

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

DIRECCIÓN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas., 29/MARZO/2011

OFICIO NUM. DEP-CT-037/2011

C. JUAN JOSÉ ARREOLA ACOSTA

PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL EN ELÉCTRICA
EGRESADO DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ.
P R E S E N T E.

Habiendo recibido la comunicación de su trabajo profesional por parte de los CC.ING. FIDEL TOVILLA HERNÁNDEZ ING. ARIOSTO MANDUJANO CABRERA e ING. PEDRO CRUZ FARRERA en el sentido que se encuentra satisfactorio el contenido del mismo como prueba escrita, **AUTORIZO** a Usted a que se proceda a la impresión del mencionado Trabajo denominado:

"PROYECTO DE CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE LA PLANTA TRITURADORA INDUSTRIAL TACC"

Registrado mediante la opción:
VII (MEMORIA DE EXPERIENCIA PROFESIONAL)

ATENTAMENTE
"CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON SENTIDO HUMANO"

Ing. Roberto Cifuentes Villafuerte
Jefe de la División de Estudios Profesionales

Vo. Bo.

Ing. José Luis Herrera Martínez
Director

C.c.p.- Departamento de Servicios Escolares
C.c.p.- Expediente
I'RCV/L'ORC



Secretaría de Educ. Pública
Instituto Tecnológico
de Tuxtla Gutiérrez
Div. de Est. Profesionales

Carretera Panamericana Km.1080, . C.P. 29050, Apartado Postal 599
Teléfonos: (961) 61 5-03-80 (961) 61 5-04-61 Fax: (961) 61 5-16-87
<http://www.ittg.edu.mx>



Alcance del Sistema: Proceso Educativo

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

TRABAJO PROFESIONAL

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL EN ELECTRICA

QUE PRESENTA:

JUAN JOSE ARREOLA ACOSTA

CON EL TEMA:

**“PROYECTO DE CORRECCIÓN DEL FACTOR DE
POTENCIA DE LA PLANTA TRITURADORA
INDUSTRIAL TACC”**

MEDIANTE :

**OPCION VII
(MEMORIA DE EXPERIENCIA PROFESIONAL)**

TUXTLA GUTIERREZ CHIAPAS

MAYO 2011

INDICE

INTRODUCCIÓN.	4
1. GENERALIDADES SOBRE FACTOR DE POTENCIA.	5
1. POTENCIA ACTIVA, REACTIVA Y APARENTE.	
2. CONCEPTO DE FACTOR DE POTENCIA.	
3. SITUACIONES QUE PROVOCAN UN BAJO FACTOR DE POTENCIA.	
4. PROBLEMAS ASOCIADOS AL FACTOR DE POTENCIA.	
2. MEDICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.	14
1. ASPECTOS GENERALES.	
14	
2. EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y PARTES PRINCIPALES DEL WATTHORIMETRO DE INDUCCIÓN.	
3. CIRCUITOS TRIFÁSICOS EN DELTA A 3 HILOS (MÉTODOS DE MEDICIÓN).	
4. CIRCUITOS TRIFÁSICOS EN ESTRELLA CON NEUTRO UTILIZANDO MEDIDORES DE 3 ELEMENTOS.	
5. CIRCUITOS TRIFÁSICOS EN ESTRELLA CON NEUTRO UTILIZANDO MEDIDORES DE 2 ½ ELEMENTOS.	
6. CIRCUITOS TRIFÁSICOS EN DELTA A 4 HILOS.	
7. CIRCUITOS MONOFÁSICOS 2 FASES A 3 HILOS.	
3. MÉTODOS GENERALES PARA LA COMPENSACIÓN DE LA CORRIENTE REACTIVA	81
1. OPERACIÓN ÓPTIMA DE MOTORES ELÉCTRICOS.	
2. GENERADORES OPERADOS COMO MOTOR SINCRONO.	
3. OPERACIÓN EFICIENTE DE LÍNEAS ELÉCTRICAS.	
4. COMPENSACIÓN DE REACTIVOS POR MEDIO DE CAPACITORES DE POTENCIA.	
4. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE LA PLANTA TRITURADORA INDUSTRIAL TACC.	114
1. ANTECEDENTES TÉCNICOS.	
2. ANÁLISIS DE REACTIVOS Y CÁLCULO DE BANCO DE CAPACITORES.	
3. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.	
4. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS.	
5. ESPECIFICACIÓN DE FILTROS DE ARMÓNICOS.	
5. BIBLIOGRAFÍA.	121

I N T R O D U C C I Ó N

En las redes eléctricas de corriente alterna, pueden distinguirse dos tipos fundamentales de cargas: Cargas óhmicas o resistivas y cargas inductivas o reactivas.

Las cargas resistivas toman corrientes que se encuentran en fase con el voltaje aplicado a las mismas; debido a esta circunstancia, la energía eléctrica que consumen se convierte íntegramente en trabajo mecánico, en calor o energía no retornable directamente a la red eléctrica. Este tipo de corriente se conoce como corrientes activas.

Las cargas reactivas ideales toman corrientes que se encuentran desfasadas 90° con respecto al voltaje aplicado y por consiguiente, la energía eléctrica que llega a las mismas no se consume en ellas, sino que se almacenan en forma de campo eléctrico o magnético, durante un corto periodo de tiempo (un cuarto de ciclo) se devuelve a la red en un tiempo idéntico al que tardó en almacenarse, este proceso se repite periódicamente, siguiendo las oscilaciones del voltaje aplicado a la carga. Las corrientes de este tipo se conocen como corrientes reactivas.

Este trabajo consta de los siguientes capítulos que se desarrollan para el tema en cuestión:

- 1. GENERALIDADES SOBRE FACTOR DE POTENCIA.**
- 2. MEDICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.**
- 3. MÉTODOS GENERALES PARA LA COMPENSACIÓN DE LA CORRIENTE REACTIVA.**
- 4. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE LA PLANTA TRITURADORA INDUSTRIAL TACC.**
- 5. EVALUACIÓN TÉCNICO – ECONÓMICA.**
- 6. BIBLIOGRAFÍA.**

Es tan importante realizar este tipo de aportaciones técnicas debido a que el impacto del factor de potencia tiende a incidir en los costos de producción al elevar la factura del consumo

eléctrico, se hizo un esfuerzo en presentar de manera objetiva y puntual la información y el desarrollo del proyecto que se actualmente le ha dejado beneficios tangibles a la empresa.

1.- GENERALIDADES SOBRE FACTOR DE POTENCIA.

1.1. POTENCIA ACTIVA, REACTIVA Y APARENTE.

En las redes eléctricas de corriente alterna, pueden distinguirse dos tipos fundamentales de cargas: Cargas óhmicas o resistivas y cargas inductivas o reactivas.

Las cargas resistivas toman corrientes que se encuentran en fase con el voltaje aplicado a las mismas; debido a esta circunstancia, la energía eléctrica que consumen se convierte íntegramente en trabajo mecánico, en calor o energía no retornable directamente a la red eléctrica. Este tipo de corriente se conoce como corrientes activas.

Las cargas reactivas ideales toman corrientes que se encuentran desfasadas 90° con respecto al voltaje aplicado y por consiguiente, la energía eléctrica que llega a las mismas no se consume en ellas, sino que se almacenan en forma de campo eléctrico o magnético, durante un corto periodo de tiempo (un cuarto de ciclo) se devuelve a la red en un tiempo idéntico al que tardó en almacenarse, este proceso se repite periódicamente, siguiendo las oscilaciones del voltaje aplicado a la carga. Las corrientes de este tipo se conocen como corrientes reactivas.

Una carga real siempre puede considerarse como compuesta por parte puramente resistiva, dispuesta en paralelo con otra parte reactiva ideal. En cargas como las compuestas por lámparas de incandescencia y aparatos de calefacción, la parte de la carga reactiva puede considerarse prácticamente nula, especialmente a las bajas frecuencias que son normales en las redes eléctricas industriales (60 Hz); son cargas eminentemente resistivas y por consiguiente, las corrientes que toman son prácticamente corrientes activas. Sin embargo, en las cargas representadas por líneas de transmisión y distribución, transformadores, lámparas fluorescentes, motores eléctricos, equipos de soldadura eléctrica, hornos de inducción, bobinas de reactancia, etc., la parte reactiva de la carga suele ser de una magnitud comparable a la de la parte puramente resistiva; en estos casos, además de la corriente activa necesaria, la carga también toma una parte adicional de corriente reactiva, la cual es indispensable para energizar los circuitos magnéticos de los equipos mencionados con anterioridad y representa una carga adicional de corriente, que también es proporcionada por la fuente. A la corriente total (activa más reactiva) que proporciona la fuente a la carga se le denomina corriente aparente.

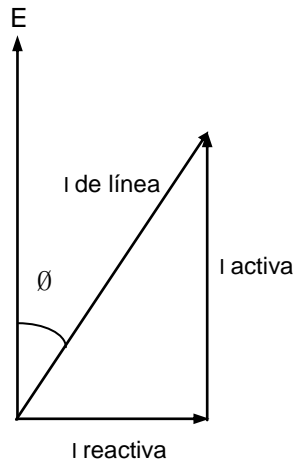


Fig. No. 1.- Representación gráfica de las corrientes activa, reactiva y aparente en una carga real.

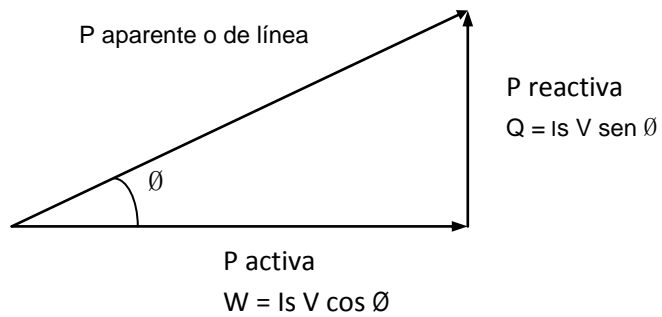


fig. No. 2.- Representación gráfica del factor de potencia mediante el triángulo de potencias.

1.2. CONCEPTO DE FACTOR DE POTENCIA.

Como vimos en el punto anterior, para cargas reales existe un ángulo de desfase entre voltaje aplicado a la carga y la corriente total demandada por esta última. Al coseno del ángulo de desfase que forma la corriente activa (la corriente activa está en fase con el voltaje aplicada) la con la corriente total resultante o aparente I_s , se le llama factor de potencia, debido a que representa: la relación existente entre la potencia real consumida ($P = I_a V$) ó activa y la potencia real consumida ($S = I_s V$) que llega a una instalación dada; esto es:

$$\cos \varnothing = \frac{\text{Potencia Activa}}{\text{Potencia Aparente}}$$

En la práctica suele multiplicarse por 100 el factor de potencia o \cos de \varnothing , quedando expresado en tanto por ciento: “porcentaje de la potencia total aparente que se consume en la instalación en forma útil”.

De la figura No. 2 se puede ver que mientras más grande sea la corriente reactiva, mayor será el ángulo \varnothing , y por consiguiente más bajo el factor de potencia.

De todo lo anterior, puede concluirse que la potencia activa y reactiva dependen de las magnitudes relativas de resistencia y reactancia de la carga del circuito, y por lo tanto, el factor de potencia puede expresarse en términos de resistencia y reactancia como sigue:

$$\cos \varnothing = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

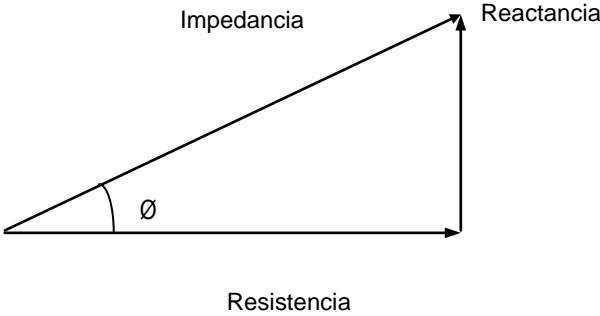


Figura No. 3.- Representación gráfica del factor de potencia mediante el triángulo de impedancias.

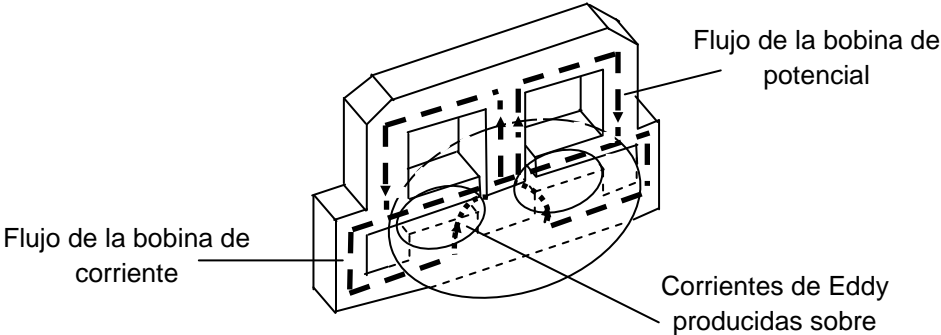


Figura No. 4.-Detalle de los flujos producidos por el estator sobre el disco para producir Par motor.

1.3. SITUACIONES QUE PROVOCAN UN BAJO FACTOR DE POTENCIA.

El factor de potencia de una instalación depende básicamente del tipo de carga que se encuentre instalada y de la forma de utilización de la mencionada carga; así tenemos que las causas principales que producen un bajo factor de potencia son:

a) Carga suficiente de los motores eléctricos de corriente alterna.

Cuando se tiene trabajando motores asíncronos de C.A. con carga inferior a la nominal, la potencia activa que se consume, disminuye en forma proporcional a la carga; no sucediendo lo mismo con la potencia reactiva, la cual se reduce pero en menor magnitud. Por ello cuanto menor es la carga del motor, menor es el factor de potencia con que opera.

Los motores que trabajan en vacío tienen un factor de potencia reducido de 0.1 a 0.3 de su nominal, dependiendo este del tipo de motor, potencia y velocidad del mismo.

b) Reparación incorrecta de motores.

Durante las reparaciones o rebobinados que se les hacen a los motores, ocasionalmente no se selecciona el alambre magneto del calibre exacto al que trae de fábrica, esto tiene como consecuencia, el que no llenen totalmente las ranuras del estator o rotor, provocando esto al ponerse en funcionamiento el aumento del flujo magnético de dispersión disminuyendo con esto el factor de potencia.

De igual manera, cuando sufre desgaste algún cojinete del motor, el rotor roza en su funcionamiento con el estator; esto es corregido en ocasiones sometiendo el rotor a un proceso de torneado en vez de sustituir el cojinete, esto ocasiona el aumento del entrehierro entre el estator y rotor, produciendo también bajo factor de potencia.

c) El aumento de la tensión en la red.

En la hora de demanda mínima o media del área de consumo, generalmente la tensión en la red de la empresa suministradora aumenta en varios voltios, esto ocasiona el incremento de la corriente de magnetización de los inductores (La corriente de magnetización es un componente de la corriente reactiva), esto provoca que el factor de potencia baje también.

d).- El aumento de la frecuencia en la red.

Cuando la frecuencia de la red de la alimentación aumenta, sea por disturbios en la planta generadoras o por la salida brusca de cargas de valor considerable; la reactancia inductiva de los inductores aumenta, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$X_L = 2\pi FL, \text{ donde:}$$

X_L = Reactancia inductiva en ohms

F = Frecuencia de la red en Hertz

L = Valor de la inductancia en Henry

Lo que produce que el factor de potencia se reduzca.

1.4. PROBLEMAS ASOCIADOS AL FACTOR DE POTENCIA BAJO.

Cuando se tiene un bajo factor de potencia en las instalaciones de los usuarios del servicio eléctrico, éste se manifiesta también, en las instalaciones de la empresa suministradora, teniendo como consecuencias los mismos que en la instalación particular de un usuario; entre los que a continuación se explica se encuentran los de mayor importancia:

a) Reducción del rendimiento de las plantas generadoras y transformadoras de energía eléctrica.

Un generador o transformador de energía eléctrica que es operado a un factor de potencia bajo, puede cargarse por completo en su corriente de carga pero no cuenta de la potencia activa del mismo.

Supóngase que se tiene un transformador de 30MVA el cual opera a un voltaje de 115,000 /13,800 volts.

Calculando su I nominal tenemos que:

$$I_{nom} = \frac{30,000}{1.732 (13.800)} = 1,255 \text{ Amp.}$$

Estos 1,255 amperes siempre serán entregados por el transformador cuando éste se encuentra operando a plena carga. Sin embargo, no sucede lo mismo con la potencia; esto puede explicarse de la siguiente forma:

Potencia activa con $\cos \emptyset$ unitario.

$$P = 1.732 E I \cos \emptyset = 1.732 (13.8)(1.255) (1.0)$$

$$P = 30,000 \text{ kilowatts. (Aproximadamente)}$$

Potencia activa con $\cos \emptyset$ igual a 0.7.

$$P = 1.732 E I \cos \emptyset = 1.732 (13.8)(1.255) (0.7)$$

$P = 21,000$ kilowatts. (Aproximadamente)

Puede verse entonces, que cuanto menor es el factor de potencia, menor es la potencia útil que entrega el transformador o equipo y tanto mayor será el rendimiento aunque por su devanado, pasen los 1,255 amperes.

De lo anterior, se deduce que puede cargarse un equipo a su capacidad nominal y no con su potencia activa por causa de un factor de potencia bajo, ocasionando además el gasto excesivo de los primotores en las plantas generadoras.

b) Necesidad de aumentar la capacidad total instalada en plantas, líneas y subestaciones.

Si consideramos que una instalación determinada requiere para su funcionamiento de una potencia activa de 40 kilowatts y esta carga opera a un factor de potencia del 90%, se tiene que para alimentar a esta instalación se requiere de una capacidad total instalada en líneas, generación, transformación, de acuerdo con lo siguiente:

$$\text{Potencia total} = \frac{\text{potencia activa}}{\cos \emptyset} = \frac{40}{0.9}$$

Potencia total = 44.44 kilovoltamperes.

Si suponemos que el factor de potencia de esta instalación se reduce a un valor de 0.6, con lo cual la potencia requerida será de

$$\text{Potencia total} = \frac{\text{potencia activa}}{\cos \emptyset} = \frac{40}{0.6}$$

$$\text{Cos } \emptyset = 0.6$$

Potencia total = 66.66 kilovoltamperes

De lo anterior, puede deducirse que aún manteniendo la misma necesidad de potencia útil, si el factor de potencia disminuye, la capacidad necesaria para satisfacer la necesidad de energía aumenta, elevando con esto sus costos.

c) Aumento de las pérdidas en los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica.

Al tener bajo factor de potencia en el sistema de distribución o transmisión, lo que ocurre como se vio anteriormente, es que circulará por los conductores de las líneas una corriente mayor mientras más bajo sea el factor de potencia.

Supóngase que se tiene que alimentar un centro de consumo con una carga de 2 MW la cual opera con un factor de potencia del 95% a un voltaje de distribución de 13,800 volts; para lo cual la corriente que circulará por las líneas es de:

$$I_a \text{ circular} = \frac{\text{Potencia útil}}{1.732 E \cos \emptyset} = \frac{2000 \text{ K}}{1.732(13.8)(0.95)} = \frac{2000}{22.706} = 88.08$$

$$I_a \text{ circular} = 88 \text{ Amperes}$$

Ahora supóngase que la mencionada carga reduce su factor de potencia al 80%

$$I_a \text{ circular} = \frac{\text{Potencia útil}}{1.732 E \cos \emptyset} = \frac{2000}{1.732 (13.8) (0.80)} = \frac{2000}{19.12} = 104.60$$

$$I_a \text{ circular} = 105 \text{ Amperes}$$

Puede deducirse de lo anterior, que al circular mayor corriente en las líneas, ésta nos trae como consecuencias unas pérdidas por efecto joule mayores en función del cuadrado de la corriente, ya que éstas pueden calcularse por la fórmula siguiente:

$$\text{Pérdidas por efecto joule} = I^2 R$$

En la práctica, cuando estas pérdidas llegan a ser demasiado grandes traen consigo la caída de potencial a niveles tan bajos, que puede ser necesario en casos extremos, utilizar conductores de mayor sección transversal para reducir la “R” del conductor y así tratar de reducir las pérdidas hasta un nivel aceptable.

2.- MEDICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

2.1. ASPECTOS GENERALES.

El suministro de energía eléctrica en usuarios residenciales es básicamente para cargas de alumbrado, siendo el factor de potencia prácticamente unitario, por lo que la potencia activa consumida es propiamente:

$$\text{Potencia activa} = E I$$

Por otro lado, en el caso del usuario industrial, este generalmente hace uso de aparatos tales como motores, transformadores, soldadores, etc., es decir equipos que requieren una corriente de magnetización atrasada 90° con respecto al voltaje aplicado, además de la corriente activa que produce trabajo útil.

Con esto se ve que el costo de la energía de usuarios industriales depende de los kilowatt-horas consumidos, de la demanda con que se consumieron y del factor de potencia de la instalación; así mismo, de acuerdo con la definición del factor de potencia que contemplan las disposiciones relativas al suministro de energía eléctrica, enunciadas en el capítulo anterior, tenemos lo siguiente:

$$\text{Factor de potencia} = \cos \phi = \cos \tan^{-1} \frac{\text{KVARH}}{\text{KWH}}$$

Esto implica que para poder determinar el promedio del factor de potencia durante el periodo de facturación, es necesario medir los KVARH (Kilovolt-amper-reactivo-hora) y los KWH (kilowatt-hora) de la instalación. Sin embargo, en la actualidad, para determinar el

factor de potencia existen una gran variedad de métodos y formas diferentes a la de medir la energía activa y reactiva, los cuales trataremos más adelante.

2.2. EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y PARTES PRINCIPALES DEL WATTHORIMETRO DE INDUCCIÓN.

La energía activa, es la componente de la energía total o suministrada a la carga que realmente se aprovecha en realizar un trabajo; esta energía es la medida en la Comisión Federal de Electricidad mediante el empleo de equipos denominados “Watthorímetros de Inducción” .

El watthorímetro de inducción funciona de acuerdo con el principio del motor de inducción, pero con campo magnético desplazable con trayectoria lineal a lo largo del entrehierro, en lugar de hacerlo con trayectoria circular alrededor de un inducido cilíndrico, por ello puede decirse que es un motor lineal de inducción.

Visto así, el rotor del watthorímetro es un conductor eléctrico en forma de disco, generalmente de aluminio, el cual se encuentra colocado entre los polos del estator, el estator está constituido por una bobina de corriente y una de potencial.

La corriente que pasa por la bobina de potencial va atrasada respecto a la corriente que circula por la bobina de corriente, por lo tanto, los flujos originados por el estator pasan por una porción del disco. Si tomamos en cuenta que los campos magnéticos en forma alternada aumentan y disminuyen induciendo una fem en el disco, el cual origina la presencia de corrientes parásitas cuyo flujo reacciona con el campo magnético del estator, provocando un par motor en el disco, el cual puede encontrarse libre para girar adquiere un movimiento de rotación. En la figura No. 4 se puede observar la interacción que existe entre los flujos para formar el par motor.

En el watthorímetro de inducción pueden observarse principalmente en tres partes:

a) Elemento electromagnético.

También llamado estator y está formado por: Una bobina de potencial construida con alambre delgado y muchas vueltas, por lo que es considerada altamente inductiva y en la que el flujo y la corriente que le circula están atrasados de la fem de línea aproximadamente 90°; y una bobina de corriente construida con alambre grueso y

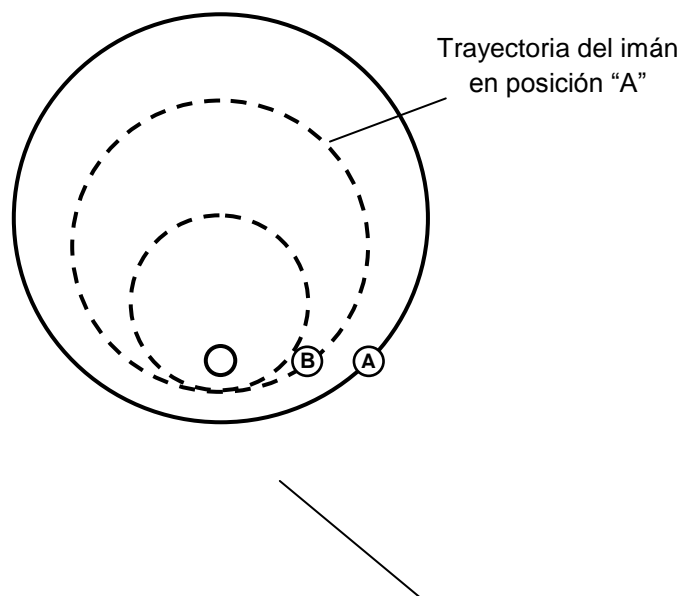
pocas vueltas, por lo que se considera altamente resistiva. Es aquí donde se producen los flujos que se interaccionan para producir el par motor sobre el disco.

b) Freno magnético.

En la práctica, la fricción que existe en el disco giratorio del wathhorímetro es casi nulo, debido a que se encuentra generalmente sobre un mecanismo embalado y sobre joyas, por tal razón, al aplicarse al voltaje y corriente al medidor el disco comienza a girar rápidamente; por otro lado, cuando cesa la corriente y el voltaje, el disco sigue girando por inercia. Para evitar y regular la velocidad del disco, se introduce un dispositivo de retardo, el cual está formado por un imán permanente que produce líneas de flujo que son cortadas por el disco en movimiento, produciéndose así un cambio en el número de líneas que enlazan el disco.

Este corte de líneas de flujo del imán permanente, genera una fem inducida y ésta a su vez engendra corrientes parásitas en el disco las cuales establecen campos magnéticos que reaccionan con el propio imán produciendo fuerzas opuestas a la rotación del disco.

De esta forma, para un determinado par motor en el disco, un área del mismo pasará debajo del imán en un determinado tiempo (si se supone una velocidad constante del disco del wathhorímetro); una mayor área pasará bajo el imán cuando éste se encuentra cerca de la periferia que cuando está en el centro del disco, de este modo el par de frenado se puede controlar, regulando éste a su vez, la velocidad del disco. Ver la siguiente figura.



Trayectoria del imán
en posición "B"

Figura No. 5.- Efecto del freno magnético sobre el disco giratorio.

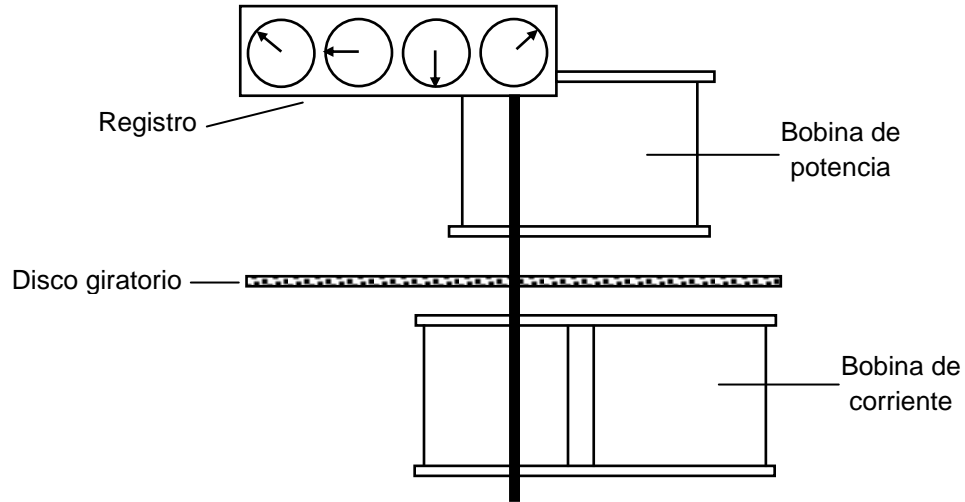


Figura No. 6.- Partes importantes en un wathorímetro de inducción.

c) Registro.

El registro es un mecanismo de relojería o contador que cuenta el número de revoluciones en forma acumulativa, en el cual registra la energía eléctrica consumida en el circuito medido.

De esta forma podemos ver que el disco del medidor o contador de energía eléctrica gira con una velocidad constante a la tensión aplicada a su bobina de potencial y a la corriente que circula por su bobina de corriente, por lo que podemos expresarlo de la siguiente manera:

Velocidad del disco $\propto E I$

Esta proporcionalidad la podemos eliminar si se introduce el valor del atraso de la corriente de carga al voltaje aplicado en la bobina de potencial, con la finalidad de tomar en cuenta únicamente la parte de la corriente que produce flujo magnético en fase con el flujo de la bobina de potencial, ya que flujos perpendiculares no producen ningún efecto sobre el disco del wathhorímetro (plano neutro).

De lo anterior podemos concluir:

$$\text{Velocidad del disco} = E I \cos \emptyset$$

Donde \emptyset es el ángulo de atraso entre el vector corriente y voltaje. Apréciese que la expresión anterior es la fórmula elemental de la corriente activa, y si tomamos en cuenta lo que dice la definición de potencia:

“La potencia es la velocidad con que se desarrolla un trabajo”

podemos decir entonces que:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}} = \text{Velocidad}$$

En consecuencia, igualando ambas expresiones,

$$\frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}} = E I \cos \emptyset$$

Tiempo

De donde podemos despejar el trabajo,

$$\text{Trabajo} = E I \cos \emptyset \text{ por unidad de tiempo}$$

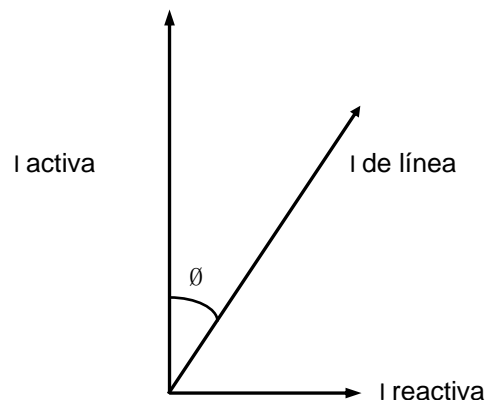


Figura No. 7 Descomposición de la corriente de carga en sus componentes activa y reactiva.

Que es la energía consumida por la carga en un determinado tiempo.

Recuérdese que la electricidad no se puede medir, ya que, como se sabe, solo es un fenómeno; sin embargo, la tensión y la corriente si se pueden medir, pero hacer la factura para un usuario sobre la base de corriente o tensión es impráctico; más bien a cada cliente se le carga sobre la base de cuanto trabajo efectúa la energía eléctrica que consume.

Así pues, para determinar el trabajo total efectuado, que es lo mismo que la potencia total consumida, se multiplicará la rapidez de ejecución del trabajo (watts) por el tiempo total durante el que se efectúa el trabajo (horas).

Podemos concluir entonces que el wathorímetro de inducción mide solamente la potencia activa y no la total o aparente.

2.3. CIRCUITOS TRIFÁSICO EN DELTA A 3 HILOS (3F-3H)

Los métodos existentes para la medición del factor de potencia son básicamente los siguientes:

- a). Método de los dos wathorímetros.
- b). Método "Z"
- c). Método de las frases cruzadas.
- d). Método del wathorímetro con defasador.
- e). Método con medidor autodefásado.
- f). Método "QH".

De todos ellos, los 2 primeros deben unirse únicamente en circuitos con cargas balanceadas. En este apartado analizaremos cada uno de ellos, aplicados a la medición de cargas conectadas a circuitos "delta", los cuales los examinaremos sobre la base de

potencia, haciendo intervenir el factor tiempo en el caso de la medición de energía; también consideramos que todas las cargas son balanceadas y equilibradas, en el caso de la medición de energía; también se considerará en las mismas condiciones, en el que la secuencia a aplicar será:

- Ilustrar diagrama eléctrico de conexiones.
- Ilustrar su diagrama de vectores.
- Realizar el análisis matemático.

Aclarando también, que en los casos en que intervenga la potencia activa, consideramos solamente que está siendo medida por los métodos apropiados al caso, haciendo intervenir en los resultados únicamente su valor de acuerdo a las fórmulas siguientes:

$$P = E_n I \cos \emptyset$$

$$P = 2 E_n I \cos \emptyset$$

$$P_{3\emptyset} = 3 E_1 I \cos \emptyset$$

En donde $P_{1\emptyset}$, $P_{2\emptyset}$, $P_{3\emptyset}$ = Potencia Monofásica, bifásica y trifásica respectivamente.

E_n = Voltaje de fase a neutro.

E_1 = Voltaje de Fase a Fase.

I = Corriente de línea.

\emptyset = Ángulo entre voltaje y corriente.

Las cuales se demostrarán al principio de cada grupo de análisis.

La medición de kilowatthoras en un circuito delta de 3 hilos, generalmente se efectúa mediante el uso de 2 medidores monofásicos o un medidor polifásico de 2 elementos, considerándose como elemento a la combinación de una bobina de corriente y una bobina de potencial.

