



Contadores de Energía Eléctrica.

Generalidades:

La aplicación más importante de los instrumentos de inducción es como contadores de energía.

La función de un contador de energía es integrar en el tiempo la potencia eléctrica consumida por los clientes de la empresa prestataria del servicio eléctrico. Por esto es impropio el nombre de medidor de energía, ya que no mide sino que cuenta cantidad de energía.

La energía utilizada o suministrada se puede determinar de la siguiente manera: cuando de una línea se recibe una corriente “i” bajo la tensión “u”, donde tanto “u” como “i” pueden variar en el tiempo (lo habitual es que “i” varíe y “u” se mantenga constante), la potencia instantánea es $p = u.i$ y la energía A utilizada entre los instantes t_1 y t_2 se puede expresar:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} p . dt = \int_{t_1}^{t_2} u . i . dt$$

Se distinguen 3 tipos de energía a saber:

a) Energía eléctrica activa

$$E_{act} = \int_{t_1}^{t_2} u . i . \cos \phi . dt \quad [\text{KWh}]$$

b) Energía eléctrica reactiva

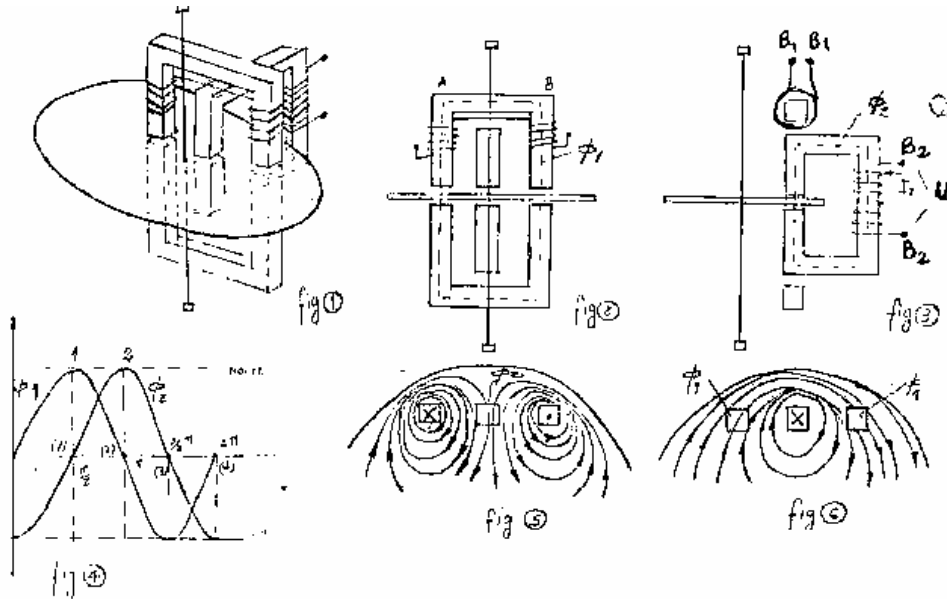
$$E_{react} = \int_{t_1}^{t_2} u . i . \sin \phi . dt \quad [\text{KVARh}]$$

c) Energía eléctrica aparente

$$E_{ap} = \int_{t_1}^{t_2} u . i . dt \quad [\text{KVAh}]$$

Generación del Par Motor.

Vamos a ver físicamente como se produce el par motor, partiendo de dos campos alternos originales por dos electroimanes.



Observando el esquema de un instrumento de inducción vemos que posee dos electroimanes excitados con corrientes alternas, y dispuestos según las figuras 1, 2 y 3. En el entrehierro de estos dos electroimanes gira un disco de aluminio. Cada electroimán genera un flujo alterno cuyo valor instantáneo denominaremos ϕ_{t1} y ϕ_{t2} . Estos flujos atraviesan el disco generando corrientes inducidas o de torbellino o también llamadas de Foucault, como muestran las figuras 5 y 6.

Veamos este fenómeno más en detalle:

El flujo es variable en el tiempo, es decir que por la ley de Lenz-Faraday, produce una f.e.m. sobre el disco:

$$e_{d1} = -\frac{d\phi_{t1}}{dt} \qquad e_{d2} = -\frac{d\phi_{t2}}{dt}$$

Como el disco es una espira cerrada aparecerá en él corrientes inducidas i_1 e i_2 respectivamente, como muestran las figuras 5 y 6, donde se ha separado las acciones de cada electroimán. Los sentidos de éstas corrientes se determinan mediante la regla de Maxwell o mano derecha.

