

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



" REINGENIERÍA DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA
EN LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA"

POR

ING. VALENTIN ZAVALA BERNAL

TÉSIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

A 24 DE JUNIO DEL 2003

ZB

REINIGUNG
BENJAMIN
SCUBA
ASPERIO
DEIN
ACI
ON
FR
GTR

TM

Z5853

.M2

FIME

2003

.Z3

2003

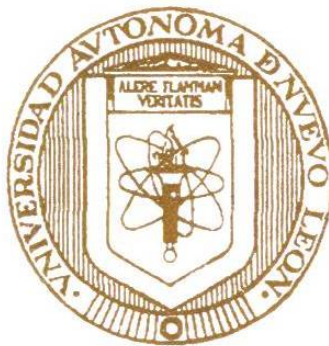


1020149863

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



“REINGENIERÍA DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA
EN LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA”

POR

ING. VALENTIN ZAVALA BERNAL

TÉSIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA

581467

TM
Z5853
.M2
FIME
2003
.Z3

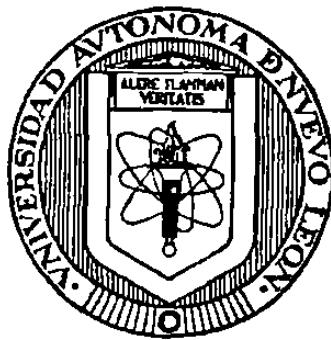


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**“ REINGENIERÍA DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA
EN LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA”**

POR

ING. VALENTIN ZAVALA BERNAL

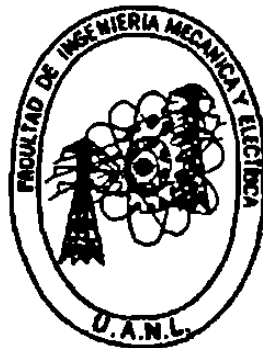
TÉSIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**“ REINGENIERÍA DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA
EN LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA”**

POR

ING. VALENTIN ZAVALA BERNAL

TÉSIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEON
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Post-grado

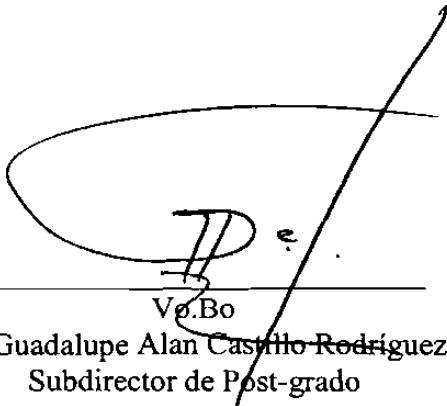
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis. “ **Reingeniería de la Instalación Eléctrica en la Escuela Superior de Ingeniería** ” realizada por el alumno **Valentín Zavala Bernal**, matrícula 1115165 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Sistemas Eléctricos de Potencia.

El comité de tesis


Asesor
Dr. Rogelio Ramírez Barradas


Coasesor
Dr. Fernando Betancourt Ramírez


Coasesor
Dr. Fernando Sánchez Tello


Vº.Bo
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
Subdirector de Post-grado

San Nicolás de los Garza, N.L., Julio de 2003

DEDICATORIA

A MI ESPOSA,

J. Narcedalia Montero Rodriguez de Zavala, mi compañera quien con su cariño y comprensión me apoya para continuar venciendo nuevas metas.

A MIS HIJAS

Gabriela Astrid

Lucia Anahi

Mariel Alejandra

Natalia Analia,

Con el deseo que sigan el camino de su formación educativa; para lograr la superación requerida en la vida

AGRADECIMIENTO

A MIS PADRES

Agapito Zavala Salazar (+), descanse en paz

Ciria Bernal Campirano (+), descanse en paz

Quienes me trajeron al mundo y me enseñaron el camino de la vida

A MIS HERMANOS

Por apoyarme y darme alientos para lograr mis anhelos en la vida, en especial a Samuel (+), descanse en paz, por comprenderme, apoyarme y conducirme.

A MIS AMIGOS

En especial aquellos que han contribuido en la formación de mi vida y me han dedicado algún tiempo para la conversación, y fraternizar.

AGRADECIMIENTO

A NUESTROS MAESTROS DE POST-GRADO

EN ESPECIAL AL ASESOR Y COASESORES DE ESTA TESIS,

DR. ROGELIO RAMÍREZ BARRADAS
DR. FERNANDO SÁNCHEZ TELLO
DR. FERNANDO BETANCOURT RAMIREZ

Quienes dedicaron su conocimiento tiempo y esfuerzo en la aplicación de metodologías, técnicas y una cultura para la aplicación en nuestra labor de vida.

A LOS COMPAÑEROS DE POST-GRADO,

Por su amistad y sus muestras abiertas al dialogo, fraternidad así como su apoyo en el trayecto de los estudios fijado por la U.A.N.L.

A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA Y EQUIPO DE APOYO EN TODAS SUS ÁREAS,

Por su apoyo, confianza y atenciones otorgadas para llevar a cabo mis estudios y este tema de tesis.

A TODOS, GRACIAS

Índice

	Pág.
Resumen	1
1.- Introducción	2
2.- Circuitos eléctricos de corriente alterna	5
2.1 Corriente alterna	
2.1.1 Introducción	
2.1.2 Periodo , frecuencia	8
2.1.2.1 Análisis	
2.1.2.2 Frecuencias industriales	
2.1.3 Formula de variación senoidal de la intensidad de la corriente	9
2.1.3.1 Análisis	
2.1.3.2 La intensidad de la corriente alterna	
2.1.4 Ley de Ohm	11
2.1.5 Condensadores	12
2.1.5.1 Introducción	
2.1.5.2 Importancia de los fenómenos de capacidad	
2.1.5.3 Utilización de los condensadores	
2.1.5.4 Clases de condensadores	
2.1.6 Inductancias	15
2.1.6.1 Campo magnético	
2.1.6.2 Fuerza electromotriz de inducción	
2.1.6.2.1 Ley de Lenz	
2.1.6.2.2 Consecuencias	
2.2 Inductancia y corriente alterna	16
2.3 Impedancia	18
2.3.2 Ley de Ohm Generalizada	
2.3.3 Resonancia	
2.4 Potencia	20
2.4.2 Desarrollo	
2.4.3 Potencia compleja	
2.4.4 Corrección del factor de potencia	
2.5 Solución de circuitos por el método de mallas	22
2.6 Circuitos de C.A. trifásicos	24
2.7 Potencia en circuitos trifásicos balanceados	
2.7.2 Conexiones y relaciones de potencia	
2.7.3 Medición de la potencia trifásica	
3.- Elementos generales de las instalaciones eléctricas	26
3.1 Objetivo	
3.2 Concepto de instalación eléctrica	
3.3 Elementos de una instalación eléctrica de baja tensión	27
3.3.1 Conductores eléctricos	
3.3.1.1 Generalidades	

3.3.1.2	Selección del calibre de conductores en baja tensión	
3.3.1.3	Número de conductores en un tubo conduit	
3.3.1.4	Cálculo de conductores por caída de voltaje	
3.4	Sistema trifásico a tres conductores	37
3.5	Utilización de los sistemas de distribución	38
3.5.1	Sistema monofásico a dos conductores	
3.5.2	Sistema trifásico a tres conductores	
3.5.3	Sistema trifásico a cuatro conductores	39
3.5.4	Caída de voltaje	
3.6	Canalizaciones eléctricas	42
3.7	Conectores para canalizaciones eléctricas	43
3.8	Accesorios adicionales	
3.9	Seguridad en instalaciones eléctricas de baja tensión	44
3.9.1	Introducción	
3.9.2	Línea de tierra	
3.9.3	Toma de tierra	45
3.9.3.1	Dependencia	
3.9.3.2	Algunos casos mas corrientes	
3.9.4	El riesgo de incendio	47
3.9.5	La sobrecarga	
3.9.6	El corto circuito	48
3.9.7	La avería de fase a tierra	
3.9.8	El arco eléctrico	49
3.9.9	Reacción en caso de corto circuito	
3.9.10	Desenganche para corriente de cortocircuito mínima	
3.9.11	Caída de tensión	50
4.-	Equipos y aparatos eléctricos en la escuela	52
4.1	La subestación eléctrica	
4.1.1	El transformador	54
4.1.2	Operación de los transformadores	58
4.1.3	Capacidad de carga de un transformador	60
4.1.4	Conexión de los transformadores	61
4.1.5	Capacitores para corrección del factor de potencia	67
4.2	Interruptores	73
4.2.1	Interruptores manuales	74
4.3	Tableros eléctricos	75
4.3.1	Tableros de distribución	80
4.4	Cuchillas fusibles	83
4.5	Apartarrayos	84
4.6	Transformador para instrumentos	86
4.7	Equipo de aire acondicionado	90
4.8	Alumbrado	106
4.9	Equipo de laboratorio para análisis del carbón	
4.10	Equipo centro de cómputo	

5.- Revisión Energética de la instalación eléctrica	107
5.1 Administración de la energía y revisión energética	
5.1.1 Auditoría energética	113
5.1.2 Administración de la energía	
5.1.2.1 Facturas o cuentas por el servicio de energía eléctrica	121
5.2 Análisis del uso eficiente de la energía	130
5.2.1 Identificación de las posibilidades de ahorro de la energía	
5.2.2 Identificación de los mayores consumidores de energía	131
5.2.3 Planteamiento estadístico para el cálculo del consumo de energía	135
5.3 Resumen de costos	136
5.3.1 Presentación de resultados	
5.3.2 Informe financiero	137
6.- Conclusiones y recomendaciones	139
Bibliografía	142
Glosario	143
Autobiografía	144
Apéndice	145

Resumen

En esta tesis se analiza de manera detallada el comportamiento energético de la instalación eléctrica de la Escuela Superior de Ingeniería y se proponen una serie de medidas tendientes a mejorar la eficiencia en el funcionamiento global de la misma.

La motivación principal de este trabajo ha sido el concretar en acciones prácticas las ideas surgidas de un afán de superación, el cual, para ser más eficientes nos conduce a racionalizar el uso de la energía como uno de los factores más importantes para el logro de ésta meta.

En los capítulos iniciales se presentan las bases teóricas de los circuitos de corriente alterna, así como de las instalaciones y equipo eléctrico considerando tanto su aspecto constructivo y operativo como los aspectos de seguridad. Se presentan también los principios de diseño del sistema de aire acondicionado, que resulta de primordial importancia considerando el clima de la región donde se localiza la instalación.

El análisis detallado de las condiciones actuales de funcionamiento de la instalación eléctrica y las alternativas de mejora ocupan la parte central de este trabajo. Se presentan los datos reales de consumo energético así como los costos que este consumo involucra. Se describen las áreas de oportunidad para el ahorro de energía y se presentan conclusiones y recomendaciones para el logro de estos objetivos.

Se recomiendan cambios a las instalaciones que involucran la remodelación de diferentes áreas de trabajo. El análisis costo-beneficio permite concluir que a través de los ahorros en la energía consumida es posible recuperar la inversión en un lapso de 3.4 años.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Las industrias, empresas u organizaciones de servicio se hallan actualmente en un proceso continuo de cambios para lograr un funcionamiento mas eficaz y mantenerse dentro de la competencia. Esto implica disminuir costos, la costehabilidad es el resultado de la aplicación de métodos, para llevar a cabo mejoras que conduzcan a estándares de tiempo equitativo y a una motivación laboral con modernos sistemas de retribución. Se suma a esto lo que la Comisión Federal de Electricidad ha instituido con un premio nacional de ahorro de Energía Eléctrica, como un reconocimiento público anual a las empresas industriales, Comerciales o de servicios, así como a las instituciones Educativas o de investigación, que más se hayan destacado durante el año calendario inmediato anterior al del lanzamiento de la convocatoria, por los esfuerzos desarrollados y los logros obtenidos en el campo del uso eficiente y racional de la energía eléctrica con el consecuente ahorro.

Este trabajo fue elaborado para identificar las posibilidades de incrementar el uso eficiente de la energía, destacando y actualizando el material que establece estrategias específicas para fomentar y llevar a cabo la disminución de energía y hacer mas eficiente la instalación eléctrica de la Escuela Superior de Ingeniería. Dotar al personal administrativo, de una fuente de datos reales provenientes del resultado de las investigaciones.

El presente trabajo de tesis tiene el objetivo de fomentar y apoyar las mejoras que respecto a la disminución del consumo y demanda de energía eléctrica son necesarias desarrollar para que las instalaciones eléctricas hagan en forma optima su función, disminuyendo las pérdidas que por algún motivo pasaron desapercibidas en su

instalación original o que por el incremento natural de la carga fueron rebasadas. A la vez considerando los avances tecnológicos en materia de equipos y luminarias es necesario su evaluación para tomar la decisión de su arreglo o reemplazo siempre considerando su mayor eficiencia, estimando la enorme trascendencia que el ahorro de Energía Eléctrica encierra para la industrialización , diversificación de la economía, generación de empleos y para el desarrollo general del País.

Cada capítulo contiene material mejorado de acuerdo a los lineamientos que surgieron por los maestros asesores.

El capítulo 1 ilustra de una forma general la necesidad de la disminución del consumo y demanda de energía eléctrica que son necesarias desarrollar en las instalaciones eléctricas.

En el capítulo 2 se desarrollan los conceptos teóricos básicos de la electricidad para lograr de una forma condensada abarcar todas las bases necesarias para la comprensión de las instalaciones eléctricas.

El capítulo 3 trata el concepto genérico de instalación eléctrica su clasificación , los elementos que la componen y su funcionamiento; a la vez trata lo necesario que es una buena selección de los elementos y equipos basado en cálculo y catálogos para que reúna las condiciones deseadas de acuerdo a la naturaleza de la carga, del tipo de energía disponible y de los dispositivos de fabricación comercial.

El capítulo 5 se dan las bases para la administración de la energía identificando las posibilidades de incrementar su eficiencia estableciendo programas y elaborando medidas para su conservación.

Capítulo 6 se discute el punto de la racionalización de la energía

Capítulo 7 conclusiones y recomendaciones

Capítulo 8 bibliografías

Objetivo

Incitar a la Escuela Superior de Ingeniería a que revise y mejore sus instalaciones en búsqueda de una mayor eficiencia mediante la aplicación de técnicas y equipos mas avanzados, así, como a la utilización de equipos mas modernos, encaminados a reducir el consumo y demanda de la Energía Eléctrica; enfocándola a la verificación que el plan o estrategia de ahorro se oriente; mas que un ahorro indiscriminado; hacia la toma de decisiones, basadas en cifras y datos verificables, mas que en opiniones; hacia el ahorro económico no solo mejorando el balance energético, sino con perspectivas de mejorar los resultados en el futuro y ser mas realistas en las economías actuales.