En la figura No. 8 se ilustra su diagrama eléctrico y su diagrama vectorial y en concordancia con éste, el registro del waththorímetro será:

$$E1 = V_{ab} I_a \cos (30 + \emptyset)$$

$$E2 = V_{cb} I_a \cos (30 - \emptyset)$$

Donde:

E1 es el registro del elemento 1 y

E2 es el registro del elemento 2

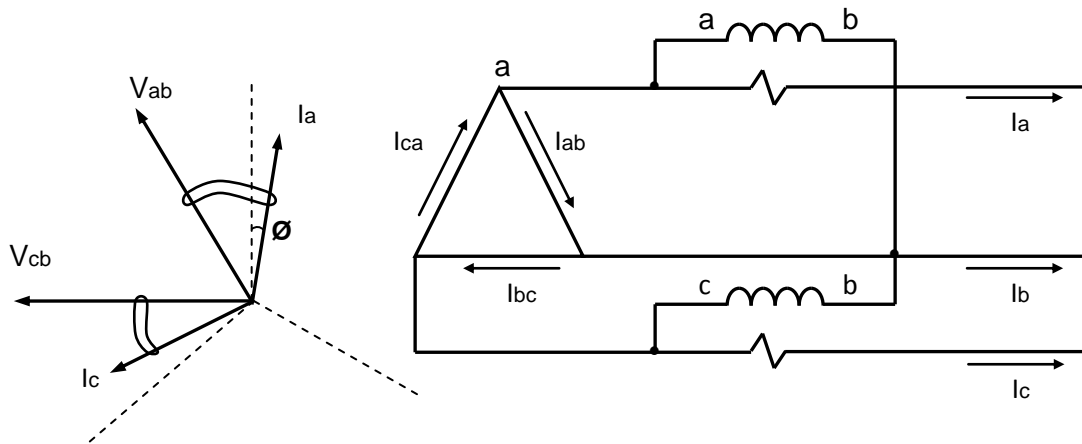


Fig. No.8 Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de kilowattthoras en un circuito delta de 3 hilos.

Sustituyendo en las expresiones anteriores las identidades trigonométricas, se obtiene:

$$E1 = V_{ab} I_a (\cos 30 \cos \emptyset - \text{Sen } 30 \text{ Sen } \emptyset)$$

$$E2 = V_{ab} I_a (\cos 30 \cos \emptyset + \text{Sen } 30 \text{ Sen } \emptyset)$$

Considerando el caso de corriente, voltajes y \emptyset balanceados y sumando $E1 + E2$, se obtiene:

$$E1 + E2 = V_1 I_1 (2 \cos 30 \cos \emptyset)$$

$$E1 + E2 = V1 I1 (2 \sqrt{3}/2 \cos \emptyset)$$

$$E1 + E2 = \sqrt{3} V1 I1 \cos \emptyset$$

Por otra parte, la potencia requerida por una carga trifásica de 3 hilos con conexión en delta está representada en la figura No. 9, donde podemos apreciar la relación de corrientes siguiente:

$$I_a = I_{ca} + I_{ba}$$

$$I_b = I_{ab} + I_{cb}$$

$$I_c = I_{bc} + I_{ac}$$

En los que los ángulos cuyos coseno es el factor de potencia son \emptyset_1 , \emptyset_2 , \emptyset_3 respectivamente.

Por lo que, la potencia de cada rama de la delta será:

$$P_1 = V_{ab} I_{ab} \cos \emptyset_1$$

$$P_2 = V_{bc} I_{bc} \cos \emptyset_2$$

$$P_3 = V_{ca} I_{ca} \cos \emptyset_3$$

Si la carga es balanceada y equilibrada, se tiene:

$$P_1 + P_2 + P_3 = P_T = 3 V1 I_d \cos \emptyset$$

Pero existe la siguiente equivalencia en los sistemas delta:

$$I_1 = \sqrt{3} I_d; \text{ por lo que}$$

$PT = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \varnothing$; que es la misma fórmula obtenida a partir del wathhorímetro.

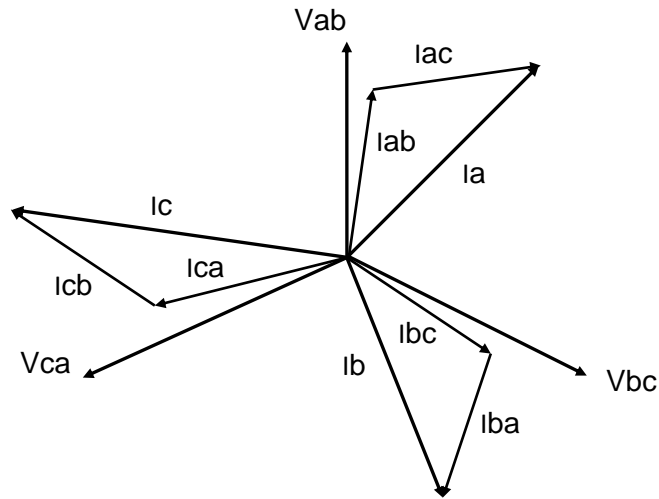


Fig. No. 9 Diagrama vectorial para una carga trifásica conectada en delta.

2.3.1. MÉTODO DE LOS DOS WATTHORÍMETROS.

La medición del factor de potencia por este método, utiliza los mismos medidores que la medición de kilowatthoras explicada con anterioridad:

$$E1 = V_{ab} I_a (\cos 30 \cos \varnothing - \sin 30 \sin \varnothing)$$

$$E2 = V_{cb} I_c (\cos 30 \cos \varnothing + \sin 30 \sin \varnothing)$$

Restando $E2 - E1$, y considerando el sistema balanceado, se tiene:

$$E2 - E1 = V_1 I_1 (2 \sin 30 \sin \varnothing)$$

$$E2 - E1 = V_1 I_1 (2 \times \frac{1}{2} \times \sin \varnothing)$$

$E_2 - E_1 = V_1 I_1 \text{ Sen } 30^\circ \phi$; dividiendo las 2 expresiones finales se tiene:

$$\frac{E_2 - E_1}{E_2 + E_1} = \frac{V_1 I_1 \text{ Sen } 30^\circ \phi}{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Cos } \phi} = \frac{\text{Tang } \phi}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Tang } \phi = \sqrt{3} \frac{(E_2 - E_1)}{(E_2 + E_1)}$$

Despejando a tang ϕ , tenemos

$$\text{Tang } \phi = \sqrt{3} \frac{(E_2 - E_1)}{(E_2 + E_1)}, \text{ de donde:}$$

$$\text{Factor de potencia} = \text{Cos Arc tang } \phi$$

En la tabla No. 3 se ilustran los valores que corresponden al factor de potencia para cada valor de E_1 y E_2 , donde se puede observar que el medidor E_1 está conectado entre las fases A y B y el E_2 es el que está conectado entre las fases C y B.

2.3.2. MÉTODO “Z”.

Este método consiste en atrasar 120° eléctricos los voltajes aplicados al medidor “Z”, con respecto a los aplicados al medidor de kilowatthoras. Esto se logra utilizando los voltajes V_{bc} y V_{ac} , que sustituyen a V_{ab} y V_{cb} respectivamente.

$$\text{Tang } \phi = \sqrt{3} \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1}$$

La parte superior se usa cuando la relación W_1/W_2 es positiva y la parte inferior se usa cuando la relación W_1/W_2 es negativa.

F.P.	<u>W1</u>	F.P.	<u>W1</u>	F.P.	<u>W1</u>	F.P.	W1	F.P.	W1
%	W2	%	W2	%	W2	%	W2	%	W2
100	1.000	90	0.564	80	0.396	70	0.259	60	0.130
99	0.647	89	0.543	79	0.382	69	0.246	59	0.117
98	0.790	88	0.525	78	0.367	68	0.233	58	0.164
97	0.747	87	0.507	77	0.353	67	0.220	57	0.092
96	0.712	86	0.490	76	0.339	66	0.207	56	0.079
95	0.681	85	0.473	75	0.325	65	0.193	55	0.066
94	0.654	84	0.457	74	0.312	64	0.181	54	0.053
93	0.629	83	0.441	73	0.298	63	0.168	53	0.039
92	0.605	82	0.425	72	0.285	62	0.156	52	0.026
91	0.583	81	0.410	71	0.272	61	0.143	51	0.013
								50	0.000
50	0.000								
49	0.013	39	0.154	29	0.312	19	0.498	9	0.729
48	0.029	38	0.169	28	0.329	18	0.519	8	0.756
47	0.041	37	0.183	27	0.346	17	0.562	7	0.784
46	0.054	36	0.199	26	0.364	16	0.540	6	0.811
45	0.068	35	0.214	25	0.382	15	0.584	5	0.849
44	0.082	34	0.230	24	0.400	14	0.606	4	0.870
43	0.096	33	0.240	23	0.419	13	0.630	3	0.902
42	0.110	32	0.262	22	0.438	12	0.654	2	0.933
41	0.125	31	0.279	21	0.458	11	0.678	1	0.967
40	0.139	30	0.295	20	0.478	10	0.703	0	0.000

Tabla No. 3.- Tabla para determinar el factor de potencia, por el método de los 2 wattorímetros.

De la figura 10 podemos deducir que el registro del medidor conectado en "Z", es el siguiente:

$$Z_{bc} = V_{bc} I_a \cos (90 - \emptyset)$$

$$Z_{ac} = V_{ac} I_c \cos (150 - \emptyset)$$

Donde: Z_{bc} es el registro del elemento 1 y

Z_{ac} es el registro del elemento 2.

Sustituyendo las identidades trigonométricas,

$$Z_{bc} = V_{bc} I_a (\cos 90 \cos \emptyset + \sin 90 \sin \emptyset)$$

$$Z_{ac} = V_{ac} I_c (\cos 150 \cos \emptyset + \sin 150 \sin \emptyset)$$

$$\text{Pero } \cos 90 = 0, \sin 90 = 1, \cos 150 = -\frac{\sqrt{3}}{2}, \sin 150 = \frac{1}{2}$$

$$Z_{bc} = V_{bc} I_a \sin \emptyset$$

$$Z_{ac} = V_{ac} I_c \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \emptyset + \frac{1}{2} \sin \emptyset \right)$$

Considerando que el circuito es balanceado y equilibrado, tenemos que sumando $Z_{bc} + Z_{ac}$,

$$Z_{bc} + Z_{ac} = Z = \frac{3}{2} V_{1l1} \sin \emptyset - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{1l1} \cos \emptyset$$

Y dividiendo esta última expresión entre el registro de energía activa:

$$W = \sqrt{3} V_{1l1} \cos \varnothing$$

$$\underline{Z} = \frac{2 V_{1l1} \text{ Sen } \varnothing - 2 V_{1l1} \text{ Cos } \varnothing}{\sqrt{3} V_{1l1} \text{ Cos } \varnothing} = \frac{2}{3} \text{ Tang } \varnothing - \frac{1}{\sqrt{3}}$$

De donde despejamos a Tang de \varnothing

$$\text{Tang } \varnothing = \left(\frac{\underline{Z} + \frac{1}{\sqrt{3}}}{\frac{2}{3}} \right) \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\text{Tang } \varnothing = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\underline{Z} + \frac{1}{\sqrt{3}}}{2} \right) = \frac{\underline{Z} + \frac{1}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3}}$$

, de donde

Factor de Potencia = $\text{Cos Arc Tang } \varnothing$

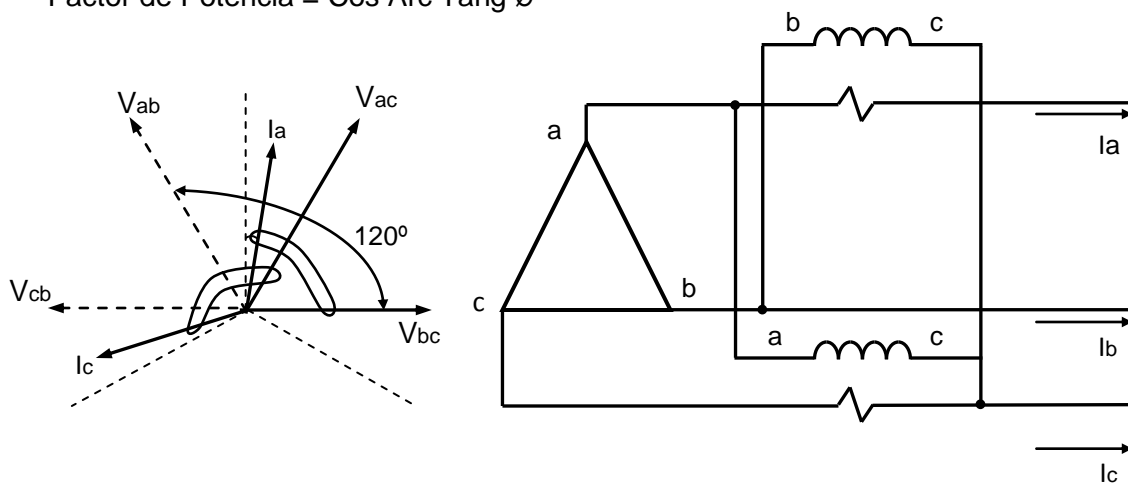


fig. 10.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de F.P. conectado en "Z".

En la tabla No. 4 se muestran los valores del factor de potencia para cada relación de valores de Z y W.

Tabla No. 4.- Tabla para determinar el factor de potencia por el método "Z"

$$\text{Tang } \theta = \frac{2z + W}{\sqrt{3} W}$$

F.P.	Z/W	F.P.	Z/W	F.P.	Z/W	F.P.	Z/W
%		%		%		%	
100	-0.5000	87	-0.0092	75	0.2637	62	0.5000
99	-0.3767	86	0.0139	74	0.2872	61	0.6250
98	-0.3243	85	0.0368	73	0.3108	60	0.6547
97	-0.2830	84	0.0594	72	0.3348	59	0.6851
96	-0.2474	83	0.0820	71	0.3590	58	0.7164
95	-0.2154	82	0.1045	70	0.3835	57	0.7484
94	-0.1857	81	0.1270	69	0.4085	56	0.7813
93	-0.1577	80	0.2495	68	0.4338	55	0.8150
92	-0.1311	79	0.1721	67	0.4596	54	0.8498
91	-0.1054	78	0.1948	66	0.4858	53	0.8856
90	-0.0806	77	0.2176	65	0.5124	52	0.9226
89	-0.0563	76	0.2406	64	0.5397	51	0.9607
88	-0.0326			63	0.5675	50	1.0000

2.3.3. MÉTODO DE LAS FASES CRUZADAS

Este método consiste en desplazar hacia atrás 90° eléctricos los voltajes aplicados al medidor, con respecto a los voltajes que generan las corrientes de líneas, esto se logra utilizando los voltajes de línea V_{bc} y V_{ab} en el elemento 1 y 2 respectivamente.

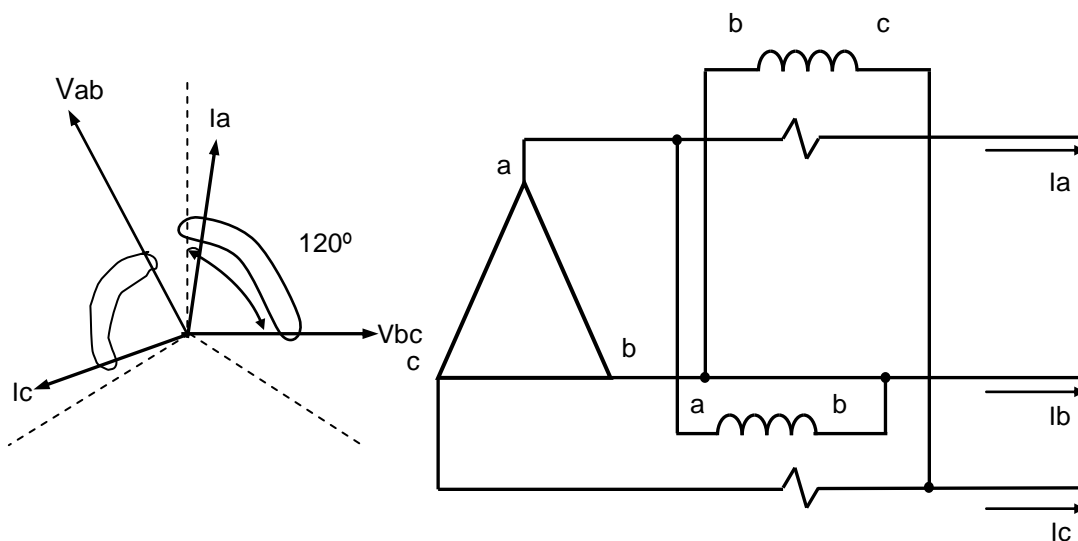


Fig. No. 11.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de Factor de Potencia en fases cruzadas.

De acuerdo con el diagrama de la figura No. 11, podemos decir que:

$$F1 = V_{bc} I_a \cos (90 - \theta)$$

$$F2 = V_{ab} I_c \cos (90 - \theta)$$

Donde: F1 es el registro del elemento 1

F2 es el registro del elemento 2

Sustituyendo las identidades trigonométricas tenemos:

$$F1 = V_{bc} I_a (\cos 90 \cos \emptyset + \text{Sen } 90 \text{ Sen } \emptyset)$$

$$F1 = V_{ab} I_a (\cos 90 \cos \emptyset + \text{Sen } 90 \text{ Sen } \emptyset)$$

Pero $\cos 90 = 0$ y $\text{Sen } 90 = 1$

$$F1 = V_{bc} I_a \text{ Sen } \emptyset$$

$$F2 = V_{ab} I_c \text{ Sen } \emptyset$$

Y considerando que la carga es balanceada y equilibrada:

$$F1 + F2 = 2 V_1 I_1 \text{ Sen } \emptyset = F$$

y dividiendo F entre W (fórmula de la potencia activa registrada por el wathhorímetro)

$$\underline{F} = \underline{2 V_1 I_1 \text{ Sen } \emptyset}$$

$$W \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \emptyset$$

$$\underline{F} = \underline{2 \text{Tang } \emptyset}$$

$$W \sqrt{3}$$

$$\text{Tang } \emptyset = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{f}{w}$$

Donde el factor de potencia = $\cos \text{Arc Tang } \emptyset$

En la tabla No. 5 se muestran los valores del factor de potencia para cada valor de F y W.

Tabla. No. 5.- Tabla para determinar el factor de potencia por el método de las fases cruzadas, en circuitos delta.

$$\text{Tang } \varnothing = \frac{3}{2} F \sqrt{W}$$

F.P.	F/W	F.P.	F/W	F.P.	F/W	F.P.	F/W
%		%		%		%	
100	0.000	87	0.654	74	1.049	61	1.499
99	0.164	86	0.685	73	1.081	60	1.539
98	0.234	85	0.715	72	1.112	59	1.580
97	0.289	84	0.745	71	1.145	58	1.621
96	0.336	83	0.775	70	1.178	57	1.664
95	0.379	82	0.805	69	1.211	56	1.708
94	0.419	81	0.835	68	1.245	55	1.753
93	0.456	80	0.866	67	1.279	54	1.799
92	0.491	79	0.896	66	1.314	53	1.847
91	0.526	78	0.926	65	1.349	52	1.896
90	0.559	77	0.956	64	1.386	51	1.9475
89	0.591	76	0.987	63	1.423	50	2.000
88	0.632	75	1.018	62	1.462		

2.3.4. MÉTODO DEL WATTHORÍMETRO CON DEFASADOR

Antes conoceremos lo que es defasador.

El transformador defasador está construido principalmente por 2 autotransformadores, cada devanado sobre un núcleo distinto, el cual sirve como complemento para la medición de Var-horas, por medio de un medidor de Watt -horas.

La velocidad del rotor en un wathhorímetro de inducción es proporcional al producto de la corriente de la bobina de corriente por la tensión aplicada a través de la bobina de potencial y por el coseno del ángulo de fase entre ambos, esto es:

$$\text{Watts} = E I \text{Cos } \emptyset$$

$$\text{Watts-horas} = E I \text{Cos } \emptyset \times \text{tiempo en horas.}$$

Si usamos un wathhorímetro de inducción para medir VAR horas, la velocidad del rotor deberá ser proporcional al producto de la corriente en la bobina de corriente por la tensión aplicada en la bobina de potencial y por el seno del ángulo de fase entre ambos, esto es:

$$\text{VAR} = E I \text{Sen } \emptyset$$

$$\text{VAR- horas} = E I \text{Sen } \emptyset \times \text{tiempo en horas.}$$

La proyección de la corriente de línea I (Ver fig. 12) sobre la tensión E es proporcional a los watts, y de igual forma la proyección de la corriente sobre un eje de diferencia que adelanta o atrasa la tensión E del circuito en 90° eléctricos, es proporcional a los VARS.

Esto significa que $\text{Cos } \emptyset = \text{Sen } (\emptyset + 90)$, es decir, que se puede usar un wathorímetro para medir VAR-horas si el circuito de potencial está excitado por un voltaje que está defasado 90° con respecto a la tensión usada en la medición de Watt-horas.

Para obtener las tensiones defasadas 90° con respecto sus tensiones de entrada y además de la misma magnitud que sus propias de fase, es menester que los autotransformadores tengan derivaciones como las indicadas en la fig. No. 13, éstas tensiones proporcionadas por las derivaciones proveen de los defasamientos necesarios para cualquier tipo de conexión, ya sea en estrella o en delta.

Tabla No. 6.- Tabla para determinar el factor de potencia por el método de las fases cruzadas, en circuitos estrella.

$$\text{Tang } \emptyset = \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ F/W}$$

F.P. %	F/W	F.P. %	F/W	F.P. %	F/W	F.P. %	F/W
100	0.000	87	0.981	74	1.574	61	2.249
99	0.246	86	1.027	73	1.621	60	2.309
98	0.351	85	1.073	72	1.669	59	2.370
97	0.434	84	1.187	71	1.717	58	2.432
96	0.505	83	1.163	70	1.767	57	2.496
95	0.569	82	1.208	69	1.816	56	2.562
94	0.628	81	1.253	68	1.867	55	2.630
93	0.684	80	1.299	67	1.767	54	2.699
92	0.737	79	1.344	66	1.971	53	2.771
91	0.789	78	1.389	65	2.024	52	2.845
90	0.839	77	1.435	64	2.079	51	2.921
89	0.887	76	1.481	63	2.135	50	3.000
88	0.934	75	1.527	62	2.191		

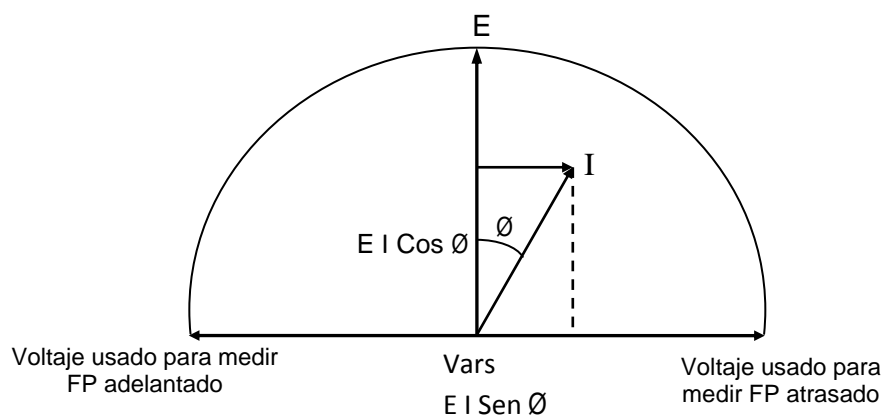


Fig. No. 12.- Tensiones utilizadas para la medición de var-horas por medio de un wattorímetro.

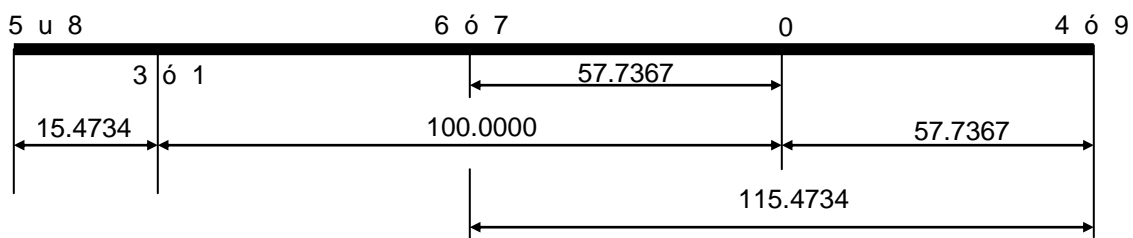


Fig. No. 13.- Derivaciones que contienen un autotransformador defasador. (Los números indican % del voltaje de alimentación)

a) Sistema 3F – 4H Estrella.

Se conectan los 2 autotransformadores con un defasamiento de 120° eléctricos (similares a la conexión estrella incompleta), alimentación con fases A, C y Neutro (la fase B se conecta únicamente al block de pruebas del autotransformador para efectuar las verificaciones al wattorímetro)

Efectuada la conexión, los voltajes resultantes son los siguientes (ver figura No. 14)

- Voltaje 4-5, defasado 90° atrás con respecto al voltaje E_{an} y de un mismo valor.
- Voltaje 6-7, defasado 90° atrás con respecto al voltaje E_{bn} y de un mismo valor.
- Voltaje 8-9, defasado 90° atrás con respecto al voltaje E_{cn} y de un mismo valor.

Para una mejor comprensión, se analiza el comportamiento de los voltajes por medio de triángulos formados por 045, 067, 089 (Ver figura No. 14)

Los voltajes anotados en los lados del triángulo se obtuvieron de aplicar el porcentaje de salida a voltaje aplicado (normalmente 120 volts).

$$04 = 57,7367 \% (120 \text{ Volts}) = 69.2840 \text{ Volts.}$$

$$05 = 115.74734 \% (120 \text{ Volts}) = 138.5680 \text{ Volts.}$$

$$45 = 05 \text{ Cos } 30$$

$$45 = 138.5680 (0.866)$$

$$45 = 119.9999 \text{ volts, que es el 100\% del voltaje de alimentación.}$$

Para el triángulo 089, el resultado es el mismo.

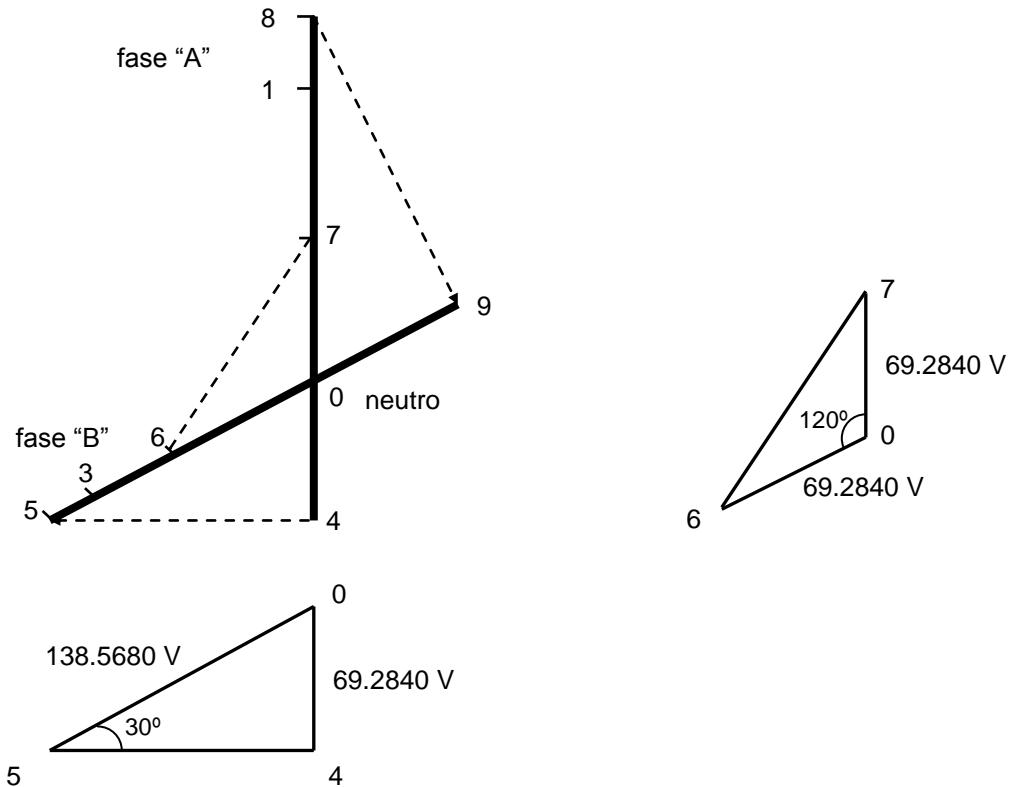


Fig. No. 14.- Diagrama de conexión de 2 autotransformadores defasadores en un circuito 3F – 4H estrella.

por lo que analizaremos el triángulo 067.

$$06 = 57.7367 \% (120 \text{ Volts}) = 69.2840 \text{ volts.}$$

$$07 = 57.7367 \% (120 \text{ Volts}) = 69.2840 \text{ volts.}$$

Por Ley de Senos tenemos que:

$$67 = \frac{06 \text{ Sen } 120}{\text{Sen } 30} = \frac{69.2840 (0.866)}{0.5}$$

$$67 = 119.9998 \text{ Volts, que es el 100\% del voltaje de alimentación.}$$

b).- Sistema 3F - 3H Delta.

Para este sistema, se conectan los autotransformadores en delta abierta, alimentándose con los voltajes A, B y C, con un defasamiento de 60° eléctricos entre ellos. Los voltajes resultantes son los siguientes (Figura No. 15).

- Voltaje 75, defasado 90° atrás con respecto al voltaje Eab y del mismo valor.
- Voltaje 86, defasado 90° atrás con respecto al voltaje Ecb y del mismo valor.

Los valores de los voltajes se logran mediante el análisis de los triángulos 086 y 075. (ver figura No. 15)

$$08 = 115.4734 \% (120 \text{ volts}) = 138.5680 \text{ volts.}$$

$$06 = 57.7367 \% (120 \text{ volts}) = 69.2840 \text{ volts.}$$

$$86 = 08 \text{ Cos } 30 = 138.5680 (0.866)$$

86 = 119.9998 Volts, que es el 100% del voltaje de alimentación. El triángulo 075 se analiza de la misma manera obteniéndose el mismo resultado.

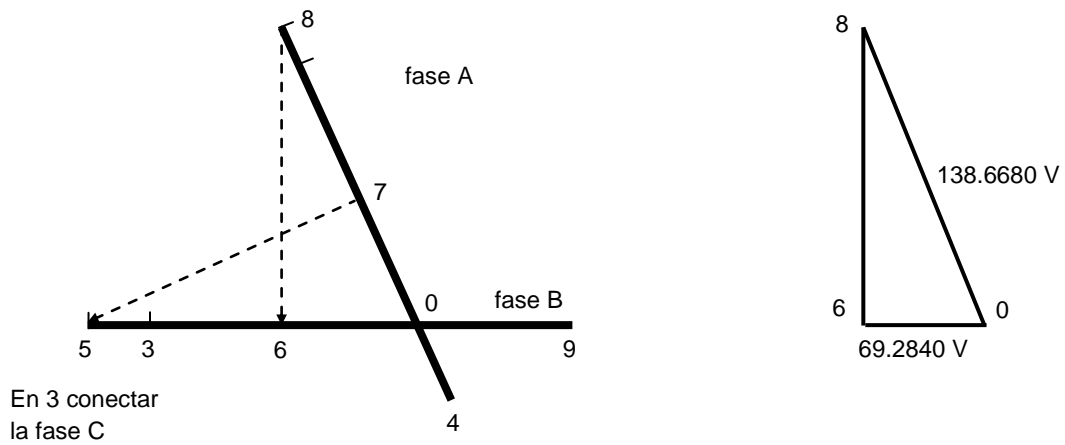


Fig. No. 15.- Diagrama de conexión de dos autotransformadores defasadores en circuitos 3F – 3H Delta.

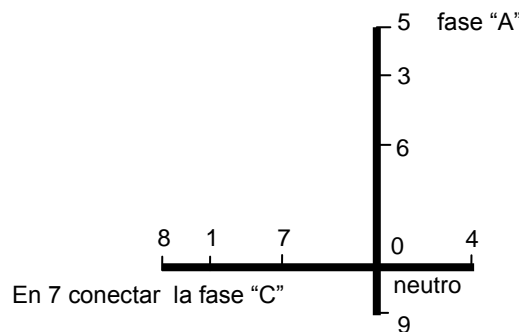


Fig. No. 16.- Diagrama de conexiones de dos autotransformadores defasadores en circuitos 3F – 4H – Delta.

c) Sistema 3F – 4H delta.

En este sistema, se conectan los autotransformadores defasados con un ángulo de 90° eléctricos, alimentándose con las fases A, C y el neutro (la fase n se conecta al block del defasador únicamente para fines de prueba del wattthorímetro), ver figura No. 16.

Con esta conexión los voltajes resultantes son los siguientes:

- Voltaje 05, defasado 90° atrás con respecto al voltaje Vbc y del mismo valor.
- Voltaje 01, defasado 90° atrás con respecto al voltaje Van y del mismo valor.

Es necesario recordar que en este circuito se tiene el siguiente comportamiento de voltajes:

$$V_{cb} = 2 V_{cn} = 2 V_{bn} \text{ y que:}$$

$V_{bn} = - V_{cn}$ es decir, es la misma fase pero en sentido contrario, y que:

$$V_{an} = 0.866 V_1, \text{ y}$$
$$V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = V_1$$

Los valores de voltaje pueden obtenerse del análisis de las secciones de cada autotransformador:

- Sección 0-5

$$05 = 115.4734 \% (V_{an}) = 115.4734 \% (0.866 \times 120)$$

$$05 = 115.4734 \% (103.92 \text{ volts}) = 119.9999 \text{ volts, que es el 100\% del voltaje } V_{bc}$$

- Sección 0 – 1

Obsérvese que en esta sección, el voltaje aplicado se encuentra entre las derivaciones 0 – 7 que represente el 57.7367 % del defasador y no el 100% como en los casos anteriores, en los que el voltaje se aplicaba entre las terminales 0-1 y 0-3. Esto significa que 57.7367% pasará a ser en esta ocasión el 100% del voltaje aplicado, entonces:

$$0 - 1 = 100 \% \text{ normal } (V_{cn})$$

Pero el voltaje V_{cn} aplicado entre las terminales 0-7 tiene ahora un nuevo porcentaje, debido a ello variará el porcentaje entre las terminales 0-1.

57.7367 (normal) tiende a 100.0000 (nuevo), por lo que:

100.0000 (normal) tenderá a "X", donde:

$$X = \frac{100.00 \times 100.00}{57.7367} = 173.2000 \%$$

$$01 = 173,2000 \% V_{cn} = 173,2000 (1/2 V_1)$$

$$01 = 173,2000 ((1/2 \times 120))$$

01= 103.92 volts, que es el 100% del voltaje Van.

