm. se tendría un deslizamiento del 3'333 % . Si cargamos la máquina el deslizamiento aumenta, el campo aumenta, la fuerza electromotor generada en el rotor aumenta, la corriente inducida aumenta y el consumo

aumenta. En el arranque el deslizamiento vale 1, el consumo es fuerte y de ahí que las compañías puedan exigir y a los particulares puedan interesar sistemas especiales para arrancar estos motores con carga a partir de ciertas potencias. Estos sistemas consistirán en actuar sobre el circuito del estator, reduciendo la tensión de alimentación en el arranque. Ello se puede conseguir con el arranque en estrella/triángulo, con el arranque por autotransformador o con el arranque por resistencias.

Si la máquina, arrastrada por una causa externa, superase la velocidad de sincronismo, obtendríamos un deslizamiento negativo y, como consecuencia, se produciría un funcionamiento como generador (hipersincronismo). Esta circunstancia se aprovecha en las grúas como servicio de frenado. Sin embargo, el uso casi exclusivo de estas máquinas es como motor: deslizamiento positivo ($s > 0$) y así vamos a considerarlo en esta práctica.

En la figura 2 se representan las partes que principalmente constituyen un motor asíncrono.

Figura 2. Estructura motor asíncrono



Conexión del motor trifásico en estrella y triángulo. Conexionado de protección.

Los motores trifásicos de jaula se fabrican para dos tensiones, por ejemplo 220/380 V. Esto quiere decir que la potencia del motor y su par de arranque nominales están calculados para la tensión más alta cuando se conecta en estrella y para la más baja cuando se hace en triángulo. La más frecuente es 380/660 V. y cada vez más, en instalaciones aisladas, como p.e. una EDAR, los motores serán para una sola tensión y arranque directo. Así pues, la placa de bornas de estos motores dispone tanto de los principios como de los finales de cada bobinado, estando internacionalmente normalizadas sus designaciones, así como su situación. Los principios se designan por U, V y W, mientras que los respectivos finales por X, Y y Z. Obsérvese que, en la figura 3.11 en las placas de bornas se desplaza la borna final X a la segunda posición para facilitar la conexión en triángulo mediante puentes verticales. La conexión en estrella se hace mediante puentes horizontales en los finales de las bobinas según se puede observar.

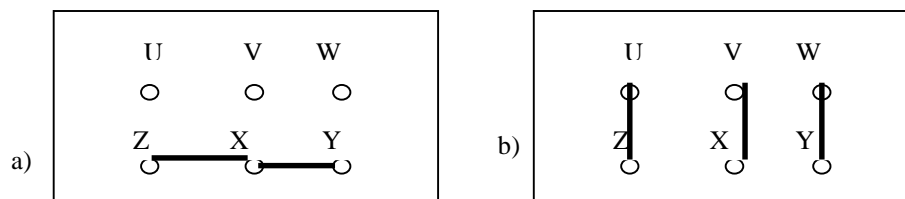


Figura 3 Conexión de un motor trifásico en a) estrella y b) triángulo

Arranque directo e inversión de giro del motor trifásico.

Para invertir el sentido de la marcha en estos motores basta con cambiar el orden de dos fases a la entrada del motor. Así, si R, S y T tienen una secuencia que unidas a U, V y W hacen girar en sentido horario al motor (figura 4), las combinaciones S, R y T o R, T y S lo harán girar en sentido antihorario (figura 5).

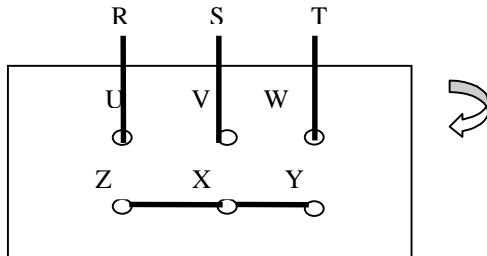


Figura 4. Motor en estrella en sentido horario antihorario

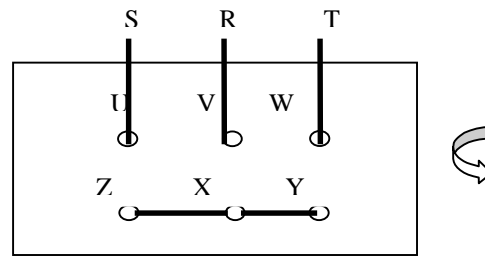


Figura 5. Motor en estrella en sentido antihorario

Cuando el mando de uno de estos motores es automático hay que tener presente el orden de sucesión de fases para no producir averías y situar los contactores de inversión delante de los de arranque estrella-triángulo.