El objetivo principal es identificar las posibilidades de incrementar el uso eficiente de la energía en la instalación eléctrica de la Escuela Superior de Ingeniería, el mejoramiento para compararla con los resultados propios obtenidos en un periodo anterior.

Capítulo 2

CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA

2.1 Corriente alterna

2.1.1 Introducción

Hoy más del 95% de la energía eléctrica utilizada por la industria y los hogares se produce en forma de corriente alterna. Esto no se debe primordialmente a ninguna superioridad de la corriente alterna sobre la continua en cuanto a su aplicación a fines domésticos e industriales. En realidad, hay muchos casos en los que la corriente continua es absolutamente necesaria para determinadas industrias, como los tranvías urbanos, los procesos electrolíticos, los motores de corriente continua son preferibles para los ascensores, prensas, mineros continuos y muchos accionamientos con velocidad variable.

Sin embargo en todos estos casos, la energía se produce y se transporta la mayoría de las veces en forma de corriente alterna y se convierte después en corriente continua.

Algunas de las razones de producir la energía en forma de corriente alterna es que puede producirse a tensiones relativamente altas, puede elevarse y reducirse fácilmente por medio de transformadores estáticos. Con ello es posible el transporte económico de energía como corriente alterna hasta distancias muy largas valiéndose de altas tensiones de transporte, lo que representa una gran ventaja, ya que el peso del conductor varía en forma inversa del cuadrado de la tensión, cuando la potencia, la distancia y las pérdidas admitidas no varían. Después es posible reducir con elevado rendimiento la tensión de transporte al alcanzar el punto de utilización de la energía.

Es posible construir generadores de corriente alterna de gran tamaño que giren a elevadas velocidades de modo que su costo de construcción y los gastos de explotación por kilowatt resulten reducidos, y estos generadores se adaptan perfectamente a turbinas motrices de elevada velocidad.

Para trabajar a velocidad constante, el motor de inducción de corriente alterna tiene mejor rendimiento que el de corriente continua, es mas barato y su fabricación es menos costosa, lo que se debe en parte al hecho de que el motor de inducción no tiene colector. Conviene, por la tanto, producir la energía eléctrica en forma de corriente alterna para poder utilizar motores de inducción.

Los elevados rendimientos de transporte que pueden alcanzarse con la corriente alterna, hacen que sea económico producir energía eléctrica en cantidades muy grandes en una central única para distribuirla sobre un extenso territorio. El alternador de gran tamaño tiene un rendimiento que puede alcanzar hasta un 98.5 % y aún, como las grandes calderas y turbinas de vapor requieren menos personal por kilowatt, las cargas de explotación por kilowatt- hora, referentes a trabajo y vigilancia, son pequeñas.

Por tales motivos, suele ser más económico producir energía eléctrica por medio de unidades grandes, transformarla en corriente continua, que producir directamente corriente continua en el propio lugar de su utilización.

Recordemos, no obstante, que los reducidos gastos de producción se contrarrestan, en parte por lo menos, por el costo de la distribución debido a la instalación de líneas, cables, subestaciones, maquinaria, etc., unidos a los gastos de personal de explotación y los de mantenimiento de la red de distribución.

La teoría y análisis de la corriente alterna se fundan en el empleo de una bobina que gira en un campo magnético uniforme a velocidad constante para generar una f.e.m. inducida que varía de una forma senoidal como se observa en la figura (2.1)

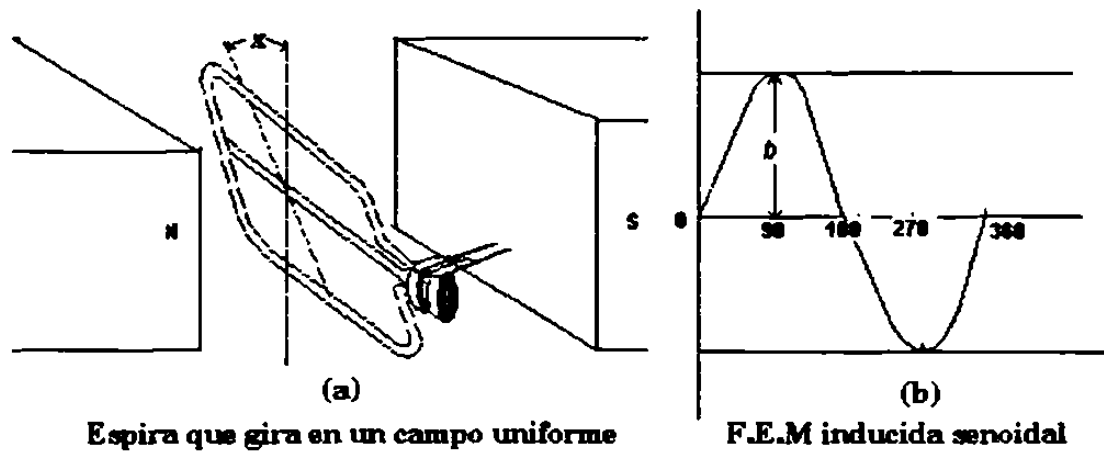


Fig.2.1. Espira que gira en un campo magnético uniforme

Cuya expresión viene dada por:

$$e = B l v \text{ sen } \theta \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

En la que :

B Es la densidad de flujo en (gauss o líneas/cm²)

l Es la longitud activa del conductor que corta el flujo en (cm)

v Es la velocidad relativa entre el conductor y el campo en cm/seg.

e Es la f.e.m. inducida en (volts)

2.1.2 Periodo; frecuencia

2.1.2.1 Análisis

Si el conductor de la fig. (2.1a) gira durante un tiempo (t) en segundos a partir de la posición 0^0 , habrá dado (st) revoluciones, o (ft) ciclos. Estando (s) en (r.p.m.) y (f) en periodos por segundo. Por lo tanto:

$$x = 2 \pi s t = 2 \pi f t \quad \text{radianes o } 360 f t \quad \text{grados}$$

Si la velocidad angular es (w) (en radianes por segundo), concluimos:

$$w = 2 \pi f \quad \text{radianes por segundo}$$

$$w = 360 f \quad \text{grados por segundo}$$

La frecuencia de un alternador depende del número de pares de polos frente a los cuales pasa la espira por segundo . Por lo tanto:

$$f = \frac{p}{2} s \quad \text{o sea} \quad f = \frac{P S}{120} \quad \text{periodos por segundo}$$

s velocidad en r. p. s.

S velocidad en r. p. m.

P numero de polos

2.1.2.2 Frecuencias industriales

Una compañía que suministra energía para luz y fuerza debe adoptar una frecuencia de 60 ciclos / seg. , porque a frecuencias menores por ejemplo a 25 ciclos/ seg. Las lamparas oscilaran de una manera inadmisibile y los transformadores para la frecuencia mas baja son mas voluminosos y pesados, además mas caros que los de frecuencia elevada. En cambio, una empresa que produzca energía únicamente destinada a fuerza puede adoptar la frecuencia de 25 ciclos/ seg. Esta frecuencia se utiliza en ferrocarriles para las locomotoras eléctricas en E.U.

2.1.3 Formula de la variación senoidal de la intensidad de la corriente

2.1.3.1 Análisis

En la curva de la fig. 2.1 (b) , el valor de la ordenada (y) en un punto cualquiera se puede hallar multiplicando b por el seno del ángulo correspondiente. Por lo tanto:

$$Y = b \text{ sen } x$$

Donde x esta expresado en grados

Si reemplazamos en esta ecuación x por su valor $2 \pi f t$ y $2 \pi f$ se reemplaza por w obtenemos la ecuación de la intensidad de la corriente alterna senoidal.

$$i = I_m \text{ sen } 2 \pi f t = I_m \text{ sen } w t$$

Donde

i es el valor de la corriente instantánea dado un instante t.

I_m es el valor máximo de la corriente

$W = 2\pi f$ velocidad angular en radianes/ seg.

2.1.3.2 La intensidad de la corriente alterna

Un amperímetro de corriente continua, conectado para determinar el valor de la intensidad de la corriente alterna, debe indicar cero, puesto que dicho instrumento mide valores medios. Pero el valor de la intensidad de la corriente alterna no se mide por su valor medio, sino por su efecto térmico y se puede definir como sigue:

Una corriente alterna de intensidad de “ un amper”; es aquella que, al circular por una determinada resistencia óhmica, produce la misma cantidad de calor que si pasara una corriente continua de un amper.

El efecto térmico es proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente, o sea que en un instante cualquiera su valor es :

$$\text{efecto térmico} = .i^2 R$$

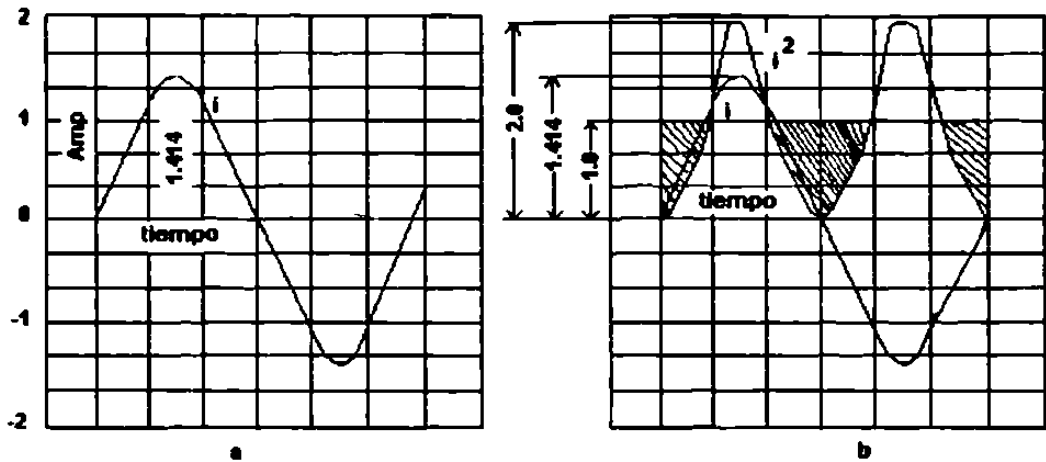


Figura 2.2 Valores máximo y eficaz de la intensidad de una corriente alterna

En la fig.2.2 (b) se representan las curvas de variación de la corriente y sus valores elevados al cuadrado. El valor máximo de la curva de i^2 es $(1.4142)^2 = 2$, puesto que el máximo de la curva de los valores de i es $1.4142 = \sqrt{2}$. La curva de los cuadrados se halla siempre encima del eje, este valor de la intensidad de corriente recibe el nombre de “ intensidad media cuadrática” o “ valor eficaz” de la intensidad de la corriente.

Para cualquier corriente senoidal, la relación entre el valor máximo de la intensidad y el valor eficaz es igual a $\sqrt{2}$, o sea 1.4142. La relación entre la intensidad eficaz y la máxima es a su vez, $1/\sqrt{2} = 0.707$

$$I_{ef} = 0.707.I.m = (1 / \sqrt{2}) I m$$

2.1.4 Ley de ohm

Si consideramos un circuito que tiene solo resistencias donde se cumple:

$$e = R i = R I_m \text{ Sen } \omega t = E_m \text{ sen } \omega t$$

Donde

E_m es el valor de la tensión.

La intensidad y la tensión tienen la misma frecuencia $f = \omega/2\pi$. Ambos también están en fase cuando $t = 0$, $\text{sen } \omega t = 0$ esto se muestra en la fig. 2.3(a) en la que están representadas cuando cortan el eje y toman su valor máximo al mismo tiempo. En la misma fig.2.3(b) se representan tanto el voltaje como la corriente en un diagrama vectorial.

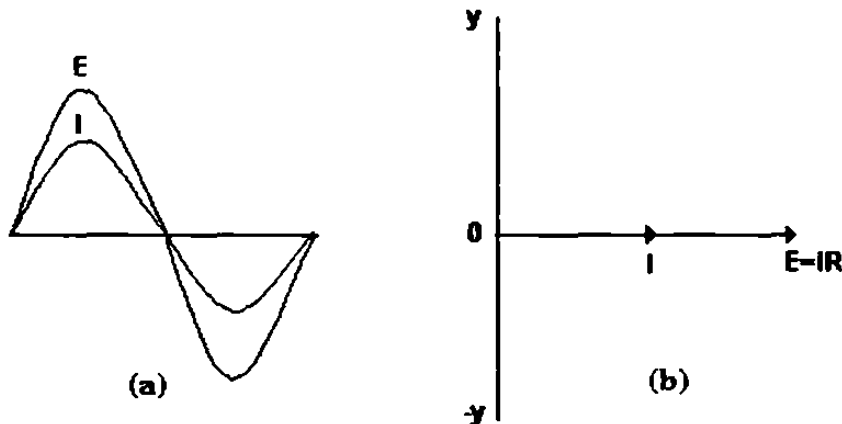


Fig.2.3 Curva de tensión y corriente en fase con el diagrama vectorial correspondiente

Cuando no hay más que resistencias, la corriente alterna sigue las mismas leyes de la corriente continua en lo que se refiere a las relaciones que existen entre la tensión y la intensidad de la corriente, la resistencia y la potencia.

2.1.5 Condensadores

2.1.5.1 Introducción

Un condensador esta constituido por dos placas metálicas separadas por un dieléctrico, trabaja bajo los principios de las cargas en los átomos de los materiales de lo que están hechas las placas, las cuales al ser conectadas a una tensión quedan cargadas. Esta carga que adquieran las placas es proporcional a la tensión de tal manera que podemos formularla.

$$Q = C V$$

Donde :

C es el coeficiente de proporcionalidad o capacidad del condensador en faradios ; como el Faradio es una unidad muy grande se utiliza el μF que representa una millonésima de Faradio (10^{-6} Faradios)

V Es la tensión o diferencia de potencial en volts

Q Es la carga que adquiere el condensador en coulomb

Si después de haber cargado un condensador se le aísla, este conserva su carga. Al contrario si se unen sus placas a través de una resistencia R se descarga según una ley exponencial.

$$v = V e^{-t/RC}$$

donde

v Es la diferencia de potencial en la descarga en cualquier instante

RC Es la constante de tiempo

t = RC ,

t en seg.