Con lo expuesto anteriormente podemos ya iniciar nuestro análisis de la medición.

De la Figura No. 17, podemos deducir las siguientes expresiones

$$VAR1 = V_{75} I_a \cos (60 - \emptyset)$$

$$VAR2 = V_{86} I_c \cos (120 - \emptyset)$$

Donde VAR1= es la medición del elemento 1 y

VAR2 = es la medición del elemento 2

Sustituyendo las identidades trigonométricas tenemos:

$$VAR1 = V_{75} I_a (\cos 60 \cos \emptyset + \sin 60 \sin \emptyset)$$

$$VAR2 = V_{86} I_c (\cos 120 \cos \emptyset + \sin 120 \sin \emptyset)$$

Pero: $\cos 60 = 1/2$, $\sin 60 = \sqrt{3}/2$, $\cos 120 = -1/2$ y $\sin 120$ es igual a $\sqrt{3}/2$, por lo que se reducen a:

$$VAR1 = V_{75} I_a (1/2 \cos \emptyset + \sqrt{3}/2 \sin \emptyset)$$

$$VAR2 = V_{86} I_c (-1/2 \cos \emptyset + \sqrt{3}/2 \sin \emptyset)$$

Considerando que la carga es balanceada y equilibrada, en consecuencia:

$$VAR1 + VAR2 = V_1 I_1 (\sqrt{3} \sin \emptyset)$$

$VAR = \sqrt{3} V_1 I_1 \sin \emptyset$, que es el valor exacto de la potencia reactiva consumida por el circuito.

Dividiendo la potencia reactiva entre la activa:

$$\frac{VAR}{W} = \frac{\sqrt{3} V_1 I_1 \sin \emptyset}{\sqrt{3} V_1 I_1 \cos \emptyset} = \text{Tang } \emptyset, \text{ de donde:}$$

Factor de potencia = $\cos \text{Arc Tang}$

En la tabla No. 7 se muestran los valores del factor de potencia para cada valor de VAR y W.

Figura No. 17.- Diagrama vectorial y eléctrico de un medidor de wathoras con defasador.

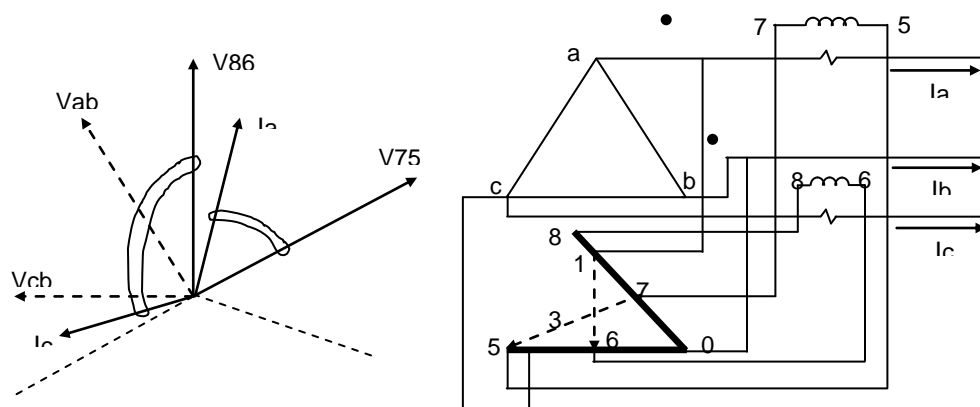


Tabla No. 7.- Tabla para determinar el factor de potencia por el método de los KVAR-H.

$$\text{Tang } \phi = \frac{\text{KVAR-H}}{\text{KW-H}}$$

F.P.	<u>KVARH</u>	F.P.	<u>KVARH</u>	F.P.	<u>KVARH</u>	F.P.	<u>KVARH</u>
%	KWH	%	KWH	%	KWH	%	KWH
100	0.000	87	0.566	74	0.908	61	1.298
99	0.142	86	0.593	73	0.936	60	1.333
98	0.203	85	0.619	72	0.963	59	1.368
97	0.250	84	0.645	71	0.991	58	1.404
96	0.291	83	0.672	70	1.020	57	1.441
95	0.328	82	0.698	69	1.048	56	1.479
94	0.363	81	0.723	68	1.078	55	1.518
93	0.395	80	0.749	67	1.108	54	1.558
92	0.426	79	0.766	66	1.138	53	1.600
91	0.455	78	0.802	65	1.169	52	1.642
90	0.484	77	0.828	64	1.200	51	1.666
89	0.512	76	0.855	63	1.232	50	1.732
88	0.539	75	0.802	62	1.265		

2.3.5. MÉTODO CON MEDIDOR AUTODEFASADO.

La medición de reactivos (VARs) por medio de un medidor autodefásado aprovecha el principio del autotransformador defasador, de defasar uno de los 2 vectores que originan el par, un ángulo eléctrico igual a 90°; en este caso el defasamiento se logra aprovechando el comportamiento de las corrientes en una delta cerrada.

Del diagrama de vectores ilustrado en la figura No. 18 puede observarse que las corrientes de línea I_c , I_a e I_b , están adelantadas 90° eléctricos de las corrientes de las ramas de la delta I_{ab} , I_{bc} e I_{ca} ; esto equivale a atrasar 90° eléctricos los voltajes. Sin embargo, se observa que las corrientes de línea son $\sqrt{3}$ veces mayores que la corriente en la delta, por lo que, el medidor registrará $\sqrt{3}$ veces más la corriente reactiva.

Del propio diagrama podemos observar los siguientes:

$$\begin{aligned}I_a &= I_{ab} - I_{ca} = I_{ab} + I_{ca} \\I_b &= I_{bc} - I_{ab} = I_{bc} + I_{ba} \\I_c &= I_{ca} - I_{bc} = I_{ca} + I_{cb}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{ca} &= V_{bc} - V_{ab} = V_{bc} + V_{cb} \\V_{ab} &= V_{ca} - V_{bc} = V_{ac} + V_{cb} \\V_{bc} &= V_{ba} - V_{ca} = V_{ba} + V_{ac}\end{aligned}$$

Para entender mejor el efecto del defasamiento de corrientes, analicemos la medición de kilowatt-horas representada en la figura No. 8, en la que la medición total está dada por:

$$Par = (V_{ab} I_a) + (V_{cb} I_c)$$

Sustituyendo los valores de I_a e I_c de acuerdo a la tabla anterior:

$$Par = V_{ab} (I_{ab} + I_{ac}) + (V_{cb} + I_{ca} + I_{cb})$$

Desarrollando y agrupando en función de las corrientes:

$$Par = V_{ab} I_{ab} + V_{cb} I_{cb} + (V_{cb} - V_{ab}) I_{ca}$$

$$\text{Pero } V_{cb} - V_{ab} = V_{ca}, \quad V_{cb} = -V_{bc} \text{ y } I_{cb} = -I_{bc}$$

$$Par = V_{ab} I_{ab} + V_{bc} I_{bc} + V_{ca} I_{ca}$$

Considerando el circuito balanceado y equilibrado:

$$Par = 3 V_1 I_d$$

Aplicando la constante de proporcionalidad adecuada, tendremos watts:

$$P \times \cos \varnothing = 3 V_l I_d \cos \varnothing, \text{ pero } I_d = I_l \sqrt{3}$$

$$\text{Watts} = \sqrt{3} V_l I_d \cos \varnothing$$

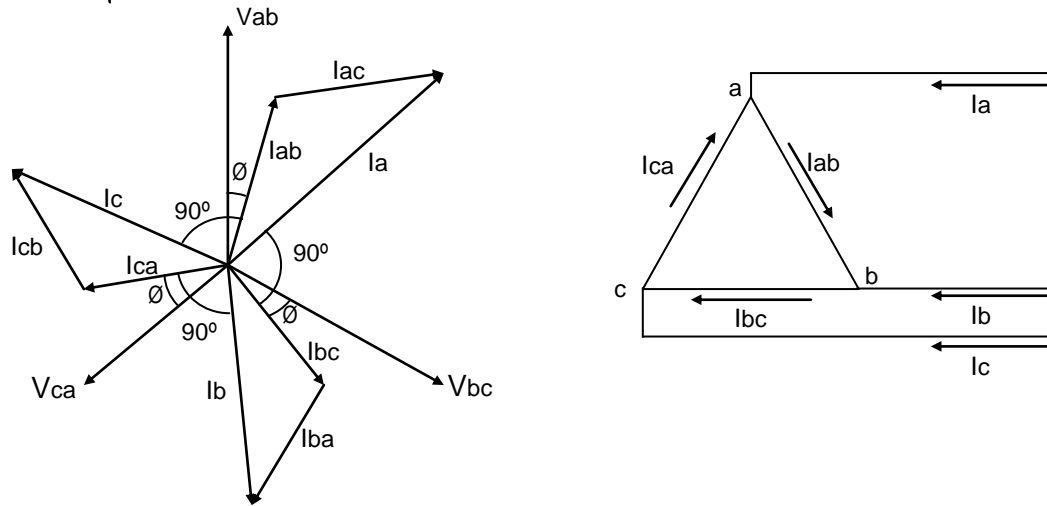


Fig. No. 18.- Diagrama vectorial de las corrientes y voltajes de una carga conectada en delta.

De la última ecuación del par obtenemos la ecuación de la potencia consumida en la delta, aplicando la constante de proporcionalidad respectiva:

$$P \times \cos \varnothing = \text{Watts} = V_{ab} I_{ab} \cos \varnothing_{ab} + V_{bc} I_{bc} \cos \varnothing_{bc} + V_{ca} I_{ca} \cos \varnothing_{ca}$$

Partiendo de esta ecuación y de acuerdo con el diagrama de la figura No. 18 podemos observar que tenemos lo necesario para poder defasar adelantado 90° las corrientes que en ella intervienen:

$$\sqrt{3} \text{ VARS} = V_{ab} I_c + V_{bc} I_a + V_{ca} I_b, \text{ si recordamos que las corrientes de línea son } \sqrt{3} \text{ veces mayores que las de delta.}$$

$$\sqrt{3} \text{ VARS} = V_{ab} (I_c) + V_{bc} (I_c) + V_{ca} (I_b)$$

$$\text{Pero } V_{ca} = (V_{cb} - V_{ab}) \text{ e } I_b = (-I_a - I_c)$$

$$\sqrt{3} \text{ VARS} = V_{ab} I_c + V_{bc} I_a + (V_{cb} - V_{ab}) (-I_a - I_c)$$

$$\sqrt{3} \text{ VARS} = V_{ab} I_c + V_{bc} I_a - V_{cb} I_a - V_{cb} I_c + V_{ab} I_a + V_{ab} I_c$$

$$\text{Pero } V_{bc} = V_{cb}$$

$$\sqrt{3} \text{ VARS} = V_{ab} (I_c + I_a + I_c) + V_{cb} (-I_a - I_a)$$

$$\sqrt{3} \text{ VARS} = V_{ab} (2I_c + I_a) + V_{cb} (-2I_a - I_c)$$

Esta última es la ecuación del par en un medidor autodefásado, cuyas conexiones internas se ilustran en la figura No. 19 de donde se obtienen las ecuaciones siguientes:

$$\text{VAR}_1 = V_{ab} I_a \cos(30^\circ + \phi) + V_{ab} (2 I_c) \cos \phi$$

$$\text{VAR}_2 = V_{cb} I_c \cos(150^\circ + \phi) + V_{cb} (2 I_a) \cos \phi$$

Donde: VAR₁ es la medición del elemento 1

VAR₂ es la medición del elemento 2

Obsérvese que los signos negativos de las corrientes no intervienen en las operaciones matemáticas, sino únicamente para ubicar los vectores en el diagrama vectorial. Resolviendo las identidades trigonométricas y considerando el sistema equilibrado y balanceado, tenemos:

$$\text{VAR}_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1 I_1 \cos \phi + \frac{3}{2} V_1 I_1 \sin \phi$$

$$\text{VAR}_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1 I_1 \cos \phi + \frac{3}{2} V_1 I_1 \sin \phi$$

$$\text{Sumando } \text{VAR}_1 + \text{VAR}_2 = \text{VAR}$$

$$\text{VAR} = 2 \left(\frac{3}{2} V_1 I_1 \sin \phi \right)$$

$$\text{VAR} = 3 V_1 I_1 \sin \phi$$

$$\text{VAR} = \sqrt{3} \left(\sqrt{3} V_1 I_1 \sin \phi \right)$$

Puede comprobarse entonces que la integración total del medidor es $\sqrt{3}$ veces la corriente reactiva, por lo tanto, para obtener registros correctos de la energía reactiva con este medidor, la velocidad del disco se afecta a través de su constante electromagnética de watt-horas (Kh) por el inverso de la $\sqrt{3}$. Entonces el registro corregido será:

$$\text{Vars} = \sqrt{3} V_1 I_1 \sin \phi$$

Que dividiendo entre la fórmula de la energía activa tenemos lo siguiente:

$$\frac{\text{Vars}}{W} = \frac{\sqrt{3} V_1 I_1 \sin \phi}{\sqrt{3} V_1 I_1 \cos \phi} = \text{Tang } \phi, \text{ de donde:}$$

Factor de potencia = $\text{Cos Arc Tang } \phi$

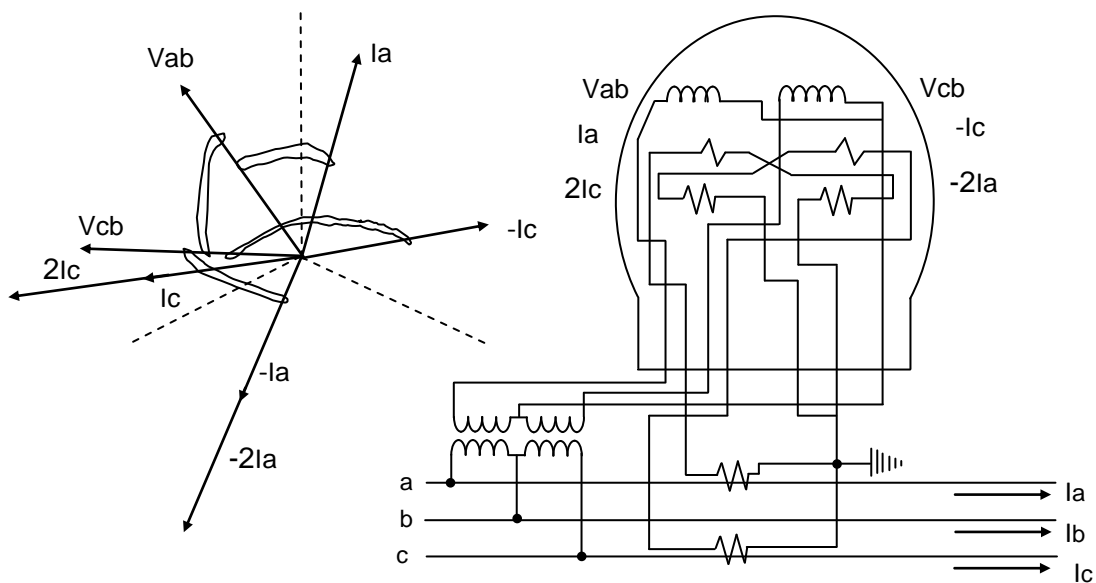


Fig. No. 19.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de VARS autodefásado.

2.3.6. MÉTODO “QH”

En este método es necesario defasar los voltajes aplicados al medidor “QH” 60° eléctricos en atraso respecto de los voltajes aplicados al medidor de kilowatthoras. Esto se obtiene con la “cruza” de las fases, eliminando así la necesidad de un defasador.

Este método tiene la ventaja que puede medir cargas con factores de potencia entre 30° adelantado y 90° atrasado.

En la figura No. 20 se ilustra el diagrama eléctrico y vectorial de una medición de factor de potencia por el método “QH”, de donde se deducen las siguientes ecuaciones:

$$Q1 = V_{ac} I_a \text{ Cos } (30 - \phi)$$

$$Q2 = V_{ab} I_c \text{ Cos } (90 - \phi)$$

Donde Q1 es el registro del elemento 1

Q2 es el registro del elemento 2

Pero $\text{Cos } 30 = \sqrt{3}/2$, $\text{Sen } 30 = 1/2$, $\text{Cos } 90 = 0$ y $\text{Sen } 90 = 1$

$$Q_1 = V_{ac} I_a (\sqrt{3}/2 \text{ Cos } \varnothing + 3/2 \text{ Cos } \varnothing + 1/2 \text{ Sen } \varnothing)$$

$$Q_2 = V_{ab} I_c (\text{Sen } \varnothing)$$

$$C_1 + Q_1 = Q = V I I_1 \left[\sqrt{3}/2 \text{ Cos } \varnothing + 3/2 \text{ Sen } \varnothing \right]$$

Y dividiendo esta expresión entre la fórmula de la energía activa:

$$\frac{Q}{W} = \frac{V I I_1 (3/2 \text{ Cos } \varnothing + 3/2 \text{ Sen } \varnothing)}{\sqrt{3} V I I_1 \text{ Cos } \varnothing}$$

$$\frac{Q}{W} = \frac{3 \tan \varnothing + 1/2}{2\sqrt{3}}$$

$$\text{Tang } \varnothing = \frac{2Q - W}{\sqrt{3} W}, \text{ de donde:}$$

Factor de potencia = $\text{Cos Arc Tang } \varnothing$

En la tabla No. 8 se muestran los valores del factor de potencia para cada valor de Q y W.

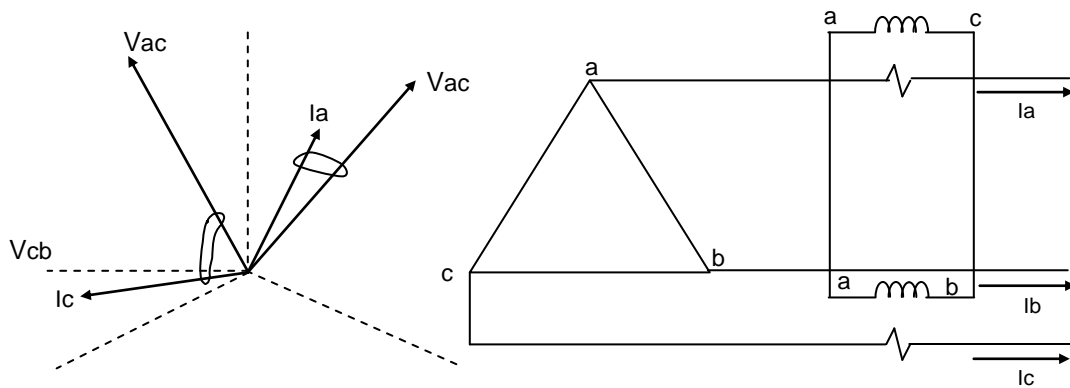


Figura No. 20.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de Factor de Potencia por el método "QH".

Tabla. No. 8.- Tabla para determinar el factor de potencia por el método de "QH".

$$\text{Tang } \emptyset = \frac{2Q - W}{\sqrt{3} W}$$

F.P. %	Q/W	F.P. %	Q/W	F.P. %	Q/W	F.P. %	Q/W
100	0.500	87	0.990	74	1.287	61	1.624
99	0.623	86	1.013	73	1.310	60	1.654
98	0.675	85	1.036	72	1.334	59	1.685
97	0.717	84	1.059	71	1.358	58	1.716
96	0.752	83	1.081	70	1.383	57	1.748
95	0.784	82	1.104	69	1.408	56	1.781
94	0.814	81	1.126	68	1.433	55	1.815
93	0.842	80	1.149	67	1.459	54	1.849
92	0.868	79	1.172	66	1.485	53	1.885
91	0.894	78	1.194	65	1.512	52	1.922
90	0.919	77	1.217	64	1.539	51	1.960
89	0.943	76	1.240	63	1.567	50	2.000
88	0.967	75	1.263	62	1.595		

2.4. CIRCUITOS TRIFÁSICOS EN ESTRELLA CON NEUTRO UTILIZANDO MEDIDORES DE 3 ELEMENTOS.

El registro de potencia activa o watts en un circuito de este tipo, se logra mediante el uso de 3 wathorímetros monofásicos o un polifásico de 3 elementos, cuyas conexiones se muestran en la figura No. 21, de donde se obtienen las siguientes expresiones:

$$\text{Registro del medidor} = W = W_a + W_b + W_c$$

$$W_a = V_{an} I_a \cos \emptyset a$$

$$W_b = V_{bn} I_b \cos \emptyset b$$

$$W_c = V_{cn} I_c \cos \emptyset c$$

Donde W_a es el registro del elemento conectado a la fase "a"

W_b es el registro del elemento conectado a la fase "b"

W_c es el registro del elemento conectado a la fase "c"

y estableciendo que el circuito es balanceado y equilibrado:

$$W_a + W_b + W_c = V_n I_1 \cos \varnothing$$

$$W = 3 V_n I_1 \cos \varnothing, \text{ pero } V_1 = \sqrt{3} V_n$$

$$W = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \varnothing$$

Por otra parte, la potencia que consume la carga está dada por:

$$P_a = V_{an} I_a \cos \varnothing_a$$

$$P_b = V_{bn} I_b \cos \varnothing_b$$

$$P_c = V_{cn} I_c \cos \varnothing_c$$

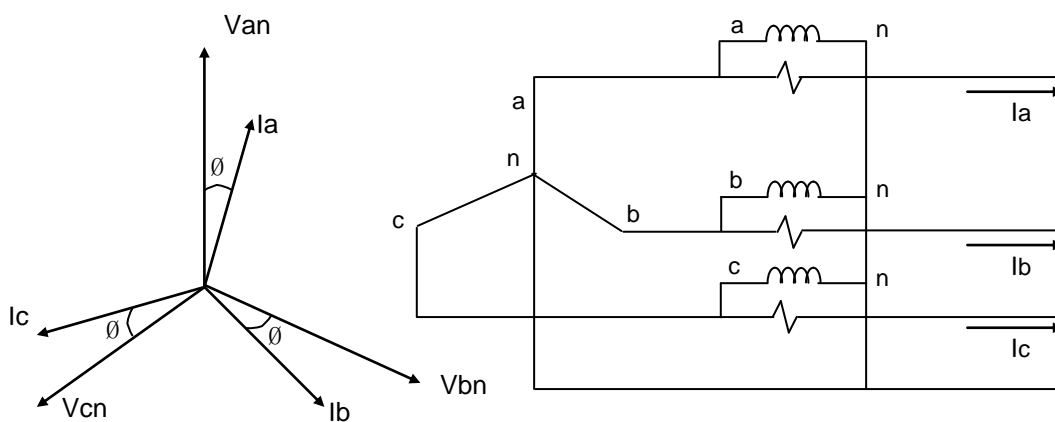


Fig. No. 21.- Diagramas eléctrico y vectorial de wathoras en circuito de 3F-4H Estrella.

Donde:

P_a es la potencia consumida por la carga conectada a fase "a"

P_b es la potencia consumida por la carga conectada a fase "b"

P_c es la potencia consumida por la carga conectada a fase "c"

$$P = P_a + P_b + P_c = 3 V_n I_1 \cos \varnothing$$

Pero $V_L = \sqrt{3} V_n$ y $V_n = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$

$$P = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \varnothing$$

Comprobándose con ello, que el medidor registra exactamente la energía activa total consumida por la carga.

2.4.1. MÉTODO “Z”

Como se apreció con anterioridad, este método consiste en desfasar 120° en atraso el voltaje aplicado al medidor “Z” con respecto a los voltajes aplicado en el medidor de kilowatts.

En la figura No. 22 se aprecia el diagrama eléctrico y vectorial de esta medición, de donde podemos obtener la siguiente expresión.

$$Z = V_{bn} I_a \cos (120 - \varnothing) + V_{cn} I_b \cos (120 - \varnothing) + V_{an} I_c \cos (120 - \varnothing)$$

Donde:

Z es el registro del medidor conectado en “Z” y considerando el sistema balanceado y equilibrado y de acuerdo con la identidad trigonométrica siguiente:

$$\cos (120 - \varnothing) = \cos 120 \cos \varnothing + \text{Sen } 120 \text{ Sen } \varnothing$$

$$\cos (120 - \varnothing) = -\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Sen } \varnothing$$

$$Z = \frac{3 V_{nl1} \left(-\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Sen } \varnothing \right)}{3 V_{nl1} \cos \varnothing}$$

$$\frac{Z}{W} = \frac{3}{2} \text{Tang } \varnothing - \frac{1}{2}$$

Despejando se tiene

$$\text{Tang } \varnothing = \frac{2 Z + 1}{\sqrt{3} W}, \text{ de donde}$$

Factor de potencia = $\cos \text{Arc Tan } \varnothing$

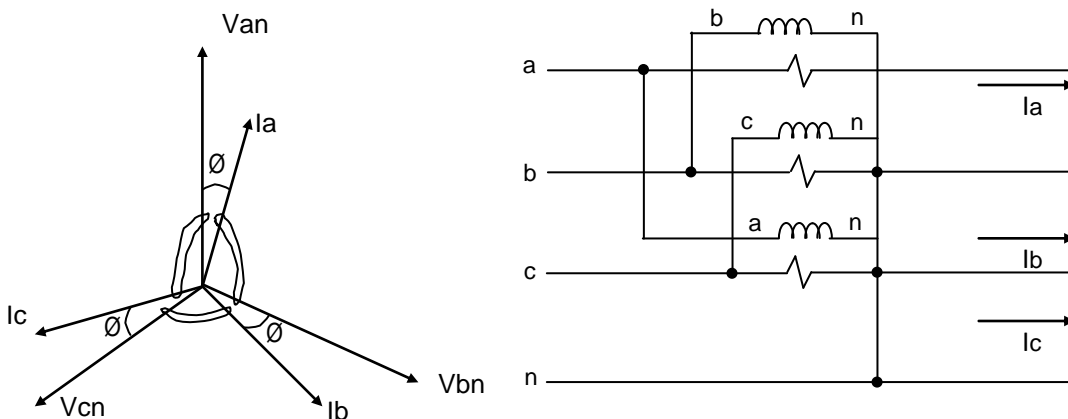


Fig. No. 22.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de F.P. por el método “Z”

2.4.2. MÉTODO DE LAS FASES CRUZADAS.

Como se pudo apreciar con anterioridad, el método de las fases cruzadas consiste en desplazar hacia atrás 90° eléctricos los voltajes aplicados al medidor, respecto a los voltajes que generan las corrientes de línea.

De los diagramas ilustrados en la figura no. 23 se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}F_a &= V_{bc} I_a \cos(90^\circ - \theta) \\F_b &= V_{ca} I_b \cos(90^\circ - \theta) \\F_c &= V_{ab} I_c \cos(90^\circ - \theta)\end{aligned}$$

Donde:

F_a es el registro del elemento conectado a la fase "a"
 F_b es el registro del elemento conectado a la fase "b"
 F_c es el registro del elemento conectado a la fase "c"

Pero $\cos(90^\circ - \theta) = \sin \theta$, por lo que, sustituyendo:

$$\begin{aligned}F_a &= V_{bc} I_a \sin \theta \\F_b &= V_{ca} I_b \sin \theta \\F_c &= V_{ab} I_c \sin \theta\end{aligned}$$

Y considerando el sistema balanceado y equilibrado:

$$F = F_a + F_b + F_c = 3 V_1 I_1 \sin \theta$$

Lo que indica 3 veces más la potencia reactiva consumida, y es producto de que los voltajes aplicados al medidor de reactivos son $\sqrt{3}$ veces más grandes que los aplicados al medidor de kilowatt horas. Por lo tanto, tendremos que afectar por un factor de corrección:

$$\frac{F}{\sqrt{3}} = 3 V_1 I_1 \sin \theta$$

Dividiendo entre la potencia activa W ,

$$\frac{F}{\sqrt{3} W} = \frac{\sqrt{3} V_1 I_1 \sin \theta}{\sqrt{3} V_1 I_1 \cos \theta} = \tan \theta$$

$$\tan \theta = \frac{F}{\sqrt{3} W}, \text{ en donde:}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang \emptyset

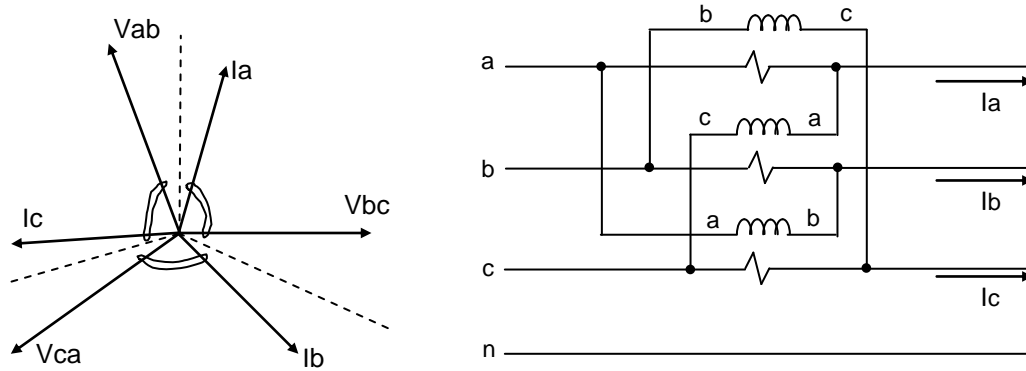


Fig. No.23.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de F.P. conectado en fases cruzadas.

2.4.3 MÉTODO DEL WATTHORÍMETRO CON DEFASADOR.

Como apreciamos en capítulos anteriores, en este método los voltajes son defasados por medio de 2 autotransformadores defasadores, cuya conexión y diagrama vectorial se ilustran en la figura No. 24 de donde se obtiene lo siguiente:

$$\text{VAR}_1 = V_{45} I_a \cos(90 - \emptyset_a) = V_{45} I_a \text{ Sen } \emptyset_a$$

$$\text{VAR}_2 = V_{67} I_b \cos(90 - \emptyset_b) = V_{67} I_b \text{ Sen } \emptyset_b$$

$$\text{VAR}_3 = V_{89} I_c \cos(90 - \emptyset_c) = V_{89} I_c \text{ Sen } \emptyset_c$$

Donde:

VAR1 es el registro del elemento 1

VAR2 es el registro del elemento 2

VAR3 es el registro del elemento 3

Y si consideramos el circuito equilibrado y balanceado

$$\text{VAR}_1 + \text{VAR}_2 + \text{VAR}_3 = \text{VAR}_S = 3 V_n I_1 \text{ Sen } \emptyset$$

Que dividiendo entre la potencia activa dada por W:

$$\underline{\text{VAR}_S} = \underline{3 V_n I_1 \text{ Sen } \emptyset} = \text{Tang } \emptyset, \text{ de donde}$$

$$W = 3 V_n I_1 \text{ Cos } \emptyset$$

Factor de potencia = $\text{Cos Arc tang } \phi$

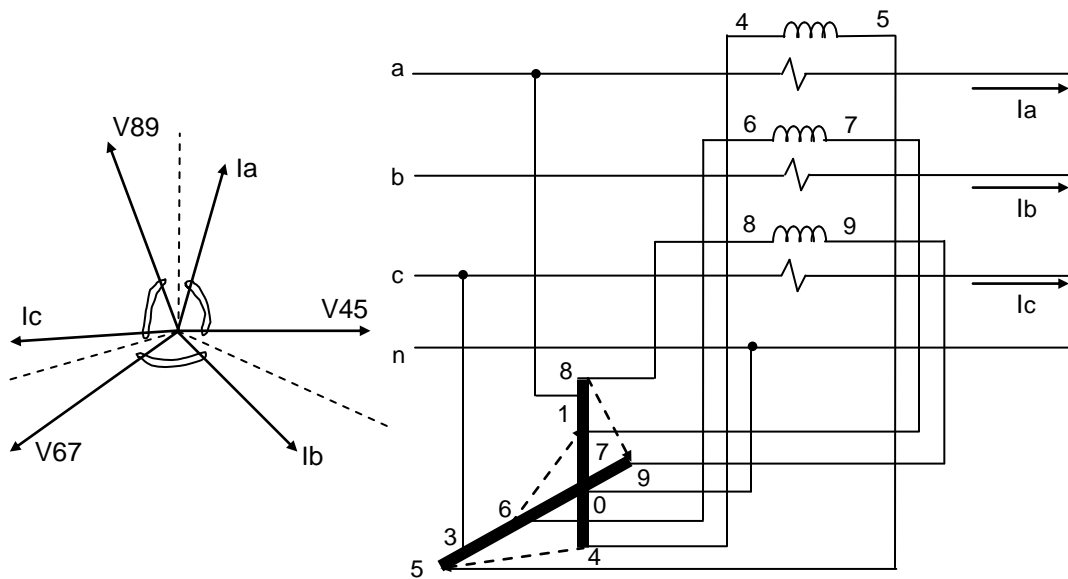


Fig. No. 24.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de factor de potencia con defasador y un wathorímetro.

2.4.4. MÉTODO CON MEDIDOR AUTODEFASADO.

Para entender mejor la manera de autodefasar los voltajes en este medidor, sin necesidad de utilizar un autotransformador defasador, revisaremos el comportamiento de las corrientes y voltajes en un circuito en estrella.

Del diagrama ilustrado en la figura No. 25 podemos deducir las siguientes expresiones:

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = V_{an} + V_{nb}$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = V_{bn} + V_{nc}$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = V_{cn} + V_{na}$$

Considerando lo anterior y apoyados por la ecuación del medidor de kilowatthoras, tenemos que los voltajes V_{an} , V_{bn} y V_{cn} pueden sustituirse por los voltajes V_{bc} , V_{ca} y V_{ab} respectivamente, lográndose con esto tener defasamiento exacto de los 90° eléctricos requeridos.