Por otra parte, la elevada intensidad de arranque consumida por estos motores hace que sean necesarias protecciones especiales para esta fase inicial. La protección magnética de máxima intensidad no vale para estos motores por cuanto en el arranque se tienen consumos de hasta 7 veces el nominal, sin embargo, sí vale la protección térmica (bimetal) ya que el tiempo que transcurre hasta alcanzar la intensidad de régimen es muy corto. Las compañías exigen, cuando el motor es de considerable potencia (más de 4 ó 5 CV) conexiones de arranque suave. En nuestro caso, dada la pequeña potencia del motor, podemos arrancarlo directamente en triángulo a una red de 220V. o en estrella a una de 380V.

2.1.3. Aparamenta.

Nos referimos aquí a la aparamenta que nos permitirá aplicar o interrumpir las magnitudes eléctricas en juego, como pueden ser, además de los interruptores y conmutadores, ya conocidos, los pulsadores, contactores y relés, así como los relés térmicos y los guardamotores.

Pulsadores.- Son mecanismos destinados a abrir o cerrar circuitos solamente durante el tiempo que se mantienen presionados. Están constituidos por un botón aislante solidario con uno o varios contactos que se mantienen en una determinada posición (abiertos o cerrados) gracias a un resorte antagonista que, al ser presionado, cede y origina la inversión de los contactos.

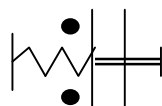


Figura 6. Pulsador

Contactores y relés.

Son interruptores gobernados a distancia por la actuación de una bobina que acciona un núcleo de hierro (electroimán) al que van solidariamente unidos, mecánicamente, dos tipos de

contactos. Los contactos principales o de fuerza, que estarán en el circuito de potencia o de fuerza motriz y los contactos auxiliares o de maniobra, con funciones de mando, control y enclavamiento. La bobina hace pasar a los contactos de su posición de reposo a la de trabajo cuando se le aplica la tensión correspondiente, es decir, cuando se cierra el circuito de la bobina. Los contactos de fuerza, en reposo, siempre estarán abiertos, mientras que de los de maniobra, siempre habrá en reposo, al menos, dos normalmente abiertos y dos normalmente cerrados.

Contactores que no conectan potencia y por ello no disponen de contactos de fuerza, se denominan "contactores auxiliares" o relés. y sirven exclusivamente para funciones de mando, control y enclavamiento. A veces degeneran en relés de tiempo, relés de protección, etc.

En la figura se representa el esquema del contactor que va a utilizarse en las prácticas, con intensidad de empleo de cargas no inductivas de 10 A., y con una potencia admisible de 2'2 KW ó 3 CV. Los terminales numerados 1-2, 3-4 y 5-6 corresponden a los contactos principales, los numerados 9-10 y 11-12 a los contactos auxiliares y los terminales A-B corresponden a la bobina. Cuando a la bobina se le aplica tensión todos los contactos pasan de su posición de reposo a la de trabajo. Para cerrar el circuito de mando pueden emplearse alguno de los métodos comentados anteriormente. Es interesante en los esquemas representar aparte el circuito de mando, con lo que se consigue simplificar el diagrama, no entrecruzando líneas de los circuitos de potencia y mando. Al lado de cada dispositivo se señala la denominación del órgano al que pertenece (Figura 7).

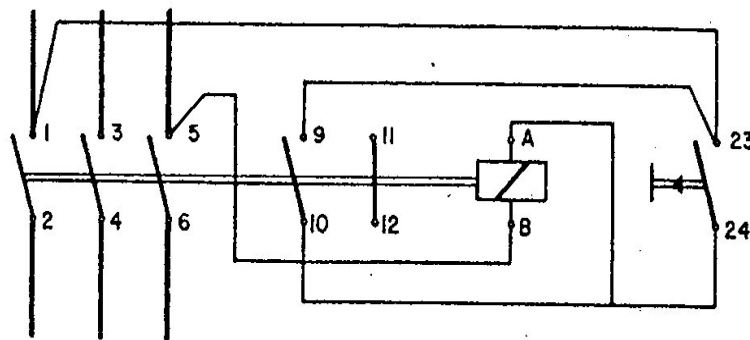


Figura 7. Representación de un contactor.