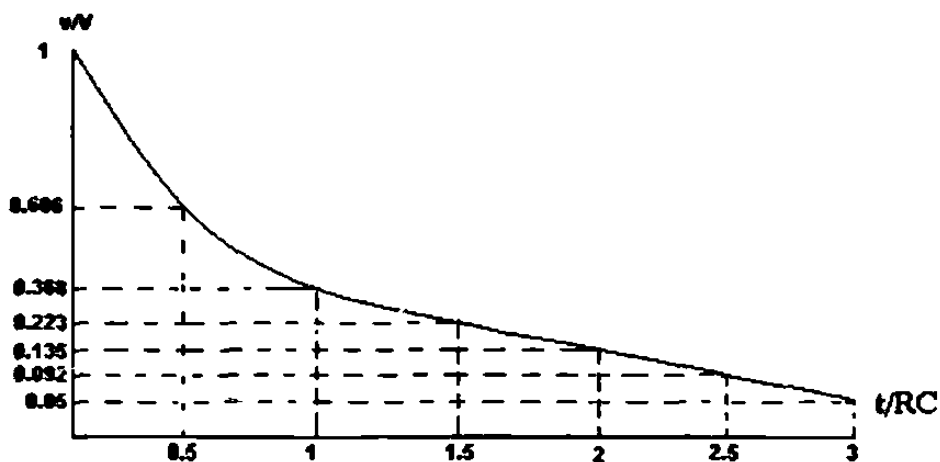


Fig. 2.4 Potencial de un condensador durante su descarga

Para $t = RC$ la diferencia de potencial de las placas alcanza un 36.8 % del valor inicial en un seg.

2.1.5.2 Importancia de los fenómenos de capacitancia

Los fenómenos de capacitancia desempeñan un gran papel en las redes eléctricas. Ya que un conductor aislado forma la placa de un conductor y la tierra forma la otra, de tal manera que entre mas largo sea el conductor mayor será su capacidad y en un aislante rebajado por raspones o por otros motivos es mas fácil que se forme el arco eléctrico y electrocutar al personal que lo maneja o dañar el equipo.

2.1.5.3 Utilización de los condensadores

Prácticamente no existe instalación eléctrica sin condensadores, a continuación damos algunos ejemplos de utilización.

- 1.- Electrónica
- 2.- Control eléctrico (relevadores de tiempo)
- 3.-“ Para corregir el factor de potencia”

En corriente alterna el condensador adelanta la corriente con respecto al voltaje, el cual si lo consideramos perfecto el ángulo de desfaseamiento es de 90 grados como se muestra en la fig.2.5 (b, c).

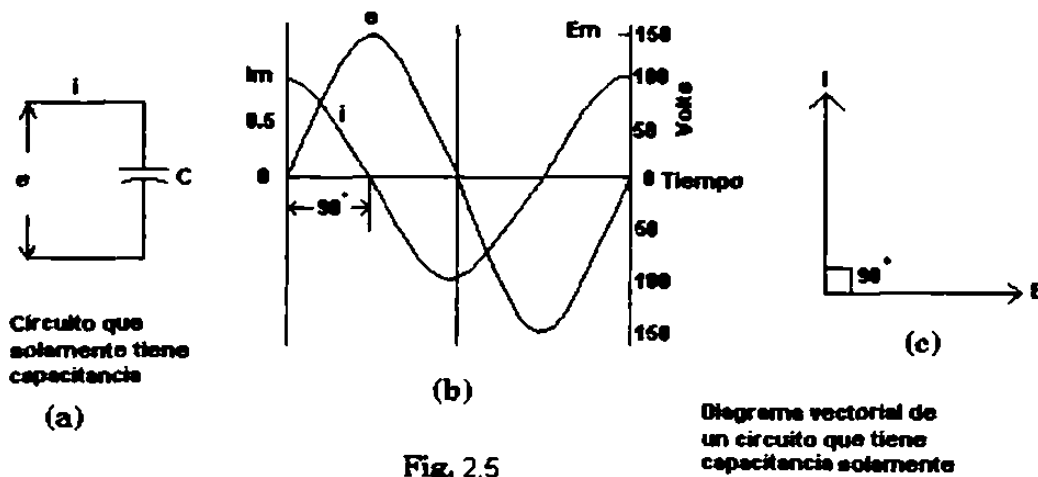


Fig. 2.5

Es esta la característica que se usa para corregir el factor de potencia. También depende en forma inversamente proporcional de cierta oposición al flujo de la corriente alterna. Dicha oposición se le llama reactancia capacitiva y se representa por X_C .

$$X_C = 1 / 2 \pi f C = 1 / \omega C$$

X_C Es la reactancia capacitiva en ohm

f Es la frecuencia en ciclos/seg. o hertz

C Es la capacidad en faradios.

2.1.5.4 Clases de condensadores

Son muchas y varían en particular según la gama, muy amplia, de las capacidades que se desean. Se distinguen los condensadores de aire, de aceite, de dieléctrico sólido. Los más clásicos están formados por bandas de papel comprendidas entre hojas de aluminio muy delgadas y enrolladas en cilindros.

2.1.6 Inductancias

2.1.6.1. Campo magnético

En todo conductor recorrido por una corriente eléctrica se crea un campo magnético alrededor de él, que es proporcional a dicha corriente.

Si el conductor se enrolla en forma de un resorte (solenoide), el campo magnético será reforzado dependiendo del número de vueltas dándole el nombre de fuerza magnetomotriz (f.m.m) al producto de la corriente por el número de vueltas.

$$f_{mm} = N I \quad \text{amper-vueltas}$$

El flujo es el número de líneas que forman el campo magnético y es proporcional a la corriente que circula por la bobina o solenoide.

Si la corriente que pasa por el conductor que forma el solenoide es variable se presenta el fenómeno de autoinducción y el flujo será:

$$\phi = L I$$

Donde L se llama inductancia en henry, es una propiedad de la bobina o elemento en estudio; también se le llama coeficiente de autoinducción.

2.1.6.2. Fuerza electromotriz de inducción

2.1.6.2.1. Ley de lenz:

En todos los casos de inducción electromagnética, la tensión inducida tenderá a hacer circular en un circuito cerrado una corriente en un sentido tal que su efecto magnético se oponga a la variación que la ha engendrado.

$$e = - d \phi / d t$$

Puesto que $\phi = L i$

$$d \phi = L d i$$

Por lo tanto

$$e = -L d i / d t$$

2.1.6.2.2 Consecuencias

En todos los circuitos eléctricos en donde intervienen bobinas hay inductancia que crean campos que inducen a su vez en el circuito una f.e.m. de inducción (e). La cual puede alcanzar valores muy grandes del 50 a 100% de la tensión de la red. Esto es lo que explica la sobreintensidad del arco al abrir o cerrar un circuito.

El transformador basa sus principios en la inducción cuyo papel es esencial dentro de la transmisión, distribución de la energía eléctrica a escala nacional, internacional y en la industria, para proporcionar los diferentes voltajes requeridos en las mejores condiciones económicas.

2.2 Inductancia y corriente alterna

En un circuito puramente inductivo la corriente atrasa al voltaje en un ángulo de 90 grados como se muestra en la fig.2.6 (b). Si se aplica una tensión de forma senoidal.

$$v = V_m \cos \omega t$$

La fuerza electromotriz de inducción contrarrestaría a esta de acuerdo a la primera ley de kirchhooff.

$$-L \frac{di}{dt} + V_m \cos \omega t = 0$$

Despejando

$$.di = (1 / L) V_m \cos \omega t dt$$

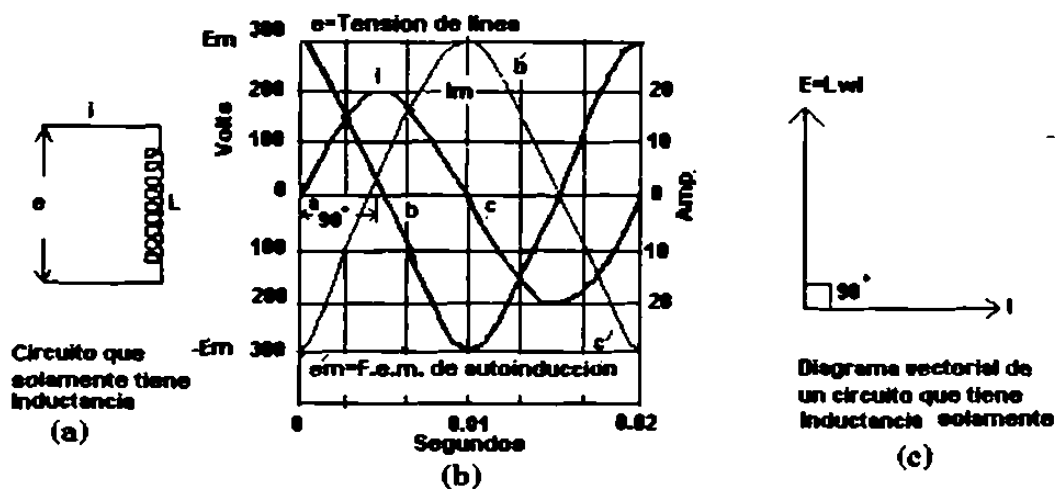
Integrando

$$.i = (1 / L\omega) V_m \text{sen} [\omega t - \pi / 2]$$

$$.i = (V_m / L\omega) \text{sen} [\omega t - \pi / 2]$$

$$i = I_m \text{sen} [\omega t - \pi / 2]$$

Al graficar el voltaje y la corriente se observa en la fig.2.6 (b) el desfaseamiento así como también la f.e.m. de inducción.



Si la asemejamos a la ley de ohm, el factor $L\omega$ nos representaría la oposición al flujo de la corriente y se representa por $X_L = L\omega$,

$X_L = 2\pi fL$ y se llama reactancia inductiva " en ohm".

Ahora podemos escribir aplicando la ley de ohm al circuito inductivo.

$$X_L(i) = v$$

$$\omega L I_m \sin(\omega t - \pi/2) = V_m \cos \omega t$$

Puesto que

$$\sin(\omega t - 90) = \cos \omega t$$

$$\omega L I_m \cos \omega t = V_m \cos \omega t$$

El valor máximo del $\cos \omega t = 1$

$$\omega L I_m = V_m$$

Los valores de voltaje y corriente máximos pueden ser leídos en osciloscopio y algunos instrumentos digitales.

En lo que respecta a los aparatos analógicos estos dan valores eficaces del voltaje y la corriente, aplicando las relaciones.

$$I_m = I_{ef} \sqrt{2}, \quad V_m = V_{ef} \sqrt{2}, \quad \omega L I_{ef} \sqrt{2} = V_{ef} \sqrt{2}$$

$$I_{ef} = V_{ef} / \omega L = V_{ef} / X_L$$

2.3. Impedancia Z

2.3.1. Ley de ohm generalizada

Si se aplica una tensión a un circuito serie que contenga resistencia, capacidad e inductancia aparecerán las siguientes relaciones del diagrama vectorial mostrado en la fig.2.7(b).

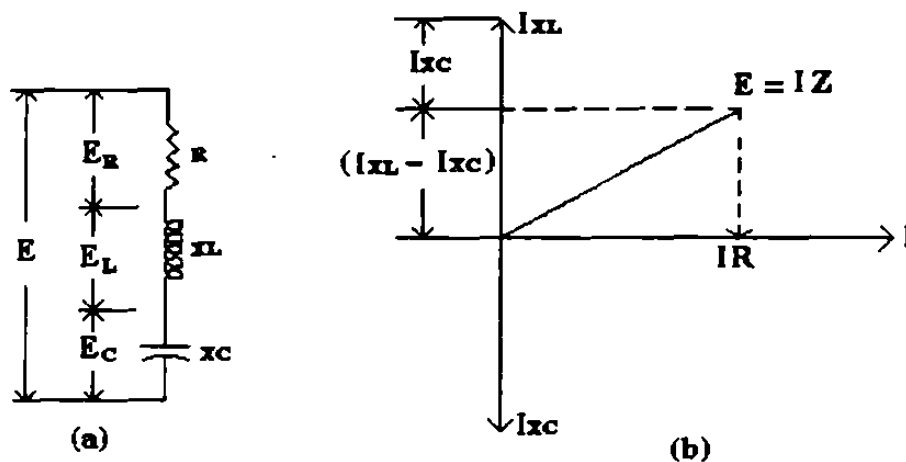


Fig. 2.7 Circuito serie con R, L, C.

En la cual se pone como referencia en el eje horizontal la corriente, ya que esta es la que se atrasa o se adelanta con respecto al voltaje dependiendo el tipo de circuito que predomine. En el caso del circuito resistivo la corriente y el voltaje están en fase.

La tensión de la línea debe ser igual al vector suma de las tres tensiones y es la hipotenusa del triángulo rectángulo cuyos catetos son IR , e $I(XL - XC)$

$$E^2 = (IR)^2 + [I(XL - XC)]^2$$

$$E^2 = I^2 [R^2 + (XL - XC)^2]$$

$$E = I \sqrt{R^2 + (XL - XC)^2}$$

El factor $\sqrt{R^2 + (XL - XC)^2}$ se le da el nombre de impedancia y se representa como.

$$Z = \sqrt{R^2 + (XL - XC)^2}$$

De tal forma que podemos escribir.

$$E = I Z, \text{ despejando } I \text{ tenemos } I = E / Z$$

$$\text{El ángulo de fase } \varphi \text{ se halla de la expresión } \operatorname{tg} \varphi = (X_L - X_C) / R$$

$$\text{El factor de potencia del circuito es } f. P = \cos \varphi = R / Z$$

2.3.2 Resonancia

Cuando la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva sucede la resonancia y la tensión en terminales de la inductancia es igual a la de la tensión en el capacitor y se equilibran mutuamente, de manera que la caída de tensión $I R$ se hace igual a la tensión de la línea como se muestra en el diagrama vectorial de la fig.2.8

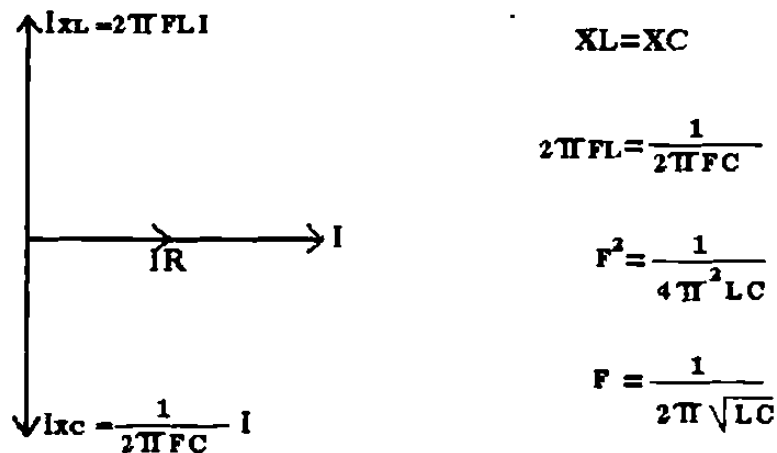


Fig. 2.8 Diagrama vectorial de la resonancia

Cuando el circuito es resonante la tensión en el inductor es igual a la del capacitor y ambas tensiones pueden alcanzar altos valores, aun cuando la tensión de alimentación sea reducida, esta relación también es aplicada a circuitos en paralelo.