El ϕ_{t1} e i_1 están a 90° eléctricos.

Las corrientes de Foucault generadas por el ϕ_{t1} recorren todo el disco y también lo hace las corrientes generadas por el flujo ϕ_{t2} . De modo que i_1 pasa por el otro campo magnético (ϕ_{t2}) e i_2 pasa por ϕ_{t1} . Entonces la corriente i_1 reaccionará con el flujo ϕ_{t2} e i_2 con ϕ_{t1} , provocando un par motor cada uno, puesto que son magnitudes independientes entre si.

De acuerdo a la ley de Biot-Savart aplicada a nuestro caso:

$$F = B.l.i$$

$$[Nw]=[T].[m].[A]$$

$$\text{ó } \vec{F} = l(\vec{i} \wedge \vec{B})$$

l: longitud de un conductor (disco)

i: corriente inducida en el disco

B: campo uniforme aplicado sobre el disco y generado por el electroimán

F: fuerza que aparece en el disco



Sentidos de las corrientes inducidas según la polaridad instantánea de los campos magnéticos.

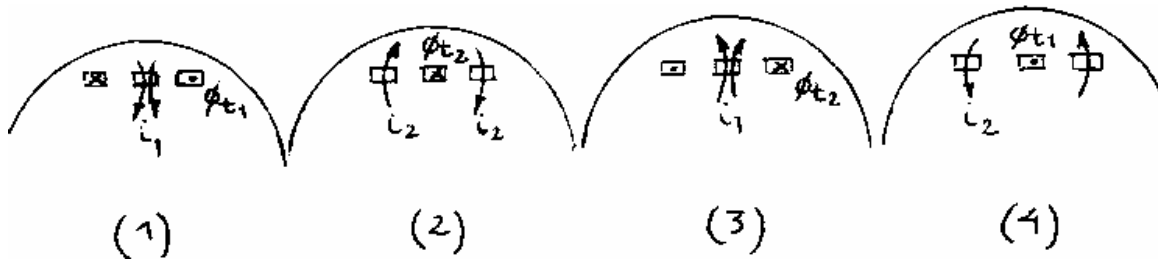


Figura (A)

Fuerzas que aparecen en el disco según sean los sentidos de las corrientes inducidas y de polaridad de los campos.

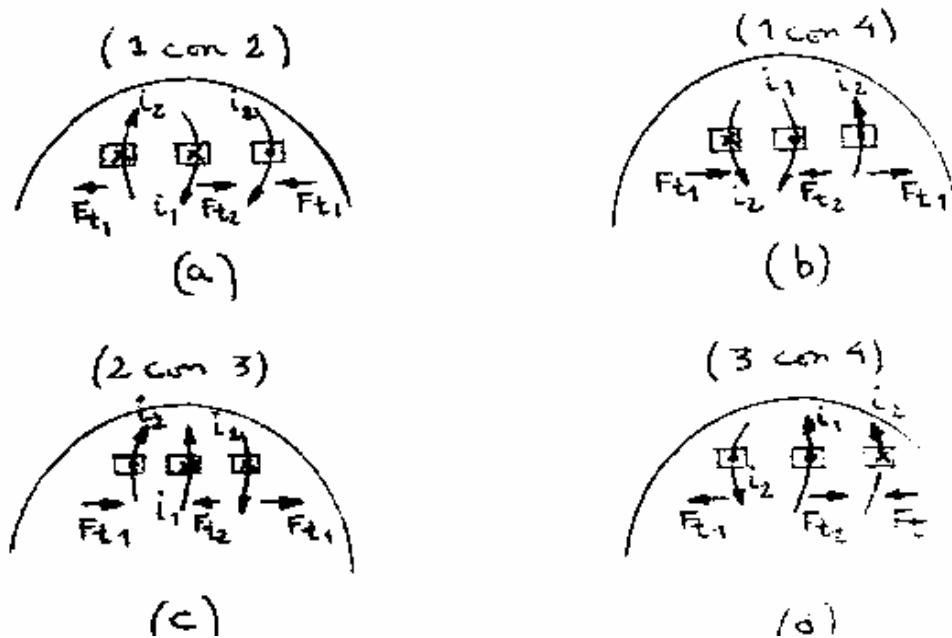
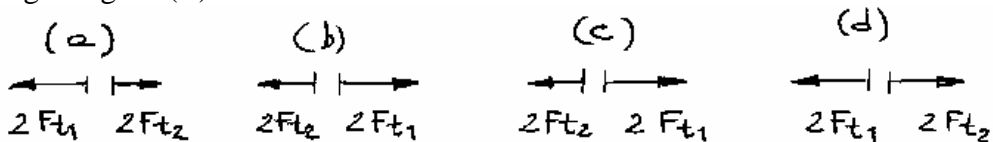