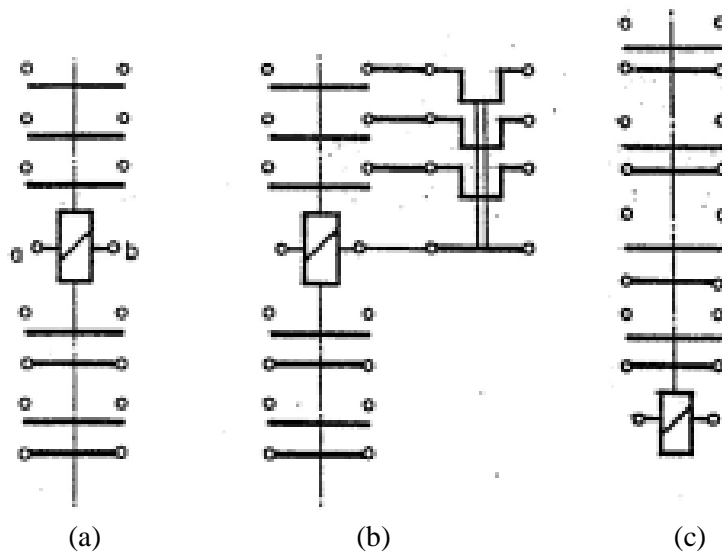


Figura 8. Esquema de un contactor (a); contactor unido a un relé térmico (b) (conjunto guardamotor) y (c) relé.

Veamos ahora, sobre esquemas, algunos conceptos que se manejarán más tarde en la técnica de control, regulación y mando. Se denomina **contacto de retención** a un contacto normalmente abierto que se conecta en paralelo con el pulsador de arranque (figura 9), A. Como su función es la de seguir alimentando (reteniendo) a la bobina del contactor, cuando deja de accionarse el pulsador, también se le conoce como **contacto de realimentación**. Obsérvese que en la representación del esquema de mando se prescinde de los contactos principales. Con ello conseguimos separar el circuito principal (o de fuerza) del circuito de mando, lo que da mayor claridad al esquema. Nótese también que conectamos el extremo "a" de la bobina (que no se une a elementos de mando) al neutro. De esta forma no quedará bajo tensión cuando el circuito de mando esté abierto y se evitarán así, tanto derivaciones en caso de fallo de aislamiento, como accidentes, además de alargar la vida de la bobina.

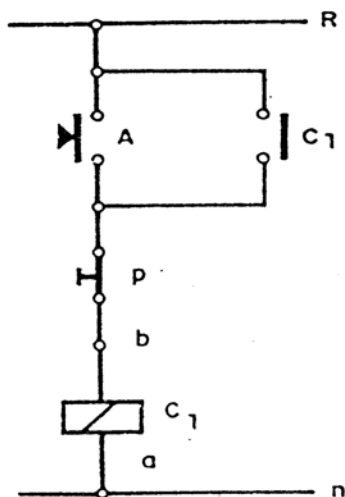


Figura 9. Esquema de un contacto de retención.

En la figura 10, podemos ver esquema de conexión en "bloqueo mutuo". Consiste en poner en serie con la bobina de un contactor, un contacto normalmente cerrado del otro. Así, si un contactor se activa su contacto normalmente cerrado se abre, antes de cerrarse su contacto normalmente abierto, impidiendo la activación del otro contactor y el funcionamiento simultáneo de dos contactores que nunca debería poder producirse. Un caso práctico se produce cuando se arranca un motor trifásico en estrella triángulo, donde hay que asegurarse de que los contactores correspondientes no estén activados simultáneamente, porque se produciría un cortocircuito en la red. Igual ocurre en el caso de la inversión del sentido de giro de un motor.

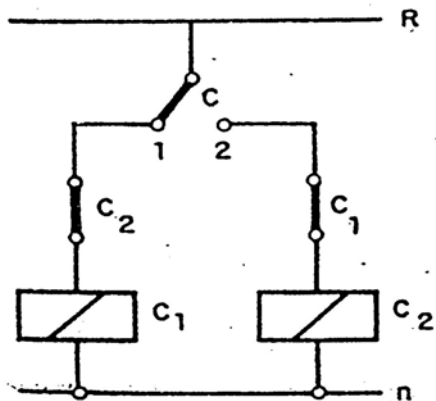


Figura 10. Esquema de bloqueo mutuo.

Guardamotor.