2.4 Potencia

2.4.1 Potencia activa

La fórmula para la potencia en corriente continua $p = e i$, en corriente alterna esta fórmula también se acepta. Considerando valores instantáneos su expresión.

$P = E_m \sin \omega t - [I_m \sin (\omega t - \phi)] = 1/2 E_m I_m [\cos \phi - \cos (2\omega t - \phi)]$ el valor medio de esta potencia

$$P = 1/2 (E_m I_m \cos \phi)$$

$$E_m = \sqrt{2} E_{ef}, \quad I_m = \sqrt{2} I_{ef},$$

$$\text{Puesto que } E_{ef} = E_m / \sqrt{2} \quad \text{y} \quad I_{ef} = I_m / \sqrt{2}$$

$$P = E_{ef} I_{ef} \cos \phi$$

Esta potencia es el efecto realmente útil de la corriente. Se llama potencia real o potencia activa, mientras que el producto de $E_{ef} \times I_{ef}$ es la potencia aparente y se representa por la letra S; al $\cos \phi$ le llama factor de potencia.

2.4.2 Potencia compleja

La potencia compleja o potencia aparente está dada por el producto $V I$ y se denota por el símbolo S. Las unidades de S son volts amper o sus múltiplos. en la forma trigonométrica la potencia compleja tiene la forma.

$$S = V I \cos \phi + j V I \sin \phi$$

Donde como ya vimos $V I \cos \phi$ es la parte real o potencia real (P), al producto $V I \sin \phi$ que es la parte imaginaria, se le conoce como la potencia reactiva se representa por la letra (Q) de manera que la potencia compleja se puede expresar;

$$S = P + j Q$$

Si la corriente va atrasada con relación al voltaje (circuito inductivo) se tiene el triángulo de la fig.2.9.



Fig 2.9 . Triangulo de potencia para cicuito inductivo

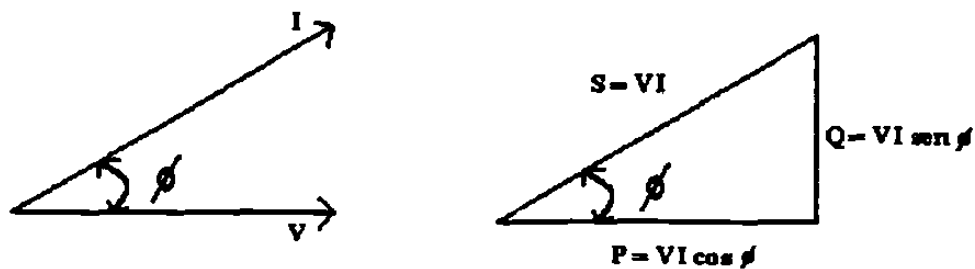


Fig.2.10 Triangulo de potencia para circuito capacitivos

Para corriente adelantada al voltaje (circuito capacitivo) fig.2.10.

La potencia compleja S también se obtiene del producto $V I$

Resumen de fórmulas para determinar la potencia real, reactiva, aparente.

Potencia real

$$P = V I \cos \phi$$

$$P = I^2 R$$

$$P = V^2 / R$$

potencia aparente

$$S = V I, \quad S = I^2 Z, \quad S = V^2 / Z$$

Potencia reactiva

$$Q = V I \text{ Sen} \phi$$

$$Q = I^2 X$$

$$Q = V^2 / X$$

Factor de potencia

$$\cos \phi = R / Z, \quad \cos \phi = P / S$$

2.4.3 Corrección del factor de potencia

En algunas aplicaciones de los circuitos eléctricos, especialmente en los casos de sistemas industriales, es necesario hacer correcciones en el factor de potencia, para evitar multas por parte de C.F.E. que establece un (0.9) mínimo.

Ver apéndice A- 2 para un ejemplo

2.5 Solución de circuitos por el método de mallas

La solución de circuitos de C.A. por el método de mallas, parte de la aplicación de la ley de Kirchhoff de voltajes a cada trayectoria cerrada del circuito (malla) seleccionadas de tal forma que se planteen ecuaciones linealmente independientes.

Consideremos la Fig. 2.11 para plantear las ecuaciones y determinar las corrientes de malla del circuito

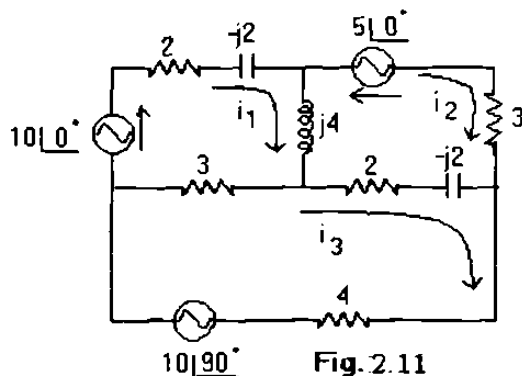


Fig. 2.11

Forma generalizada de las ecuaciones usando la técnica de inspección:

$$Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2 + Z_{13} I_3 = V_1$$

$$Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2 + Z_{23} I_3 = V_2$$

$$Z_{31} I_1 + Z_{32} I_2 + Z_{33} I_3 = V_3$$

Los elementos $Z_{kk} = Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}$ se conocen como **impedancias propias** y se obtienen como la suma algebraica de las impedancias alrededor de esa malla.

Los elementos $Z_{ki} = Z_{12}, Z_{13}, Z_{21}, Z_{23}, Z_{31}, Z_{32}$, se conocen como **impedancia mutua** entre las mallas $k-i$ y es la impedancia que se encuentra entre estas mallas tomada con el signo apropiado. En caso de acoplamiento magnético entre inductancias de distintas mallas se deben considerar como elementos mutuos de acuerdo con el signo dado por su polaridad.

Otra forma de expresar el sistema de ecuaciones es como un producto de matrices.

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

Las incógnitas son las corrientes de malla I_1, I_2, I_3 , que se obtienen resolviendo estos sistemas por medio de las técnicas de solución de ecuaciones simultaneas.

Tomando en consideración lo antes dicho las impedancias propias son

$$Z_{11} = 2 - j 2 + j 4 + 3 = 5 + j 2$$

$$Z_{22} = 2 + 3 - j 2 + j 4 = 5 + j 2$$

$$Z_{33} = 3 + 2 - j 2 + 4 = 9 - j 2$$

Las impedancias mutuas.

$$Z_{12} = Z_{21} = -(j 4) = -j 4$$

$$Z_{13} = Z_{31} = -(3) = -3$$

$$Z_{23} = Z_{32} = -(2 - j 2) = -2 + j 2$$

Sustituyendo en la formula generalizada

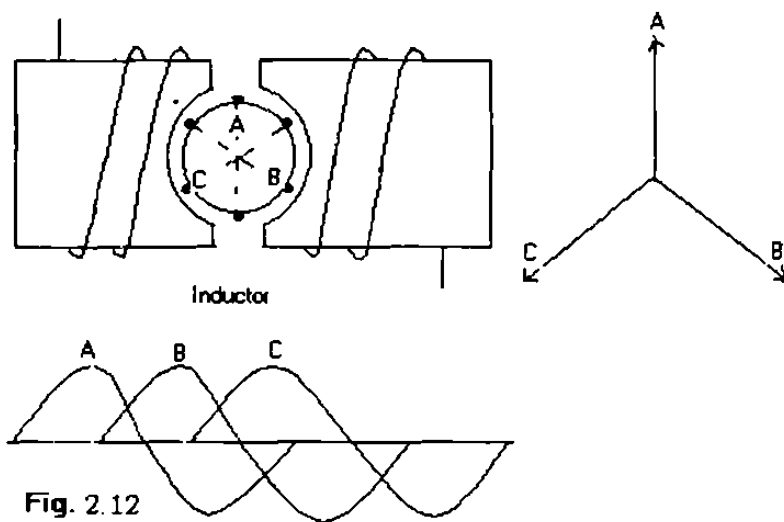
$$(5 + j 2) I_1 + (-j 4) I_2 + (-3) I_3 = 10 \angle 0^\circ$$

$$(-j 4) I_1 + (5 + j 2) I_2 + (-2 + j 2) I_3 = -5 \angle 0^\circ$$

$$(-3) I_1 + (-2 + j 2) I_2 + (9 - j 2) I_3 = -10 \angle 90^\circ$$

2.6 Circuitos de C.A. trifásicos

Un sistema trifásico de inducción de voltaje se puede interpretar como tres fasores separados entre si por 120° , de tal forma que las ondas de voltaje para cada fase se encuentran separadas 120° entre si, considerando como positiva la rotación del inductor en el sentido contrario a las manecillas del reloj de tal forma que para la secuencia A B C, los fasores pasen con respecto a un punto fijo en el orden A-B, C-A, B-C, esto para cualquier voltaje instantáneo inducido.



Tanto las fuentes de voltaje como las cargas se encuentran normalmente conectadas en dos formas: **Delta y Estrella**.

2.7 Potencia en circuitos trifásicos balanceados

2.7.1 Conexiones y relaciones de potencia

Las conexiones mas empleadas (de transformadores, motores) en la industria son las conexiones Delta (Δ) y Estrella (Y) y las relaciones entre potencia, corriente y voltaje para cada una de ellas se muestra a continuación.

$$S_t = \sqrt{3} V_L I_L \text{ (Volts Amper)}$$

$$Q_t = \sqrt{3} V_L I_L \text{ Sen } \varphi \text{ (Volts Amper reactivos)}$$

Para conexión Δ

$$P_t = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \text{ (Watts)}$$

$$I_L = I_f \sqrt{3}$$

$$V_L = V_f$$

P_t = potencia total en Watts

V_L = voltaje de línea en Volts

I_L = corriente de línea en Amperes

V_f = voltaje de fase en Volts

I_f = corriente de fase en Amperes

Para conexión Y

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \text{ (Watts)}$$

$$I_L = I_f$$

$$V_L = V_f \sqrt{3}$$

2.7.2 Medición de la potencia trifásica

La potencia como se sabe se mide por medio de un Wattmetro, que es un instrumento que tiene bobinas de potencial y bobinas de corriente en un arreglo de tal forma que su deflexión es proporcional a $V I \cos \phi$, siendo ϕ el ángulo entre el voltaje y la corriente.

Capítulo 3

ELEMENTOS GENERALES DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS

3.1 Objetivo

El objetivo de una instalación eléctrica es cumplir con los servicios que fueron requeridos durante la etapa del proyecto, en esencia proporciona servicio con el propósito de que la energía eléctrica satisfaga los requerimientos de los distintos elementos que la transformaran según sean las necesidades.

Las instalaciones eléctricas se clasifican tomando en cuenta la generación hasta la utilización pasando por las etapas de transformación, transmisión y distribución como:

- a).- Alta tensión (80, 100, 110, 220, 400 KV).
- b).- Extra alta tensión (mas de 345 KV).
- c).- Mediana tensión (66, 44, 32 KV).
- d).-Distribución y baja tensión (23, 20, 13.2, 4.16, 0.440, 0.220, 0.127 KV)

Esta clasificación esta de acuerdo a las tensiones empleadas en los sistemas eléctricos, ya que el reglamento de obras e Instalaciones Eléctricas establece otros rangos para un tipo específico de instalación eléctrica.

3.2 Concepto de instalación eléctrica

Conjunto de elementos necesarios para conducir y transformar la energía eléctrica: cumpliendo con los requisitos de:

- a).- Ser segura contra accidentes e incendios.
- b).-Eficiente y económica.
- c).-Accesible y de fácil mantenimiento
- d).- Cumplir con los requisitos técnicos que fija el reglamento de obras e instalaciones eléctricas.

3.3 Elementos de una instalación eléctrica de baja tensión

En principio en una instalación eléctrica intervienen como elementos principales para conducir, proteger y controlar la energía eléctrica y los dispositivos receptores los siguientes:

- a).- Conductores Eléctricos.
- b).- Canalizaciones Eléctricas.
- c).- Conectores para las canalizaciones eléctricas.
- d).- Accesorios adicionales.
- e).-Dispositivos de protección.

Considerando que las instalaciones pueden ser: visibles, ocultas, parcialmente ocultas y a prueba de explosión.

3.3.1 Conductores eléctricos

3.3.1.1 Generalidades

En cualquier instalación eléctrica se requiere que los elementos de conducción de energía tengan una buena conductividad y cumplan con otros requisitos en cuanto a sus propiedades eléctricas y mecánicas, considerando desde luego el aspecto económico. Por esta razón la mayor parte de los conductores empleados en instalaciones eléctricas están hechos de cobre o aluminio que son comercialmente los materiales con mayor conductividad y con un costo bajo, ya que existen otros materiales con mejor conductividad como son la plata y el platino, pero con un costo elevado lo que hace antieconómico su utilización en instalaciones eléctricas.