En la fig. No. 26 se muestra el diagrama eléctrico y vectorial de este tipo de medidor, de donde se desprenden las siguientes expresiones:

$$\text{VAR1} = V_{bc} I_a \text{ Cos } (90 - \phi) = V_{bc} I_a \text{ Sen } \phi_a$$

$$\text{VAR2} = V_{ca} I_b \text{ Cos } (90 - \phi) = V_{ca} I_b \text{ Sen } \phi_a$$

$$\text{VAR3} = V_{ab} I_c \text{ Cos } (90 - \phi) = V_{ab} I_c \text{ Sen } \phi_a$$

Donde:

VAR1 es el registro del elemento 1
VAR2 es el registro del elemento 2
VAR3 es el registro del elemento 3

Si tomamos el circuito como balanceado y equilibrado

$$\text{VAR1} + \text{VAR2} + \text{VAR3} = \text{VARs} = 3 V_1 I_1 \text{ Sen } \varnothing$$

En esta expresión se aprecia que el medidor registra $\sqrt{3}$ veces más la potencia reactiva como resultado de que los voltajes aplicados son $\sqrt{3}$ veces mayores que los aplicados al medidor de kilowatthoras, por lo tanto, para que el medidor dé una lectura directa, se afecta en su diseño, su constante electromagnética K_h por el inverso de $\sqrt{3}$.

$\sqrt{3} \text{VARs} = \sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Sen } \varnothing$ y haciendo intervenir el factor de corrección la expresión queda:

$$\text{VARs} = \sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Sen } \varnothing$$

Y dividiendo entre la potencia activa dada por W

$$\frac{\text{VARs}}{W} = \frac{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Sen } \varnothing}{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Sen } \varnothing} = \text{Tang } \varnothing; \text{ de donde}$$

Factor de potencia = $\text{Cos Arc tang } \varnothing$

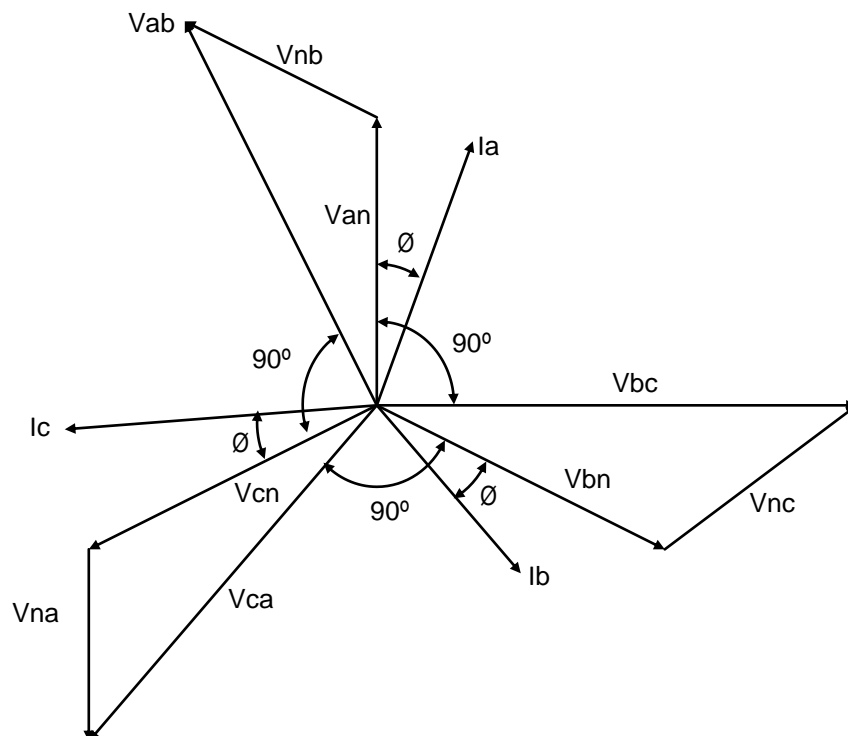


Fig. No. 25.- Diagrama vectorial de voltajes en un circuito estrella.

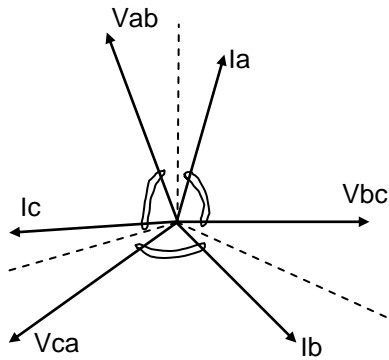
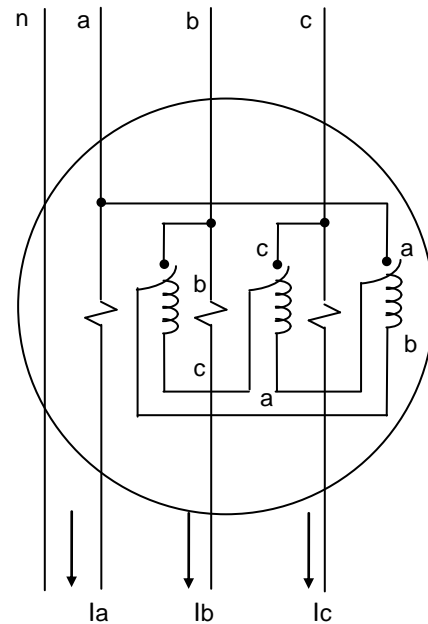


Fig. No. 26.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor autodefásado de factor de potencia.



2.4.5. MÉTODO “QH”

Como se mencionó anteriormente en este método es necesario defasar en atraso 60° eléctricos los voltajes aplicados a este medidor respecto a los aplicados al medidor de kilowatthoras, esto se logra tomando los voltajes con la polaridad invertida (observar figura No. 27)

En dicha figura se aprecia la forma de conectar las bobinas de potencial para lograr el defasamiento requerido, de donde se desprende las siguientes expresiones:

$$Q_1 = V_{nc} I_a \cos(60 - \varnothing)$$

$$Q_2 = V_{na} I_b \cos(60 - \varnothing)$$

$$Q_3 = V_{nb} I_c \cos(60 - \varnothing)$$

Donde:

- Q_1 es el registro del elemento 1
- Q_2 es el registro del elemento 2
- Q_3 es el registro del elemento 3

Desarrollando la identidad trigonométrica:

$$Q_1 = V_{nc} I_a (\cos 60 \cos \varnothing + \text{Sen } 60 \text{ Sen } \varnothing)$$

$$Q_2 = V_{nc} I_b (\cos 60 \cos \varnothing + \text{Sen } 60 \text{ Sen } \varnothing)$$

$$Q_3 = V_{nc} I_c (\cos 60 \cos \varnothing + \text{Sen } 60 \text{ Sen } \varnothing)$$

$$\text{Pero } \cos 60 = \frac{1}{2}, \quad \text{Sen } 60 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$Q_1 = V_{nc} I_a \left(\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Sen } \varnothing \right)$$

$$Q_2 = V_{na} I_b \left(\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varnothing \right)$$

$$Q_3 = V_{nc} I_c \left(\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varnothing \right)$$

Considerando el sistema balanceado y equilibrado, asimismo sumando las expresiones anteriores se tiene:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q = 3 V_n I_l \left(\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varnothing \right)$$

Y dividiendo la expresión anterior entre la potencia dada por W:

$$\frac{Q}{W} = \frac{3 V_n I_l \left(\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varnothing \right)}{3 V_n I_l \cos \varnothing}$$

$$\frac{Q}{W} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Tang } \varnothing$$

$$\text{Tang } \varnothing = \frac{2Q - W}{\sqrt{3} W}, \text{ de donde}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang \varnothing

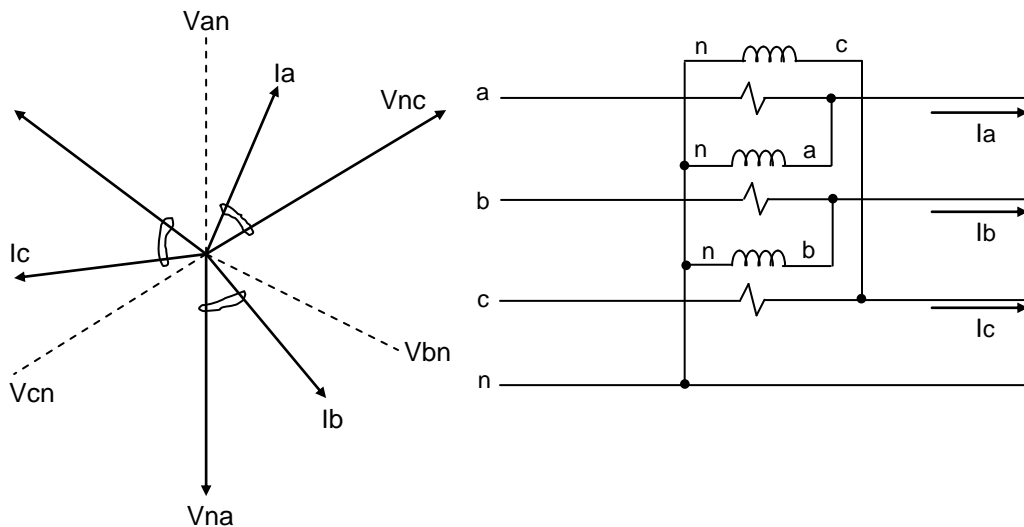


Fig. No. 27.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de F.P. por el método "QH"

2.5. CIRCUITOS TRIFÁSICOS EN ESTRELLA CON NEUTRO UTILIZANDO MEDIDORES DE 2 ½ ELEMENTOS.

La medición de potencia activa mediante medidores de 2 ½ elementos se logra mediante la combinación de las bobinas de potencial con bobinas de corriente de su propia fase y otra fase diferente, por este hecho debe preferirse usar este método en sistemas con voltajes balanceados; el diagrama de interconexión de las bobinas es el que se ilustra en la figura No. 28, de donde se puede observar lo siguiente:

$$W_a = V_{an} I_a \cos \varnothing + V_{an} I_b \cos (60 - \varnothing)$$

$$W_c = V_{cn} I_c \cos \varnothing + V_{cn} I_b \cos (60 + \varnothing)$$

Donde:

W_a es el registro del elemento conectado al voltaje V_{an} .

W_c es el registro del elemento conectado al voltaje V_{cn} .

Sustituyendo la identidad trigonométrica:

$$W_a = V_{an} I_a \cos \varnothing + V_{an} I_b (\cos 60 \cos \varnothing + \text{Sen } 60 \text{ Sen } \varnothing)$$

$$W_c = V_{cn} I_c \cos \varnothing + V_{cn} I_b (\cos 60 \cos \varnothing - \text{Sen } 60 \text{ Sen } \varnothing)$$

Pero $\cos 60 = \frac{1}{2}$, y considerando el sistema balanceado y equilibrado, se tiene:

$$W_a + W_c = 3 V_n I_1 \cos \varnothing$$

$$W = 3 V_n I_1 \cos \varnothing$$

De lo anterior, se deduce que el medidor registra exactamente la corriente activa.

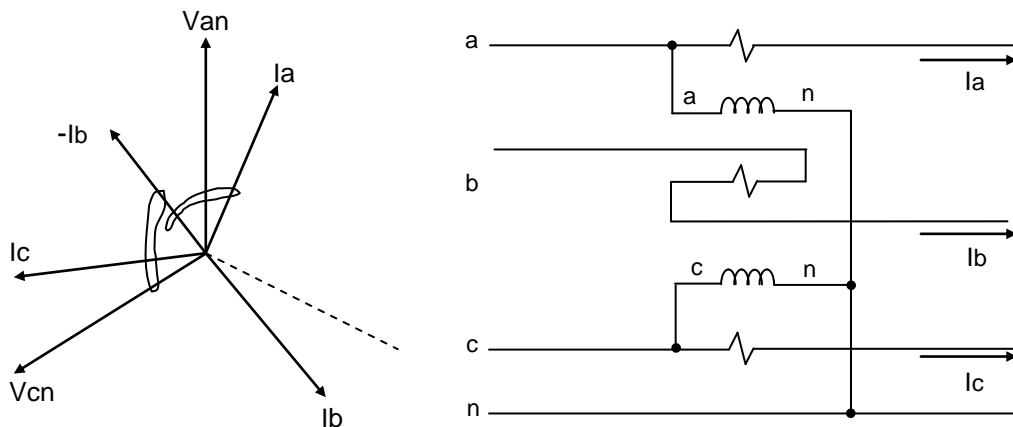


Fig. No. 28.- Diagrama eléctrico y vectorial para un medidor de kilowatt-horas de 2 ½ elementos.

2.5.1. MÉTODO "Z"

El diagrama de conexión se identifica en la figura No. 29, donde se observa la manera en que se logra atrasar 120° eléctricos los voltajes aplicados al medidor conectado en "Z" con respecto a los aplicados al medidor de kilowatt-horas. Del mismo diagrama se deducen las siguientes expresiones:

$$Z_b = V_{bn} I_a \cos (120 - \varnothing) - V_{bn} I_b \cos (180 - \varnothing)$$

$$Z_a = V_{an} I_c \cos (120 - \varnothing) - V_{an} I_b \cos (60 - \varnothing)$$

Donde:

Z_b es el registro del elemento conectado al voltaje V_{bn}

Z_a es el registro del elemento conectado al voltaje V_{an}

Y sustituyendo las identidades trigonométricas se tiene:

$$Z_b = V_{bn} I_a (\cos 120 \cos \emptyset + \text{Sen } 120 \text{ Sen } \emptyset) + V_{bn} I_b (\cos 180 \cos \emptyset + \text{Sen } 180 \text{ Sen } \emptyset)$$

$$Z_a = V_{an} I_c (\cos 120 \cos \emptyset + \text{Sen } 120 \text{ Sen } \emptyset) + V_{an} I_b (\cos 60 \cos \emptyset + \text{Sen } 60 \text{ Sen } \emptyset)$$

$$\text{Pero } \cos 120 = -\frac{1}{2}, \text{ Sen } 120 = \frac{\sqrt{3}}{2}, \cos 180 = -1$$

$$\text{Sen } 180 = 0, \cos 60 = \frac{1}{2}, \text{ Sen } 60 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$Z_b = V_{bn} I_a (-\frac{1}{2} \cos \emptyset + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Sen } \emptyset) + V_{bn} I_b (-\cos \emptyset)$$

$$Z_a = V_{an} I_c (-\frac{1}{2} \cos \emptyset + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Sen } \emptyset) + V_{an} I_b (\frac{1}{2} \cos \emptyset + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Sen } \emptyset)$$

Y tomando a los voltajes y corrientes como balanceadas y equilibradas, tenemos:

$$Z = -\frac{3}{2} V_n I_1 \cos \emptyset + \frac{3\sqrt{3}}{2} V_n I_1 \text{Sen } \emptyset$$

Que si dividimos entre la potencia activa dada por "W"

$$\frac{Z}{W} = \frac{-\frac{3}{2} V_n I_1 \cos \emptyset + \frac{3\sqrt{3}}{2} V_n I_1 \text{Sen } \emptyset}{3 V_n I_1 \cos \emptyset}$$

$$\frac{Z}{W} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Tang } \emptyset$$

$$\text{Tang } \emptyset = \frac{\frac{Z}{W} + \frac{1}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}}, \text{ de donde:}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang ϕ

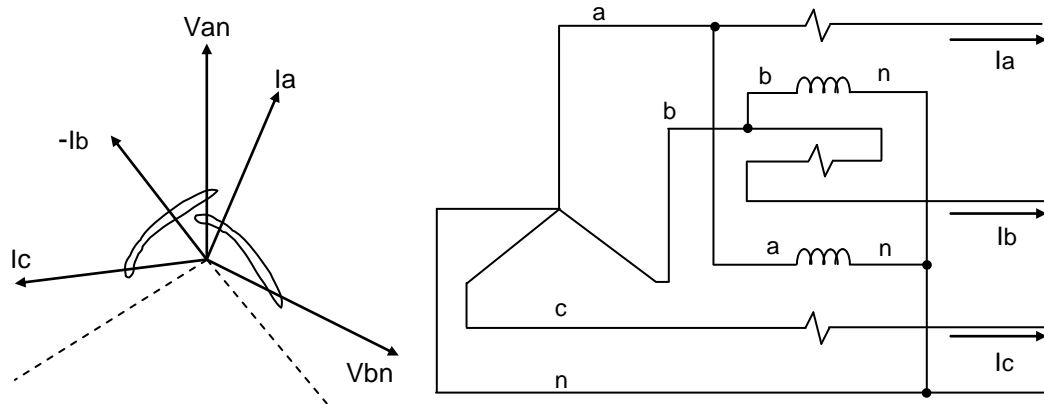


Fig. No. 29.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de Factor de Potencia por el método "Z".

2.5.2. MÉTODO DE LAS FASES CRUZADAS.

Como se observa en este método, es necesario defasar los voltajes aplicados al medidor de reactivos 90° eléctricos respecto de los voltajes aplicados al medidor de kilowatthoras, en este caso, esta situación se logra aplicando los voltajes V_{bc} y V_{ab} en lugar de los voltajes V_{an} y V_{cn} respectivamente.

En la figura No. 30 se ilustran los diagramas vectorial y eléctrico de esta medición; de donde deducimos las siguientes expresiones:

$$F1 = V_{bc} I_a \cos(90^\circ - \phi) + V_{bc} I_b \cos(150^\circ - \phi)$$

$$F2 = V_{ab} I_c \cos(90^\circ - \phi) + V_{ab} I_b \cos(30^\circ - \phi)$$

Donde:

F1 es el registro del elemento 1 y

F2 es el registro del elemento 2.

Sustituyendo las identidades trigonométricas:

$$F1 = V_{bc} I_a \sin \phi + V_{bc} I_b (\cos 150 \cos \phi + \sin 150 \sin \phi)$$

$$F2 = V_{ab} I_c \sin \phi + V_{ab} I_b (\cos 30 \cos \phi + \sin 30 \sin \phi)$$

Pero $\cos 150 = -\frac{\sqrt{3}}{2}$, $\sin 150 = \frac{1}{2}$, $\cos 30 = \frac{\sqrt{3}}{2}$ y $\sin 30 = \frac{1}{2}$

que sustituyendo en las expresiones anteriores:

$$F1 = V_{bc} I_a \sin \phi + V_{bc} I_b \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \phi + \frac{1}{2} \sin \phi \right)$$

$$F2 = V_{ab} I_c \sin \phi + V_{ab} I_b \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \phi + \frac{1}{2} \sin \phi \right)$$

si tomamos al sistema como balanceado y equilibrado:

$$F1 + F2 = F = 3 V1 I1 \text{ Sen } \emptyset$$

Esto indica que el medidor registra $\sqrt{3}$ veces más la energía reactiva; esto es consecuencia de que los voltajes aplicados son $\sqrt{3}$ veces mayores que los del medidor de kilowatthoras.

Dividiendo esta expresión entre la potencia activa dada por W.

$$\frac{F}{W} = \frac{3 V1 I1 \text{ Sen } \emptyset}{\sqrt{3} V1 I1 \text{ Cos } \emptyset} = \sqrt{3} \text{ Tang } \emptyset, \text{ de donde:}$$

$$\text{Tang } \emptyset = \frac{F}{\sqrt{3} W}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang \emptyset

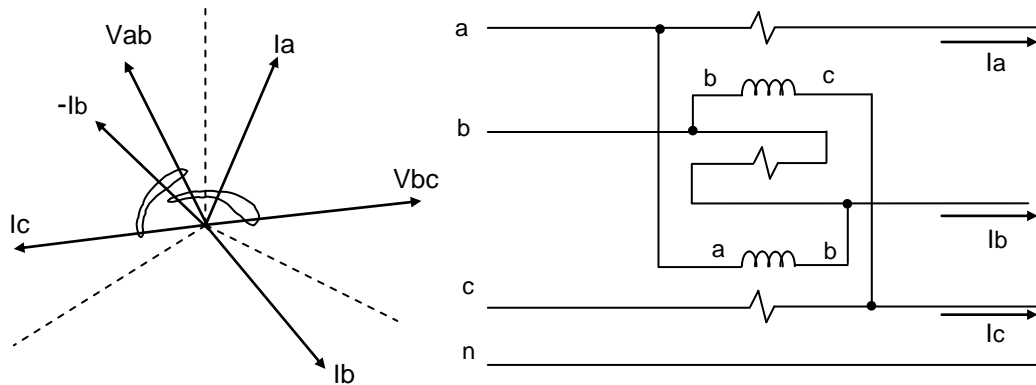


Fig. No. 30. Diagramas vectorial y eléctrico de un medidor de 2 ½ elementos para medir factor de potencia por el método de las fases cruzadas.

2.5.3 MÉTODO DEL WATTHORÍMETRO CON DEFASADOR.

En este método la conexión del defasador se da en estrella incompleta, tal como se ilustra en la figura No. 31, de donde podemos obtener las siguientes expresiones:

$$\text{VAR1} = V45 I_a \text{ Cos } (90 - \emptyset) + V45 I_b \text{ Cos } (150 - \emptyset)$$

$$\text{VAR2} = V89 I_c \text{ Cos } (90 - \emptyset) + V89 I_b \text{ Cos } (30 - \emptyset)$$

Donde:

VAR1 es el registro del elemento 1

VAR2 es el registro del elemento 2

Por lo que desarrollando las identidades trigonométricas se tiene lo siguiente:

$$F1 = V45 I_a \text{ Sen } \emptyset - \frac{\sqrt{3}}{2} V45 I_b \text{ Cos } \emptyset + \frac{1}{2} V45 I_b \text{ Sen } \emptyset$$

$$F1 = V89 I_c \text{ Sen } \emptyset - \frac{\sqrt{3}}{2} V89 I_b \text{ Cos } \emptyset + \frac{1}{2} V89 I_b \text{ Sen } \emptyset$$

y tomando el sistema como balanceado y equilibrado:

$$VAR_1 + VAR_2 = VARS = 3 V_n I_l \text{ Sen } \emptyset$$

de donde se deduce que el medidor mide exactamente la corriente reactiva y dividiendo entre la potencia activa dada por W.

$$VARS = \frac{3 V_n I_l \text{ Sen } \emptyset}{\text{Cos } \emptyset} = \text{Tang } \emptyset, \text{ de donde:}$$

$$3 V_n I_l \text{ Cos } \emptyset$$

Factor de potencia = cos Arc Tang \emptyset

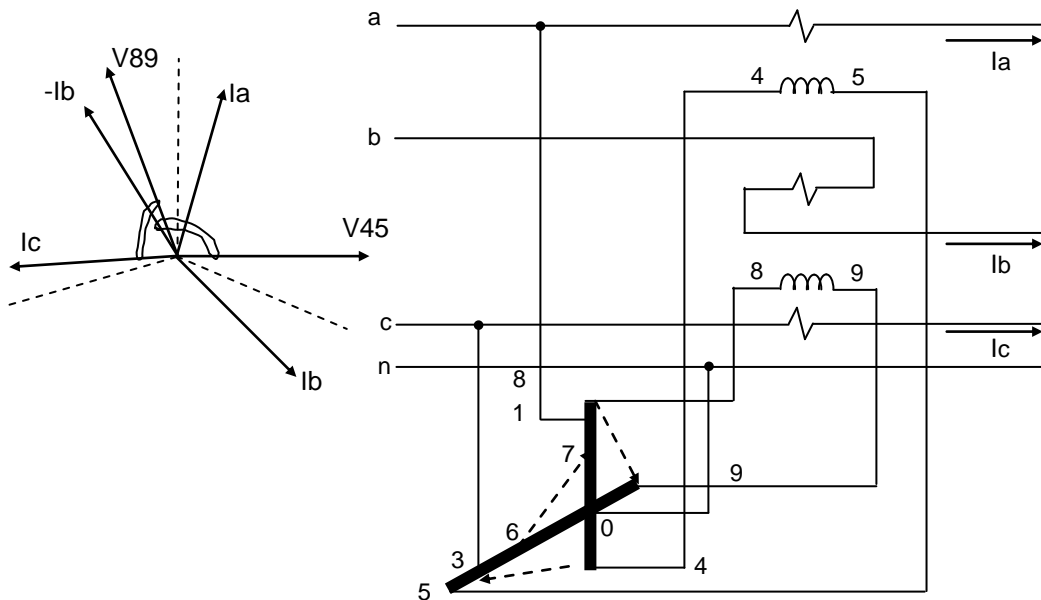


Fig. No.31.- Diagramas eléctrico y vectorial de un medidor de 2 ½ elementos con defasador para medir VARS.

2.5.4. MÉTODO CON MEDIDOR AUTODEFASADO.

En este método se tienen 2 combinaciones de bobinas de corrientes y voltaje para lograr el autodefásamiento, las cuales es común denominarlas: Varhorímetro de 2½ elementos y Varhorímetro de 2 elementos:

a) VARHORÍMETRO DE 2 ½ ELEMENTOS.

El autodefásamiento de este medidor se logra aplicando los voltajes Vbc y Vab en sustitución de los voltajes Van y Vcn que se aplican en el medidor de kilowatthoras. Obsérvese que estos voltajes son $\sqrt{3}$ veces mayores por lo que este medidor registrará $\sqrt{3}$ veces más la energía reactiva.

En el diagrama ilustrado en la figura No. 32 se observan las siguientes expresiones:

$$\text{VAR1} = V_{bc} I_a \cos(90^\circ - \phi) + V_{bc} I_b \cos(150^\circ - \phi)$$

$$\text{VAR2} = V_{ab} I_c \cos(90^\circ - \phi) + V_{ab} I_b \cos(30^\circ - \phi)$$

Donde: VAR1 es el registro del elemento 1

VAR2 es el registro del elemento 2

Si analizamos, estas expresiones son las mismas obtenidas cuando se examinó el método de las fases cruzadas con wattorímetro de 2 ½ elementos, con la diferencia que en este método se logra en la conexiones internas del medidor y en el de fases cruzadas todo el arreglo es externo. Por lo tanto, se concluye:

$\text{VAR}_S = 3V_{11}I_1 \text{Sen } \phi$, que dividiendo entre la potencia activa dada por W .

$$\frac{\text{VAR}_S}{W} = \frac{3 V_1 I_1 \text{ Sen } \phi}{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Cos } \phi} = \sqrt{3} \text{ Tang } \phi$$

Para eliminar este $\sqrt{3}$ que afecta al resultado de la energía reactiva, y que ésta pueda leerse directamente en el medidor, se afecta su constante electromagnética de watt horas KH por $1/\sqrt{3}$, por lo que el resultado es:

$$\frac{\text{VAR}_S}{W} = \frac{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Sen } \phi}{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Cos } \phi} = \text{ Tang } \phi, \text{ de donde}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang ϕ

b) VARHORÍMETRO DE 2 ELEMENTOS.

A diferencia del anterior, en que el efecto de defasamiento se lograba mediante la combinación de voltajes en atraso, en este caso, se logra mediante la combinación de corrientes en adelanto para producir el mismo efecto. Para ello analizaremos el diagrama ilustrado en la figura No. 33 en el que se observa el comportamiento de las corrientes de una carga conectada en delta, y de donde se deduce lo siguiente:

$I_{R1} = I_c - I_b$ y está adelantada 90° eléctricos de la

$I_{R2} = I_a - I_c$ y está adelantada 90° eléctricos de I_b

$I_{R3} = I_b - I_a$ y está adelantada 90° eléctricos de I_c

Con esto se tiene el defasamiento preciso de los vectores de voltaje y corriente, sin embargo, veamos que pasa con la magnitud de la corriente resultante. Para el caso analizaremos el comportamiento de la I_{R1} ; la cual se ilustra con sus valores de ángulo en la figura 34, de donde aplicando la Ley de Senos tenemos:

$$\frac{\text{Sen } 30}{I_c} = \frac{\text{Sen } 30}{I_b} = \frac{\text{Sen } 120}{IR1}$$

$$IR1 = \frac{I1 \text{ Sen } 120}{\text{Sen } 30}$$

$$IR1 = \frac{I1 (\sqrt{3}/2)}{(1/2)} = \sqrt{3} I1$$

Puede apreciarse que las corrientes aplicadas al medidor son $\sqrt{3}$ veces mayores que las aplicadas al medidor de kilowattoras, y por lo tanto, el medidor registrará $\sqrt{3}$ veces más la energía reactiva.

Considerando lo anterior y al diagrama de la figura No. 34 se tiene que se requiera la siguiente combinación de voltajes y corrientes por elemento:

Elemento 1: Combina el voltaje V_{an} con las corrientes:

I_a su correspondiente adelantada $90^\circ = IR1$

- I_b su correspondiente adelantada $90^\circ = -IR2$

I total combinada = $IR1 - IR2$

$$\begin{aligned} IR1 - IR2 &= I_c - I_b - (I_a - I_c) \\ &= 2I_c - I_b - I_d \end{aligned}$$

Que es la corriente a aplicar en el medidor.

Elemento 2: Combina el voltaje V_{cn} con las corrientes:

I_c su correspondiente adelantada $90^\circ = IR3$

- I_b su correspondiente adelantada $90^\circ = -IR2$

I total combinada = $IR3 - IR2$

$$\begin{aligned} IR3 - IR2 &= I_b - I_a - (I_a - I_c) \\ &= 2I_a + I_b + I_c \end{aligned}$$

Que es la corriente a aplicar en el medidor.

Comprendido lo anterior, se analiza lo que ocurre con el Varhorímetro, cuyo diagrama vector y de conexiones se muestra en la figura No. 35; donde puede observarse que para hacer sentir el efecto de que circula dos veces una corriente, lo que se hace es duplicar el número de espiras de la bobina para alcanzar los amper-vuelta requeridos. Del mismo diagrama se obtiene lo siguiente:

$$E1 = V_{an} I_a \text{ Cos } (180 - \emptyset) + V_{an} (2I_c) \text{ Cos } (120 - \emptyset) + V_{dn} I_b \text{ Cos } \emptyset$$

$$E2 = V_{cn} I_b \text{ Cos } (120 - \emptyset) + V_{cn} (2I_a) \text{ Cos } (60 - \emptyset) + V_{cn} I_c \text{ Cos } \emptyset$$

Donde:

E1 es el registro del elemento 1

E2 es el registro del elemento 2

Resolviendo las identidades trigonométricas y agrupando términos:

$$E1 = -\frac{3}{2} V_n I_n \cos \varnothing + \frac{3\sqrt{3}}{2} V_n I1 \text{ Sen } \varnothing$$

$$E1 = \frac{3}{2} V_n I_n \cos \varnothing + \frac{3\sqrt{3}}{2} V_n I1 \text{ Sen } \varnothing$$

y sumando términos:

$$F1 = 3\sqrt{3} V_n I1 \text{ Sen } \varnothing$$

Para evitar que el medidor registre $\sqrt{3}$ veces más la energía reactiva y tener lectura directa de VARS, el medidor se afecta con su constante electromagnética de diseño por $1/\sqrt{3}$, con lo que se obtiene:

$$\text{VARS} = 3 V_n I_L \text{ Sen } \varnothing$$

lo cual dividiendo entre la potencia activa dada:

$$\frac{\text{VARS}}{W} = \frac{3 V_n I1 \text{ Sen } \varnothing}{3 V_n I1 \cos \varnothing} = \text{Tang } \varnothing, \text{ de donde}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang \varnothing

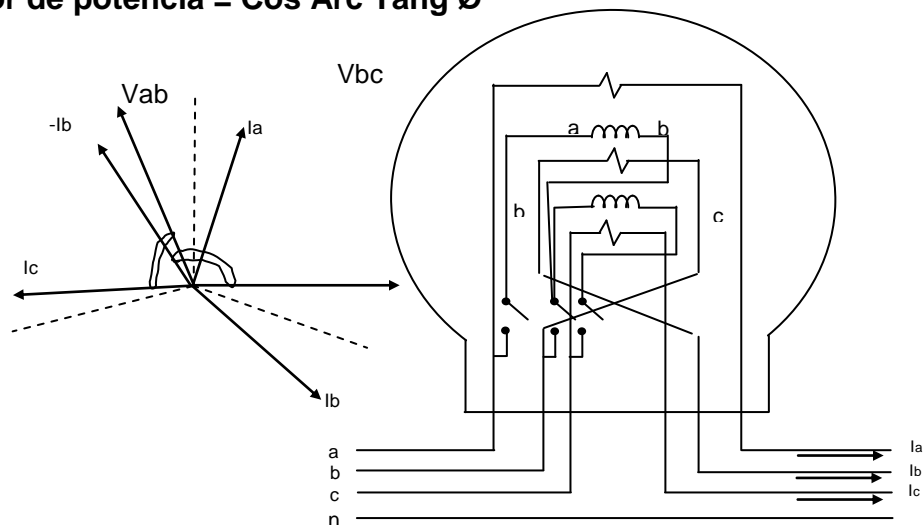


Fig. No. 32.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor autodefásado de 2 1/2 elementos.

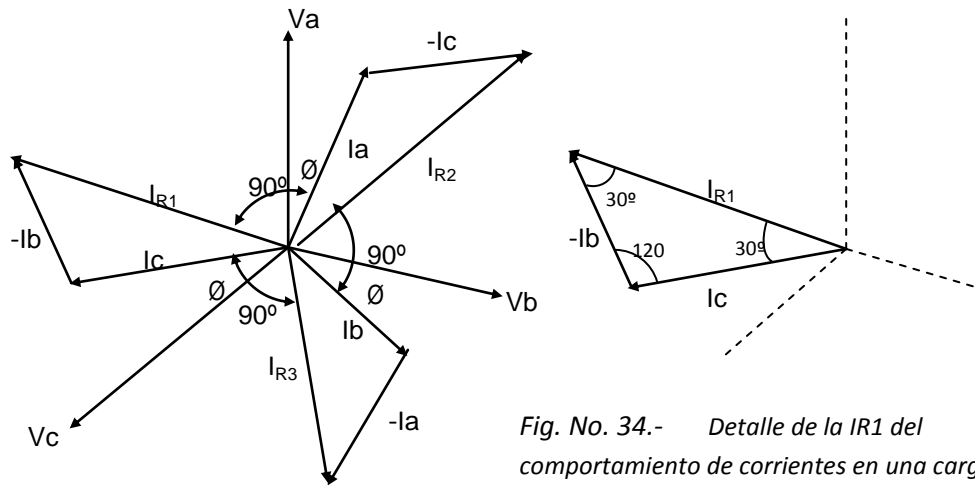


Fig. No. 33.- Diagrama vectorial de corrientes en un circuito

Fig. No. 34.- Detalle de la IR1 del comportamiento de corrientes en una carga conectada en estrella.