El guardamotor se utiliza para la protección del motor contra sobrecargas. Está constituido por el acoplamiento de un contactor y de un relé térmico de protección. Este relé tiene dos partes fundamentales:

- Láminas bimetálicas como elementos de dilatación por intensidad/temperatura.
- Mecanismo de desconexión o de disparo.

Las láminas bimetálicas se calientan al paso de la corriente del motor, de tal manera que cuando alcanzan su temperatura de reacción se dilatan y disparan el mecanismo de desconexión. La lámina está formada por dos metales de distinto coeficiente de dilatación.

La figura 3.6 representa la acción de las tres láminas bimetálicas (una por cada fase) sobre la reglilla móvil, de tal manera que cuando se alcanza la intensidad límite del relé las láminas desplazan la reglilla móvil y ésta a su vez hace abrir el contacto conmutado de la posición 4 que conecta a la bobina del contactor, desconectándolo, y además si se pasa a la posición 30, puede conectar una lámpara de señalización u ordenar el arranque de otro motor, etc.. Cada relé tiene una gama de regulación para la intensidad. Una vez establecido el valor límite de la corriente de regulación, se disparará en un tiempo que dependerá del valor de la intensidad que pase por él. En la siguiente figura se dan curvas características de disparo de los relés térmicos utilizados en las prácticas, siendo I la curva correspondiente a las láminas frías y II a las láminas calientes.

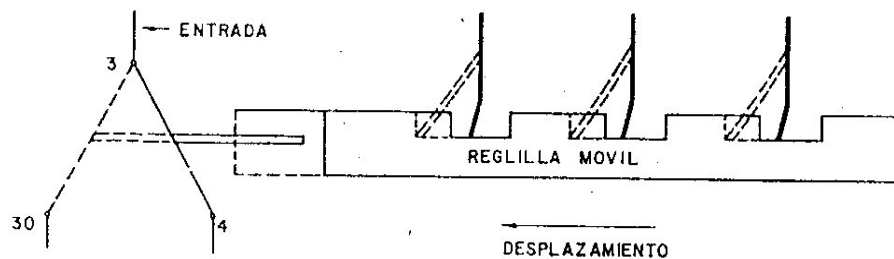


Figura 11. Relé térmico.

Como puede observarse, en la figura 12 cuando la intensidad que circula es el doble del valor de regulación del relé, éste se dispara a los 60 segundos si están las láminas frías, y a los 40 segundos si están calientes.

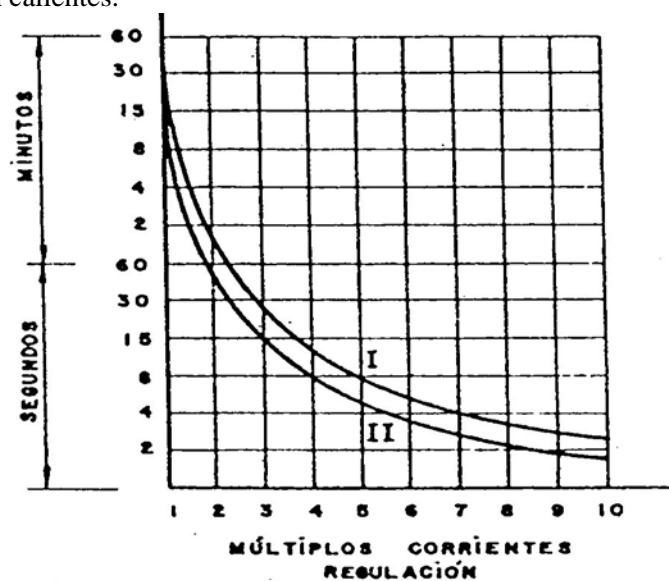


Figura 12. Curvas de disparo de un relé térmico.

El relé térmico protege al motor de una sobrecarga más o menos prolongada y para su actuación requiere de un tiempo. Son relés de tiempo inverso, que quiere decir que a mayor sobrecarga, menor tiempo de respuesta. Por tanto no se produce una desconexión instantánea, lo que indica que este relé no protege al motor de un cortocircuito que provoca una intensidad instantánea muy elevada y que precisa una desconexión también instantánea.

La protección de un motor contra un cortocircuito debe hacerse utilizando fusibles en las tres fases que alimentan al motor, del tipo aM. Se pueden sustituir a los fusibles por un interruptor magnetotérmico, también de acción instantánea.