Desde el punto de vista de las normas, los conductores se han identificado por un número que corresponden a lo que comúnmente se conoce como el calibre y que normalmente sigue el sistema americano (A.W.G., circular mil) o europeo, siendo el más grueso el número 4/0, siguiendo en orden descendente del área del conductor los números 3/0, 2/0, 1/0, 1,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20, que es el más delgado usado en

instalaciones eléctricas. Los países europeos usan generalmente el milímetro cuadrado por tal motivo es necesario tener una conversión de medida que puede hacerse utilizando la relación.

$$\text{Circular mil} = \text{mm}^2 \times 1973.5$$

la tabla N° 3.1 que se muestra a continuación presenta estas equivalencias. (1)*

Dimensiones de los conductores eléctricos desnudos				
Calibre	Sección		Diámetro	
A.W.G. M.C.M	C.M.	mm ²	Pulg.	mm
20	1022	0.5176	0.03196	0.812
18	1624	0.8232	0.04030	1.024
16	2583	1.3090	0.05082	1.291
14	4107	2.0810	0.06408	1.628
12	6530	3.3090	0.08081	2.053
10	10380	5.2610	0.1019	2.588
8	16510	8.3670	0.1285	3.264
6	26250	13.3030	0.1620	4.115
4	41740	21.1480	0.2043	5.189
3	52630	26.6700	0.2294	5.827
2	66370	33.6320	0.2576	6.543
1	83690	42.4060	0.2893	7.348
1/0	105500	53.4770	0.3249	8.252
2/0	133100	67.4190	0.3648	9.266
3/0	167800	85.0320	0.4096	10.403
4/0	211600	107.2250	0.4600	11.684
250		126.644	0.575	14.605
300		151.999	0.630	16.002
350		177.354	0.681	17.297
400		202.709	0.728	18.491
500		253.354	0.814	20.675

* Bibliografía

A excepción de los conductores eléctricos usados en líneas aéreas y redes de distribución, los conductores empleados en las instalaciones eléctricas están aislados con aislante tipo termoplástico con diferentes denominaciones comerciales según el tipo de fabricante, siendo los mas comunes: tipo TW, vinanel 900, vinanel nylon, vulcanel E.P, vulcanel XLP.

Cada tipo de conductor tiene propiedades específicas que lo diferencian de otros, pero en general en la selección de un conductor deben considerarse los agentes que los afectan durante su operación.

Primero conviene elegir el tipo de cable a usar, que depende de su utilización.

Como segundo punto, elegir la sección de los conductores, de acuerdo a las secciones normalizadas que da la tabla siguiente (sección en mm^2 para un conductor de fase):

Esta tabla hace recordar la noción de densidad de corriente, que es la relación entre la intensidad de la corriente y la sección de los conductores es de :

5.5 A/ mm^2 para una sección nominal de cable de 10 mm^2

1.7 A/ mm^2 para una sección nominal de cable de 150 mm^2

El cable destinado a la conducción de la energía debe satisfacer muchos imperativos que resultan en la utilización y que se pueden agrupar como:

- 1) Agentes químicos (agua , humedad, hidrocarburos, ácidos, álcalis)
- 2) Agentes mecánicos (presión mecánica, abrasión, elongación, dobleces a 180 grados)
- 3) Agentes eléctricos (rigidez dieléctrica).

Por otra parte los conductores alimentan diferentes tipos de aparatos: el conductor debe estar concebido en forma que se evite todo peligro de electrocución, con algún dispositivo que lo ponga fuera de servicio cuando se presente una avería .

En estas condiciones un solo tipo de conductor no puede satisfacer a la vez todas las condiciones. con la aparición de materiales nuevos en la fabricación, conducen a modificaciones constantes en la concepción actual de los conductores.

3.3.1.2 Selección del calibre de conductores en baja tensión

La selección adecuada de un conductor eléctrico que llevará corriente a un dispositivo específico se hace tomando en consideración dos factores:

- 1.- La capacidad de conducción de corriente (Ampacidad).
- 2.- La caída de voltaje.

La capacidad de conducción de un conductor se encuentra limitada por los siguientes factores.

Conductividad del material conductor.

Capacidad térmica del aislamiento.

Desde el punto de vista de conductividad hay tablas que dan la resistencia eléctrica de los conductores de cobre, este factor es muy importante ya que determina las pérdidas de potencia eléctrica al paso de la corriente según la formula.

$$W = I^2 R$$

Donde

R = resistencia del conductor

I = Corriente eléctrica en amperes

W = Perdida de potencia en Watts.

Esta potencia en un periodo de tiempo determinado es una energía que se disipa en forma de calor.

También sabemos que la resistencia eléctrica de los conductores varía con la temperatura, y los datos están normalmente dados para temperaturas de 60 °C, por lo que al calcular la resistencia de un conductor a cualquier otra temperatura se debe corregir mediante la formula:

$$R_t = R_{60^\circ C} \left[1 + \alpha (T - 60) \right]$$

Donde

R_t = Resistencia a la temperatura deseada

T = Temperatura considerada

.α = Coeficiente de corrección en ohms/°c, en el caso del cobre su valor es de 0.00385.

Recordemos que la resistencia indicada en las tablas están dados para una corriente directa, y que cuando una corriente alterna circula por un conductor se produce lo que se conoce como el efecto superficial debido a que se desarrolla una tensión por efecto de la inducción que es mayor en la parte central del conductor que en la superficie produciendo el efecto de una corriente en sentido contrario a la corriente normal que circula por el conductor, manifestándose como un aumento de resistencia.

Por lo tanto podemos decir que la resistencia de un conductor cuando circula por el una corriente alterna es mayor que cuando circula una corriente directa, hay factores de corrección para obtener la resistencia a la corriente alterna partiendo de la resistencia a la corriente directa.

Un factor muy importante para determinar la temperatura máxima de operación a régimen permanente de un conductor son las pérdidas que se manifiestan en forma de calor ($W = I^2 R$)

TABLA N° 3.2 TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN A RÉGIMEN PERMANENTE DE LOS CONDUCTORES DE BAJA TENSIÓN

TW	60°C EN AMBIENTE SECO	60°C EN AMBIENTE MOJADO
VINANEL 900	90°C. EN AMBIENTE SECO	75°C EN AMBIENTE MOJADO
VINANEL NYLON	90°C. EN AMBIENTE SECO	75°C EN AMBIENTE MOJADO
VULCANEL EP	90°C. EN AMBIENTE SECO	75°C EN AMBIENTE MOJADO
VULCANEL XLP	90°C. EN AMBIENTE SECO	75°C EN AMBIENTE MOJADO

La capacidad de conducción de corriente está íntimamente ligada a la capacidad del aislamiento a las temperaturas elevadas, por temperaturas ambientes superiores a los 40°C , también considerando que por lo general los conductores se encuentran dentro de canalizaciones en las instalaciones eléctricas, y se comportan como emisores de calor.

En el caso de instalaciones eléctricas de baja tensión, los conductores se encuentran alojados en un medio de canalización en donde además se encuentran otros conductores, al considerar como ejemplo un tubo conduit, el calor generado tiende a disiparse en el medio envolvente es decir, el propio aislamiento del conductor, el aislamiento de los

conductores vecinos, el aire que está contenido en el tubo mismo. En este caso el calor generado en el caso de sobrecargas permanentes destruirá los aislamientos mucho antes que el material conductor llegue a su temperatura de fusión, debido a que la capacidad térmica del aislamiento es mucho menor que la del conductor, por lo que es muy importante limitar la temperatura de trabajo de los conductores hasta el punto en que el calor que se genera no llegue a la temperatura de fusión de los aislamientos, un conductor debe de trabajarse debajo de la temperatura de fusión del aislamiento.

Una expresión para calcular la corriente admisible en el conductor que se encuentra en un tubo conduit es: tomando en consideración la temperatura del conductor y la temperatura ambiente.

$$I = \sqrt{(T_c - T_a) / (R \cdot R_x)}$$

Donde

T_c => Temperatura del conductor

T_a => Temperatura ambiente

R => Resistencia del conductor en ohm-m²/ m

R_x => Resistencia térmica de los distintos medios desde el punto mas caliente hasta el mas frío.

3.3.1.3 Número de conductores en un tubo conduit

Debido a las restricciones del tipo térmico que el aislamiento impone, el numero de conductores dentro de un tubo conduit tiene que ser restringido. De manera que facilite el alojamiento y la manipulación durante la instalación de los conductores y se considere también la cantidad de aire necesaria para que los conductores se mantengan a temperaturas adecuadas en base a un buen enfriamiento.

Relación entre la sección del tubo y los conductores

$$F = a / A$$

Donde ,

A => Área interior del tubo en mm² o plg²

a => Área total de los conductores

F => Factor de relleno

Este factor de relleno tiene los siguientes valores establecidos para instalaciones

53% para un conductor

31% para dos conductores

43% para tres conductores

40% para cuatro o mas conductores

Tabla N° 3.3 Factores multiplicadores para convertir resistencia con corriente continua a resistencia con corriente alterna de 50 y 60 Hz (1)*

Calibre	Factor multiplicador, cables con cubierta no magnética en aire o en ductos no magnéticos	Factor Multiplicador
A. W. G		Cables con cubierta magnética o en ducto Magnético.
M. C. M.		
2	1.000	1.01
1	1.000	1.01
0	1.001	1.02
00	1.001	1.03
000	1.002	1.04
0000	1.004	1.05
250	1.005	1.06
300	1.006	1.07
350	1.009	1.08
400	1.011	1.10
500	1.018	1.13
600	1.025	1.16
700	1.034	1.19
750	1.039	1.21
800	1.044	1.27
1000	1.067	1.30
1250	1.102	1.41
1500	1.142	1.53
1750	1.185	1.67

TABLA N° 3.4 CAPACIDAD DE CORRIENTE DE CONDUCTORES DE
CU BASADA EN UNA TEMPERATURA AMBIENTE DE 30°C (1)*

Calibre	TIPO T.W. 60°C				VINANEL 900 75°C			
	1 a 3	4 a 6	6 a 9	1	1 a 3	4 a 6	6 a 9	1
	CONDS. TUBO	CONDS. TUBO	CONDS. TUBO	CONDS. TUBO	CONDS. TUBO	CONDS. TUBO	CONDS. TUBO	CONDS. TUBO
14	15	12	10	20	15	12	10	20
12	20	16	14	25	20	16	14	25
10	30	24	21	40	30	24	21	40
8	40	32	28	55	45	36	31	65
6	55	44	38	80	65	52	45	95
4	70	56	49	105	85	68	59	125
2	95	76	66	140	115	92	80	170
0	125	100	87	195	150	120	105	230
00	145	116	110	225	175	140	122	265
000	165	132	115	260	200	160	140	310
0000	195	156	132	300	230	184	161	360
250	215	172	150	340	255	204	178	405
300	240	192	168	375	285	228	199	445
350	260	208	182	420	310	248	217	505
400	280	224	196	455	335	268	234	545
500	320	256	224	515	380	304	266	680

TABLA N° 3.5 (1)*

CALIBRE	TAMAÑO DEL TUBO CONDUIT												
	A.W.G.	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/4"	3"	3 1/2"	4"	5"	6"
	Dimensión en milímetros												
	13	19	25	31	38	51	64	76	89	101	127	152	
14	9	13	25	44	60	99							
12	7	12	20	34	47	78							
10	5	9	15	26	36	60	85						
8	3	5	8	14	20	32	46	72					
6	1	2	4	7	10	16	23	36	48	62			
4	1	1	3	5	7	12	17	27	36	46	63		
2	1	1	1	4	5	9	12	20	26	34	54	78	
1	0	1	1	2	4	6	8	14	19	25	39	57	
0	0	1	1	2	3	5	8	12	16	21	33	45	
00	0	1	1	1	3	4	6	10	14	18	28	41	
000	0	0	1	1	1	4	4	9	12	15	24	35	
0000	0	0	1	1	1	3	4	7	10	13	20	29	
250				1	1	2	3	6	8	10	16	23	
300				1	1	1	2	5	7	9	14	20	
350				1	1	1	1	4	6	8	12	18	
400					1	1	1	4	5	7	11	16	
500					1	1	1	3	4	6	9	13	
600					1	1	1	3	3	5	7	11	
700						1	1	2	3	4	6	10	

3.3.1.4 Cálculo de conductores por caída de voltaje

No basta calcular los conductores con corriente únicamente, es decir, seleccionar el calibre de un conductor de acuerdo con la corriente que circulará por él. También es necesario que la caída de voltaje en el conductor no exceda los valores establecidos por el Reglamento de Obras e Instalaciones Eléctricas (que son 2% en instalaciones residenciales y 3 ó 4% en instalaciones industriales).

Para estar seguros de que la caída de voltaje no exceda esos valores es necesario calcular las caídas de voltaje "e%" en los circuitos derivados y en los alimentadores que se formula de la manera siguiente.

$$.e\% = e \times 100 / E_n = e_f \times 100 / E_f$$

Donde

$e \Rightarrow$ Caída de voltaje de fase a neutro en volts

$.e_f \Rightarrow$ Caída de voltaje entre fases, en volts

$e\% \Rightarrow$ Caída de voltaje en porciento

$E_n \Rightarrow$ Voltaje de línea a neutro

$E_f \Rightarrow$ Voltaje entre fases

Sistema monofásico

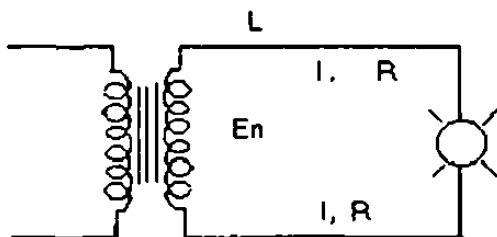


Fig. 3.1 Circuito monofásico simple

La potencia que consume la carga es

$$W = E_n I \cos \varphi \quad \text{despejando } I \text{ tenemos } I = W / E_n \cos \varphi$$

La caída de voltaje por resistencia en el conductor es:

$$.e = 2 I R$$

La resistencia del conductor es

$$R = \rho L / A = (1/50) (L / A)$$

De donde

$$.e = (1/25) (L I / A)$$

$$.e\% = (L I / 25 A) (100 / E_n) = 4 L I / E_n A$$

Siendo

$$\rho = \text{Resistividad del cobre en (ohm-m / mm}^2) = 1/50$$

$L =$ Longitud del conductor en metros

$A \Rightarrow$ Sección transversal del conductor en (metros²) (ver apéndice A-3)

3.4 Sistema Trifásico a Tres Conductores

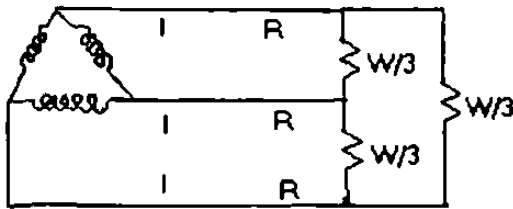


Fig. 3.2 Circuito trifásico a tres conductores

La potencia que consume la carga trifásica es:

$$W = \sqrt{3} E_f I \cos \phi \quad \text{y despejando } I \text{ tenemos.}$$

$$I = W / \sqrt{3} E_f \cos \phi$$

La caída de voltaje entre fases es

$$E_f = \sqrt{3} R I$$

Pero ;

$$R = \rho L / A = (1 / 50) (L / A)$$

$$.ef = (\sqrt{3} / 50) L I / A$$

El porciento de caída de voltaje es:

$$.e\% = (ef / E_f) \times 100$$

$$e\% = (\sqrt{3} / 50) (L / A E_f) \times 100$$

$$e\% = (2 \sqrt{3}) L I / A \times E_f$$

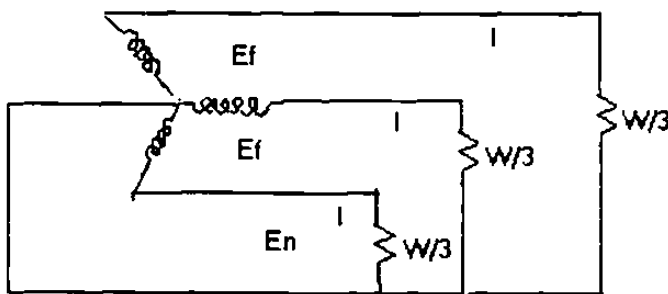


Fig. 3.3 Circuito trifásico a cuatro conductores

La potencia que consume la carga trifásica es

$$W = \sqrt{3} E_f I \cos \varphi = 3 E_n I \cos \varphi$$

$$I = W / \sqrt{3} E_f \cos \varphi = W / 3 E_n \cos \varphi$$

La caída de voltaje entre fases es:

$$E_f = \sqrt{3} R I = (\sqrt{3} / 50) L I / A$$

$$.e\% = (\sqrt{3} / 50) (L I / A E_f) \times 100 = (2\sqrt{3}) (L I / A E_f)$$

La caída de tensión al neutro es:

$$.e = I R = L I / 50 A$$

$$.e\% = (e / E_n) \times 100 = (L I / 50 A E_n) \times 100 = 2 L I / A E_n$$

3.5 Utilización de los sistemas de distribución

3.5.1 Sistema monofásico a dos conductores.

El sistema monofásico a dos conductores se emplea para alimentar cargas de alumbrado que no excedan a 3750 watts por circuito.