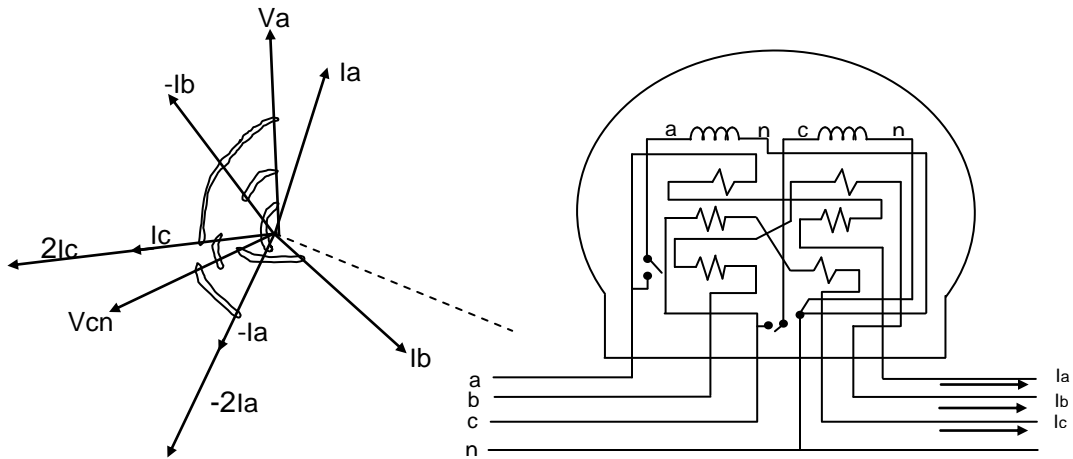


Fig. No. 35.- Diagramas eléctrico y vectorial de un medidor autodefásado de dos elementos.

2.5.5. MÉTODO “QH”

Como se ha observado anteriormente, en este método se defasan hacia atrás 60° eléctricos los voltajes aplicados al medidor de reactivos, con respecto a los aplicados al medidor de kilowatthoras.

En la figura No. 36 se observa lo siguiente:

$$Q1 = V_{nc} I_a \cos (60 - \varnothing) + V_{nc} I_b \cos (120 - \varnothing)$$

$$Q2 = V_{nb} I_c \cos (60 - \varnothing) + V_{nb} I_b \cos \varnothing$$

Donde:

Q1 es el registro del elemento 1
Q2 es el registro del elemento 2

Sustituyendo por las identidades trigonométricas:

$$Q_1 = V_{nc} I_a \left(\frac{1}{2} \cos \varnothing \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} V_{nc} I_a \sin \varnothing + V_{nc} I_b \left(-\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varnothing \right)$$

$$Q_2 = V_{nb} I_c \left(\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varnothing \right) + V_{nb} I_b \cos \varnothing$$

Tomando al sistema como balanceado y equilibrado:

$$Q_1 + Q_2 = Q = \frac{3}{2} V_n I_1 \cos \varnothing + \frac{3\sqrt{3}}{2} V_n I_1 \sin \varnothing$$

y dividiendo el resultado entre W

$$\frac{Q}{W} = \frac{\frac{3}{2} V_n I_1 \cos \varnothing + \frac{3\sqrt{3}}{2} V_n I_1 \sin \varnothing}{3 V_n I_1 \cos \varnothing}$$

$$\frac{Q}{W} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Tang } \varnothing$$

$$\text{Tang } \varnothing = \frac{2Q - W}{\sqrt{3} W}, \text{ de donde:}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang \varnothing

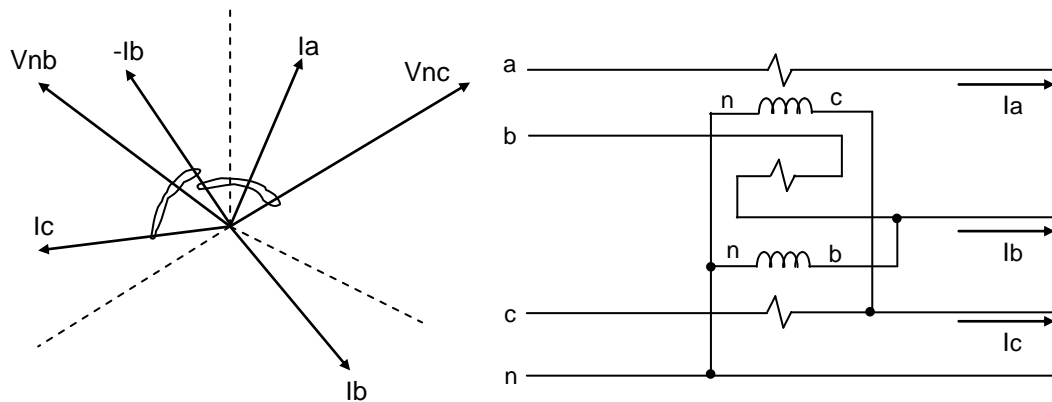


Fig. No. 36.- Diagramas eléctrico y vectorial para un medidor de factor de potencia por el método "QH"

2.6. CIRCUITOS TRIFÁSICOS EN DELTA A 4 HILOS.

La medición de kilowatthoras en este tipo de circuitos puede realizarse mediante medidores de 2 y 3 elementos, en la figura No.37 se representa un medidor de 3 elementos. Obsérvese que en el diagrama de vectores los ángulos \varnothing se refieren a un sistema balanceado imaginario de voltajes, donde:

$$\varnothing_a = \varnothing_b = \varnothing_c = \varnothing$$

De este diagrama de vectores se obtiene:

$$W = V_{an} I_a \cos \varnothing + V_{bn} I_b \cos (30 + \varnothing) + V_{cn} I_c \cos (30 - \varnothing)$$

que al sustituir por las identidades trigonométricas

$$W = V_{an} I_a \cos \varnothing + V_{bn} I_b (\cos 30 \cos \varnothing - \text{Sen } 30 \text{ Sen } \varnothing) + V_{cn} I_c (\cos 30 \cos \varnothing + \text{Sen } 30 \text{ Sen } \varnothing)$$

Pero $\cos 30 = \sqrt{3}/2$, $\sin 30 = 1/2$

$$W = V_{an} I_a \cos \varnothing + V_{bn} I_b \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varnothing - \frac{1}{2} \sin \varnothing \right) + V_{cn} I_c \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varnothing + \frac{1}{2} \sin \varnothing \right)$$

Si consideramos que en sistema delta se cumplen las siguientes condiciones:

$$V_{an} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1$$

$V_{bn} = -V_{cn} = 1/2 V_{ab}$, que sustituyendo se tiene:

$$W = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1 I_1 \cos \varnothing + \frac{1}{2} V_1 I_1 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varnothing - \frac{1}{2} \sin \varnothing \right) + \frac{1}{2} V_1 I_1 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varnothing + \frac{1}{2} \sin \varnothing \right)$$

Considerando una carga balanceada:

$$W = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1 I_1 \cos \varnothing + 3 \frac{\sqrt{2}}{2} V_1 I_1 \cos \varnothing$$

$$W = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \varnothing, \text{ que es la fórmula de la potencia activa}$$

Obsérvese que no se toma en cuenta el signo menos de (-Vcn) ya que esto se consideró en el ángulo en su análisis de vectores.

En el caso de la medición por medio de 2 elementos, la interconexión de las bobinas es la ilustrada en la figura No. 38 de donde se obtiene:

$$W = V_{an} I_a \cos \varnothing + V_{bc} (I_c/2) \cos (30 - \varnothing) + V_{bc} (I_b/2) \cos (30 + \varnothing)$$

$$W = V_{an} I_a \cos \varnothing + V_{bc} (I_c/2) (\cos 30 \cos \varnothing + \sin 30 \sin \varnothing) +$$

$$V_{bc} (I_b/2) (\cos 30 \cos \varnothing + \sin 30 \sin \varnothing)$$

considerando la carga balanceada y equilibrada:

$$W = V_{an} I_1 \cos \varnothing + V_1 \left(\frac{I_1}{2} \right) \left(\sqrt{3} \cos \varnothing \right)$$

Pero $V_{an} = 0.866 V_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1$

$$W = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1 I_1 \cos \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} V_1 I_1 \cos \varnothing$$

$$W = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \varnothing, \text{ que es la expresión de la potencia real.}$$

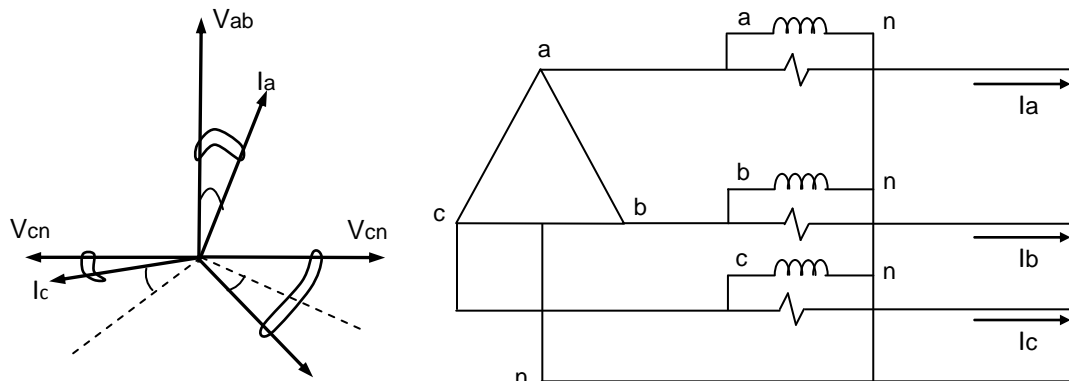


Fig. No. 37.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de kilowatt horas de tres elementos en un circuito delta de 4 hilos.

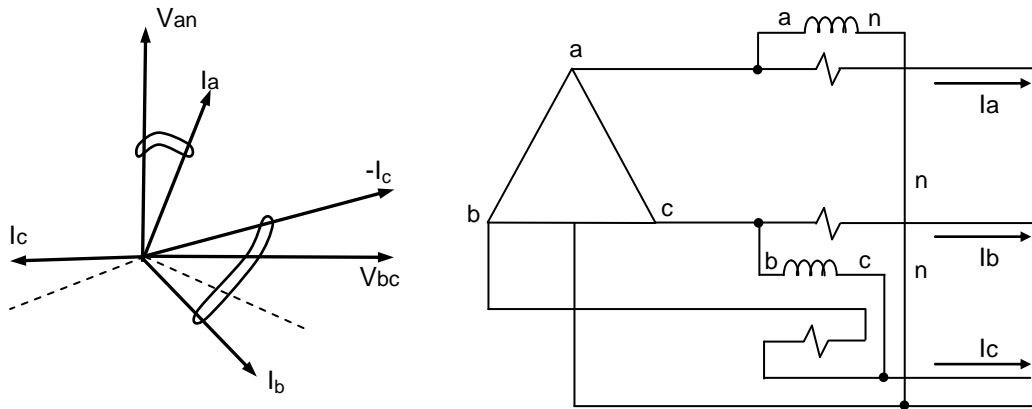


Fig. No. 38.- Diagramas eléctrico y vectorial de un medidor de kilowatthoras de dos elementos en un circuito delta de 4 hilos.

2.6.1. MÉTODO DEL WATTHORÍMETRO CON DESAFADOR.

Este método es aplicable a la medición de 3 y de 2 elementos auxiliándose para el defasamiento de los voltajes mediante el autotransformador defasador.

a).- MEDICIÓN CON 3 ELEMENTOS.

El diagrama de interconexión del wathorímetro y el defasador es el indicado en la figura No. 39, y a partir de este diagrama vectorial el registro del medidor será:

$$VARS = V_{01} I_a \cos(90 - \varnothing) + V_{06} I_b \cos(60 - \varnothing) + V_{56} I_c \cos(120 - \varnothing)$$

$$VARS = V_{01} I_a \sin \varnothing + V_{06} I_b (\cos 60 \cos \varnothing + \sin 60 \sin \varnothing) + V_{56} I_c (\cos 120 \cos \varnothing + \sin 120 \sin \varnothing)$$

Pero:

$$\cos 60 = \frac{1}{2}, \sin 60 = \frac{\sqrt{3}}{2}, \cos 120 = -\frac{1}{2}, \sin 120 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

y $V_{01} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1$,

$$V_{06} = V_{56} = \frac{1}{2} V_1$$

sustituyendo se tiene:

$$VARS = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1 I_1 \sin \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{4} V_1 I_1 \sin \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{4} V_1 I_1 \sin \varnothing$$

$$VARS = \sqrt{3} V_1 I_1 \sin \varnothing, \text{ es la potencia reactiva en un sistema trifásico.}$$

Dividiendo esta última expresión entre la potencia activa dada por W:

$$\frac{\text{VARS}}{W} = \frac{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Sen } \varnothing}{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Cos } \varnothing} = \text{Tang } \varnothing, \text{ de donde}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang \varnothing

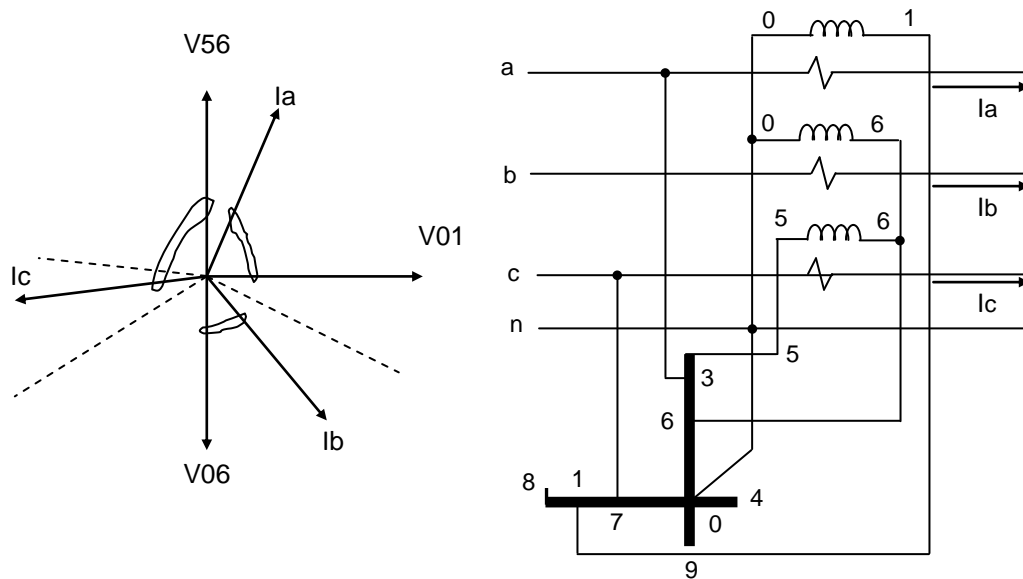


Fig. No. 39.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de tres elementos con defasador para medir factor de potencia.

b) MEDICIÓN CON 2 ELEMENTOS

Para este caso la interconexión del defasador y del watthorímetro se ilustra en la figura No. 40, del cual se obtiene el siguiente registro del medidor:

$$\text{VARS} = V01 I_a \text{ Cos } (90-\varnothing) + V05 (I_c/2) \text{ Cos } (120-\varnothing) + V05 (I_b/2) \text{ Cos } (60+\varnothing)$$

desarrollando las identidades trigonométricas y tomando en cuenta que:

$$V01 = V_{an} = 0.866 V_1 = \sqrt{3}/2 V_1$$

$$V05 = V_{cn} = 1/2 V_1$$

Valores que sustituyendo se obtiene:

$$\text{VARS} = \sqrt{3}/2 V_1 I_1 \text{ Sen } \varnothing + \sqrt{3}/2 V_1 I_1 \text{ Sen } \varnothing$$

$$\text{VARS} = \sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Sen } \varnothing, \text{ que es la fórmula de la potencia reactiva trifásica,}$$

y dividiendo esta última entre la potencia activa dada por W

$$\frac{\text{VARS}}{W} = \frac{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Sen } \varnothing}{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Cos } \varnothing} = \text{Tang } \varnothing, \text{ de donde}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang \varnothing

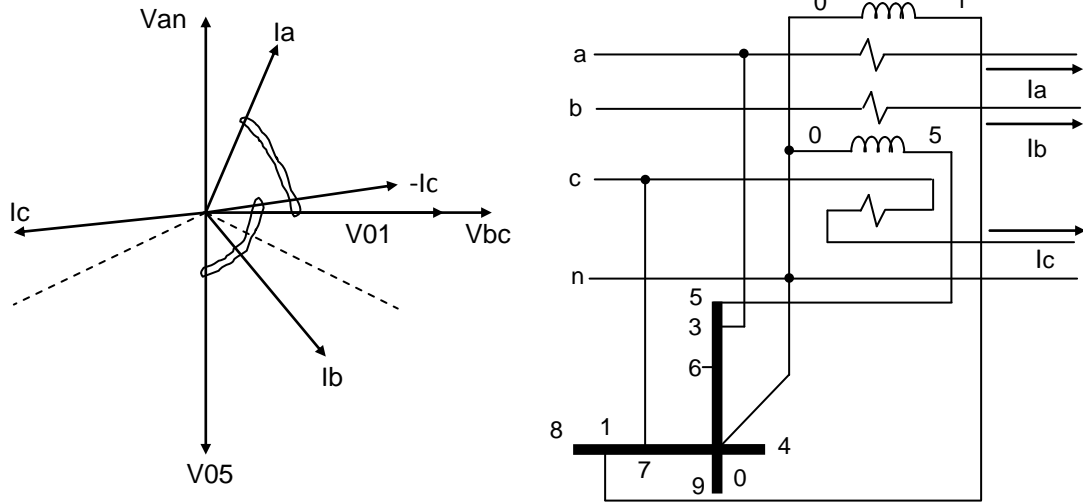


Fig. No. 40.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de dos elementos con defasador para medir factor de potencia.

2.6.2. MÉTODO CON MEDIDOR AUTODEFASADO.

El defasamiento en este tipo de medidor se logra cruzando los voltajes existentes en el circuito, tal como se ilustra en la figura 41, de donde el registro que se obtiene del medidor es el siguiente:

$$\text{VARS} = V_{bc} I_a \text{ Cos } (90-\varnothing) + V_{na} (I_c/2) \text{ Cos } (120-\varnothing) + V_{na} (I_b/2) \text{ Cos } (60-\varnothing)$$

Es necesario mencionar que para hacer sentir en el medidor una circulación de $\frac{1}{2}$ del valor total de la corriente, lo que hace es reducir a un medio el número de vueltas de esa bobina, con lo que se obtiene el mismo efecto.

Resolviendo las identidades trigonométricas se tiene lo siguiente:

$$\text{VARS} = V_{bc} \text{ Sen } \varnothing + V_{na} (I_b/2) \left(\frac{1}{2} \text{ Cos } \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ Sen } \varnothing \right) +$$

$$V_{na} (I_c/2) \left(\frac{1}{2} \text{ Cos } \varnothing + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ Sen } \varnothing \right)$$

Pero $V_{na} = \frac{1}{2} V_1$, $V_{bc} = V_1$

Si suponemos condiciones de balance y equilibrio en la carga:

$$\text{VARS} = V_1 I_1 \text{ Sen } \emptyset + \frac{3}{4} V_1 I_1 \text{ Sen } \emptyset$$

$$\text{VARS} = \frac{7}{4} V_1 I_1 \text{ Cos } \emptyset$$

Por lo que, para tener el registro correcto de energía reactiva, la constante electromagnética K_h del medidor deberá de afectarse por $\frac{3\sqrt{4}}{7}$, con lo que se obtiene:

$$\text{VARS} = \sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Sen } \emptyset$$

y dividiendo entre la potencia activa dada por W :

$$\frac{\text{VARS}}{W} = \frac{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Sen } \emptyset}{\sqrt{3} V_1 I_1 \text{ Cos } \emptyset} = \text{Tang } \emptyset, \text{ de donde}$$

$$\text{Factor de potencia} = \text{Cos Arc Tang } \emptyset$$

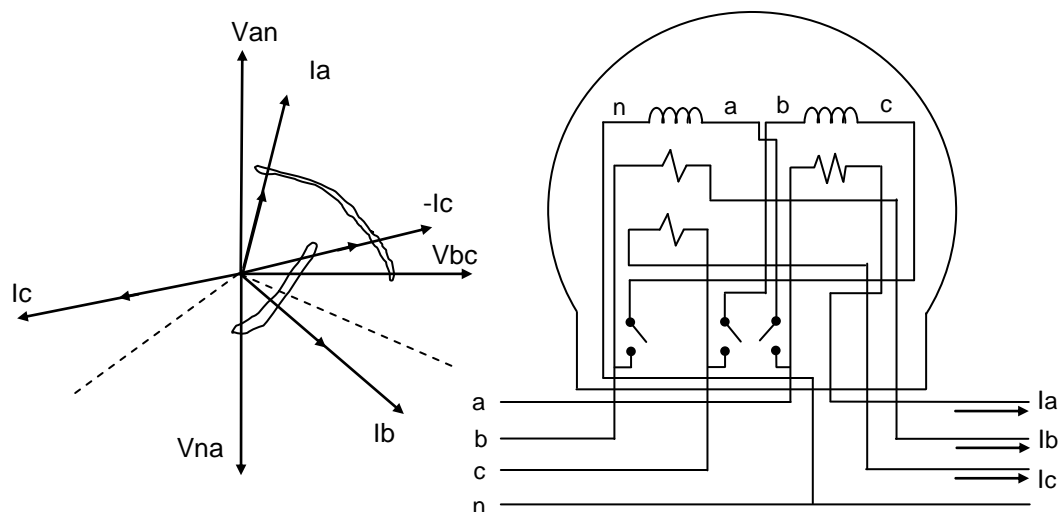


Fig. No. 41.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor autodefásado para medir factor de potencia de un circuito delta de 4 hilos.

2.7. CIRCUITOS MONOFÁSICOS 2 FASES 3 HILOS.

El sistema "Network" no es más que parte de una estrella, por lo que ocasionalmente se le llama "estrella incompleta".

En este caso, la medición se lleva a cabo mediante medidores monofásicos o un polifásico de elementos, con los cuales también se pueden medir sistemas monofásicos de tres hilos; sin embargo, para ésta última también se pueden utilizar medidores monofásicos trifilares de $1 \frac{1}{2}$ elementos los cuales no deben usarse en el sistema network, sino únicamente en sistemas donde la carga esté conectada entre las fases A y B.

Para el análisis de la medición de kilowatt horas se tienen 5 casos:

Caso 1.- Carga exclusivamente monofásica, sistema network.

En el diagrama de la figura No. 42 puede observarse un medidor de dos elementos conectado a una carga conectada en estrella incompleta de donde se observa que el registro del medidor es:

$$W = V_{an} I_a \cos \varnothing_a + V_{bn} I_b \cos \varnothing_b$$

Si consideramos la carga balanceada, se tendrá:

$$W = V_n I_n (2 \cos \varnothing) = 2 V_n I_1 \cos \varnothing$$

Por otro lado, analizando el consumo de la carga se tiene:

$$P = V_{an} I_a \cos \varnothing_a + V_{bn} I_b \cos \varnothing_b$$

y si la carga es balanceada

$$P = 2 V_n I_1 \cos \varnothing$$

Por lo que, se deduce que el medidor registra el 100% de la energía activa consumida.

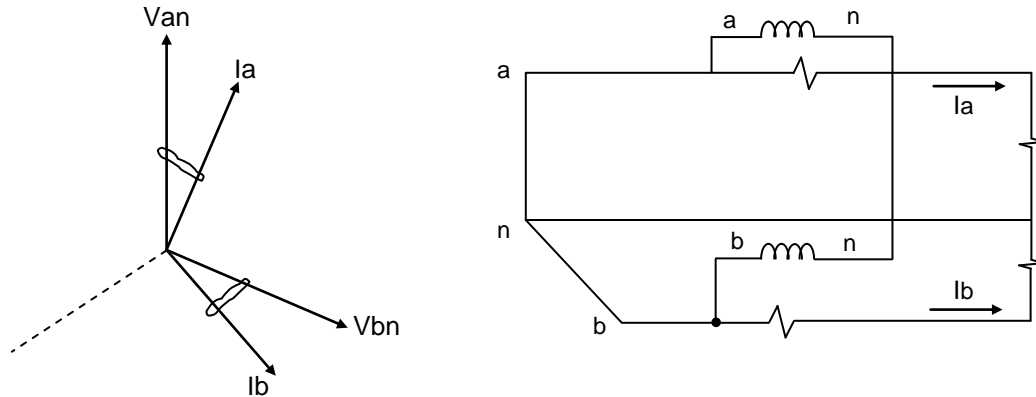


Fig. No. 42.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de kilowatt horas en sistema estrella incompleta.

Caso 2. La carga está conectada al neutro y entre fase, sistema network.

La figura No. 43 representa un medidor de 2 elementos conectados a una carga aprovechando los voltajes de fase tierra y entre fases de donde se observa que el registro del medidor es:

$$W1 = V_{an} I_{an} \cos \varnothing + V_{an} I_{ab} \cos (30 - \varnothing)$$

$$W2 = V_{bn} I_{bn} \cos \varnothing + V_{bn} I_{ba} \cos (30 + \varnothing)$$

Donde:

W1 es el registro del elemento 1

W2 es el registro del elemento 2

Y resolviendo las identidades trigonométricas, se tiene:

$$W1 = V_{an} I_{an} \cos \varnothing + V_{an} I_{ab} (\cos 30 \cos \varnothing + \sin 30 \sin \varnothing)$$

$$W2 = V_{bn} I_{bn} \cos \varnothing + V_{bn} I_{ba} (\cos 30 \cos \varnothing - \sin 30 \sin \varnothing)$$

Pero $V_{an} = V_{bn} = V_n$, $I_{ab} = I_{ba}$, por lo que sumando:

$$W = W1 + W2 = V_n I_{an} \cos \varnothing + V_n I_{bn} \cos \varnothing + 2 V_n I_{ab} (\cos 30 \cos \varnothing)$$

Reduciendo:

$$W = V_n (I_{an} + I_{bn} + 3 I_{ab} \cos 30) \cos \varnothing$$

Por otra parte, la potencia consumida por la carga es:

$$P1 = V_{an} I_{an} \cos \varnothing$$

$$P2 = V_{bn} I_{bn} \cos \varnothing$$

$$P3 = V_{ab} I_{ab} \cos \varnothing$$

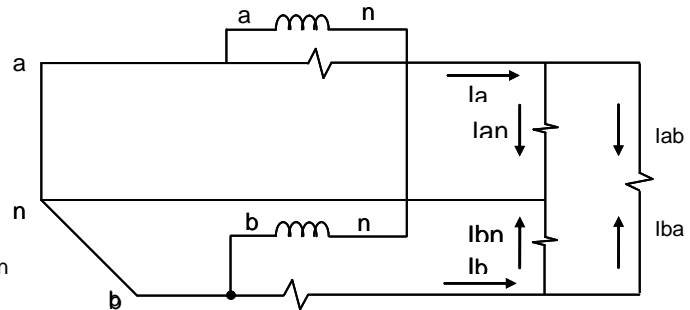
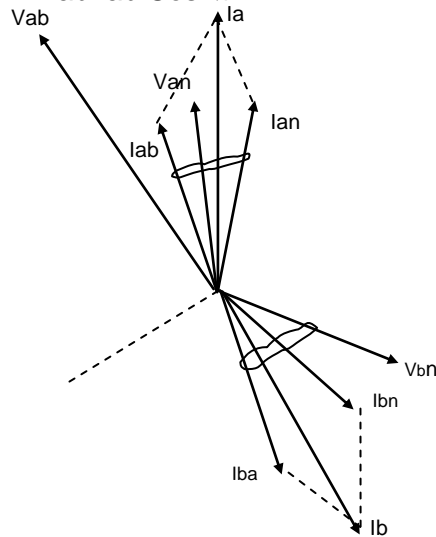


Fig. No. 43.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de kilowattthoras en sistema estrella incompleta.

Donde:

P1 es la potencia consumida por la carga conectada al voltaje V_{an} .

P2 es la potencia consumida por la carga conectada al voltaje V_{bn} .

P3 es la potencia consumida por la carga conectada al voltaje V_{ab} .

$$\text{Pero } V_{an} = V_{bn} = V_n, \quad V_{ab} = \sqrt{3} V_n$$

Y si tomamos el sistema como balanceado y equilibrado se tiene:

$$P_1 + P_2 + P_3 = P = V_n I_{an} \cos \varnothing + V_n I_{bn} \cos \varnothing + \sqrt{3} V_n I_{ab} \cos \varnothing$$

$$P = V_n (I_{an} + I_{bn} + \sqrt{3} I_{ab}) \cos \varnothing$$

Por lo tanto, se deduce que el medidor registra exactamente cualquier carga que se presente en el sistema.

Caso No. 3.- Un medidor de 2 elementos conectado a una alimentación y carga monofásica trifilar.

En la figura No. 44 se ilustra un medidor de kilowatt horas conectado a una carga en un sistema monofásico trifilar, de donde se observan los siguientes:

$$W_1 = V_{an} I_{an} \cos \varnothing + V_{an} I_{ab} \cos \varnothing$$

$$W_2 = V_{bn} I_{bn} \cos \varnothing + V_{bn} I_{ba} \cos \varnothing$$

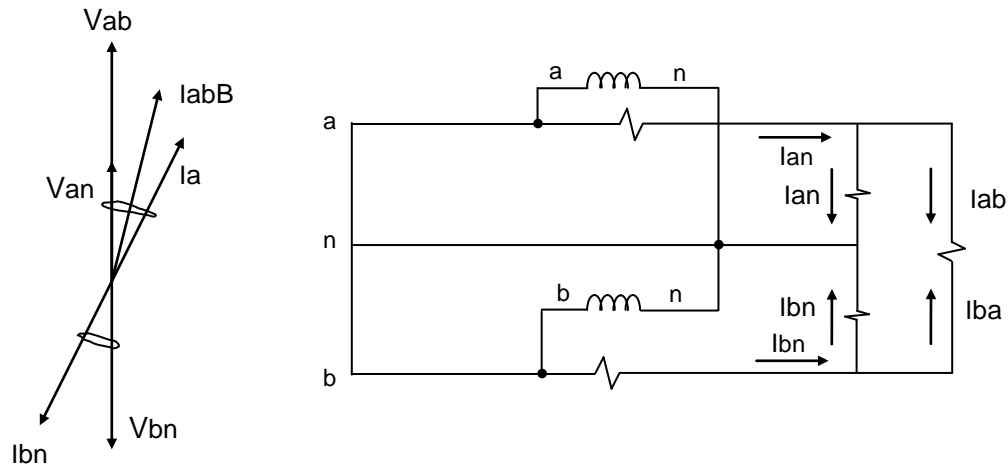


Fig. No. 44.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de kilowatt horas en un sistema monofásico trifilar.

Donde:

W1 es el registro del elemento 1

W2 es el registro del elemento 2

$$\text{Pero } V_{an} = V_{bn} = V_n, \quad I_{ab} = I_{ba}$$

$$W_1 + W_2 = W = V_n I_{an} \cos \varnothing + V_n I_{bn} + 2 V_n I_{ab} \cos \varnothing$$

$$W = V_n (I_{an} + I_{bn} + 2 I_{ab}) \cos \varnothing$$

Por otra parte, la carga consume:

$$P1 = V_{an} I_{an} \cos \varnothing$$

$$P2 = V_{bn} I_{bn} \cos \varnothing$$

$$P3 = V_{ab} I_{ab} \cos \varnothing$$

Donde:

P1 es la potencia consumida por la carga conectada al voltaje V_{an} .

P2 es la potencia consumida por la carga conectada al voltaje V_{bn} .

P3 es la potencia consumida por la carga conectada al voltaje V_{ab} .

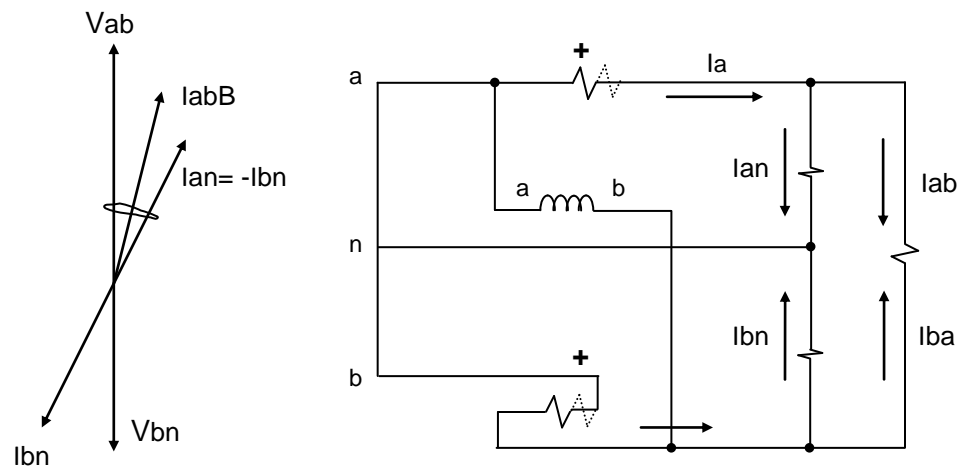
Pero $V_{an} = V_{bn} = V_n$, $V_{ab} = 2 V_n$

$$P = P1 + P2 + P3 = V_n I_{an} \cos \varnothing + V_n I_{bn} \cos \varnothing + 2V_n I_{ab} \cos \varnothing$$

$$P = V_n (I_{an} + I_{bn} + 2 I_{ab}) \cos \varnothing$$

De esto se deduce que el medidor registra el 100% de la carga.