En la figura 13 se muestra el esquema eléctrico del relé térmico, donde las láminas bimetálicas están intercaladas en la línea que alimenta el motor o circuito de fuerza motriz o principal, conectándose a éste por las bornas U, V y W.

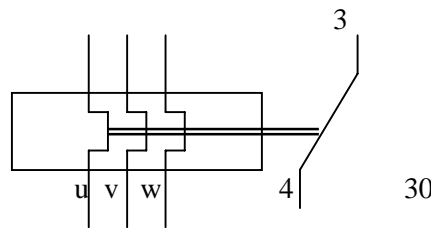


Figura 13. Esquema eléctrico de un relé térmico.

2.2. Introducción a la corrección del factor de potencia

Todas las máquinas eléctricas alimentadas con corriente alterna (motores, transformadores,...) así como otros receptores (reactancias, bobinas, ...) necesitan para su funcionamiento dos tipos de energía:

- Energía activa: es la que se transforma, íntegramente en trabajo o en calor (pérdidas) y se mide en kW.h.
- Energía reactiva: se pone de manifiesto cuando existe un trasiego de energía activa entre la fuente y la carga. generalmente está asociada a los campos magnéticos internos de las máquinas y receptores y se mide en kVAr.h. Como ésta energía provoca sobrecargas en los generadores, transformadores y líneas, sin producir un trabajo útil, es necesario neutralizarla o compensarla.

Los condensadores generan la energía reactiva consumida por dichas cargas, evitando la sobrecarga de la instalación.

Al instalar condensadores, se reduce el consumo total de energía (activa+reactiva), por lo que se consiguen las ventajas de todos conocidas.

2-2.1.Cálculo de la potencia reactiva de batería y condensadores.-

Para ello es necesario conocer:

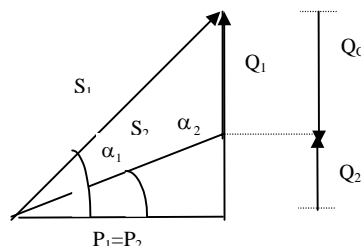
- La potencia activa consumida en kW.
- El $\cos \alpha$ inicial.
- El $\cos \alpha$ deseado

Si el régimen de funcionamiento no es dispar y se conocen las horas de funcionamiento, se producen resultados aceptables a partir del recibo de la compañía eléctrica.

Tanto el motor universal como el motor trifásico son motores inductivos, luego para corregir el factor de potencia tendremos que conectar condensadores en paralelo. de capacidad apropiada.

a.- Para el motor monofásico

Tenemos un receptor monofásico con un triángulo de potencias inicial: P_1 ; Q_1 ; S_1 ; y factor de potencia inicial $\cos \alpha_1$. Se quiere mejorar el factor de potencia del motor añadiendo condensadores hasta un valor $\cos \alpha_2$ manteniendo la misma potencia activa $P_2=P_1$; Q_2 ; S_2 ; Para saber el condensador que hay que añadir habrá que calcular en primer lugar la potencia reactiva que nos tiene que proporcionar los condensadores Q_c :



$$Q_c = P (\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2) = U^2 \omega C$$

$$C = \frac{Q_c}{U^2 \omega}$$

Siendo: U tensión a la que están sometidos los condensadores en voltios; C capacidad de los condensadores en faradios; ω pulsación que es igual a $2 \pi f$; f frecuencia (50 Hz)

b- Para el motor trifásico

El problema se resuelve con el mismo procedimiento anterior. Al ser el motor equilibrado, el sistema de condensadores que hay que añadir también lo será, luego si el problema lo planteamos: dado un receptor trifásico equilibrado con unas características iniciales de trabajo: P_1 ; Q_1 ; S_1 ; $\cos \alpha_1$ y queremos mejorar el factor de potencia del motor hasta un valor $\cos \alpha_2$ añadiendo condensadores, manteniendo la misma potencia activa $P_2=P_1$; Q_2 ; S_2 . Al hacer el estudio con las potencias tenemos el triángulo de potencias anterior, pudiendo ser para una fase o para las tres fases., tendremos los mismos resultados, sólo que para las tres fases será 3 veces más grande. Si ponemos los valores de la potencia total activa del motor obtendremos la potencia reactiva total trifásica a aportar; si ponemos la monofásica, el resultado lo multiplicamos por 3 y obtendremos lo mismo.