Figura (B)

Conclusión

a) El valor instantáneo de la fuerza aplicada al disco es la resultante en cada instante de la diferencia geométrica (o vectorial) de las fuerzas F_{t1} y F_{t2} .

Según figura (B):



2. F_{t1} porque son dos corrientes inducidas (i_2) provenientes de las dos piernas de ϕ_{t2} , que pasan debajo de ϕ_{t1} .

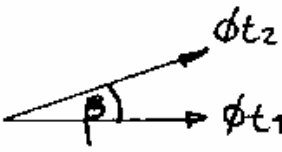
b) Son vectores que están en el mismo plano físico, están en fase eléctricamente, pero tienen sentidos opuestos y módulos diferentes. Esto último es debido a que provienen de distintos flujos y corrientes inducidas:



$$|f_{t1}| \neq |f_{t2}| \Rightarrow |i_2| \neq |i_1|$$

Expresión del Par Motor.

Sean i_1 la corriente que circula por el electroimán (1) e i_2 la que circule por el electroimán (2). Estas corrientes crean flujos magnéticos ϕ_{t1} y ϕ_{t2} en valores instantáneos:

$$\text{flujos} \begin{cases} f_{t1} = f_1 \cdot \text{sen} \omega t \\ f_{t2} = f_2 \cdot \text{sen}(\omega t + b) \end{cases}$$


Es el ángulo de desfase entre ϕ_{t1} y ϕ_{t2} . y se debe a las características propias de los dos bobinados distintos y que a su vez están excitados con parámetros distintos.

Estos flujos inducen en el disco de aluminio según Lenz-Faraday:

$$\text{f.e.m en el disco} \begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{df_{t1}}{dt} = -N_1 \cdot f_1 \cdot \omega \cdot \cos \omega t \\ e_2 = -N_2 \frac{df_{t2}}{dt} = -N_2 \cdot f_2 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + b) \end{cases}$$

Si el disco de aluminio posee una impedancia $Z_d = R_d + jX_d$, despreciamos X_d en compensación con R_d tendremos una corriente inducida en el disco debida a cada f.e.m. (corrientes de Foucault):

$$\text{Corrientes inducidas en el disco} \begin{cases} i_1 = \frac{e_1}{R_d} = -\frac{N_1}{R_d} \cdot f_1 \cdot \omega \cdot \cos \omega t = K_1 \cdot f_1 \cdot \omega \cdot \cos \omega t \\ i_2 = \frac{e_2}{R_d} = -\frac{N_2}{R_d} \cdot f_2 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + b) = K_2 \cdot f_2 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + b) \end{cases}$$

Las fuerzas producidas por estas corrientes con sus propios campos productores son nulas:

$$\vec{F} = l(\vec{i} \wedge \vec{B}) \quad |\vec{F}| = l \cdot i \cdot B \cdot \text{sen} iB$$

$i \cdot B = 90^\circ$, además $i = f \cdot (\cos \omega t)$ y $B = f \cdot (\text{sen} \omega t)$ al integrar en un período se anulan ambas funciones y $F=0$

Las corrientes inducidas se extienden también por la zona de influencia de los polos vecinos. Entonces se generarán fuerzas por la interacción de la corriente inducida por un electroimán y el flujo del otro electroimán, es decir i_1 con ϕ_{t2} e i_2 con ϕ_{t1} .