También se emplea para alimentar circuitos derivados que no excedan de 20, 30, 40 Amper.

3.5.2 Sistema trifásico a tres conductores.

El sistema trifásico a tres conductores se emplea generalmente para alimentar cargas trifásicas que operan con tensiones de 440 o 220 volts, como es el caso de los motores trifásicos de 440 V, que en operación resultan mas económicos que los motores a 220 V, ya que demandan menos corriente.

$$P = \sqrt{3} V I \cos \varphi \eta$$

Donde $\eta \Rightarrow$ Eficiencia del motor

$V \Rightarrow$ Voltaje de operación

$\cos \varphi \Rightarrow$ Factor de potencia

Ver apéndice A-4

3.5.3 Sistema trifásico a cuatro conductores

El sistema trifásico a cuatro conductores presenta una operación flexible de cargas trifásicas y monofásicas. Es posible alimentar cargas trifásicas en tres conductores (con tensión entre líneas) , por ejemplo a 220 V y alimentar cargas monofásicas (alumbrado) a una tensión entre línea y neutro $220 / \sqrt{3} = 127 \text{ V}$). Debido a esta ventaja, este sistema es el mas empleado para la alimentación de cargas industriales.

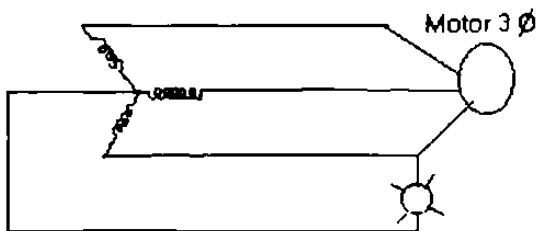


Fig 3.4 Circuito trifásico de 4 conductores alimentando un motor

3.5.4 Caída de voltaje.

En los conductores eléctricos se tiene resistencia y reactancia, es decir, la caída de voltaje total es por resistencia y reactancia.

La reactancia de un conductor depende de varios factores: sección, frecuencia de operación, longitud, material, materiales magnéticos, etc.

Sea:

E_n = Voltaje al principio del conductor,

E'_n = Voltaje al final del conductor,

e = La caída de voltaje en el conductor por resistencia y reactancia.

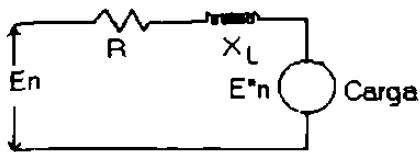


Fig.3.5a Circuito simple monofásico

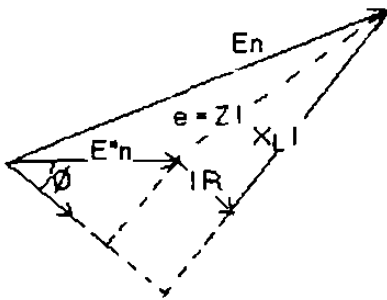


Fig 3.5 b Diagrama fasorial

$$\overline{E_n} = \overline{E''_n} + \overline{R I} + \overline{j X_L I}$$

$$E_n = \sqrt{(E''_n \cos \varphi + R I)^2 + (E''_n \sin \varphi + X_L I)^2}$$

E_n magnitud

$$|E_n| = |E''_n| + |R I| + |X_L I| = |E''_n| + |Z I|$$

$$|Z I| = e = \sqrt{(R I)^2 + (X_L I)^2}$$

$$|E_n| = |E''_n| + e$$

$$E''_n = |E_n| - e$$

La caída de voltaje total por resistencia y reactancia es:

$$e = \sqrt{(R I)^2 + (X_L I)^2}$$

Ver apéndice A-5

TABLA N° 3.6 (1)*

Calibre A.W.G. M.C.M.	Resistencia. Ohm / 1000 pie 60°C.	Reactancia ohm / 1000 pie	
		minima	máxima
14	3.0		
12	1.87		
10	1.18		
8	0.740	0.046	0.045
6	0.465	0.040	0.045
4	0.292	0.037	0.050
3	0.228	0.036	0.049
2	0.185	0.035	0.048
1	0.146	0.035	0.048
0	0.116	0.034	0.048
00	0.092	0.032	0.044
000	0.073	0.031	0.044
0000	0.058	0.030	0.045
250	0.049	0.030	0.044
300	0.0408	0.029	0.045
350	0.0350	0.029	0.044
400	0.0306	0.029	0.043
450	0.0272	0.028	0.040
500	0.0245	0.028	0.038
550	0.0222	0.028	0.040
600	0.0204	0.028	0.038
750	0.0163	0.028	0.035
1000	0.0123	0.028	0.038
1250	0.0098	0.028	0.038
1500	0.00816	0.028	0.038
1750	0.00700	0.027	0.037

Notas Relativas a la tabla anterior

- 1.- El factor de corrección por temperatura para la resistencia óhmica es de 0.34% por °C.

2.-Para conductores en ductos de acero, ó con armaduras de acero, la resistencia aumenta en 25%, por lo tanto multiplíquese los valores por 1.25.

3.- Los valores de la reactancia mínima se aplican para conductores juntos dentro de un tubo conduit o ducto. Los valores de la reactancia máxima se aplican para conductores separados, en instalaciones aéreas, o en mensulas en galerías de conductores.

4.- Para 50 ciclos, los valores de la reactancia deben multiplicarse por 5/6

3.6 Canalizaciones eléctricas

Son dispositivos que se emplean en las instalaciones para contener a los conductores de manera que estos queden protegidos en lo posible contra el deterioro mecánico, contaminación y a su vez proteger a la instalación contra incendios por los arcos que se puedan presentar durante un corto circuito

Los medios de canalizaciones mas comunes son .

- 1).- Tubos conduit
- 2).- Ductos
- 3).- Charolas

1).- Tubo conduit

Existen en el mercado una gran variedad de tubería conduit para emplearse de acuerdo a las necesidades especiales de que se trate en tramos de 3.05 m de largo con rosca en los extremos a excepción de plástico y de pared delgada entre los que se consideran los siguientes

Tubo de acero galvanizado de pared gruesa

Tubo de acero galvanizado de pared delgada.

Tubo de acero esmaltado de pared gruesa.

Tubo de aluminio.

Tubo flexible

Tubo de plástico flexible

3.7 Conectores para canalizaciones eléctricas

Son aquellos elementos que sirven para interconectar las canalizaciones eléctricas entre si, o con los elementos que contienen a los dispositivos de control, protección o salidas para receptores son esencialmente de dos tipos:

- 1).- Condulet
- 2).- Cajas de conexión

1).- Condulets

Son empleados en instalaciones de tubo conduit de tipo visible, se fabrican de una aleación de aluminio y otros metales.

Se fabrican en tres tipos principalmente

- a) Ordinario
- b) A prueba de polvo y vapor.
- c) A prueba de explosión

3.8 Accesorios adicionales

Dentro de estos accesorios se encuentran los siguientes:

- 1) Portalámparas.
- 2) Apagadores de palanca, de botón o de presión.
- 3) De tipo oculto
- 4) De sobreponer.
- 5) Contactos.

Tipo doméstico y comercial e industrial que pueden ser:

- a) Para sobreponer
- b) Intercambiables
- c) Tipo oculto.
- d) De piso y polarizados, para los de tipo industrial se fabrican para sobreponer, de tipo oculto y en forma de extensión, así como el tipo clavija.
- e) Dispositivos de protección

3.9 Seguridad en instalaciones eléctricas de baja tensión

3.9.1 Introducción

El estudio de la seguridad de las redes, tanto de neutro a tierra como de neutro aislado, muestran la gran importancia de una puesta a tierra correcta de las masas de la red por lo que se dedican algunas líneas al modo práctico de realizarlas.

3.9.2 Línea a tierra

Se trata de un conductor que sigue aproximadamente el mismo trayecto que las tres fases de la red. Su objetivo es facilitar la unión con tierra de todas las masas metálicas: cárter de los transformadores, de motores, de cajas de conexión, etc. Reglamentariamente, las líneas de tierra deben tener una conductancia por unidad de longitud al menos igual a la del conductor activo mas grueso de alimentación.

Puede estar constituido por

- A) Un conductor especial
- B) Una vaina de plomo de un cable
- C) La armadura metálica de un cable armado

En los cables de baja tensión, un cuarto conductor, dentro del tubo conduit adicional a los tres de fase ,añadido en el cable armado o de uso rudo a los tres conductores de fase, suele ser el que se utiliza como línea de tierra y se identifica generalmente con un color Blanco , Gris o Verde. En caso de estar fuera del tubo conduit este puede ser desnudo.

3.9.3 Toma de tierra

3.9.3.1 Dependencia

a).- Depende de la resistividad del suelo. Esta varia de 40 a 5000 ohm-m²/m, cuando se pasa de la tierra de labor húmeda al gres ordinario. Las pizarras secas tienen resistividades de 200 a 1000 Ohm-m²/m. La humedad reduce mucho éstas últimas cifras.

b).- También depende de la forma geométrica y de las dimensiones de la armadura metálica que las constituyen. En general, la resistencia de la toma de tierra disminuye con las dimensiones.

3.9.3.2 Algunos casos más corrientes:

1.- Tubo introducido verticalmente en un agujero: no requiere pasar de 1.5 mts. de longitud. La resistencia es aproximadamente de 0.12Ω

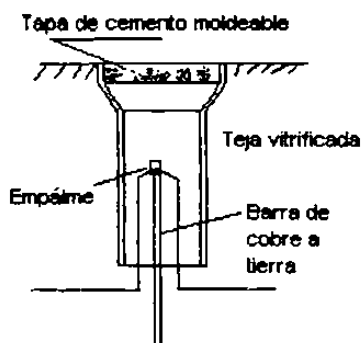


Fig 3.6 Toma de tierra desconectable

2. - Placa de hierro laminado: una superficie de un metro cuadrado es suficiente; corresponde a 0.4 Ω

3.- Conductor enterrado; constituye una buena toma de tierra. El diámetro del conductor tiene poca importancia. Mas allá de 50 mts, de longitud las ventajas son, por otra parte, pequeñas. Para 50 mts. La resistencia es alrededor de 0.15 Ω

4.- Varios tubos verticales conectados en paralelo: se estima inútil colocar mas de 8. Se les podrá colocar a 2 mts. unos de otros y la resistencia será de 0.05Ω .

Una buena realización práctica consistirá en colocar dos series de 4 tubos ligados entre ellos por 50 mts. de conductor enterrado en el suelo.

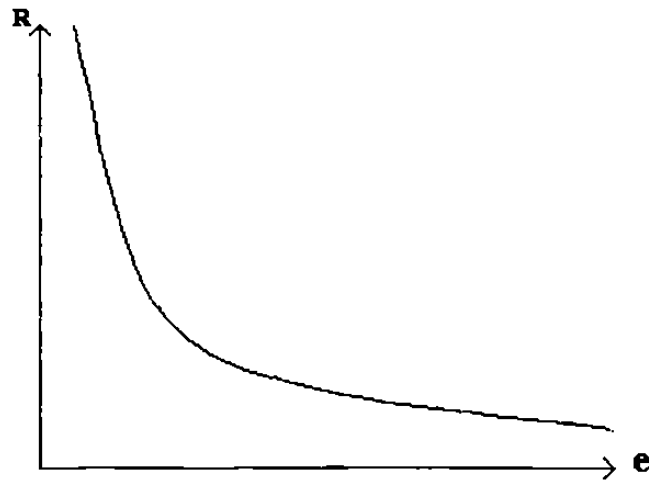


Fig. 3.7 Variación de la resistencia de una toma de tierra en función de una de sus dimensiones

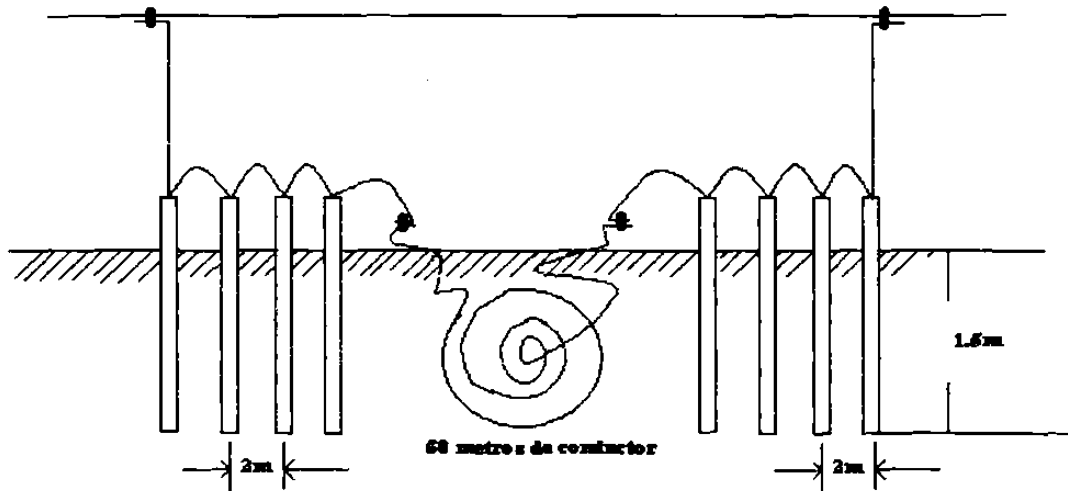


Fig. 3.8 Toma de tierra

Resistencia

Para el tubo = 0.12Ω

Para la placa = 0.4Ω

Para los conductores = 0.15Ω

Para los 8 tubos = 0.05Ω

3.9.4 El riesgo de incendio

Toda circulación de corriente lleva consigo un calentamiento de los conductores por efecto joule. Y esto puede provocar un incendio, si no se cumplen ciertas condiciones cuyas consecuencias pueden ser catastróficas.