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \alpha_1$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_c = P_2 \operatorname{tg} \alpha_2 = P_1 \operatorname{tg} \alpha_2$$

Luego, la potencia reactiva total que hemos de aportar a la red será

$$Q_c = P (\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2) = 3 U_c^2 \omega C_i$$

siendo U_c la tensión a la que está sometido cada condensador; ω la pulsación y C_i la capacidad de cada condensador.

a.- Si los condensadores los conectamos en asociación triángulo:

La tensión U_c coincide con la tensión de línea U del sistema trifásico, por lo que la capacidad de cada condensador será:

$$C_t = \frac{Q_c}{3U^2w}$$

b.- Si los condensadores los conectamos en asociación estrella:

La tensión U_c coincide con una tensión de fase U' del sistema trifásico, por lo que la capacidad de cada condensador será:

$$C_e = \frac{Q_c}{3\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2 w} = \frac{Q_c}{U^2 w}$$

Luego, para obtener la misma potencia reactiva, si ponemos los condensadores en asociación en estrella necesitaremos condensadores tres veces mayores que si los montamos en triángulo.

3.- MATERIAL

- Motor trifásico
- Motor monofásico
- Contactores
- Guardamotores
- Pulsadores para maniobrar.
- Aparatos de medida: voltímetro, amperímetro, fasímetro, vatímetro.
- Condensadores: $3\mu\text{F}$; $9\mu\text{F}$.

4.- RELIZACIÓN PRÁCTICA

a.-) Un motor monofásico

En primer lugar mediremos el factor de potencia de dicho motor funcionando en vacío, para ello se realizará el montaje del esquema 1. Donde anotaremos las lecturas de los aparatos que tenemos conectados: voltímetro (V), amperímetro(A), fasímetro ($\cos\alpha$) y vatímetro (W). Con estos valores podremos calcular el triángulo de potencias del motor funcionando en vacío.

Para corregir el factor de potencia del motor le vamos a ir añadiendo condensadores de distintas capacidades según el esquema 1; concretamente:

- 1.-Tres condensadores en serie de 9 microfaradios cada uno.
- 2.-Dos condensadores en serie de 9 microfaradios cada uno.
- 3.-Dos condensadores en serie entre sí con uno en paralelo de 9 microfaradios cada uno.
- 4.-Uno en paralelo de 9 microfaradios cada uno.
- 5.-Dos en paralelo de 9 microfaradios cada uno.

Para cada una de estas asociaciones anotaremos las lecturas de los aparatos que tenemos conectados: voltímetro (V), amperímetro(A), fasímetro($\cos\alpha$) y vatímetro (W) en la tabla siguiente:

	Vacio	3 Serie	2Serie	2 S 1P	1 Parl.	2 Parl.
V(V)						
I(A)						
$\cos \alpha$						
P(W)						
Q(VAr)						
S(VA)						

Se pide realizar por el alumno:

- a.) Calcular y representar el triángulo de potencias del motor en vacío (condiciones iniciales)
- b.) Calcular y representar el triángulo de potencias del motor una vez que se le han añadido las distintas asociaciones de condensadores. ¿Qué capacidad de condensador será la solución más idónea para mejorar el factor de potencia de este motor?

b.-) Un motor trifásico funcionando en estrella y en triángulo.

De la misma forma que en el caso anterior en primer lugar mediremos el factor de potencia del motor trifásico en triángulo y en estrella (receptor equilibrado) funcionando en vacío. Anotaremos las lecturas de los aparatos que tenemos conectados: voltímetro (V), amperímetro(A) y fasímetro ($\cos\alpha$). Con estos valores podremos calcular el triángulo de potencias del motor funcionando en vacío.

Para corregir el factor de potencia tanto del motor trifásico funcionando en estrella como en triángulo le vamos a conectar en primer lugar una asociación de condensadores en estrella como se indica en el esquema 2. Y luego los mismos condensadores conectados en triángulo se lo asociaremos al motor trifásico como indica el esquema 3.

Concretamente tendremos los siguientes casos:

- 1.-Motor trifásico en estrella y condensadores en estrella.
- 2.-Motor trifásico en estrella y condensadores en triángulo.
- 3.-Motor trifásico en triángulo y condensadores en estrella.
- 4.-Motor trifásico en triángulo y condensadores en triángulo.