Los valores instantáneos de las fuerzas son:

$$\text{Fuerzas} \begin{cases} F_{t1} = K_3 \cdot i_1 \cdot f_{t2} \\ F_{t2} = K_4 \cdot i_2 \cdot f_{t1} \end{cases}$$

Y los sentidos resultaran de la aplicación de la regla de la mano izquierda.

$$F_{t1} = \mathbf{w} \cdot K_3 \cdot K_1 \cdot f_1 \cos \mathbf{wt} \cdot f_2 \cdot \text{sen}(\mathbf{wt} + \mathbf{b})$$

$$F_{t1} = K_5 \cdot \mathbf{w} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \cos \mathbf{wt} \cdot \text{sen}(\mathbf{wt} + \mathbf{b})$$

Su valor medio correspondiente al período completo es:

$$F_1 = K_5 \cdot \mathbf{w} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \text{sen} \mathbf{b} \quad \text{donde } \phi_1 \text{ y } \phi_2 \text{ son valores eficaces}$$

Por analogía: $F_2 = K_6 \cdot \mathbf{w} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \text{sen} \mathbf{b}$

Entonces:

$$\text{Fuerzas} \begin{cases} F_1 = K_5 \cdot \mathbf{w} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \text{sen} \mathbf{b} \\ F_2 = K_6 \cdot \mathbf{w} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \text{sen} \mathbf{b} \end{cases}$$

Los arrollamientos se conectan de modo tal que ambas fuerzas provoquen giros del disco en el mismo sentido:

$$F = F_1 + F_2 = K_7 \cdot \mathbf{w} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \text{sen} \mathbf{b}$$

El par motor es proporcional a la fuerza:

$$Mm = F \cdot d$$

$$Mm = K_8 \cdot f \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \text{sen} \mathbf{b}$$

Cuando el instrumento va conectado a un sistema donde sabemos que la frecuencia varía muy poco, podemos considerar la constante

$$\boxed{Mm = K_9 \cdot f \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \text{sen} \mathbf{b}} \quad (1) \text{ Ecuación del par motor para un instrumento de inducción.}$$

Se requiere que los dos flujos ϕ_1 y ϕ_2 tengan algún corrimiento de fase entre ambos.

La expresión (1) que es general para estos instrumentos nos permite ver, que son instrumentos de doble excitación y como muestra la figura 3 tienen doble entrada (bornes B_1 y bornes B_2). Esto nos dice que el aparato puede utilizarse en forma voltimétrica excitado uno de los electroimanes con tensión y el otro con la corriente, en cuyo caso la expresión (1) se convierte en (2)

$$f_2 = K_{10} \cdot U$$

$$f_1 = K_{11} \cdot I$$

$$\boxed{Mm = K_{12} \cdot U \cdot I \cdot \text{sen} \mathbf{b}} \quad (2)$$



El circuito de la figura 7 indica como se conectará este instrumento para una medición voltimétrica como estamos analizando.

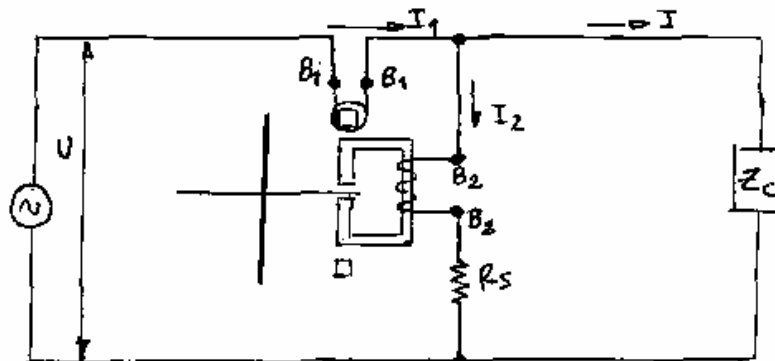
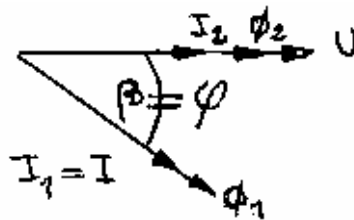


Figura (7)

R_5 = resistencia limitadora



En el caso de la figura (7) al circuito del electroimán de tensión cuyos bornes son B_2 se ha agregado una elevada resistencia antiinductiva con el objeto de mantener en fase la corriente I_2 con la tensión.