En el caso de los medidores de $1\frac{1}{2}$ no sucede lo mismo en todas las cargas, analicemos:



+ Indica que las bobinas están devanadas al 50% de lo normal para hacer sentir que circula $\frac{1}{2}$ de la corriente total.

Figura No. 45.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de kilowatt-horas en un sistema monofásico trifilar.

Caso No. 4.- Un medidor de 1½ elementos conectado en un sistema monofásica trifilar.

En la figura No. 45, se deducen las siguientes expresiones:

$$W = V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{an} \right) \cos \emptyset + V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{ab} \right) \cos \emptyset + V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{bn} \right) \cos \emptyset + V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{ba} \right) \cos \emptyset$$

Pero $V_{ab}=2V_n$, $I_{ab}=I_{ba}$ y tomando el sistema como balanceado y equilibrado, obtenemos lo siguiente:

$$W = V_n I_{an} \cos \emptyset + V_n I_{bn} \cos \emptyset + 2 V_n I_{ab} \cos \emptyset$$

Y de los análisis anteriores podemos comprobar que el medidor registra el 100% de la carga.

Caso No. 5.- Un medidor de 1 ½ elemento conectado a una carga de un sistema estrella incompleta.

En el diagrama ilustrado en la figura No. 46, se puede obtener la siguiente expresión:

$$W = V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{an} \right) \cos (30 + \emptyset) + V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{ab} \right) \cos \emptyset + V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{bn} \right) \cos (30 - \emptyset) + V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{ba} \right) \cos \emptyset$$

donde resolviendo las identidades trigonométricas :

$$W = V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{an} \right) (\cos 30 \cos \emptyset - \text{Sen } 30 \text{ Sen } \emptyset) + V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{bn} \right) (\cos 30 \cos \emptyset + \text{Sen } 30 \text{ Sen } \emptyset) + V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{ab} \right) \cos \emptyset + V_{ab} \left(\frac{1}{2} I_{ba} \right) \cos \emptyset$$

Pero $I_{an} = I_{bn}$, $I_{ab} = I_{ba}$ y $V_{ab} = \sqrt{3} V_n$ y considerando el sistema balanceado y equilibrado se presenta:

$$W = \sqrt{3} V_n \left(\frac{1}{2} I_{an} \right) \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \emptyset + \sqrt{3} V_n \left(\frac{1}{2} I_{bn} \right) \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \emptyset + \sqrt{3} V_n I_{ab} \cos \emptyset$$

$$W = \frac{3}{4} V_n I_{an} \cos \emptyset + \frac{3}{4} V_n I_{bn} \cos \emptyset + \sqrt{3} V_n I_{ab} \cos \emptyset$$

$$W = V_n \left(\frac{3}{4} I_{an} + \frac{3}{4} I_{bn} + \sqrt{3} I_{ab} \right) \cos \emptyset$$

De lo anterior, se deduce que el medidor registra el 100% de la carga entre fases, pero no registra correctamente (75%) la carga monofásica. Por tal razón, la medición de factor de potencia se realiza con medidores de 2 elementos.

+ Indica que las bobinas están devanadas al 50% de lo normal para hacer sentir que circula $\frac{1}{2}$ de la corriente total.

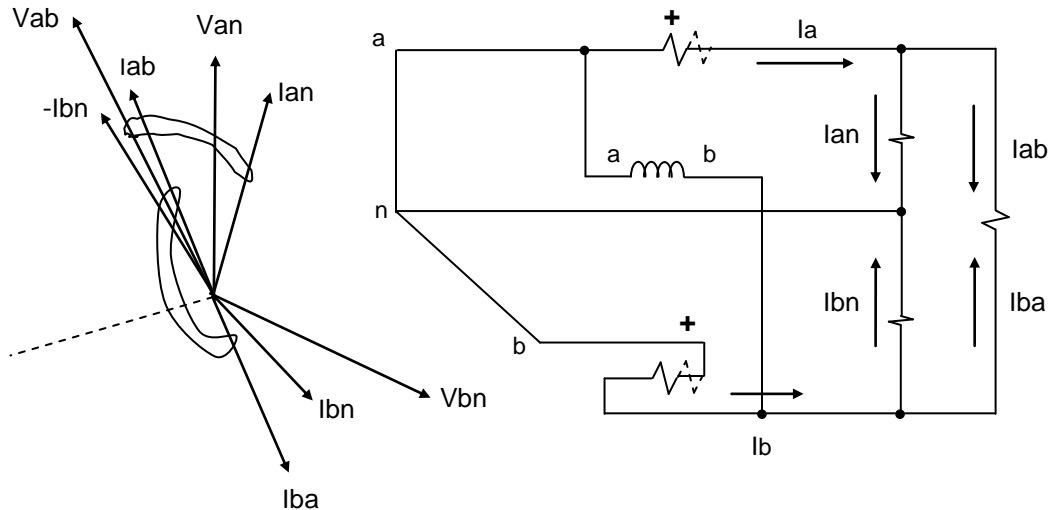


Figura No. 46.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de kilowatt-horas de 1 1/2 elementos en un sistema estrella incompleto.

2.7.1. MÉTODO “Z”.

Para lograr el defasamiento de los 120° eléctricos en este método, es necesario utilizar el potencial de la fase que no alimenta a la carga.

En la figura No. 47 se observa la conexión del medidor, de donde se deduce:

$$Z1 = Vbn I_a (\cos 120^\circ - \phi)$$

$$Z2 = Vcn I_b (\cos 120^\circ - \phi)$$

Donde:

Z1 es el registro del elemento 1

Z2 es el registro del elemento 2

que resolviendo se tiene:

$$Z1 = Vbn I_a (\cos 120^\circ \cos \phi + \sin 120^\circ \sin \phi)$$

$$Z2 = Vcn I_b (\cos 120^\circ \cos \phi + \sin 120^\circ \sin \phi)$$

$$Z1 = Vbn I_a \left(-\frac{1}{2} \cos \phi + 3\sqrt{3} \sin \phi \right)$$

$$Z2 = Vcn I_b \left(-\frac{1}{2} \cos \phi + 3\sqrt{3} \sin \phi \right)$$

Teniendo en cuenta que es un sistema balanceado y equilibrado $V_{bn} = V_{cn} = V_n$, $I_a + I_b = 1$

$$Z = Z_1 + Z_2 = V_n I_1 \left(\frac{2\sqrt{3}}{2} \text{ Sen } \varnothing - \frac{1}{2} \text{ Cos } \varnothing \right)$$

$$Z = 2 V_n I_1 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ Sen } \varnothing - \frac{1}{2} \text{ Cos } \varnothing \right)$$

que dividiendo entre la potencia activa dada por W

$$\frac{Z}{W} = \frac{2 V_n I_1 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ Sen } \varnothing - \frac{1}{2} \text{ Cos } \varnothing \right)}{2 V_n I_1 \text{ Cos } \varnothing}$$

$$\frac{Z}{W} = \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ Tang } \varnothing - \frac{1}{2}$$

$$\text{Tang } \varnothing = \frac{2Z + W}{\sqrt{3} W}, \text{ de donde:}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang \varnothing

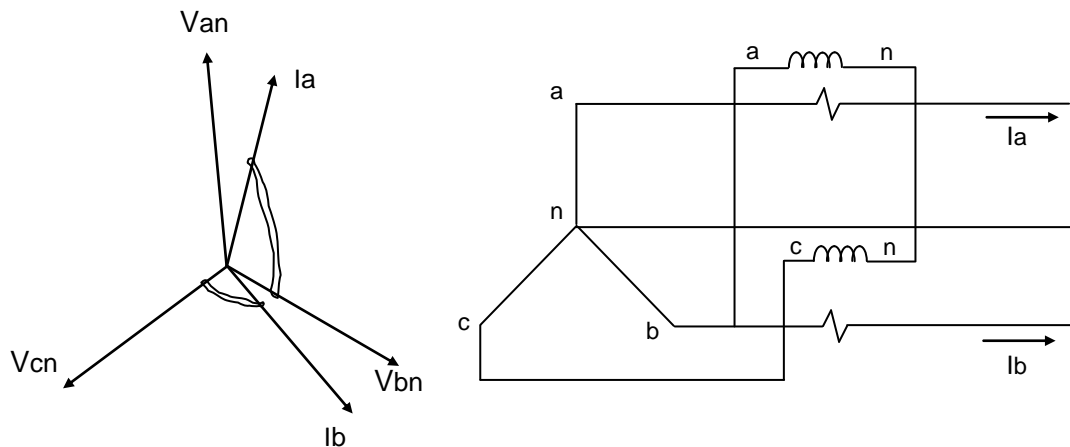


Fig. No. 47.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de factor de potencia en un circuito estrella incompleta por el método "Z".

2.7.2. MÉTODO DE LAS FASES CRUZADAS.

Como se ha observado con anterioridad, este método consiste en utilizar potenciales retrasados 90° eléctricos sin usar un autotransformador defasador.

En la figura No. 48, se ilustran las conexiones necesarias para lograr el defasamiento, de éste se desprende que los potenciales aplicados V_{bc} y V_{ca} son 3 veces mayores que los voltajes V_{an} y V_{bn} que utiliza el medidor de kilowatt horas, por lo que el medidor registrará 3 veces más la potencia reactiva.

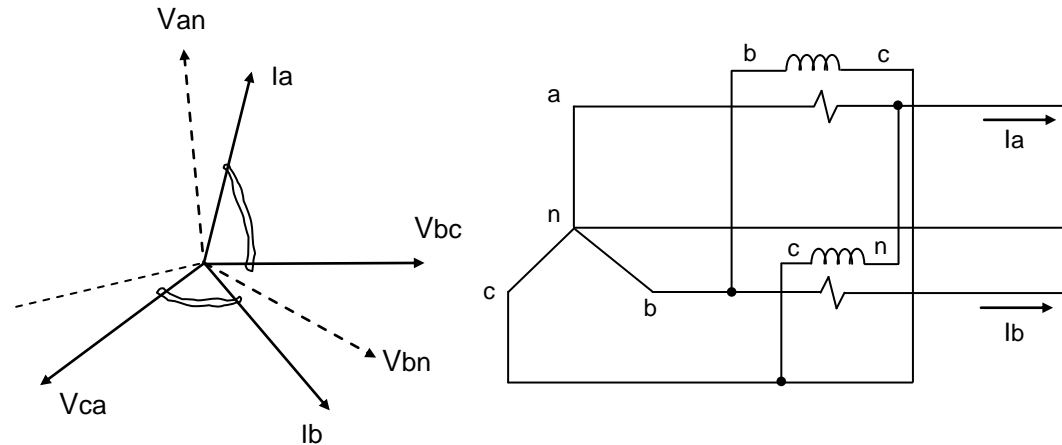


Fig. No. 48.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de factor de potencia por el método de las fases cruzadas.

Del anterior diagrama obtenemos la siguiente expresión:

$$R = V_{bc} I_{an} \cos(90 - \phi) + V_{ca} I_{bn} \cos(90 - \phi)$$

Donde:

R es el registro total del medidor que resolviendo las identidades trigonométricas

$$R = V_{bc} I_{an} \sin \phi + V_{ca} I_{bn} \sin \phi$$

$$\text{Pero } V_{bc} = V_{ca} = \sqrt{3} V_n, \quad I_{an} = I_{bn} = I_1$$

$$R = 2 (\sqrt{3}) V_n I_1 \sin \phi$$

que dividiendo entre la potencia activa dada por W

$$\frac{R}{W} = \frac{2 (\sqrt{3}) V_n I_1 \sin \phi}{2 V_n I_1 \cos \phi} = 3 \sqrt{3} \text{Tang } \phi$$

$$\text{Tang } \phi = \frac{R}{\sqrt{3} W}, \quad \text{de donde:}$$

$$\text{Factor de potencia} = \cos \text{Arc Tang } \phi$$

2.7.3. MÉTODO DEL WATTHORÍMETRO CON DEFASADOR.

La excitación defasada en 90° eléctricos en atraso puede obtenerse también mediante un autotransformador defasador en el que se tienen las conexiones ilustradas en la figura No. 49, de donde se obtiene la siguiente expresión:

$$\text{VARS} = V_{45} I_a \cos (90 - \varnothing) + V_{67} I_b \cos (90 - \varnothing)$$

$$\text{Pero } V_{45} = V_{67} = V_n, I_a = I_b = I_1$$

$$\text{VARS} = 2 V_n I_1 \text{ Sen } \varnothing + V_n I_1 \text{ Sen } \varnothing$$

$$\text{VARS} = 2 V_n I_1 \text{ Sen } \varnothing$$

Que dividiendo entre W:

$$\frac{\text{VARS}}{W} = \frac{2 V_n I_1 \text{ Sen } \varnothing}{2 V_n I_1 \text{ Cos } \varnothing} = \text{Tang } \varnothing, \text{ de donde}$$

$$W = 2 V_n I_1 \text{ Cos } \varnothing$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang \varnothing

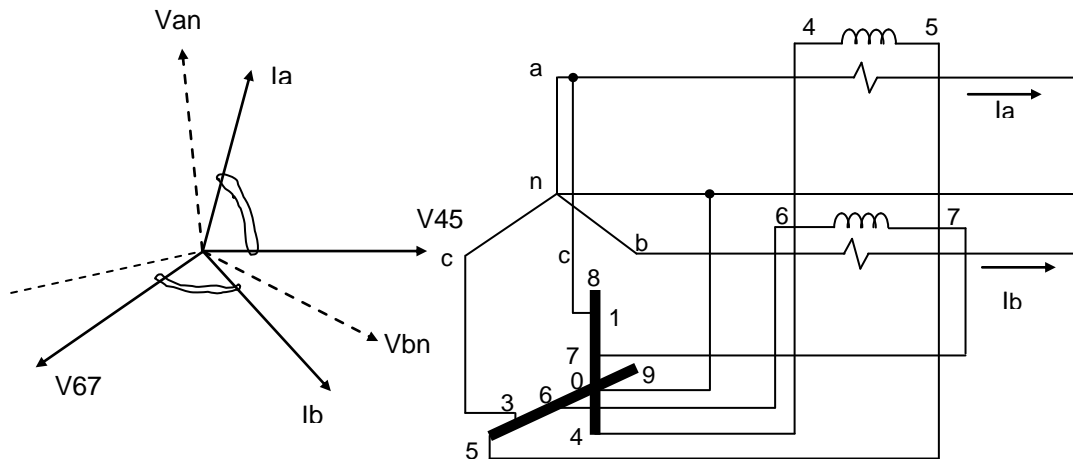


Fig. No. 49.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de factor de potencia por el método "QH"

2.7.4. MÉTODO "QH".

Como se ha mencionado con anterioridad, en este método se aplican voltajes defasados 60° eléctricos atrasados respecto de los aplicados al medidor de kilowatt-horas. El diagrama de conexión para este caso está representado en la figura No. 50, de donde se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_1 = V_{nc} I_a \cos (60 - \varnothing)$$

$$Q_2 = V_{na} I_b \cos (60 - \varnothing)$$

Donde:

Q1 es el registro del elemento 1

Q2 es el registro del elemento 2

Y resolviendo las identidades trigonométricas se tiene lo siguiente:

$$Q1 = V_{nc} I_a (\cos 60 \cos \varnothing + \sin 60 \sin \varnothing)$$

$$Q2 = V_{na} I_b (\cos 60 \cos \varnothing + \sin 60 \sin \varnothing)$$

$$\text{Pero } V_{na} = V_{nc} = V_n, \quad I_a = I_b = I_1, \quad \cos 60 = \frac{1}{2}, \quad \sin 60 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$Q1 + Q2 = Q = 2 V_n I_1 \left(\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{3\sqrt{2}}{2} \sin \varnothing \right)$$

que dividiendo entre la potencia activa dada por W

$$\frac{Q}{W} = \frac{2 V_n I_1 \left(\frac{1}{2} \cos \varnothing + \frac{3\sqrt{2}}{2} \sin \varnothing \right)}{2 V_n I_1 \cos \varnothing}$$

$$Q = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Tang } \varnothing$$

$$\text{Tang } Q = \frac{2Q - W}{\sqrt{3} W}, \text{ de donde:}$$

Factor de potencia = Cos Arc Tang \varnothing

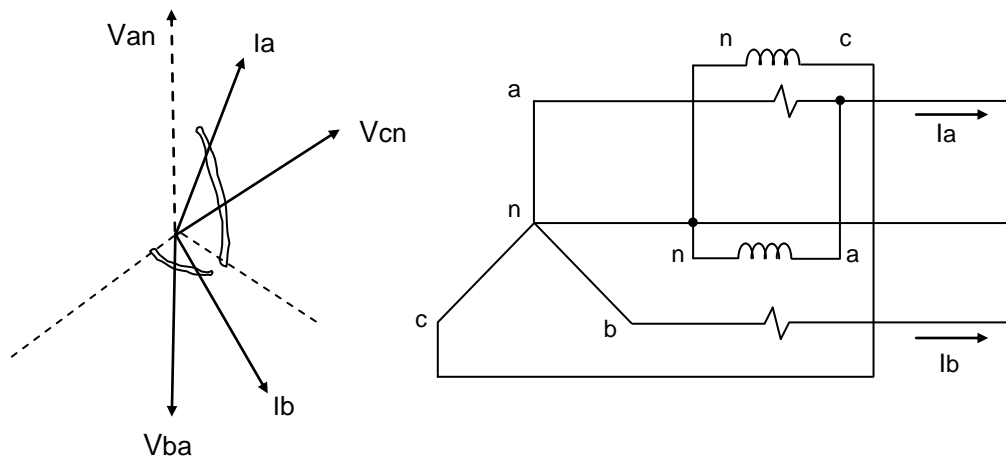


Fig. No. 50.- Diagrama eléctrico y vectorial de un medidor de factor de potencia por el método "QH"

De lo expuesto en el presente capítulo puede observarse que salvo la medición del factor de potencia por el método del defasador y con medidor autodefasado, miden directamente el consumo de energía reactiva (vars hora reactivo), sin embargo a partir de estas mediciones puede determinarse la energía reactiva:

a) Método de los wattmetros.

$$\text{Tang } \emptyset = \sqrt{3} \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1} \text{ pero también } \text{Tang } \emptyset = \frac{\text{Var-hora-Reac}}{\text{Watt-hora}}$$

$$\text{VARs} = \sqrt{3} \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1} (W_2 + W_1) = \sqrt{3} (W_2 - W_1)$$

b) Método "Z".

$$\text{Tang } \emptyset = \frac{2Z + W}{\sqrt{3} W}$$

$$\text{VARs} = \frac{2 Z + W}{\sqrt{3} W} (W) = \frac{2 Z + W}{\sqrt{3}}$$

c) Método de las fases cruzadas.

- En sistema delta

$$\text{Tang } \emptyset = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{F}{W}$$

$$\text{VARs} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{F}{W} (W) = \frac{\sqrt{3}}{2} F$$

- En sistema estrella

$$\text{Tang } \emptyset = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{F}{W} = \frac{F}{\sqrt{3} W}$$

$$\text{VARs} = \frac{F}{\sqrt{3} W} (W) = \frac{F}{\sqrt{3}}$$

d) Método “QH”.

$$\text{Tang } \phi = \frac{2Q - W}{\sqrt{3} W}$$

$$\text{VARs} = \frac{2Q + W}{\sqrt{3} W} \quad (W) = \frac{2Q - W}{\sqrt{3}}$$

Para concluir, es necesario recordar que de los métodos de medición del factor de potencia descritos, no todos pueden ser utilizados por igual. Los métodos de los 3 wattmetros y el método “Z” deben utilizarse únicamente para medición de cargas balanceadas y los métodos restantes: Fases cruzadas, Medidores Autodefásados, con Defasador y QH, pueden utilizarse para medición de cualquier tipo de carga.

Por otra parte, la utilización de uno u otro método de medición depende en gran medida de la disponibilidad del equipo necesario y del que disponga en primer lugar, y en segundo, del costo del mencionado equipo.

3. METODOS GENERALES PARA LA COMPENSACIÓN DE CORRIENTE REACTIVA.

3.1. OPERACIÓN ÓPTIMA DE MOTORES ELÉCTRICOS.

Como se expuso en el primer capítulo, es necesario y conveniente controlar el factor de potencia tanto en instalaciones industriales como en los sistemas de distribución, para lo cual, existen una serie de medidas orientadas a aumentar el factor de potencia, en las cuales la operación de los motores eléctricos juegan un papel importante, basta enumerar las siguientes medidas:

- a) Selección justa del tipo, potencia y velocidad de los motores que se instalan.
- b) Aumento de las cargas de los motores.
- c) Inadmisibilidad al trabajo prolongado en vacío de los motores.
- d) Reparación correcta de los motores.

La selección apropiada de los motores a utilizar en cada instalación es importante, el factor de potencia de un motor baja cuando éste se opera a niveles inferiores a los de plena carga, lo mismo ocurre cuando el voltaje de alimentación se eleva por arriba de lo nominal o la frecuencia baja. En la tabla No. 10 se ilustra una guía para la selección apropiada de los motores a utilizar de acuerdo a la aplicación y operación de cada motor.

Una ventaja muy importante, es la de utilizar motores síncronos, los que, independientemente de mover una carga mecánica, corrigen el factor de potencia, esto es, adelantándolo o atrasándolo de acuerdo a las necesidades y características de la instalación, mediante la sobreexcitación o subexcitación de su campo. Cuando se usan motores síncronos para corregir el factor de potencia se dice que están operando como capacitores síncronos.

Los motores síncronos se utilizan también para mover cargas a velocidad constante, toda vez que ofrecen las ventajas siguientes:

Alta eficiencia: La eficiencia del motor síncrono es de 1 a 3 % veces mayor que la del motor de inducción, debido a la ausencia del deslizamiento y a la corriente de excitación.

Bajo costo.- Las mayores tolerancias en el entrehierro hace más económica su construcción.- El entrehierro de un motor síncrono es 2 a 3 veces el de un motor de inducción.

En la tabla No. 10 se ilustran las características de los motores síncronos para diferentes velocidades y factores de potencia, y en la tabla No. 11 se puede hacer la comparación de la corriente que consumen los motores síncronos y los motores de inducción jaula de ardilla y de rotor devanado, en el que puede verse la economía de usar estos motores.

Tabla No. 10.- Características de los motores síncronos.

MOTOR	No. DE POLOS	PAR DE ARRANQUE	PAR SINCR	PAR DE SALIDA	CORRIENTE DE ARRANQUE
DE APLICACIÓN GENERAL					
F.P.= 1.0	4	110	110	150	550-750
	6-14	110	110	175	550-750
F.P.= 0.8	4	125	125	200	500-700
	6-14	125	125	250	500-700
MOTORES GRANDES DE ALTA VELOCIDAD					
514 A 1200 RPM F.P.= 1.0					
250 A 500 H.P.	4-14	110	110	150	500-750
600 H.P. Y MAYORES	4-14	85	85	150	500-750
F.P.= 0.8 250 A 500 H.P. 4-14					
600 H.P. y mayores	4-14	85	85	200	550-700
MOTORES DE BAJA VELOCIDAD					
450 RPM y menores					
F.P.= 1.0	-	40	40	150	275-500
F.P.= 0.8	-	40	40	200	225-400
MOTORES PARA COMPRESORES					
	-	40	30	140	275-500

Nota: Los valores están en % de los valores de plena carga.

Tabla No. 11.- Intensidad de corriente a plena carga¹ en motores de C.A. trifásica.

H.P	Motor de inducción y Motor devanado			Jaula de Ardilla	Motor Síncrono		Factor de Potencia Unidad (2)		
	110 V	220 V	440 V	550 V	2,300	220 V	440 V	550 V	2300 V
0.5	4	2	1	0.8					
0.75	5.6	2.8	1.4	1.1					
1	7	3.5	1.8	1.4					
1.5	10	5	2.5	2.0					
2	13	6.5	3.3	2.6					
3	-	9	4.5	4					
2	-	15	7.5	6					
7.5	-	22	11	9					
10	-	27	14	11					
15	-	40	20	16					
20	-	52	26	21					
25	-	64	32	26	7	54	27	22	5.4
30	-	78	39	31	8.5	65	33	26	6.5
40	-	104	52	41	10.5	86	43	35	8
50	-	125	63	50	13	108	54	44	10
60	-	150	75	66	16	128	64	51	12
75	-	185	93	74	19	161	81	65	15
100	-	246	123	98	25	211	106	85	20
125	-	310	155	124	31	264	132	106	25
150	-	360	180	144	37	-	158	127	30
200	-	480	240	192	48	-	210	168	40

Para intensidades de corriente a plena carga de motores de 208 y 200 V, incrementarse la intensidad de corriente a plena carga correspondiente al motor de 220 V en un 6 y un 10 %, respectivamente.

- (1) Estos valores de intensidad de corriente a plena carga se refieren a motores que giren a velocidad standard para motores con correa y motores con características normales de par resistente. Los motores construidos para velocidades especiales y grandes, pueden requerir más intensidad de corriente, en cuyo caso se empleará la corriente de placa indicadora.
- (2) Para factores de potencia del 90 y del 80%, las cifras anteriores deben multiplicarse por 1.1. y 1.25 respectivamente.

Las tensiones se refieren a tensiones normales para los motores.

Tabla No. 12.- Características de motores de inducción jaula de ardilla.

CARACTERÍSTICA	VOLTAJE		FUNCIÓN	FRECUENCIA		FUNCIÓN
	110 %	90 %		105 %	95 %	
Par	%	%		%	%	
Arranque Máximo	+21	-19	(Volt) ²	-10	+11	$\frac{1}{\text{Frec}^2}$
Velocidad Síncrona	0	0	Constante	+5	-5	Frec
Plena Carga	+1	-1.5	+	+5	-5	} Frec Part. Const.
Deslizamiento	-17	+23	$\frac{1}{\text{Volt}^2}$	0	0	
Eficiencia						
Plena Carga	+0.5 a 1	-2	-	Pequeño Incremento	Pequeña Disminución	-
¾ Carga	0	0	-	"	"	-
½ Carga	-1 a 2	+1 a 2	-	"	"	-
Factor de Potencia						
Plena Carga	-3	+1	-	Pequeño aumento	Pequeña Disminución	-
¾ Carga	-4	+2 a 3	-	"	"	-
	-5 a 6	+4 a 5	-	"	"	-
Corriente						
Arranque	+10 a 12	-10 a 12	Volts	-5 a 6	+5 a 6	$\frac{1}{\text{Frec}}$
Plena carga	-7	+11	-	Pequeño Aumento	Pequeña Disminución	-
Aumento de temperatura	-3 a 4 °C	+6 a 7 °C	-	"	"	-
Capacidad máxima de sobrecarga	+21	-19	Volt ²	"	"	"
Ruido Magnético	Pequeño Aumento	Pequeña Disminución	-	"	"	-

3.2. GENERADORES OPERADOS COMO MOTOR SÍNCRONO.

Un generador también es un generador de reactivos, es decir, que podemos sacrificar el factor de potencia de la generación con la consecuentemente generación de reactivos, tal como se ilustra en la gráfica de la figura No. 51. De la gráfica referida, se observa que para un factor de potencia de 0.90 un generador entregará el 90% de su capacidad total y unos reactivos del 43.58%, por otro lado, con un factor de potencia del 0.80%, que aunque sacrificamos el factor de potencia, aumenta la generación de reactivos a un valor del 60%. Ahora bien, si en vez de que el factor de potencia del generador esté adelantado, estuviera atrasado, éste consumiría reactivos en vez de generarlos.

Los generadores síncronos sirven también para tener una estabilidad del sistema, pudiéndose conectar en los terciarios de los transformadores y además de proporcionarnos los reactivos necesarios, nos pueden proporcionar un voltaje estable y la energía necesaria en casos de colapsos de algún alimentador, aunque esto resulta demasiado costoso, pues se tendría una estación generadora operando como un capacitor.

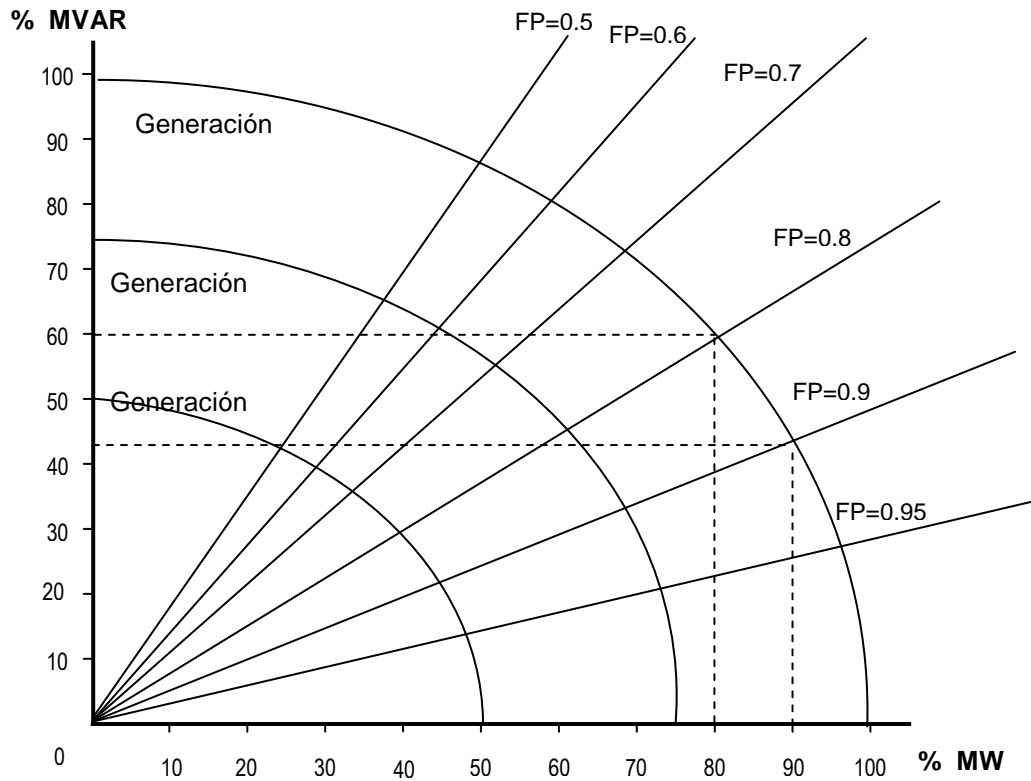


Fig. No 51.- Generación de reactivos por un generador a diferentes factores de potencia.

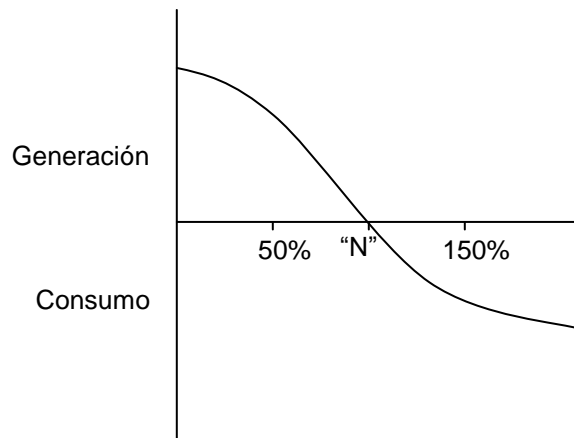


Fig. No. 52.- Comportamiento de los reactivos de una línea de conducción de energía eléctrica a diferentes cargas.

3.3. OPERACIÓN EFICIENTE DE LÍNEAS ELÉCTRICAS.

En el caso de una línea de conducción de energía eléctrica con una capacidad de conducción de potencia nominal "N", la cual trabaja exactamente a su potencia característica, ni absorbe ni genera reactivos, pero si ésta trabaja a un nivel menor de lo nominal va a generarnos reactivos, y por el contrario, si trabaja por arriba de su potencial nominal, va a consumir reactivos.

En la fig. No. 52 puede observarse que una línea en vacío puede funcionar como un capacitor y generar una gran cantidad de reactivos. Esto puede ser benéfico en cierto grado, ya que si no hay carga que consuma estos reactivos a través de la línea, éstos tienden a viajar hacia la fuente ocasionando una gran cantidad de pérdidas por efecto Joule ($I^2 R$) que puede resultar más caro que económico.

A manera de conclusión del presente capítulo podemos decir que el factor de potencia dentro de una instalación industrial y dentro de un sistema de potencia, requiere de especial atención y que como se detalló en el presente trabajo, sus consecuencias tanto económicas como técnicas, de mantenerlo abajo del valor mínimo aceptable de 85% resulta comprometido.

Para lo cual, los métodos descritos para su medición resultan de gran utilidad, sin embargo, la aplicación de los mismos requiere de personal que conozcan sobre la materia a fin de obtener resultados satisfactorios, de igual manera, la corrección de factor de potencia por cualquier método será tan eficiente como tan adecuada sea la medición del factor de potencia que se utilizó de base para el estudio.

3.4. COMPENSACIÓN DE REACTIVOS POR MEDIO DE CAPACITADORES DE POTENCIA.

ASPECTOS GENERALES DEL USO DE CAPACITORES.

El capacitor eléctrico o condensador, fue descubierto en el año de 1745 por el inventor alemán Ewald Georg Von Kleist y poco después por el holandés Pieter Van Musschenbroek en la Universidad de Leyden. En su primera versión consistió en un cilindro de vidrio recubierto en sus paredes interna y externa por una laminilla metálica y fue utilizado como almacenador de cargas eléctricas.