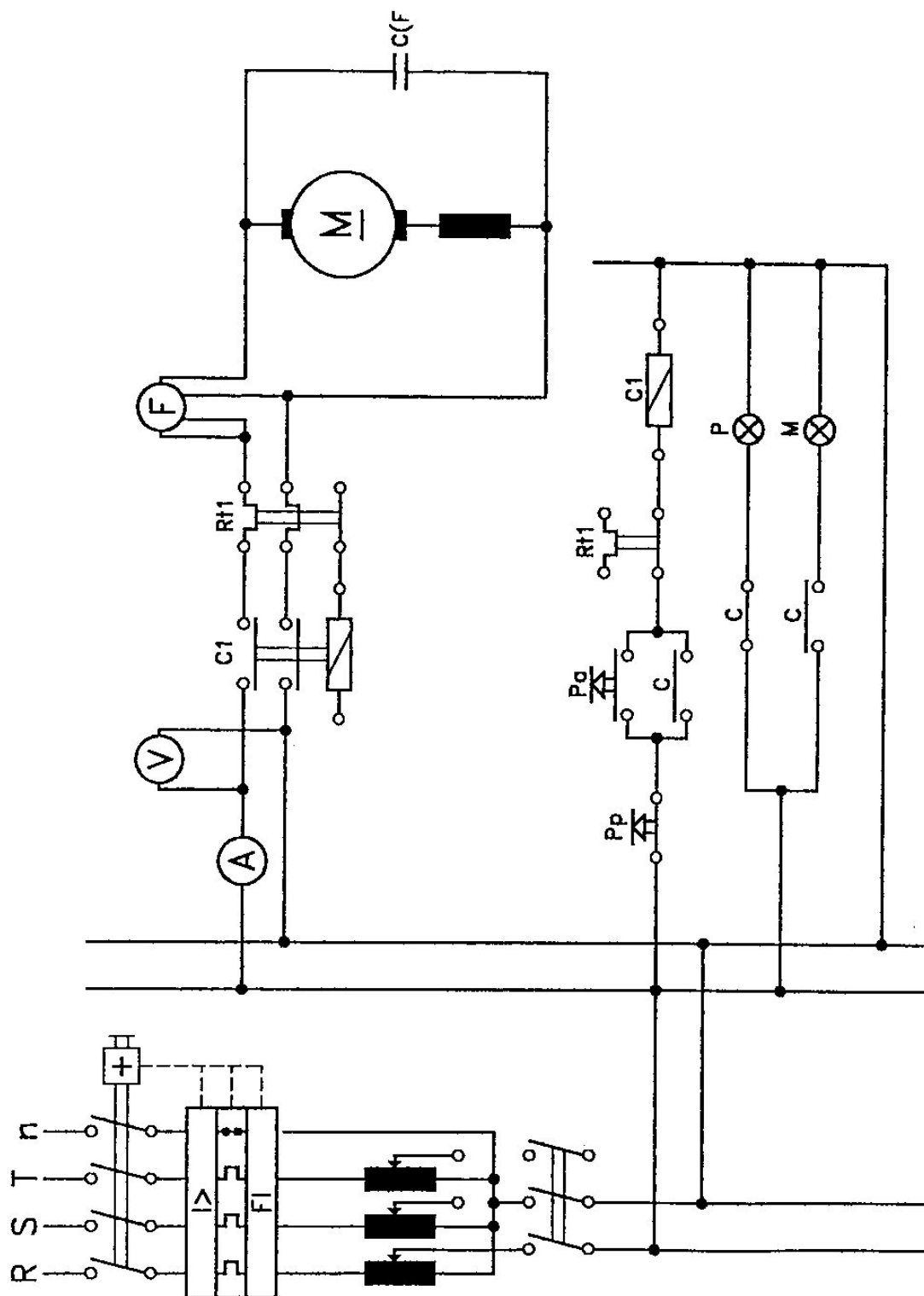
Para cada una de estas asociaciones anotaremos las lecturas de los aparatos que tenemos conectados: voltímetro (V), amperímetro(A) y fasímetro($\cos\alpha$) en la tabla siguiente:

	Vacío estrella	Vacío triángulo	Me-Ce	Me-Ct	Mt-Ce	Mt-Ct
V(V)						
I(A)						
Cos α						