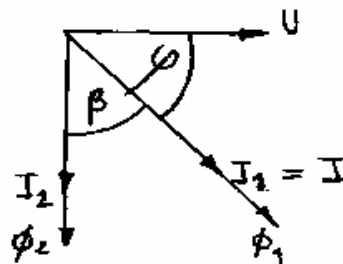
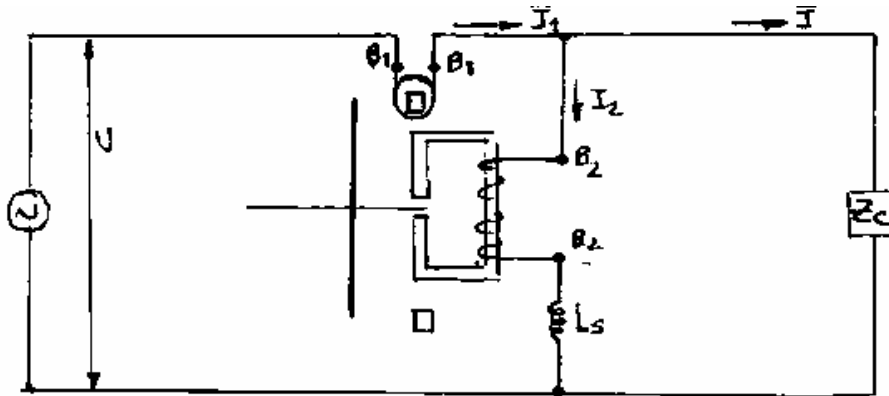
En ese caso el ángulo que se ha denominado β es el φ ángulo de desfase entre tensión e intensidad en el circuito debido a la impedancia de carga Z_c . En estas condiciones el par Mm de la expresión (2) se convierte en:

$$Mm = K_{13} \cdot U \cdot I \cdot \text{sen } \beta \quad (3)$$

Y por lo tanto el instrumento será sensible a la potencia reactiva

$$Mm = K_{13} \cdot P_{\text{react}} \quad (4)$$

Para que este instrumento sea capaz de medir potencia activa es necesario desfasar 90° la corriente que excita el bobinado voltimétrico con respecto a la tensión de alimentación.



$$b = 90^\circ$$

$$\text{sen}(90 - j) = \cos j$$

$$Mm = K_{13} \cdot U \cdot I \cdot \cos j$$

$$\boxed{Mm = K_{13} \cdot P_{act}} \quad (5)$$

Contadores de KW-h y de KVAR-h.

Cuando estos instrumentos tienen que medir energía se construyen en forma de voltímetros y se posibilita que el disco gire mientras se está consumiendo energía en el circuito que se mide, es decir mientras esté excitado tanto el electroimán voltimétrico como el amperométrico. En este caso el ángulo total que gira el disco será proporcional a la potencia y al tiempo que se registra el consumo, vale decir el aparato indicará potencia por tiempo que es energía simplemente en función del ángulo que ha girado, es decir del número de vueltas que rota el disco, para lo cual este número de vueltas queda indicado por un dispositivo mecánico, que si bien en realidad cuenta vueltas tiene incluido la constante de proporcionalidad que permite leer directamente KW-h. Cuando ambos electroimanes están excitados aparece un par que llamaremos Mm que provoca la rotación del disco, pero si el sistema puede girar y sobre él actúa un par habrá aceleración angular actuando mientras este actuando el par y proporcional al mismo.

$$F = m \cdot a \text{ (Lineal)}$$

$$Mto = J \cdot g \text{ (Angular)}$$

$$g = \frac{Mto}{J} \text{ Como } J = \text{constante} = \frac{1}{K}$$

$$g = K \cdot Mto$$

$$\boxed{g_{disco} = K \cdot Mm} \quad (6) \quad \text{aceleración angular del disco}$$



$$Mm = K_{13} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi = K_{13} \cdot P_{act}$$

$$g_{disco} = K_{14} \cdot P_{act} \quad (7)$$

$$K_{14} = K \cdot K_{13}$$

Nos dice que si P_{act} es constante disco es constante y la velocidad crece indefinidamente.