Pero fue hasta principios del siglo XX cuando comenzó a fabricarse el capacitor en forma industrial. De un periodo inicial de demanda insignificante el capacitor pasó rápidamente a representar un instrumento indispensable en la explosión tecnológica característica de nuestro tiempo; se utilizó inicialmente como supresor de la chispa eléctrica en la desconexión de bobinas de inducción y pronto se multiplicaron sus aplicaciones especialmente hacia la técnica de los sistemas de comunicación.

En la actualidad una de las aplicaciones más importantes del capacitor ha sido el de corregir el factor de potencia en líneas de energía e instalaciones industriales, aumentando de esta forma la capacidad de transmitir energía de las líneas, la energía activa disponible en los generadores eléctricos, el aprovechamiento de la capacidad de los transformadores, la regulación del voltaje en los puntos de consumo, etc., todo esto a un costo más bajos que el que supondría la inversión en nuevas líneas y equipo o maquinaria necesaria para producir el mismo efecto de regulación de voltaje o aumento de la energía activa disponible. El capacitor aquí empleado es llamado capacitor de potencia.

El uso del capacitor de potencia se inició hacia el año de 1914 aproximadamente, fabricándose en su inicio con dieléctrico de papel impregnado en aceite mineral; más tarde con la introducción de los askareles (hidrocarburos aromáticos clorados) como impregnantes, se produjo una revolución en la técnica de los capacitores de potencia, bajando bruscamente sus tamaños, pesos y costos de unidades.

La introducción de los dieléctricos de plástico en los capacitores de potencia para alta tensión ha marcado un nuevo paso. El nuevo dieléctrico Papel - Plástico - Askarel ha hecho posible la aparición de unidades significativamente más compactas, más resistentes a las descargas parciales, de mayor vida media y pérdidas dieléctricas considerablemente más bajas.

3.4.1. VENTAJAS.

Dentro de los métodos de compensación de energía reactiva se tiene una gran diversidad, los cuales fueron ampliamente explicados en el capítulo que antecede, destacando dentro de ellos el capacitor, por las siguientes ventajas:

- Los motores síncronos aunque pueden considerarse como una ayuda para mejorar el factor de potencia, no constituyen una forma de compensación fácilmente controlable.
- Los capacitores síncronos suelen ser de gran tamaño y aunque también mejoran la estabilidad de las líneas en régimen transitorio, son equipos cuyo uso implica fuerte inversión inicial y un mantenimiento altamente costoso.
- Los capacitores de potencia tienen la ventaja de tener un bajo costo por KVARC instalado, un fácil manejo, una ausencia de partes rotativas y un mantenimiento sencillo y barato, que en ocasiones se hace prácticamente inexistente. Este es el motivo de la aceptación universal que han tenido los capacitores de potencia en todos los sistemas de distribución y consumo de energía eléctrica y su creciente demanda año tras año.

3.4.2. ASPECTO TÉCNICO-ECONÓMICOS.

Desde el punto de vista económico suele resultar mucho más interesante el instalar los capacitores en el lado de alta tensión que en el de baja tensión.

Para voltajes de línea de hasta unos 45 KV, la instalación de un banco de capacitores fijo en el lado de alta tensión suele resultar unas 10 veces más económico que la instalación de un banco de la misma potencia reactiva instalado en el lado de las bajas tensiones industriales, si en lugar de ser banco fijo, se trata de un banco desconectable, la instalación de alta tensión resulta unas 6 veces más económica que en baja tensión.

Para voltajes de líneas superiores a los 100 KV, el aislamiento del banco y especialmente, el equipo de conexión, suele encarecer notablemente el costo del banco de capacitores.

No obstante, el costo de un banco de capacitores instalados en alta tensión, siempre resulta notablemente ventajoso frente al costo de un banco equivalente instalado en baja tensión.

Pero pueden existir razones técnicas que hagan necesaria la instalación de los capacitores en baja tensión.

Cuando se desea corregir el factor de potencia para evitar la penalización por parte de la empresa suministradora, los capacitores deben instalarse detrás del equipo de medida, de forma que la corriente reactiva que fluyen entre los capacitores y la carga no pase a través de dicho equipo de medida, por consiguiente, cuando el equipo de medida se encuentre instalado en el lado de baja tensión, los capacitores de potencia deben ser instalados también en baja tensión.

Cuando se requiere aumentar la capacidad de carga de un transformador, los capacitores deben instalarse en el lado secundario de dicho transformador (generalmente, lado de baja tensión industrial), para que se disminuya la corriente inductiva que pasa a través del mismo.

Cuando se busca disminuir las pérdidas por efecto Joule en una instalación, los capacitores deben instalarse junto a las cargas principales, de forma que eviten el paso de corrientes inductivas por el cableado. Si las cargas están conectadas en baja tensión, los capacitores deben instalarse también en baja tensión.

3.4.3. CONSIDERACIONES IMPORTANTES PARA INSTALAR UN BANCO DE CAPACITORES

En la instalación de los capacitores, como en la de cualquier otro equipo eléctrico deben tomarse en cuenta ciertas consideraciones que aseguren el buen funcionamiento del equipo; en este punto, analizaremos los más importantes sobre la instalación de capacitores de potencia, de acuerdo a lo siguiente:

- a) **Ventilación.-** A pesar de las pérdidas eléctricas disipadas en calor de los capacitores de potencia representan un porcentaje muy bajo con respecto a la potencia nominal (0.5 watts/KVARC), cada capacitor en operación se convierte en un generador de calor de cierta importancia, debido a la gran cantidad de energía que es capaz de tener en juego.

Es importante disipar correctamente esta energía calorífica y no permitir que la temperatura de operación suba a valores superiores de los de diseño, ya que los dieléctricos de los capacitores de potencia son muy sensibles a las temperaturas. El operar a una temperatura media de unos 10° C por encima de la temperatura normal de operación, puede significar el disminuir la vida media del capacitor en más de un 70% y si se tienen calentamientos mayores, la vida del capacitor se afecta en una forma exponencial.

Las normas de CCONNIE (Comité Consultivo Nacional de Normalización de la Industria Eléctrica), NEMA (Asociación Nacional de Manufacturas Eléctricas) y ANSI (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares) especifican que el fabricante deberá garantizar la estabilidad térmica de los capacitores, cuando éstos se instalen respetándose las distancias que el mismo especifique y en un medio ambiente cuya temperatura no sobrepase los valores de la tabla No. 14.

Los problemas ocasionados por una ventilación defectuosa suelen ser altamente críticos en los capacitores instalados en alta tensión debido a las grandes concentraciones de energía almacenada, pero no deben pasarse por alto estos problemas en las instalaciones de las bajas tensiones industriales.

Tabla No. 14.- Temperatura máxima permitida por las normas CCONNIE, NEMA y ANSI para la instalación de capacitores en las que el fabricante debe garantizar la estabilidad térmica.

MÉTODO DE MONTAJE	<u>TEMPERATURA MEDIA EN °C:</u>	
	EN 24 HR*	ANUAL
Capacitor aislado	46	35
Capacitores instalados en una hilera	40	25
Capacitores instalados en varias hileras contiguas	35	20
En locales cerrados	35	20

* Temperatura media aritmética de lecturas horarias, tomadas durante las 24 horas del día más caluroso de la localidad.

b) Frecuencia de operación.- Los capacitores de potencia se fabrican para operar a una frecuencia nominal de 60 Hz, sin embargo, no existe ningún inconveniente técnico para que estos capacitores operen a frecuencias más bajas, excepto la reducción de la potencia reactiva suministrada.

La potencia reactiva suministrada está dada por:

$$KVARC = 2\pi f (KV^2) \times 10^{-3} \times C$$

Donde:

KVARC = Potencia reactiva del capacitor

f = Frecuencia de operación en Hz

KV = Voltaje aplicado en bornes en KV

C = Capacidad del capacitor en microfaradios

De esto se deduce que la potencia reactiva del capacitor es directamente proporcional al valor de la frecuencia, por ello puede decirse que los KVARC suministrados a una frecuencia diferente de lo nominal queda determinada por la siguiente expresión:

$$KVARC \text{ Suministrados} = \frac{\text{Frecuencia aplicada}}{60} \times KVARC_{nom}$$

- c) **Voltaje de operación.**- Los capacitores de potencia para alta y baja tensión se fabrican de forma que puedan operar a sobrevoltajes de hasta el 10% del voltaje nominal, sin que aparezcan problemas de aislamiento, estabilidad térmica, etc. Esto tiene la finalidad de absorber las posibles fluctuaciones del voltaje de las líneas eléctricas y los pequeños sobrevoltajes que pudieran ocasionar los mismos capacitores al operar en condiciones de baja carga. Sin embargo, esto no implica que se tome como práctica el instalarlos en estas condiciones de sobrevoltajes, ya que el deterioro que producen los sobrevoltajes sobre los dieléctricos es similar al producido por el sobrecalentamiento. El operar permanentemente a un sobrevoltaje del 10% puede disminuir la vida de un capacitor en más de un 50%.

Contrariamente a lo expuesto en el punto anterior, el operar a los capacitores a voltajes inferiores a los nominales no los afecta en su vida media, ocasionando únicamente la disminución de la potencia reactiva proporcionalmente al cuadrado de la relación del voltaje aplicado, lo cual queda determinado por la expresión siguiente:

$$KVAR \text{ Suministrados} = \frac{\left[\text{KV aplicado} \right]^2}{\text{KV nominales}} \times KVARC \text{ nom}$$

- d) **Corriente nominal de operación.-** La corriente nominal de un capacitor puede calcularse por la fórmula siguiente:

$$I_{\text{nom}} = \frac{\text{KVARC}}{\text{KV}}$$

Para el caso de los capacitores trifásicos solo basta inducir el factor $\sqrt{3}$ independientemente de la conexión interna, y en consecuencia también puede expresarse como:

$$I_{\text{nom}} = 2 \pi f C (\text{KV}) \times 10^{-3}$$

De donde se deduce que la corriente que toma un capacitor es directamente proporcional a su voltaje de operación, capacidad del mismo y frecuencia de operación.

- e) **Corrientes armónicas.-** Existen instalaciones industriales tales como: hornos metalúrgicos de arco, hornos de inducción, grandes motores que entran y salen de operación frecuentemente, etc., los cuales son propicios de generar corrientes armónicas de singular importancia. En estos casos si no se toman las precauciones adecuadas en la instalación de capacitores, es posible que éstos queden sometidos a corrientes excesivamente peligrosas que traerán como consecuencias la disminución notable de su vida media y posibles fallas de unidades en tiempos relativamente cortos.

En la práctica, de las corrientes armónicas que suelen encontrarse son siempre impares: 3^a, 5^a, 7^a, etc., cada una con valores eficaces e_3 , e_5 , e_7 , respectivamente, el cual se puede determinar por medio de un osciloscopio o un medidor de armónicas haciendo mediciones directas en los bornes del capacitor. El valor eficaz del voltaje total resultante aplicado al capacitor viene dado por la expresión:

$$V = 0.01 V_n \sqrt{100^2 + e_3^2 + e_5^2 + e_7^2 + \dots}$$

y la corriente eficaz del capacitor:

$$I = 0.01 I_n \sqrt{100^2 + 9e^2_3 + 25 e^2_5 + 49 e^2_7 + \dots}$$

donde V_n e I_n son el voltaje y corriente nominales.

Y el incremento de potencia reactiva de operación debido a estas armónicas exclusivamente, viene dada por:

$$KVARC = 0.01 (3 e^2_3 + 5 e^2_5 + 7 e^2_7 + \dots) \%$$

este tanto por ciento está referido a la potencia nominal del banco.

Al respecto las normas CCNNIE, NEMA y ANSI recomiendan lo siguiente:

Sobrevoltaje máximo	10%
Sobrecorriente máxima (onda fundamental más armónicas)	80%
Potencia reactiva máxima permitible (efecto del sobrevoltaje y Corriente)	35%

Cuando se presenta un problema de sobrecarga de corriente o potencia, los capacitores suelen mostrar síntomas de una temperatura de operación excesivamente elevadas y en los peores casos, una deformación del tanque, que indica las altas presiones a las que está sometido el capacitor, debido a la dilatación del dieléctrico.

En los casos en que se tengan instalaciones en las que cabe esperar en la onda fundamental del voltaje perturbaciones de consideración, debe preverse la existencia de estas sobrecorrientes, tanto en el alambrado como en el equipo auxiliar y tenerse muy en cuenta los siguientes aspectos:

- Tener un cuidado especial en la ventilación del banco e incluso en la refrigeración del mismo.
- Dejar el neutro flotante, en los casos de conexión en estrella.

En el caso que se compruebe la existencia del problema de sobrecarga, puede optarse por lo siguiente:

- Desconectar el banco en los periodos de máxima generación de armónicas.
- Cambiar de lugar el banco para evitar posible resonancia parcial.

Y si el problema es demasiado grande, puede pensarse en instalar inductancias de choque en serie con el banco de capacitores, cuya reactancia inductiva representa una pequeña fracción de la reactancia capacitiva por fase del banco para la frecuencia fundamental, constituyendo un verdadero choque para las altas frecuencias.

f) Condiciones anormales de operación.- Las normas CCNNIE, NEMA y ANSI, especifican que el fabricante debe ser puesto en antecedentes de condiciones anormales de servicio, tales como:

- Exposición a humos o vapores corrosivos.
- Exposición a polvos conductores o explosivos.
- Exposición a choques mecánicos o vibraciones.
- Exposiciones a radiaciones de calor provenientes de superficies que se encuentran a mayor temperatura que la temperatura ambiente máxima a la que se permite operar a los capacitores; excluyendo las radiaciones solares.
- Montaje que dificulte una ventilación adecuada; ya sea por el agrupamiento de los capacitores o por el lugar y circunstancias de la instalación.
- Operar a temperaturas ambientales más altas que la máxima permitida según normas o especificaciones del fabricante.
- Operación a altitudes superiores a 1,800 metros sobre el nivel del mar.

- Formas de ondas distorsionadas, con armónicas que causen sobrecargas de corriente o de potencia en los capacitores, superiores a las admitidas por las normas.
- Cualquier otro requerimiento especial, fuera de lo común.

g) Pruebas de campo.- Cuando en un banco de capacitores han sucedido problemas que lleven a pensar en alguna unidad fallada, o simplemente cuando el banco ha sido expuesto a condiciones de operación adversas, es recomendable cerciorarse del estado en que se encuentra dicho capacitor, realizando las siguientes pruebas antes de ponerlo nuevamente en operación:

- Capacidad.
- Resistencia entre bornes y el tanque.
- Prueba de fugas del dieléctrico.
- Factor de disipación.

h) Mantenimiento.- Al terminar de poner en servicio un nuevo banco de capacitores, debe efectuarse una revisión del mismo, comprobando:

- Que los voltajes de las fases estén balanceados y que permanezcan dentro de los límites aceptables, según las especificaciones de los capacitores.
- Que la potencia reactiva de operación del banco no exceda en más del 35% de la potencia reactiva nominal del mismo.
- Ventilación.
- Temperatura.

a) ALTA TENSIÓN.

Independientemente de las condiciones importantes señaladas con anterioridad, al instalar un banco en alta tensión deben observarse los siguientes puntos; se consideran capacitores de potencia de alta tensión aquellos cuyo voltaje nominal oscila entre los 2,400 volts y 19,200 volts, tomando cualquiera de los voltajes nominales entre fase y neutro de las líneas de distribución de hasta 34.5 KV.

Los capacitores para alta tensión se fabrican en unidades monofásicas de 50, 100, 150, 200, 300 y 400 KVARC y en unidades trifásicas de 300 KVARC, siendo las unidades monofásicas de 100 y 150 KVARC las de uso común.

Normalmente los bancos de capacitores de alta tensión se conectan en estrella, en ambas combinaciones de neutro flotante o neutro conectado a tierra, la conexión en delta se reduce prácticamente a los bancos instalados en líneas de 2,400 volts. La razón principal de esta práctica, es el buscar una mayor economía en los fusibles de protección del banco de capacitores.

a.1. Alambrado.- La conexión de un banco de capacitores con el neutro flotante o conectado a tierra, está sujeta a las consideraciones siguientes:

Conexión a tierra del sistema.- Los capacitores deben conectarse con el neutro flotante siempre que se instalen en sistemas aislados o con los neutros de los transformadores conectados a tierra a través de una impedancia. De esta manera se logra evitar el paso de corrientes armónicas excesivas a través de los capacitores.

A veces, conviene conectar el neutro a tierra, ya sea para facilitar el accionamiento de los fusibles, o bien para evitar sobrevoltajes excesivos en los momentos de conexión y desconexión de bancos de capacitores instalados en líneas de voltaje elevado; pero, esta conexión puede efectuarse únicamente cuando se instalan los capacitores en líneas conectadas a tierra en múltiples puntos, o en subestaciones con los neutros de los transformadores conectados a tierra directamente.

Aún así, la conexión con neutro flotante resulta recomendable incluso para las instalaciones de capacitores en sistemas ligados a tierra, ya que para ciertas relaciones de impedancia de secuencia cero o impedancia de secuencia positiva de estos sistemas, un fallo en las líneas puede originar sobrevoltajes peligrosos para el banco de capacitores, si su neutro se encuentra conectado a tierra.

Economía de los fusibles.- El costo de los fusibles de protección de un banco de capacitores está relacionado directamente con las corrientes de cortocircuito que se presentan al fallar un capacitor.

Éstas a su vez, están relacionadas con el tipo de conexión efectuada en los capacitores.

De utilizarse una conexión en estrella con una sola fila de capacitores por fase, tal como se muestra en la figura 53, la corriente de cortocircuito que se presente al fallar un capacitor depende, esencialmente, de que el neutro se deje flotando o conectado firmemente a tierra. En el primer caso, la corriente que fluye a través del capacitor fallado en cualquier fase, antes de que llegue a actuar el fusible, está limitada por la corriente de las otras 2 fases de la estrella y se reduce, aproximadamente, a un valor de 3 veces la corriente nominal de la fase.

Normalmente esto significa corrientes de fallo bastante bajas, que pueden interrumpirse con fusibles tipo expulsión de bajo costo. En el segundo caso, el fallo de un capacitor implica un fallo de fase a tierra, que si excede de 5000 amperes asimétricos, con capacitores de 100 KVARC o 6,000 amperes, con capacitores de 150 KVARC, debe de ser interrumpido por medio de fusibles de potencia, cuyo costo es bastante más elevado que el de los fusibles tipo expulsión.

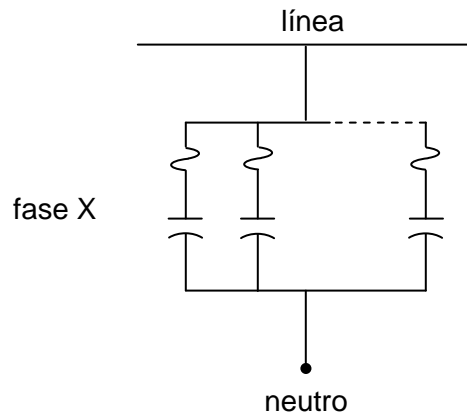


Fig. No. 53.- Conexión en estrella con una sola fila de capacitores por fase, apropiada para líneas hasta 34.5 kv .

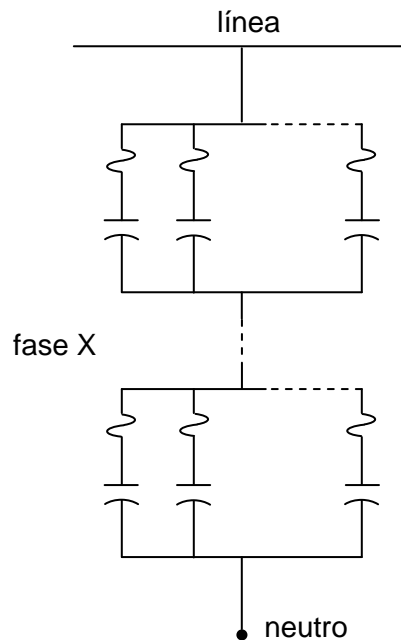


Fig. No. 54.- Conexión en estrella con varias filas de capacitores en serie por fase, apropiada para líneas de más de 34.5 KV.

Para el caso de utilizarse una conexión en estrella con varias filas de capacitores conectados en serie en cada fase, tal como se ve en la figura 54, la corriente de cortocircuito que se presenta al fallar un capacitor en cualquier fila de alguna de las fases, está limitada por las impedancias de las otras filas de capacitores conectados en serie con las otras fases.

Por lo que, cuando se usa este tipo de conexión la corriente que fluye a través de un capacitor fallado, antes de actuar el fusible, es poco variable respecto al hecho de dejarse el neutro flotante o conectado a tierra; en consecuencia, el costo de los fusibles resulta prácticamente independientemente del tipo de conexión del neutro. Cuando se instalan capacitores en paralelo en una misma fase, debe prevenirse que en caso de fallar un capacitor, además de la corriente de cortocircuito asociada con la red de alimentación, existe un flujo instantáneo de corriente a través de la unidad fallada, originada por las descargas de los capacitores conectados en paralelo con dicha unidad. Estas corrientes, aunque se amortiguan en milésimas de segundo, suelen ser de gran intensidad y frecuencia elevada, no pudiendo ser interrumpidas por fusibles tipo expulsión.

Este fenómeno no es de consecuencias graves si se tiene la precaución de no sobrepasar en capacitores en paralelo, una capacidad de almacenamiento de 10,000 watts-segundo, aproximadamente.

La energía almacenada en una instalación puede calcularse por medio de la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2} C V^2$$

Siendo C la capacidad total de los capacitores instalados y V el voltaje nominal de los capacitores multiplicado \sqrt{pdr} 2 y por 1.1. (Este último factor prevé que en el momento del fallo, los capacitores puedan estar operando al límite máximo de tolerancia de voltaje).

En la práctica se considera recomendable no sobrepasar de 3,000 KVARC la potencia reactiva instalada con capacitores en paralelo, si la protección se realiza con fusibles tipo expulsión.

Economía del dispositivo de conexión y desconexión.- Los voltajes de recuperación que se presentan entre los contactos del dispositivo de conexión y desconexión son más altos cuando se deja el neutro flotante que cuando se conecta a tierra.

Para voltajes de línea inferiores a 45 KV, esta diferencia no es significativa y no merece tomarse en cuenta, siempre que el banco de capacitores opere con desconectores o interruptores diseñados específicamente para operar con cargas capacitivas puras.

Para bancos de gran potencia reactiva o bancos conectados a líneas de más de 45 KV, el dispositivo de conexión y desconexión suele resultar más caro al tener que operar un banco con el neutro flotante.

Para voltajes de línea de más de 100 KV, la conexión del neutro a tierra resulta prácticamente imprescindible, por razones de costo del dispositivo de conexión y desconexión. Para niveles de voltaje superiores a 300 KV, los únicos interruptores disponibles en el mercado, son para usarse en bancos con neutro conectado a tierra.

Calibración de los relevadores de protección del sistema.- La conexión del neutro a tierra en un banco de capacitores instalado en una subestación puede afectar el sistema de protección por relevadores, debido a que introduce un nuevo camino por el que pueden fluir las corrientes de secuencia cero en el momento de un cortocircuito.

Pero, en la práctica, sólo en muy raras ocasiones ha significado esto una necesidad de reajustar los relevadores.

- a.2. Conexión a tierra del bastidor.-** En bancos de capacitores de pequeña potencia reactiva, se acostumbra conectar a tierra el bastidor independientemente de que el neutro se instale flotando o conectado a tierra.

En el caso de bancos de gran potencia reactiva, es normal que exista una cantidad considerada de superficies energizadas distribuidas por el banco y expuestas a la intemperie que aumentan la posibilidad de algún contacto accidental entre alguna fase y el bastidor.

En estos casos, es prácticamente común el instalar el bastidor aislado de tierra, con la finalidad de impedir algún posible cortocircuito de fase tierra.

- a.3. Resonancia con los transformadores.-** En la práctica cuando se instalan capacitores de alta tensión en el secundario de transformadores de potencia de las subestaciones, no existe peligro de resonancia con los transformadores, siempre que los capacitores operen con la carga en paralelo. Puede existir peligro de resonancia si los capacitores operan en vacío y la potencia reactiva instalada en capacitores es del mismo orden de magnitud que la potencia nominal de los transformadores. Sin embargo, estas circunstancias no suelen presentarse en la práctica y debe tratarse de que sean evitadas.

b) BAJA TENSIÓN

En el caso de instalación de capacitores en el lado de baja tensión, es conveniente tomar en cuenta lo siguiente:

- b.1. Alambrado.-** Los capacitores de potencia para baja tensión suelen encontrarse en el mercado en forma de unidades trifásicas, con un voltaje nominal que oscila entre 216 y 600 Volts; considerándose voltajes nominales los siguientes: 230 ó 240 Volts, 460 ó 480 Volts y 575 ó 600 Volts. La potencia reactiva de estas unidades varía según una amplia gama de valores comprendidos, normalmente entre 1 y 50 KVARC.

Normalmente, las unidades trifásicas traen de fábrica una conexión interna en delta, de igual manera cuando se usan unidades monofásicas también se conectan en delta, instalándose en bancos de 3 unidades o múltiplo de 3. La razón de utilizar esta conexión preferentemente es la de aprovechar al máximo el dieléctrico con que están contruidos estos capacitores, aplicándoles el máximo voltaje que sea posible.

En baja tensión el voltaje nominal de los capacitores es más alto (del 5 al 10%) que el voltaje nominal de la línea a la que se conectan, esto es para prevenir las elevaciones del voltaje que pueden producirse al desconectar los capacitores en paralelo con motores de inducción, especialmente, en los casos en que la potencia reactiva del banco de capacitores instalado sea superior a la adecuada, por añadidura los capacitores suelen ser diseñados de forma en que sean capaces de soportar sobretensiones de hasta un 10% de su voltaje nominal, a fin de prevenir la

elevación local de voltaje ocasionada por los mismos capacitores en su punto de instalación y las posibles fluctuaciones del voltaje de línea.

Los capacitores de potencia de baja tensión se conectan siempre en paralelo entre sí, cuando una unidad trifásica o tres monofásicos no son suficientes para obtener la potencia reactiva necesaria. El banco de capacitores así formado se conecta, a su vez, en paralelo con la carga que se pretende corregir. Físicamente, los capacitores se colocan en una hilera formando un agrupamiento compacto, pero respetándose las distancias mínimas entre unidades que recomienda el fabricante.

La corriente nominal del cableado, equipos de conexión y desconexión, cuchillas desconectoras, etc., deben ser, como mínimo, con una capacidad de 135% de la corriente nominal del banco, con excepción de los fusibles que en general, deben elegirse con una corriente nominal mínima del 165% de la corriente del banco.

En casos especiales en que debido a la existencia de corrientes armónicas relativamente altas en el punto de instalación, la corriente total que toma el banco llegue a ser superior al 135% de su corriente nominal, el cableado, equipo de accesorios del banco deben elegirse con una corriente nominal superior a éste límite mínimo referido.

En baja tensión, los capacitores de potencia suelen llevar resistencias internas de descarga que garantizan que el voltaje entre bornes baja menos de 50 Volts en un minuto después de haber sido desenergizado el capacitor. Si un capacitor no llevase instaladas estas resistencias internas, es necesario prever la instalación de unas resistencias externas equivalentes o asegurarse de que el capacitor va a funcionar en paralelo con el bobinado de un motor, un transformador o un equipo análogo, a través del cual pueda descargarse con una velocidad apropiada al quedar desenergizado.

- b.2. Conexión a tierra del bastidor.-** Aunque en el propio diseño del capacitor, las líneas de campo eléctrico originadas dentro del mismo capacitor inician y terminan dentro del mismo, no es posible evitar que también se establezca un campo eléctrico hacia el exterior del aparato y en consecuencia, que el tanque del capacitor se convierta en una superficie equipotencial de dicho campo. Por este motivo resulta necesario el conectar a tierra el tanque del capacitor, ya que si se le

mantiene aislado de tierra, puede quedar cargado a un potencial distinto a cero, creándose el peligro de producirse una descarga eléctrica si se le toca.

- b.3. Compensación de motores de inducción.-** La demanda de potencia reactiva de un motor de inducción suele variar con las condiciones de carga, consecuentemente, cuando se compensa individualmente este tipo de motores, el capacitor o banco de capacitores instalado no debe ajustarse a las condiciones de plena carga, ya que esto podría originar un exceso de potencia reactiva cuando se opere un motor en condiciones de baja carga o en vacío.

Por otro lado, cuando se desconecta un motor de inducción al que se le han instalado capacitores, la tensión entre bornes no baja rápidamente a cero, esto es debido a que la corriente de descarga de los capacitores mantiene un cierto campo magnético en las bobinas del motor, induciendo una tensión de autoexcitación mientras el motor sigue girando por inercia.

En estos casos, si los capacitores están excedidos en potencia reactiva, esta tensión puede alcanzar valores considerablemente más altas que la tensión nominal del motor, poniendo en peligro tanto el aislamiento del motor como a los capacitores mismos. Para evitar estos problemas, debe procurarse que la potencia del banco de capacitores no exceda las necesidades de potencia reactiva del motor para la marcha en vacío.

Corrigiendo el factor de potencia al 100% para la marcha en vacío, puede obtenerse un factor de potencia de plena carga del orden del 95% sin que exceda en ningún momento la demanda de potencia reactiva del motor. (Ver tabla No. 14).

Cuando para el arranque del motor se utilizan arrancadores estrella-delta puede ocurrir que al cambiar de conexión en el arrancador, la pérdida de sincronismo entre la tensión de la red, produzca una fuerte autoexcitación del motor en el momento de restablecerse el contacto, originando con ello, sobretensiones excesivas que pueden dañar las bobinas del motor.

Para evitar este problema, existen en el mercado arrancadores especiales para operar motores con capacitores. Sin embargo, en la práctica esto puede hacerse sin problemas si se observa lo siguiente:

En motores de potencia inferior a los 7.5 H.P., el problema no es grave y se resuelve conectando el banco de capacitores en serie con los devanados del motor, esto crea la necesidad de contar con resistencias de descarga (ver figura No. 55)

Potencia del motor en HP	Velocidad de sincronismo del motor en RPM					
	3,600	1,800	1,200	900	720	600
10	2.5	4	4	5	5	7.5
15	2.5	5	5	7.5	7.5	10
20	5	5	5	7.5	10	12.5
25	5	7.5	7.5	10	10	15
30	7.5	10	10	10	12.5	15
40	10	10	10	12.5	15	17.5
50	12.5	12.5	12.5	15	20	22.5
60	15	15	15	17.5	22.5	25
75	17.5	17.5	17.5	20	27.5	30
100	22.5	22.5	22.5	25	35	37.5
125	25	27.5	27.5	30	40	47.5
150	32.5	35	35	37.5	47.5	55
200	42.5	42.5	42.5	45	60	67.5

TABLA No. 14.- *Potencia reactiva máxima del banco de capacitores para compensar motores trifásicos de inducción tipo abierto, en KVAR.*

Potencia del transformador en KVA	Voltaje de la línea en KV		
	5/13	15/23	25/34
25	2	2.5	3
50	3.5	5	6
75	5	6	7
100	6	8	10
160	10	12.5	15
250	15	18	22
315	18	20	24
400	20	22.5	28
630	28	32.5	40

TABLA No. 15.- *Potencia reactiva necesaria en capacitores para compensar transformadores, en KVAR*

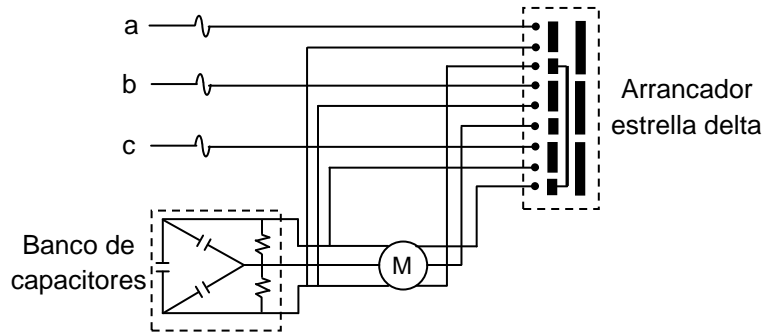


Fig. No. 55.- Conexión de capacitores en paralelo con un motor de potencia inferior 7.5 H.P., con arrancador Estrella Delta Normal.

- En motores de potencia entre 7.5 y 25 H.P. pueden instalarse los capacitores en paralelo con el devanado del motor (figura No. 56), de esta forma puede producirse una descarga rápida a través de dichos arrollamientos y por lo tanto, puede prescindirse de las resistencias de descarga.
- En motores de potencia nominal superior a los 25 H.P. los capacitores deben conectarse con un arrancador adicional, una vez que el arrancador ha pasado a la posición delta (ver figura No. 57).

b.4. Compensación de transformadores.- Cuando se quiere corregir el factor de potencia de un transformador, por medio de capacitores instalados en el lado de baja tensión, debe procurarse que la potencia reactiva de los capacitores no sea mayor que el 10% de la potencia nominal del transformador. De esta forma se evitan problemas de resonancia y se reducen las pérdidas de energía del transformador cuando éste funcione en vacío.