La electricidad exige precauciones especiales. Por ejemplo, examinemos las circunstancias por las que una instalación eléctrica puede dar lugar a un incendio. Se distinguen cuatro tipos de fenómenos:

- a) La sobrecarga
- b) El corto circuito
- c) La fase a tierra
- d) El arco eléctrico.

3.9.5 La sobrecarga

La elección de las distintas partes de una red eléctrica se hace de modo que los desprendimientos de calor a lo largo del servicio, sean bastantes débiles para que se disipen sin ningún riesgo.

Pero con frecuencia ocurre que una instalación evoluciona, teniendo que soportar la red eléctrica motores adicionales o suplementarios. Si la selección no ha sido adecuada

algunas partes de la red soportaran intensidades de corriente más elevadas que aquellas para las que habían sido previstas: existirá entonces sobrecarga.

Las sobrecargas tienen como efecto someter a los aislantes a temperaturas elevadas. Por lo tanto se afectan sus cualidades, hay descomposición y a veces hasta su inflamación.

3.9.6 El corto circuito

Es el incidente en que se establece un contacto directo entre dos fases o entre fase y tierra en una red con neutro a tierra. Este fenómeno va acompañado casi siempre de un arco que desprende un calor importante. Tales arcos, pueden provocar el incendio de los cables o provocar la explosión de aparatos llenos de aceite.

Los cortocircuitos tienen los diversos orígenes siguientes:

- 1.- Degradación del material por una causa exterior:
- 2.- Degradación progresiva de los aislantes.
- 3.- Error del material.

3.9.7. La avería fase a tierra

En una red con neutro aislado, esta avería no provoca cortocircuito. Es esta una de las ventajas más importantes de este tipo de red que se añade a la de su seguridad en cuanto al riesgo de electrocución.

3.9.8. El arco eléctrico

Se trata del arco que salta entre los dos extremos de un corte sobre un conductor y que conserva así, a pesar de este corte, el paso de una corriente. Lo que puede ser suficiente para provocar un incendio. Por lo tanto es necesario considerar.

- 1) Medidas preventivas, para evitar su aparición.
- 2) Disposiciones de protección para contener el fenómeno inmediatamente.

3.9.9 Reacción en caso de corto circuito

Las protecciones de las redes están provistas para cortar las corrientes de corto circuito. Pero es preciso admitir que este corte necesita algún tiempo, muy corto, durante el cual la red soporta la fuerte intensidad de la corriente.

El tiempo de corte es normalmente inferior a 0.2 segundos. Sin embargo, por razones de seguridad, se admite que puede prolongarse durante 2 segundos y se deduce que una gran duración de la red esta asegurada si la corriente de corto circuito, aun la mas grande, no pasa de 90 amperes por mm^2 de conductor.

3.9.10 Desenganche para la corriente de corto circuito mínima

Las protecciones deben:

- 1) Quedar insensibles a las corrientes inferiores de 6 a 10 de la corriente nominal, a fin de no impedir el arranque de los motores.
- 2) Responder a todas las corrientes superiores a todas las corrientes de cortocircuito mínima ($2I_{cm}$) y para mejor seguridad a $2/3$ de $2I_{cm}$.

Ahora bien, en el cálculo de estas corrientes interviene la impedancia del cable. Si es grande, el valor $2/3$ ($2I_{cm}$) puede ser más pequeño que 6 a 10 I_n . En este caso, ninguna protección reunirá a la vez las dos condiciones contradictorias anteriores. Es necesario entonces, aunque el cable convenga desde el punto de vista de la densidad de corriente y de todas las demás condiciones, pasar a un cable más grueso, de impedancia menor.

3.9.11 Caída de tensión

Se presenta como se muestra a continuación.

Sea un motor con una intensidad (I_n) alimentado por un transformador que asegura una tensión constante (E_t) gracias a un conductor de impedancia (Z_c), la caída de tensión en el cable es vectorialmente :

$$e_c = Z_c I_n$$

De manera que la tensión en los bornes del motor será:

$$E_{\text{motor}} = E_t - e_c$$

Por otra parte, durante el periodo de arranque:

- La corriente es muy importante
- El factor de potencia $\cos \varphi$ baja alrededor de 0.4
- El par es proporcional al cuadrado de la tensión.

Nos exponemos a un arranque difícil si el valor de Z_c es excesivo. Es necesario calcular las caídas de tensión antes de proceder a una instalación. Se hace un cálculo de la siguiente manera:

1. Estudio general

Transformador:	Tensión	E_t constante
Cable	: Impedancia	Z_c
Motor	: Intensidad nominal	I_n (para la tensión E_t)
	: Intensidad de arranque	I_a (para la tensión E_t)
	: $\cos \varphi$	para la marcha normal (con I_n y E_t)
	$\cos \varphi = 0.4$	(en el arranque)

Para marcha normal la impedancia del motor:

$$Z_{\text{motor}} = E_{\text{motor}} / I_n$$

La impedancia del conjunto, cable y motor, es:

$$Z_c + Z_{\text{motor}} = Z_c + E_{\text{motor}} / I_n$$

La corriente que se establecerá en el circuito será, por consiguiente:

$$I = E_t / (Z_c + Z_{\text{motor}})$$

Finalmente, la caída de tensión en el cable, es:

$$E_c = Z_c I = Z_c E_t / (Z_c + Z_{\text{motor}})$$

Y la tensión en los bornes del motor es:

$$E_t - Z_c I = E_t Z_{\text{motor}} / (Z_c + Z_{\text{motor}})$$

En el cálculo de arranque, por otra parte, el cálculo es el mismo, pero la impedancia del motor, es:

$$Z_{am} = E_{\text{motor}} / I_A$$

La nueva tensión en los bornes del motor es:

$$E_t - Z_c I_A = E_t Z_{am} / (Z_c + Z_{am})$$

Donde Z_{am} es la impedancia de arranque del motor y puede ser muy inferior a Z_m , puesto que I_A esta comprendida entre 6 y 10 I_n siendo I_n la corriente nominal del motor y el $\cos \varphi$ es pequeño en el arranque. Como consecuencia, el par motor, que es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación, puede ser insuficiente al principio.

CAPITULO 4

EQUIPOS Y APARATOS ELÉCTRICOS EN LA ESCUELA

4.1 La Subestación Eléctrica

Una subestación eléctrica es un conjunto de elementos que sirven para transformar las características de la energía eléctrica (voltaje, corriente), o bien para transformar la energía eléctrica de C.A. a C.D.

Las subestaciones eléctricas intervienen en las distintas etapas que tiene la energía eléctrica desde su generación; es decir, la transmisión, la distribución, y la utilización.

De acuerdo con lo anterior, las subestaciones eléctricas se pueden clasificar como sigue:

- 6) Por su operación:
 - e) De C.A.,
 - f) De C.D.

- 7) Por la función que desempeñan:
 - a) Elevadoras de tensión
 - b) Reductoras de tensión
 - c) De enlace (para interconectar líneas)
 - d) Rectificadoras (convertir C.A. en C.D.).

- 3) Por su construcción:
 - a) Tipo intemperie
 - b) Tipo interior
 - c) Tipo blindada

Elementos Principales de una Subestación Eléctrica

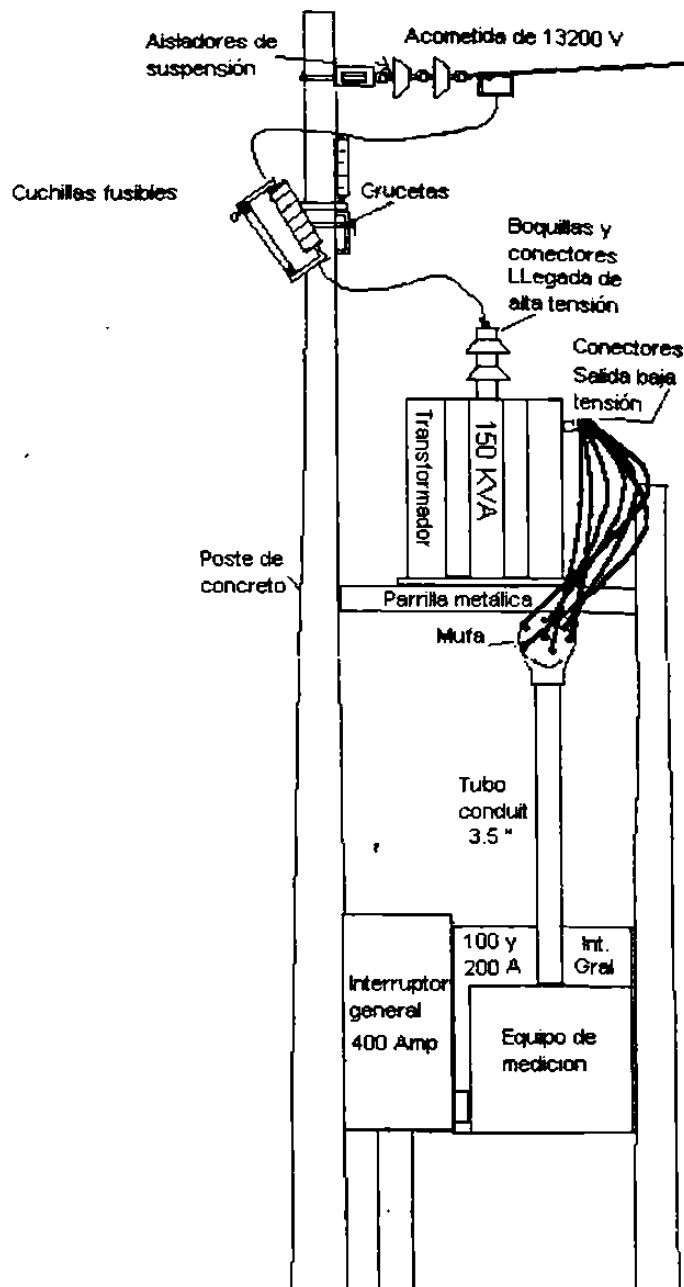


Fig.4.0 Vista lateral de la subestación en la Escuela Superior de Ingeniería

Los principales elementos que constituyen una subestación eléctrica son los siguientes:

- 1.- Transformador.
- 2.- Interruptor.
- 3.- Restaurador.
- 4.- Cuchilla fusible.
- 5.- Cuchilla desconectadora.
- 6.- Apartarrayos.
- 7.- Transformador de instrumentos (potencial y corriente).
- 8.- Red de tierras.
- 9.- Tablero de control.
- 10.- Estructura.
- 11.- Equipo de filtrado de aceite.
- 12.- Alumbrado.
- 13.- Herrajes.

4.1.1 Transformador

El transformador esta considerado como el elemento mas importante de una subestación de C.A. , y se puede definir como sigue:

Un transformador es un dispositivo que;

- a) Transfiere energía de un circuito a otro,
- b) Hace la transferencia de energía por inducción electromagnética,
- c) Los circuitos están aislados eléctricamente y acoplados magnéticamente
- d) Transfiere la energía manteniendo la frecuencia constante
- e) Generalmente la hace con un cambio de voltaje.

El circuito elemental de un transformador es el que se observa en la Fig. 4.1:

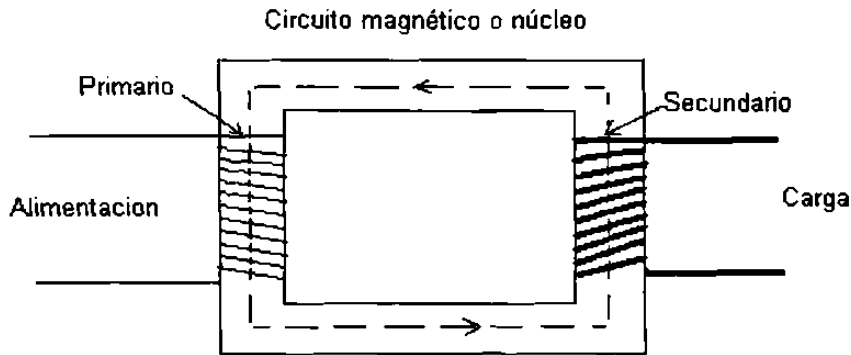


Fig. 4.1 Transformador elemental

Las partes principales de que esta formado un transformador son las siguientes:

1. Núcleo
2. Devanado primario y secundario
3. Tanque.
4. Boquillas aisladoras para conexión
5. Herrajes (para sujeción del núcleo)
6. Ganchos de sujeción
7. Base para rolar.
8. Placa de características
9. Placa de conexión a tierra
10. Instrumentos indicadores

Las ecuaciones fundamentales de un transformador son: la relación de transformación, la ecuación del voltaje inducido, y la formula para la potencia.

Relación de transformación:

$$V_p / V_s = N_p / N_s \quad V_p / V_s = I_s / I_p$$

$V_p \Rightarrow$ Voltaje de fase del primario (línea a neutro)

$V_s \Rightarrow$ Voltaje de fase del secundario (línea a neutro)

$N_s \Rightarrow$ Número de espiras por fase del secundario

$N_p \Rightarrow$ Número de espiras del primario

$I_p \Rightarrow$ Corriente de fase del primario

$I_s \Rightarrow$ Corriente de fase del secundario

La ecuación de voltaje inducido:

$$V_p = 4.44 \dot{\Phi} f N_p \times 10^{-8} \text{ (volts por fase)}.$$

$\dot{\Phi}$ = Flujo magnético en líneas (o maxwells)

f = Frecuencia

N_p = Número de espiras del primario por fase.