La (7) nos dice que si este instrumento está conectado a un consumo $P = \text{Constante}$, el disco tendrá aceleración angular también constante y por lo tanto la velocidad crecerá indefinidamente debido a esa aceleración, en consecuencia cuando se comienza a medir la energía pese a permanecer la $P_{act} = \text{constante}$ en los primeros instantes el cuenta vueltas registrará lentamente, pero luego de un intervalo su velocidad será tan grande que un mismo número de KW-h corresponderá a muchas vueltas y por lo tanto da una indicación exagerada y totalmente inaceptable del contador. El problema reside en que **se debe cambiar la ley (7) por la ley (8)**

$$w_{disco} = K \cdot P_{act} \quad (8)$$

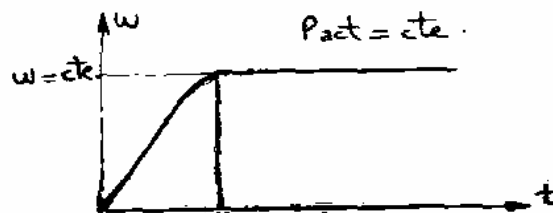
Para ello se coloca un imán o electroimán como freno ya que mecánicamente debe cumplirse

$$\text{El ángulo girado del disco } b_{disco} = w \cdot t$$

$$b_{disco} = K \cdot P \cdot t$$

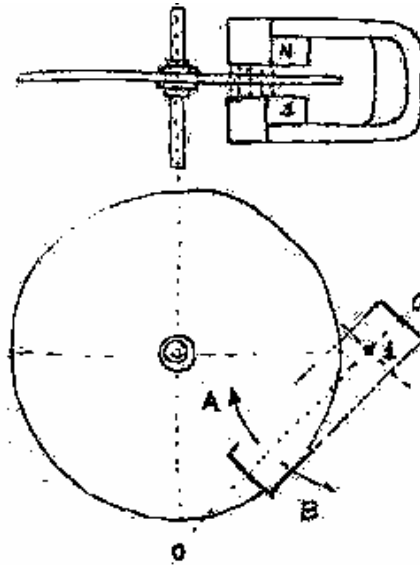
$$b_{disco} = K \cdot E \quad (9)$$

Para lograr la relación (9) es necesario que para cada potencia instantánea el disco tenga una velocidad de rotación instantánea proporcional (8), lo cual se logra mediante un par de amortiguamiento que se opone al movimiento con un valor proporcional a la velocidad del mismo. En estas condiciones cuando comienza a girar el disco. Este se irá acelerando por lo cual se va incrementando el par de amortiguamiento hasta que se logra el equilibrio entre el par motor Mm y el par de amortiguamiento y el disco cese de acelerarse continuando su rotación a velocidad angular constante mientras no cambie la potencia del circuito al cual mide. Es decir en los primeros instantes se cumple la ley (7) hasta que se logra el equilibrio que requiere la expresión (8) en forma de movimiento estacionario, vale decir a velocidad constante.





Par de amortiguamiento del imán permanente



Cuando el contador está en marcha el par motor está en equilibrio con el par de amortiguamiento producido por el imán permanente. Este par depende del flujo de ese imán y de la velocidad del disco en la zona de influencia del imán.

Al girar el disco corta líneas de fuerza e induce en el disco una f.e.m., E que provoca una corriente inducida (I), ya que el disco es una espira cerrada.

$$\left. \begin{aligned} E &= K_1 \cdot f \cdot v \\ I &= \frac{E}{R_d} = K_2 \cdot f \cdot v \end{aligned} \right\} \begin{aligned} R_d &= \text{resistencia del disco} \\ X_d &= \text{despreciable} \end{aligned}$$

Esta corriente origina un momento de torsión o par amortiguador en el disco opuesto al par motor.

$$M_{\text{amortig}} = K_3 \cdot I \cdot f = K_3 \cdot K_2 \cdot f^2 \cdot v$$

pero $f = cte$

$$\boxed{M_{\text{amortig}} = K_5 \cdot v} \quad v = \text{velocidad tangencial}$$

Con una determinada potencia constante el par motor es igual al par de amortiguamiento, siendo constante la velocidad angular del disco. El M_{amortig} depende de la **velocidad de la porción del disco abarcada por el imán**. Moviendo el imán se puede variar el M_{amortig} y con ello la velocidad angular del disco sin que varíe la potencia. En la posición indicada en la figura corresponde al máximo valor de M_{amortig} . Si giramos el imán alrededor del punto 1 en el sentido A disminuye M_{amortig} , ya que la velocidad es menor y en el sentido B también disminuye M_{amortig} . Porque el disco corta menos líneas de flujo.