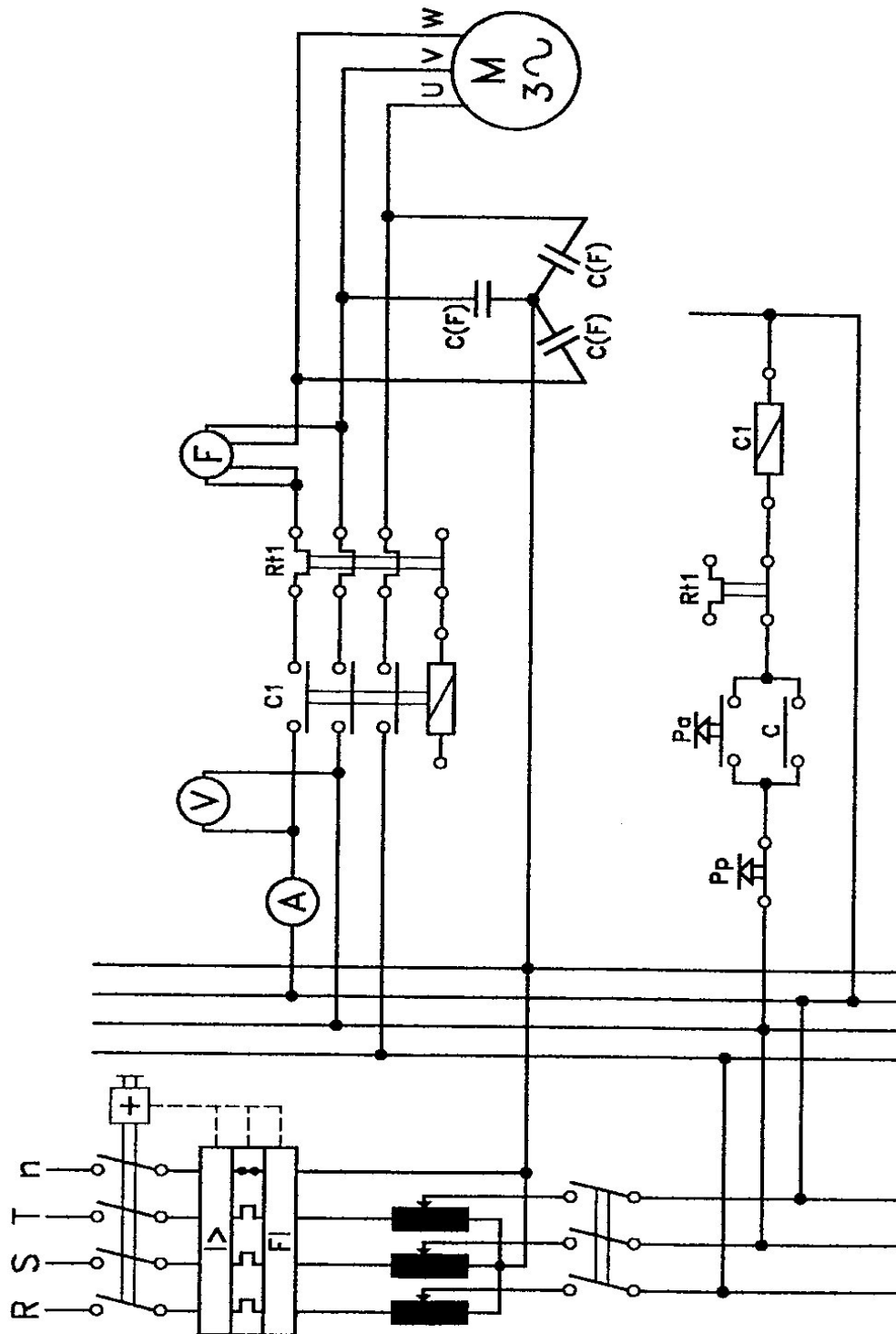
Se pide realizar por el alumno:

- a.)Calcular y representar el triángulo de potencias del motor trifásico en estrella y en triángulo funcionando en vacío (condiciones iniciales)
- b.)Calcular y representar el triángulo de potencias de los motores en estrella y en triángulo una vez que se le han añadido las distintas asociaciones de condensadores. ¿Qué relación entre las capacidades de los condensadores puedes sacar al asociar en estrella o en triángulo los condensadores con el motor trabajando en triángulo?. ¿Y en estrella?.

Esquema 1. Fuerza y mando para la corrección del factor de potencia del motor monofásico.



Esquema 2. Fuerza y mando para la corrección del factor de potencia del motor trifásico funcionando en estrella o triángulo con una batería de condensadores en estrella.



Esquema 3. Fuerza y mando para la corrección del factor de potencia del motor trifásico funcionando en estrella o triángulo con una batería de condensadores en triángulo.