La tabla No. 16 nos da una orientación sobre la potencia reactiva que debe instalarse en capacitores en función de la potencia nominal del transformador y el voltaje de línea

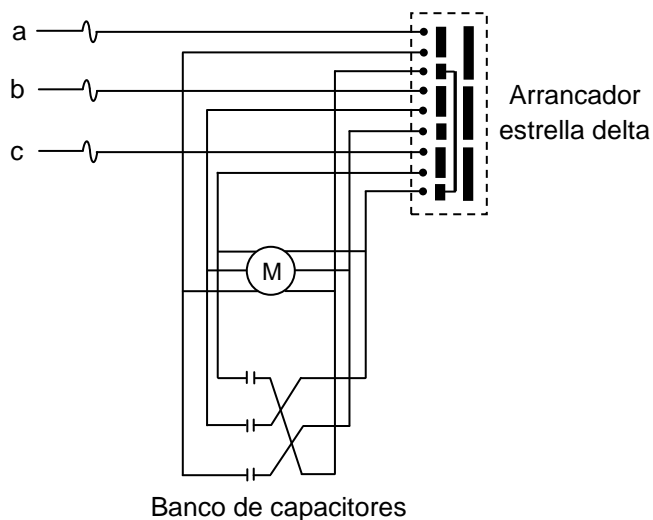
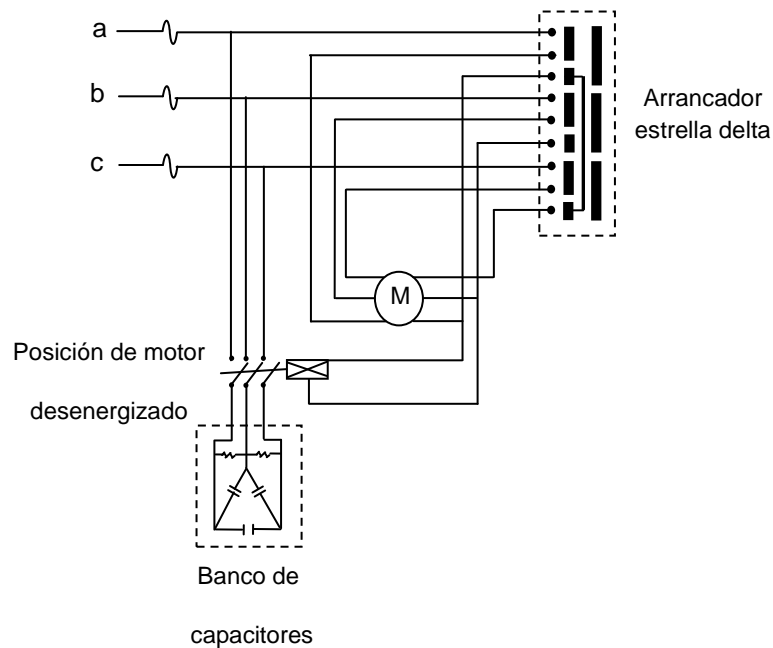


Figura No. 56.- Conexión de capacitores en paralelo con un motor de 7.5 a 25 HP, con arrancador estrella delta normal.

Figura No. 57.- Conexión de capacitores en paralelo con un motor de más de 25 HP, con arrancador estrella delta normal.



3.4.4. BANCOS DE CAPACITORES FIJOS O DESCONECTABLES

Se denominan bancos de capacitores fijos aquellos que quedan conectados permanentemente a la línea y para los cuales no se prevén más que algunas operaciones de conexión y desconexión al año. Normalmente se conectan a través de cuchillas des conectoras o cuchillas cortacircuitos fusibles.

Los bancos fijos se instalan preferentemente bajo las siguientes circunstancias:

- a) Cuando la demanda de potencia reactiva de la carga que se pretende compensar es poco variable.
- b) Cuando se pretende reducir pérdidas por efecto Joule, o bien, aumentar la capacidad de carga de transformadores o generadores, contándose con una carga global poco variable

c) Cuando se trata de elevar los niveles de voltaje en líneas eléctricas.

Se denominan bancos de capacitores desconectables aquellos que están planeados para entrar y salir de operación frecuentemente, ya sea en forma automática o manual, normalmente se operan por medio de desconectadores diseñados especialmente para operar con cargas capacitivas puras.

Los bancos desconectables se instalarán principalmente bajo las circunstancias siguientes:

a) Cuando se pretende compensar cargas fuertemente variables, ya sea con la finalidad de compensar el factor de potencia, reducir pérdidas eléctricas o aumentar la capacidad de carga del sistema.

b) Cuando se trata de mejorar la regulación de voltaje en líneas eléctricas.

Al compensar cargas industriales no es raro encontrarse con la necesidad de instalar bancos de capacitores divididos en una sección fija y varias secciones desconectables, capaces de entrar y salir de operación según las variaciones de la carga.

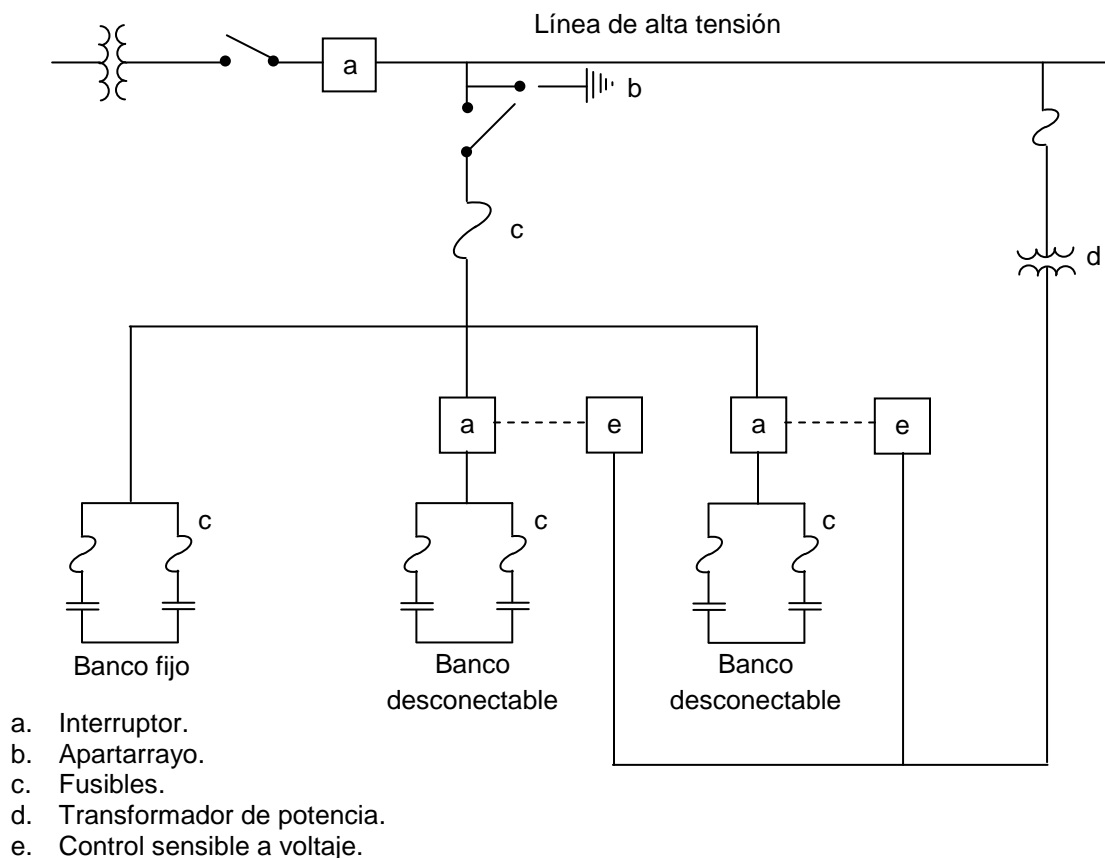


Figura No. 58.- Banco de capacitores de potencia en alta tensión dividido en una sección fija y dos secciones desconectables, operadas automáticamente.

3.4.5. PROTECCIÓN Y CONTROL DE CAPACITORES

Normalmente la falla de un capacitor de potencia lleva implícita un corto circuito entre sus placas (considérese que un capacitor de 150 KVARC en alta tensión está formado por un dieléctrico de pocas milésimas de espesor y una superficie de 200 m² aproximadamente), con un arqueo que descompone su dieléctrico formando un gas de cloruro de hidrógeno gaseoso, el cual es sometido a presión por el calentamiento producido por el mismo arco eléctrico; el cual puede llegar a hacer explotar el tanque del capacitor si no existe un medio adecuado de interrumpir el corto circuito en un tiempo suficientemente pequeño.

La posibilidad de estos fallos hace imprescindible que en cualquier instalación de capacitores de potencia, ya sea de alta o baja tensión, se planee una protección adecuada, la cual tiene el objetivo más que el de proteger a los capacitores, el de mantener la continuidad del servicio y proteger al personal y al equipo de las posibles consecuencias provocadas por la falta de un capacitor; por ello enunciaremos a continuación las diferentes formas de protección de los capacitores.

a) Protección por medio de fusibles.

La protección más económica para los capacitores de potencia, es sin duda los fusibles, los cuales deberán ser elegidos de forma de que cumplan los requisitos siguientes:

- Mantener la continuidad del servicio, evitando la salida de operación de algún circuito por falla ocurrida en el capacitor.
- Evitar que la falla de un capacitor pueda causar daño a otros capacitores del mismo banco, a otros equipos instalados en la proximidad del banco o accidentes personales.
- Proporcionar una indicación visual de la unidad fallada, en caso de protección individual o de la fase en que ocurrió el fallo en caso de protección en grupo.

Para elegir el fusible destinado a proteger un capacitor o un grupo de capacitores, deberán de tenerse en cuenta los siguientes datos:

- El voltaje nominal del fusible debe de ser el adecuado al voltaje de la línea en que se va a instalar de modo que en el momento de presentarse la falla del

capacitor, el voltaje que aparezca sobre el fusible no sea superior a su voltaje nominal.

- Debe procurarse que la corriente nominal del fusible exceda en un 65% como mínimo a la corriente nominal del capacitor que se pretende proteger.

De esta forma se prevé que el fusible no falle por el paso de un nivel de armónicas todavía admisible por los capacitores, ni por las corrientes transitorias ocasionadas en las operaciones de conexión y desconexión del banco de capacitores. En conexiones en delta pueda reducirse este factor de seguridad hasta el 50%.

- La capacidad interruptiva del fusible debe ser superior a la corriente de falla del capacitor.

En las instalaciones más usuales con una sola fila de capacitores en paralelo por fase, esta corriente de fallo depende esencialmente del tipo de conexión efectuada en los capacitores.

Para la conexión en delta, la corriente de fallo coincide básicamente con la corriente de corto circuito de fase a fase del sistema, en el punto en que está instalado el banco.

Para la conexión estrella con neutro a tierra, la corriente de fallo coincide con la corriente de fallo de fase a tierra del sistema en el punto de instalación del banco.

Para la instalación estrella con neutro flotante, la corriente de fallo en uno de los capacitores suele resultar más baja que la corriente de fallo obtenida con las conexiones anteriores.

En bancos con varias filas de capacitores conectados en serie (conexión serie - paralelo), la corriente de fallo de un capacitor fallado en una de las filas, está limitada por la impedancia de las otras filas y no varía tan significativamente con el tipo de conexión (ver tablas No. 16 y 17) al elegir la capacidad interrumpida del fusible debe considerarse como tal, para fusibles en alta tensión 1.16 veces la corriente asimétrica de falla del capacitor y 1.4 veces para fusibles en baja tensión.

Cuando se eligen fusibles para capacitores en AT, es necesario coordinar las características de fusión del fusible con las curvas de probabilidad de ruptura del tanque del capacitor, para asegurar que no habrá una ruptura violenta del tanque. Cuando las corrientes de fallo de un capacitor en AT es mayor de 4,000 amperes asimétricos capacitores de 25 o 50 KVARC, mayor de 5,000 amperes para capacitores de 150 o 200 KVARC, no pueden usarse fusibles tipo expulsión para la protección de ésta instalación en particular, ya que existe un peligro inminente de que se produzca la ruptura violenta del tanque antes de que opere el fusible. En estos casos debe de utilizarse fusibles de potencia.

Los fusibles tipo expulsión tampoco resultan adecuados cuando se instalan en paralelo un número de capacitores tal que su capacidad de almacenamiento de energía exceda a los 10,000 joules. Para estos casos debe de utilizarse también, fusibles de potencia que además de interrumpir corrientes de alta frecuencia son de alta velocidad en su respuesta.

Tabla No. 16.-Corriente de fallo de un capacitor y sobrevoltaje producido por el fallo de desconexión de una unidad, en un banco de capacitores conectado en estrella con neutro flotante, con varias filas de capacitores en serie por fase.

Número de filas en serie	Número mínimo de unidades en cada fila	Corriente de un capacitor fallado en la formal	Sobrevoltaje ocasionado por la desconexión de un capacitor en tanto por ciento
1	4	12.0	9
2	8	12.0	9
3	9	11.6	9.5
4	9	10.8	10
5	10	11.5	10
6	10	11.0	10
7	10	11.0	10
8	10	10.9	10
9	11	11.9	Menos que 10
10	11	11.8	menos que 10
11	11	11.7	menos que 10
12	11	11.6	menos que 10
13	11	11.6	menos que 10
14	11	11.5	menos que 10
15	11	11.5	menos que 10
16	11	11.5	menos que 10

b) Protección por relevadores.

La protección por relevadores se basa principalmente en el desbalanceo de voltajes y corrientes que aparecen en el banco en el momento de fallar un capacitor o desconectar un capacitor. Este consiste fundamentalmente en un desconectador o juego de desconectadores capaces de operar el banco de capacitores con carga, un juego de transformadores de potencial o de corriente y un juego de relevadores que al captar una señal de desbalanceo predeterminada envía una señal de apertura al desconectador sacando de operación al banco de capacitores en el momento que alcanzan condiciones de desbalance críticas.

TABLA No. 17.- Corriente de fallo de un capacitor y voltaje producido por el fallo y desconexión de una unidad, en un banco de capacitores conectado en estrella con neutro a tierra, con varias filas de capacitores en serie por fase.

Número de filas en serie	Número mínimo de unidades en cada fila	Corriente de un capacitor fallado en la formal	Sobrevoltaje ocasionado por la desconexión de un capacitor en tanto por ciento
1	1	Corto de fase a tierra	Nulo
2	6	12	9
3	8	12	9
4	9	12	9
5	9	11.2	9.8
6	9	10.8	10.0
7	10	11.7	9.4
8	10	11.4	9.5
9	10	11.2	menos que 10
10	10	11.1	menos que 10
11	10	11.0	menos que 10
12	10	10.9	menos que 10
13	20	10.8	menos que 10
14	11	11.8	menos que 10
15	11	11.8	menos que 10
16	11	11.7	menos que 10

Control de capacitores.

La operación automática de los capacitores desconectables se efectúa por medio de controles sensibles a una magnitud física, cuya fluctuación a lo largo del tiempo determina los momentos que deban entrar o salir de operación. Los elementos básicos de un control automático son:

- Un elemento que detecta los cambios de la magnitud física o variable de control, a la que el control es sensible.
- Un juego de contactos capaces de iniciar la operación de cierre o de apertura del desconectador, operados por el elemento sensible cuando la variable de control alcanza ciertos valores predeterminados.
- Un medio de ajustar los valores predeterminados de la variable de control para los que deben operar dichos contactos.
- Un retardo de tiempo, muchas veces ajustable, entre el momento en que la variable de control ha alcanzado su valor de operación y la orden final de operación.

Actualmente existen un sinnúmero de controles, entre los que podemos enumerar los siguientes:

a) Control de voltaje.

Son los controles de uso más común en la operación automática de bancos de capacitores en donde el elemento sensible consiste en un voltímetro capaz de abrir o cerrar los contactos que inician la operación del desconectador del banco. Operan generalmente a 120 volts y pueden usarse en lugares donde el voltaje desciende al menos 4 volts.

b) Control de corriente.

Se usan principalmente en líneas reguladas, en las zonas donde los controles de voltaje no operan satisfactoriamente.

El transformador de corriente que alimenta al elemento sensible de estos controles (un amperímetro) debe ser instalado entre los capacitores y la carga de modo que en cualquier momento, el control reciba la señal de corriente total que demanda la carga. De esta manera, los capacitores pueden entrar en operación en los periodos de máxima carga.

Si el control se instalara entre los capacitores y la fuente, al entrar en operación el banco de capacitores disminuirá la corriente que detecta el control y volverían a salir de operación los capacitores, produciéndose un “bombeo” del control.

c) Control de voltaje compensado con corriente.

Estos controles cuentan con un elemento sensible a voltaje, compensado con otro elemento sensible a la corriente. Cuando las corrientes en las líneas se mantienen a un cierto valor predeterminado, el control actúa como un simple control de voltaje. Sin embargo, cuando la corriente de la línea sobrepasa dicho valor, actúa un regulador que cambia la calibración del elemento sensible a corriente y hace entrar en operación a los capacitores. Estos se mantienen conectados mientras la corriente siga excediendo el valor predeterminado, a no ser que el voltaje de la línea suba a un valor suficiente como para volver a cambiar la calibración del elemento sensible a voltaje, restableciendo las condiciones iniciales.

Una ventaja importante de estos controles con respecto a los anteriores, es que si en condiciones de baja carga se presenta un descenso de voltaje, debido a alguna perturbación en las líneas, los capacitores pueden entrar en operación tendiendo a subir el voltaje. De esta manera los capacitores operan cuando más se les necesita.

d) Control de kilovares.

Sirven para limitar a un valor tan pequeño como sea conveniente el suministro de potencia reactiva de los generadores, reduciendo al máximo las pérdidas eléctricas y las caídas de voltaje en las líneas, o relevando la máxima capacidad de generación y transmisión del sistema. El elemento sensible de estos controles es un medidor de potencia reactiva, que puede originar la conexión de los capacitores cuando la potencia reactiva de los generadores a la línea sube un cierto límite prefijado.

e) Controles de tiempo.

Se utilizan en líneas cuyas necesidades de potencia reactiva se presenta como una función bien establecida en las horas del día.

Aunque el costo es relativamente bajo, presentan problemas que ha provocado que su uso se reduzca, en primer lugar, si la carga de la línea se reduce debido a alguna circunstancia imprevista, puede ser necesario sacar de servicio los capacitores manualmente para impedir elevaciones de voltaje excesivas, además durante un apagón prolongado es necesario volver a calibrar la secuencia de operación de los relojes de todos los controles instalados.

f) Controles de temperatura.

Pueden ser muy útiles donde exista una marcada relación entre las necesidades de reactivos y la temperatura ambiente. Este puede ser el caso de las zonas en que la carga principalmente corresponde a equipos de aire acondicionado.

g) Control de pasos múltiples.

Se utilizan para el control de bancos de capacitores divididos en secciones desconectables, tanto en alta como en baja tensión. En alta tensión, se trata normalmente de grandes bancos de capacitores cuya potencia reactiva debe ser dividida en varios pasos, a fin de que el suministro de potencia reactiva por medio de capacitores no sobrepase en ningún momento a las necesidades de la carga, sin que por otra parte, tampoco quede excesivamente abajo. En baja tensión, suele ser un voltímetro o un amperímetro, o un medidor de energía reactiva. Cada control puede accionar un cierto número de secciones, operadas por contactores individuales. En la práctica, el número de secciones no puede sobrepasar un cierto valor (8 o 10) a fin de evitar que se presenten “bombeos” de valor.

4. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE LA PLANTA TRITURADORA INDUSTRIAL TACC.

4.1. ANTECEDENTES TÉCNICOS.

Las trituradoras de piedra son máquinas que se utilizan para la fabricación del pedrín comercial, utilizado en la industria de la construcción con el propósito de la fabricación de los materiales necesarios en las fundiciones de concreto, para lo cual son tres los tamaños comerciales, $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ ", 1", en conjunto con el cemento y la arena. Estos materiales son básicos en la rama de la ingeniería civil y la construcción.

La clasificación adecuada de los tamaños es la segunda función después de la molienda, por ello, a las trituradoras de piedra también se les llama molinos de piedra. La trituración se realiza por medio de dos mordazas, a una se le llama mordaza primaria y a la otra mordaza secundaria. Esto depende de la robustez de las máquinas, que va de la mano con el tamaño de la piedra.

La clasificación es muy importante, puesto que la trituradora separa los distintos tipos de tamaño, a través de una zaranda o clasificadora, la cual basa su funcionamiento en la vibración, depositándolos en distintas regiones en forma de conos.

La transportación del material de un lugar a otro en la trituradora se realiza por medio de bandas transportadoras, al igual que el transporte hacia los depósitos finales de almacenamiento.

4.2. ANÁLISIS DE REACTIVOS Y CÁLCULO DE BANCO DE CAPACITORES.

REPORTE TÉCNICO

CORRECCIÓN FACTOR DE POTENCIA

INDUSTRIA
TACC

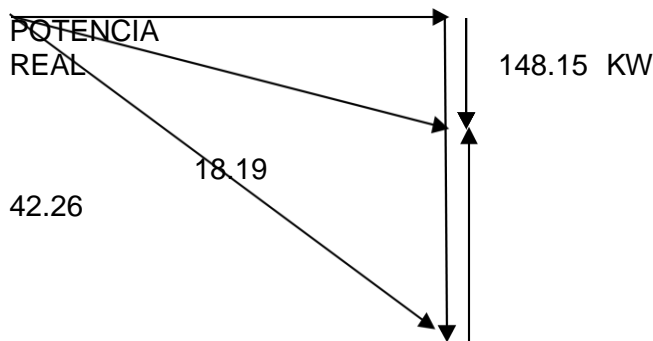
PLANTA TEAPA, TAB.

ÁREA TRITURADORA NUEVA
SUBESTACIONES: 750 KVA

MES	DEMANDA (KW)	F.P.(%)
dic-07	159.00	88.37
ene-08	189.00	87.73
feb-08	181.00	87.78
mar-08	218.00	88.95
abr-08	190.00	91.63
may-08	83.00	89.74
jun-08	126.00	88.28
jul-08	224.00	80.45
ago-08	117.00	85.43
sep-08	46	51.04
oct-08	76	52
nov-08	103	34.13
dic-08	214	36.65
PROMEDIOS	148.15	74.01

VALORES CRÍTICOS

DEMANDA (KW)	FP (%)
46	51.04
76	52
103	34.13
214	36.65



POTENCIA REACTIVA
Q2 = 48.70 KVAR

Q3 = 85.91 KVAR

Q1 = 134.61 KVAR

LA CORRECCIÓN AL 95% SE LOGRA ADICIONANDO

85.91 KVAR

EL BANCO DE CAPACITORES COMERCIAL PRÓXIMO ES:
OPCION MÁS ADECUADA

90.00 KVAR

2	BANCOS CAPACITORES	40	KVAR
1	BANCO DE CAPACITOR PARA MOTOR 100 HP	10	KVAR
LA CORRIENTE DEL CAPACITOR ES:		52.49	AMPERES
CONDUCTOR Y MEDIO DE DESCONEXIÓN (460-24)		70.86	
EL INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO NECESARIO ES:		3X100	AMPERES
CALIBRE DE CABLE NECESARIO:	(TABLA 310.16)	2	AWG
CONDUCTOR DE TIERRA FÍSICA:	(TABLA 250-95)	6	AWG
	RECOMENDADO	4	AWG

FORMULÓ
ING. JUAN JOSÉ
ARREOLA
ACOSTA

ANÁLISIS DE SITUACIÓN

Los valores marcados como críticos se manifestaron en la instalación debido a que el banco de capacitadores automático de 250 kvar marca ABB, estuvo fuera por un trabajo de mantenimiento inadecuado que desprogramó el control automático.

Por esta razón durante dichos meses el equipo no estuvo operando y por ello se tuvieron multas por bajo factor de potencia desde el mes de septiembre.

Cabe hacer notar que aún con el banco operando el cálculo de la corrección del factor de potencia el año fue de 87% lo cual originó también cobros por multas por estar abajo del 90% exigido por la CFE.

TRABAJOS EFECTUADOS

Se realizó una programación completa del equipo revisando cada uno de los elementos de control y fuerza que estaban instalados.

El equipo estaba bloqueado con valores desajustados y sin tener una configuración adecuada a la planta trituradora.

Después de la programación y ajuste se hizo la puesta en servicio quedando en operación de manera satisfactoria con las restricciones en la corrección contempladas por el cálculo inicial.

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA PARA AJUSTE DE LA PLANTA INDUSTRIAL TACC

Se propone efectuar una corrección del factor de potencia para llevar dicho factor por lo menos al 95% y obtener una bonificación del 2% sobre el consumo de energía

obviamente que los valores serán superados en la práctica debido a que los cálculos son conservadores, y de acuerdo a la experiencia se han obtenido valores arriba del 98%.

ANÁLISIS DE SITUACIÓN

Los valores marcados como críticos se manifestaron en la instalación debido a que el banco de capacitadores automático de 250 kvar marca ABB, estuvo fuera por un trabajo de mantenimiento inadecuado que desprogramó el control automático.

Por esta razón durante dichos meses el equipo no estuvo operando y por ello se tuvieron multas por bajo factor de potencia desde el mes de septiembre.

Cabe hacer notar que aún con el banco operando el cálculo de la corrección del factor de potencia el año fue de 87% lo cual originó también cobros por multas por estar abajo del 90% exigido por la CFE.

TRABAJOS EFECTUADOS

Se realizó una programación completa del equipo revisando cada uno de los elementos de control y fuerza que estaban instalados.

El equipo estaba bloqueado con valores desajustados y sin tener una configuración adecuada a la planta trituradora.

Después de la programación y ajuste se hizo la puesta en servicio quedando en operación de manera satisfactoria con las restricciones en la corrección contempladas por el cálculo inicial.

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA PARA AJUSTE DE LA PLANTA INDUSTRIAL TACC

Se propone efectuar una corrección del factor de potencia para llevar dicho factor por lo menos al 95% y obtener una bonificación del 2% sobre el consumo de energía obviamente que los valores serán superados en la práctica debido a que los cálculos son conservadores, y de acuerdo a la experiencia se han obtenido valores arriba del 98%.

ACCIONES POSTERIORES PARA SEGURIDAD.

Para seguridad de la instalación una vez corregido el factor de potencia adecuada mente se ha de efectuar un estudio de armónicos para instalar filtros de armónicas que eviten daño a los capacitores, variadores de velocidad y la instalación misma.

Instalando los filtros de manera puntual se ha de obtener seguridad y una corrección del factor de potencia, además de bonificación por este concepto.

Es importante señalar que siempre se debe contar con la participación de personal altamente capacitado y actualizado para evitar problemas de operación y pagos.

4.3. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS.

Los armónicos son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

La aparición de corrientes y/o tensiones armónicas en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros.

Las soluciones a dicho problema se realizan en forma jerarquizada; primero en forma particular, resolviendo el problema de inyección de armónicos por parte del usuario al sistema (diseñando y ubicando filtros en el lado de baja tensión, usando el transformador como barrera); y segundo, resolviendo el problema en forma global, buscando reducir las pérdidas y mantener los niveles armónicos por debajo de los límites permitidos, en este caso, se trata de un problema de optimización donde se determina la ubicación de los compensadores (condensadores, filtros pasivos, filtros activos). Independientemente del tipo compensador utilizado para reducir los niveles de armónicos en el sistema o en el usuario, se debe analizar la forma en que el compensador afecta a la impedancia al variar la frecuencia, esto con el fin de determinar resonancia serie (baja impedancia al paso de corriente) y paralelo (baja admitancia a la tensión de alimentación).

FILTROS PASIVOS PARA COMPONENTES ARMÓNICAS

El uso de filtros para componentes armónicas en sistemas potencia tiene dos objetivos: Servir de sumidero para las corrientes y tensiones armónicas; y proveer al sistema toda o parte de la potencia reactiva que éste necesita. Los filtros pasivos pueden ser, según el propósito particular que se persigue, de dos tipos:

- Filtros Series.
- Filtros Shunt o paralelo.

Los Filtros Series evitan el paso de una componente de frecuencia particular, desde el contaminante hacia alguna componente de la planta o parte del sistema de potencia, mediante la presencia de una gran impedancia serie a la frecuencia especificada. Estos constan de un inductor y un capacitor en paralelo que se posicionan en serie a la parte de la red que se desea proteger. Los Filtros Shunt o paralelo proveen un paso alternativo de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, y consisten en una rama resonante serie, compuesta por elementos RLC en conexión paralela con el sistema de alimentación, entre otros.

El filtro paralelo presenta mayores ventajas que el filtro serie porque: Es más económico, sólo transporta las corrientes armónicas para las que fue sintonizado, proporciona una parte de la potencia reactiva al sistema.

4.4. ESPECIFICACIÓN DE FILTROS DE ARMÓNICOS.

El primer aspecto a tener en cuenta, es cual es objetivo que se pretende mediante la incorporación de un equipo de corrección del factor de potencia y/o filtrado de armónicas, teniendo en cuenta las características del tipo de carga a compensar, habiendo efectuado previamente las tareas de medición de parámetros eléctricos y armónicas tanto de tensión como de corriente.

Para mejorar el factor de potencia, en instalaciones donde existen cargas distorsivas en un porcentaje inferior al 20% del total de cargas presentes, se pueden utilizar capacitores para uso interior, o para intemperie de servicios liviano y pesado y bancos de capacitores del tipo convencional, tanto fijos como automáticos. En el caso que se supere el 20% de cargas no lineales, pero inferior al 50%, generalmente los filtros anti-resonantes cumplen satisfactoriamente su función de compensadores del factor de potencia y al mismo tiempo reducen a niveles aceptables la distorsión armónica total THD, quedando a cargo del proyectista la evaluación del grado de sintonía adecuado, la potencia del equipo de filtrado fijo, y la potencia de equipo de filtrado automático y el dimensionamiento de los escalones y pasos con que dispondrá. Cuando las cargas no lineales superan el 50%, en la mayor parte de los casos se recurre a filtros sintonizados en los cuales el proyectista deberá efectuar un dimensionamiento "a medida", teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

Lo indicado anteriormente puede resumirse en el siguiente cuadro: Están equipados con: Línea preferida Standard, para 3x400V - 50Hz. Ordenes de armónicas, contando el filtro con tantas ramas de filtrado como armónicas se quiera filtrar. Valor máximo de corrientes armónicas a filtrar, discriminando su orden. Valor de THD requerido, el cual no deberá superarse, recurriendo a un análisis mediante simulación de cargas, teniendo en cuenta las mediciones efectuadas, que en este caso serán objeto de un tratamiento más exhaustivo. Están equipados con: Línea preferida Standard, para 3x400V - 50Hz. Ordenes de armónicas, contando el filtro con tantas ramas de filtrado como armónicas se quiera filtrar. Valor máximo de corrientes armónicas a filtrar, discriminando su orden. Valor de THD requerido, el cual no deberá superarse, recurriendo a un análisis mediante simulación de cargas, teniendo en cuenta las mediciones efectuadas, que en este caso serán objeto de un tratamiento más exhaustivo.

Filtros anti-resonantes fijos:

Capacitores cilíndricos antiexplosivos construidos con film de polipropileno total auto-regenerable (MKP) y/o film de polipropileno mas papel metalizado (MPP) con sistema de protección por sobre presión y resistores de descarga incorporados.

Reactores anti-resonantes trifásicos construidos con chapa de acero magnético de bajas pérdidas, secado e impregnados con resina al vacío.

Contactores equipados con relevo térmico.

Fusibles de alta capacidad de ruptura para protección contra cortocircuitos.

Gabinete adecuado para el grado de protección exigido por las condiciones ambientales donde el equipo será instalado.

Cableado de interconexión, forzadores de aire para ventilación, accesorios, etc.

AMORTIZACIÓN DE LA INVERSIÓN.

PROYECTO: CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.
CLIENTE: GRUPO INDUSTRIAL TACC GR CONSTRUCCIONES
 PLANTA TEAPA TABASCO

OBJETIVO:
***CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA PARA
 OBTENER EL USO EFICIENTE DE LA
 ENERGÍA EN LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS***

SERVICIOS ANALIZADOS:

	MEDIDOR	CONSUMO	
1 SUBESTACION 750 KVA	60RP95	\$149,201.56	MENSUAL

ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN:

***2 BANCOS DE CAPACITORES FIJOS EN S.E. 750 KVA
 1 BANCO DE CAPACITORES PARA MOTOR DE 100 HP***

ESTUDIO DE AMORTIZACIÓN DE LA INVERSIÓN

SUBESTACION PEDESTAL 750 KVA

	KW	
	DEM	ACTUAL
CONSUMO ACTUAL (ULTIMO RECIBO)	214.00	\$ 129,740.12
	\$ KW-H (TARIFA HM)	COSTO ESPERADO
	BASE INTERMEDIA PUNTA	
COSTO ACTUAL	0.92600 1.11340 1.73600	\$ 129,740.12

CARGO POR ENERGÍA	\$34,483.54
CARGO POR DEMANDA	\$37,162.90

AHORRO POR CORRECCION DEL FP

	<i>(MULTA A ELIMINAR)</i>	\$60,471.50	MENSUAL
BONIFICACIÓN POR FP CORREGIDO	2%	\$689.67	
AHORRO TOTAL POR CORRECCIÓN FP		\$61,161.17	
AHORRO ANUAL COSTO CORRECCIÓN F.P. AMORTIZACION		\$733,934.05	
		\$59,276.60	COTIZACIÓN EM.780/08
		0.0808	AÑOS
		0.97	MESES

NOTA: **ESTE TIEMPO ES RELATIVO DEBIDO A QUE NO SE CONSIDERA EL INCREMENTO DE LAS TARIFAS ELÉCTRICAS MENSUALES NI AJUSTES DE LA INFLACION**

BIBLIOGRAFÍA

- El capacitor de Potencia
Industrias Balmec
- El Capacitor
Instituto Franco Mexicano.
- Manual del Ingeniero
Ralph G. Hudson.
- Fundamentos de electrotécnica
M. Kusnetsov.
- Electricidad Básica, Serie Uno al siete.
Harry Mileaf
- Medidores de energía eléctrica en baja y alta tensión.
Comisión Federal de Electricidad.
- Curso Nacional de Medición, Tomo V
Comisión Federal de Electricidad.
- Conelec, Manual Eléctrico.
Industrias CONELEC.

PÁGINAS WEB:

- www.anser.com.ar/factordepotencia.htm
- www.acee.com.mx/correcciondefactordepotencia.htm
- www.cfe.gob.mx
- www.itlp.edu.mx/publica/tutoriales/instalacelectricas/
- www.c-mos.com
- www.ingelectricista.com.ar/cosfi.htm
- www.cvingeneria.cl/serv_ahorro_energía.htm