Contraste de contadores de energía.



Este tema se refiere a la comparación de un contador desconocido con otro conocido y preferentemente patrón para conocer los errores del primero.

Existen varios métodos de contraste y la elección de un método depende del instrumental disponible, de la cantidad y de los tipos de medidores que hay que contrastar periódicamente, etc.

En general se emplean los siguientes métodos clásicos

- 1) Contraste por medio del contador patrón
- 2) Contraste por medio del vatímetro patrón y cronómetro
- 3) Contraste por medio de otros métodos

El contador patrón es un instrumento especialmente construido con el error prácticamente igual a cero.

El contraste de contadores mediante el contador patrón puede realizarse de 2 formas:

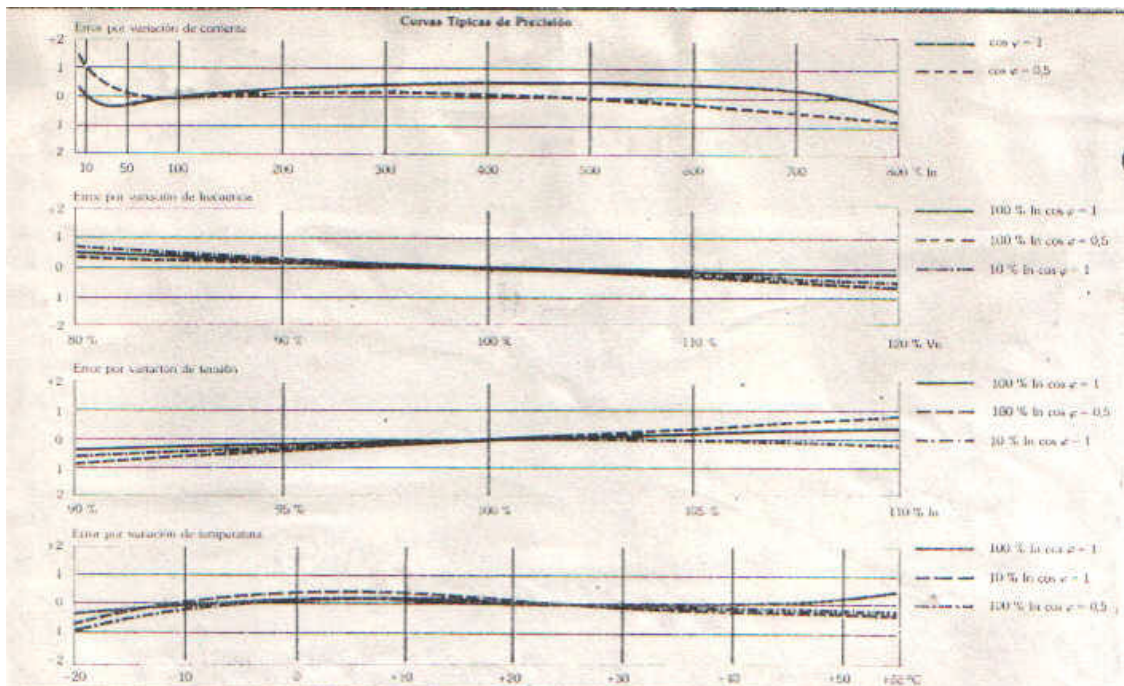
- a) cuando hay necesidad de verificar el medidor en el lugar de su instalación (in situ)
- b) en los laboratorios de medidas eléctricas o en laboratorios de contraste.

El contraste por medio de los métodos 1) y 2) se puede efectuar de 2 maneras

- a) con carga real, es decir utilizando la carga propia de la instalación
- b) con carga práctica

Según las normas el contraste se debe hacer con potencia nominal (100%) y fraccionada (50%, 25% y 10%) y con varios valores de factor de potencia.

También se debe verificar el contador de energía frente a las variaciones de frecuencia, de tensión y de temperatura, como lo indican las siguientes curvas típicas de precisión.



La conexión y la forma de efectuar el contraste y demás aspectos constructivos de los contadores se verá en el ensayo de laboratorio.

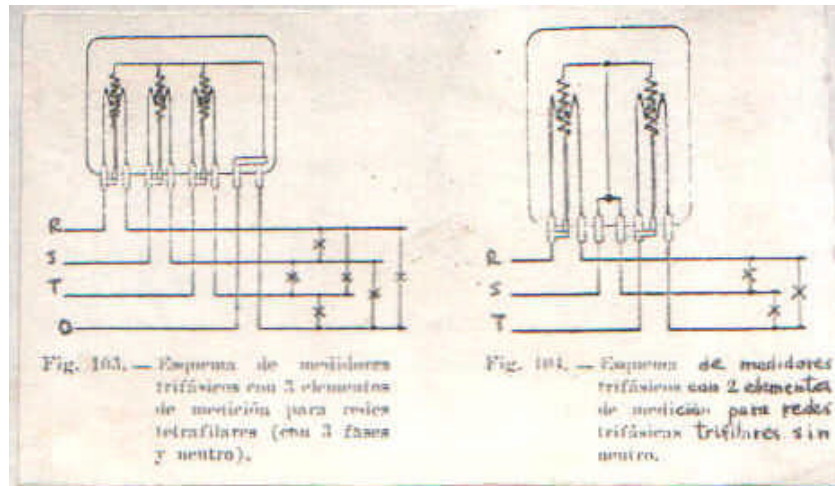


Contadores de energía activa trifásica.

Se construyen bajo el mismo principio de los contadores de inducción para corriente alterna monofásicos.

Su conexión se efectúa de acuerdo a 2 conexiones posibles:

- Contadores con 3 elementos de medición.
- Contadores con 2 elementos de medición.



Contadores con 3 elementos de medición.

Poseen 3 discos sobre el mismo eje, con un sistema motor aplicado sobre cada disco y un solo imán permanente.

Cada elemento (conjunto bobina de intensidad y tensión) de estos contadores, mide la energía activa que pasa por una fase, por lo que la energía total (trifásica) es la suma aritmética de la energía suministrada por los 3 circuitos monofásicos.

Estos contadores se aplican casi exclusivamente en las redes trifásicas con neutro conectado a tierra (baja tensión), para registrar energía trifásica o monofásica. Sirven por lo tanto, para medición de cargas equilibradas y desequilibradas. En cualquiera de estos casos el contador registra siempre correctamente. Claro está, que también podemos usar los contadores de 3 elementos de medición en las redes trifásicas trifilares (media y alta tensión), en cuya las conexiones tendrían que hacerse según el mismo esquema, pero sin conexión al neutro. Entonces, los circuitos de las 3 bobinas de tensión del contador no se cierran directamente con la red de distribución (como ocurre en baja tensión), sino forman un neutro ficticio.

Contadores con 2 elementos de medición.

Poseen 2 discos sobre el mismo eje, con un sistema motor aplicado sobre cada disco y un solo imán permanente.

Cada elemento de estos contadores, mide la energía activa proveniente de la corriente que circula por una de las fases del sistema trifásico y de la tensión compuesta entre estas fases y la otra que no tiene bobina de intensidad, por lo que la energía total (trifásica) es la suma algebraica de la energía registrada por cada elemento.



Este contador registra correctamente cargas monofásicas y trifásicas, aún cuando la carga trifásica sea desequilibrada y la carga monofásica conectada entre la fase S y cualquiera de las otras fases R y T.

Estos instrumentos se aplican actualmente en redes trifásicas trifilares (media y alta tensión) y antiguamente se lo usaba también en redes trifásicas de baja tensión sin neutro (distribución en triángulo).

Para intensidades (mayores de 50A) y tensiones (mayores de 1000V), estos contadores de 2 ó 3 elementos de medición, se los conecta por medio de T.I. y T.V.

Integrantes de la Cátedra :

Titular: Ing. Roberto Martínez

JTP: Ing. Eduardo Grosso

Ayudantes:

Ing. Pedro Pérez

Ing. Walter Javier Paris