Para el secundario, la ecuación de voltaje inducido es semejante.

$$V_s = 4.44 \dot{\Phi} f N_s \times 10^{-8} \text{ (volts por fase)}.$$

La ecuación de la potencia de un transformador es:

Transformador monofásico

$$S = V I \text{ (K V A)}$$

$$P = V I \text{ Cos } \Phi \text{ (KW)}$$

$\text{Cos } \Phi \Rightarrow$ factor de potencia de la carga alimentada por el transformador.

La corriente en el primario es :

$$I_p = P / (V_p \text{ Cos } \Phi) \quad \text{(Amperes)}$$

La corriente en el secundario:

$$I_s = P / (V_s \cos \Phi) \quad (\text{Amperes})$$

Para el transformador trifásico

$$P = \sqrt{3} * V_L I_L \cos \Phi \quad (\text{Watts})$$

$$I_L = P / (\sqrt{3} * V_L \cos \Phi) \quad (\text{Amperes})$$

Los transformadores por el número de fases pueden ser monofásicos o trifásicos.

Por el tipo de núcleo:

- a) Núcleo tipo columnas.
- b) Núcleo tipo acorazado.

Por su forma de enfriamiento:

- a) Tipo OA.
- b) Tipo OA/FA.
- c) Tipo FOA.
- d) Tipo OW
- e) Tipo AA.
- f) Tipo AFA

En nuestro caso el transformador que se encuentra en la Subestación es:

El tipo OA , de 150 KVA, 13200/ 220 / 127 Volts , Conexión Delta Estrella , Impedancia de 2.67 % , con un peso de 750 Kg, Marca Continental, es un transformador enfriado por aceite y aire. El transformador se encuentra dentro de un recipiente.

(tanque) que contiene aceite. El aceite desempeña la función de refrigerante, pero también debe ser un buen aislante.

El calor se transmite del transformador al aceite, del aceite al tanque, y el tanque lo disipa por contacto con el aire.

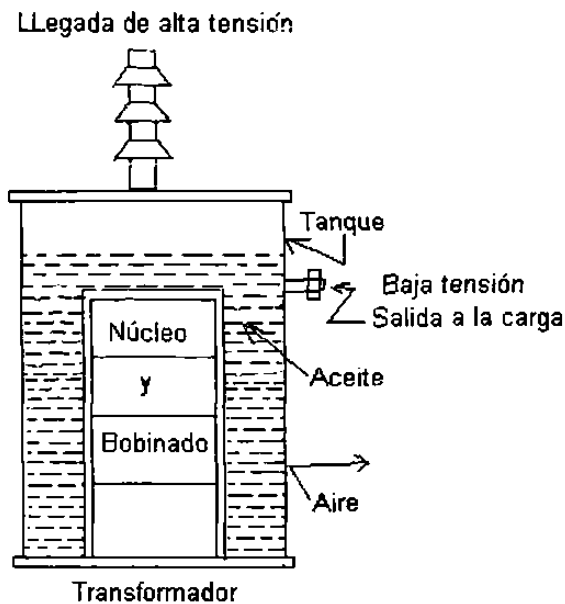


Fig.4.2 Vista lateral

4.1.2 Operación de los transformadores

Las corrientes de carga en un transformador producen esfuerzos magnéticos en los devanados y también producen calentamiento (pérdidas por efecto joule) $I^2 R$, este calor generado va de los devanados al aceite aislante, al tanque y finalmente al medio que lo rodea. El calor total generado y la eficiencia para disiparlo determina la temperatura final del devanado, esta temperatura final conjuntamente con el ciclo de carga del transformador determinan la carga que puede operar un transformador sin dañar excesivamente sus aislamientos.

Se emplean varios métodos para mejorar la eficiencia en la disipación de calor, como son: radiadores de enfriamiento, se emplea para aumentar el área de la superficie del tanque y de esta forma disipar en un área mayor. En caso necesario se instalan ventiladores cerca de los radiadores de manera que el aire circulante aumente la

capacidad de transferencia de calor. En otros casos puede ser usada circulación forzada de aceite, que transmite el calor de los devanados del transformador a la superficie del tanque en una forma mucho más rápida.

Los fabricantes usualmente diseñan un transformador para suministrar una cierta carga continua (de acuerdo a su capacidad de placa) para ciertas condiciones específicas de operación, esta carga dará una vida normal esperada para los aislamientos y de aquí la del transformador.

El deterioro del aislamiento se presenta por la carga a cualquier valor sobre la nominal en donde son mas nocivos los calentamientos. El grado de deterioro se incrementa aproximadamente el doble por cada 5 a 10°C de incremento en la temperatura del conductor. Por otro lado es conveniente considerar que el deterioro de aislamiento es acumulativo, un transformador puede ser sobrecargado durante algunos periodos y en otros periodos operar con poca carga, el efecto combinado de estos ciclos puede ser tal que el deterioro puede ser retardado.

Por esta razón la disponibilidad de un transformador puede ser en ocasiones muy diferente a su capacidad de placa. En la gráfica se ilustra la variación de la carga de un transformador con relación a su capacidad de placa.

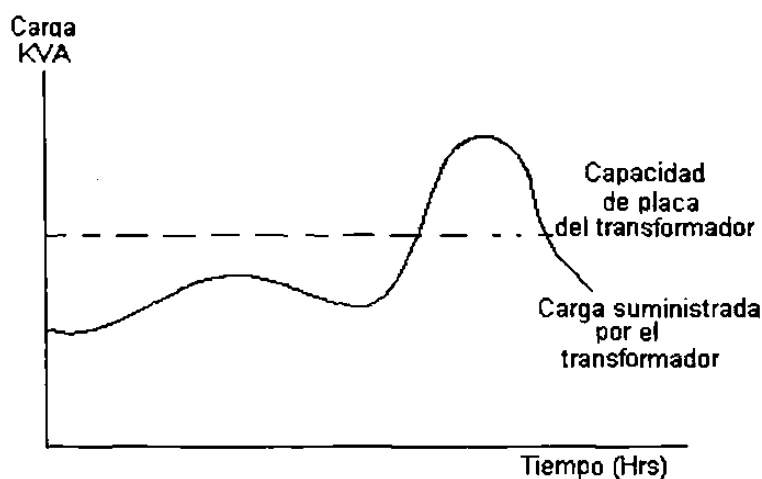


Fig. 4.3 Ciclo de carga del transformador

Un transformador usualmente no debe fallar cuando opera con una carga que exceda a su capacidad, con tal de que esta carga se mantenga en valores razonables, sin embargo, sobrecargas repetidas causan un daño acelerado en los transformadores y entonces el transformador puede fallar aún cuando se le apliquen cargas relativamente pequeñas o fallar debido a vibraciones o esfuerzos mecánicos cuando sea movido.

4.1.3 Capacidad de carga de un transformador

La disponibilidad de carga de un transformador se puede definir como la carga pico que un transformador puede suministrar para un ciclo de carga específico, sin exceder los límites de calentamiento de los devanados.

La capacidad de carga de un transformador está determinada por el ciclo de carga y por las características del transformador.

Ciclo de carga del transformador

Se debe de conocer el ciclo de carga diario para el transformador de una subestación específica. Por ejemplo, cada subestación que proporciona servicio a una industria tiene un ciclo de carga variable, los bancos de transformadores para distribución, también tienen ciclos de carga variables.

Para propósitos de cálculo es conveniente convertir un ciclo de carga real a un ciclo de carga equivalente. Una carga equivalente para cualquier parte de un ciclo de carga diaria puede obtenerse usando la siguiente ecuación:

$$\text{Valor r.m.s de la carga} = \sqrt{(C_1^2 T_1 + C_2^2 T_2 + C_3^2 T_3 + \dots + C_n^2 T_n) / T_1 + T_2 + \dots T_n}$$

$C_1, C_2, C_3, \dots, C_n \Rightarrow$ Valores de las cargas

$T_1, T_2, T_3, \dots, T_n \Rightarrow$ Tiempos en los cuales se presentan las cargas

La disponibilidad de carga del transformador requiere de los datos siguientes

Pérdidas en el núcleo ----- Watts

Pérdidas en el cobre a plena carga ----- Watts

Elevación de temperatura en los devanados a plena carga ----- °C

Elevación máxima de temperatura a plena carga ----- °C

Ciclo de carga diaria equivalente. ----- Watts

Eficiencia de los transformadores

La mayoría de los transformadores que se emplean en el suministro de energía eléctrica, ya sea en subestaciones de gran potencia, ó en redes de distribución operan continuamente cada año, pero no continuamente entregando plena carga. Debido a esto es importante mantener las pérdidas en el núcleo tan bajas como sea posible usando en el diseño materiales magnéticos de alto grado, como por ejemplo, el acero de grano orientado.

Usar materiales de alta calidad magnética aumenta el costo inicial del transformador, sin embargo, para una condición de carga dada hay un diseño óptimo para el cual la suma de los intereses anuales y cargos por depreciación sobre el costo inicial, mas el costo anual de las pérdidas por energía es un mínimo, por tanto, la eficiencia a plena carga calculada en termino de las potencia de entrada y salida no representa el único criterio. Los conceptos de eficiencia diaria y eficiencia anual también son importantes, estos conceptos pueden ser expresados como sigue:

$$\text{Eficiencia a plena carga} = 1.0 - \frac{\text{Pérdidas}}{\text{Pérdidas} + \text{potencia de salida}}$$

$$\text{Eficiencia diaria} = 1.0 - \frac{\text{pérdidas diarias de energía}}{\text{Energía de salida} + \text{perdidas diarias de energía}}$$

$$\text{Eficiencia anual} = 1.0 - \frac{\text{Pérdidas de energía anuales}}{\text{Energía de salida anual} + \text{perdidas anuales de energía}}$$

4.1.4 Conexión de los transformadores

La conexión de dos o mas transformadores en paralelo se efectúa cuando sus primarios se conectan a la misma fuente de alimentación y sus secundarios a la misma carga.

Razones para la operación en paralelo de transformadores.-

Los transformadores pueden operar en paralelo por las siguientes razones:

- 1.- Para aumentar la capacidad de la subestación.
- 2.- Para dar flexibilidad de operación (continuidad de servicio).
- 3.- Para repartir la carga que se tiene que alimentar.

Condiciones para la operación en paralelo de transformadores.-

Para que los transformadores operen correctamente en paralelo se deben cumplir los siguientes requisitos:

- 1.- Que tengan iguales voltajes en sus primarios y secundarios (igual relación de transformación).
- 2.- Que tengan el mismo desplazamiento angular, o sea la misma conexión, es decir, si un transformador tiene una conexión Δ —Y, el otro debe tener la misma conexión.
- 3.- Debe conectarse con la misma secuencia de fase.
- 4.- Que tengan similar porcentaje de impedancia.
- 5.- Deben tener la misma frecuencia de operación.

Antes de cerrar la cuchillas S, que ponen en paralelo los transformadores, se deben tener las siguientes precauciones:

- 1.- Unir los neutros mediante un cable.
- 2.- Verificar que no haya diferencia de potencial entre los puntos a conectar, para lo cual se emplea un voltímetro o una lámpara como se indica en la Fig.4.4 .

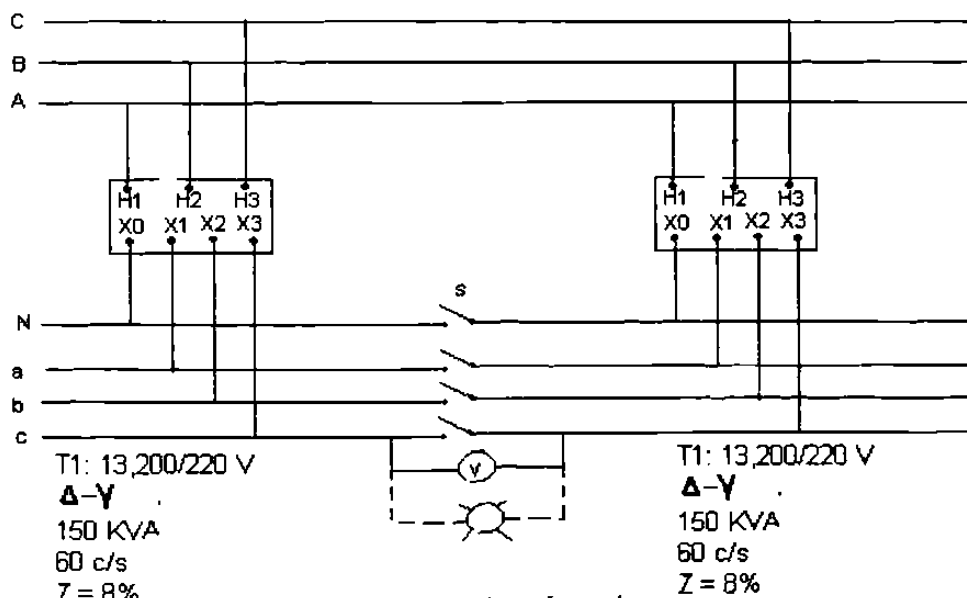


Fig 4.4 Conexión paralelo de transformadores

- 3.- Comprobar con un secuencímetro que tenga la misma secuencia de fase.
- 4.- Observar que los taps o cambiador de derivaciones tengan la misma posición.

Especificaciones para la compra de un transformador.-

Las características más importantes que deben especificarse para la compra de un transformador son las siguientes:

- 1.- Capacidad en KVA
- 2.- Tensiones del primario y del secundario
- 3.- Número de fases
- 4.- Conexión del transformador trifásico (Δ —Y, Y— Δ , Y—Y, etc.)
- 5.- Frecuencia de operación
- 6.- Localización de las boquillas (en la parte superior, y al frente, o laterales).
- 7.- Tipo de tanque (con garganta para conexión a ducto o convencional)
- 8.- Ganchos de sujeción
- 9.- Tipo de montaje (base para montaje) .
- 10.- Tiempo de entrega y lugar donde debe entregarse.
- 11.- Pena por eficiencia (\$)

Conexión de transformadores monofásicos en bancos trifásicos

En muchas subestaciones eléctricas es conveniente instalar transformadores monofásicos en conexión trifásica, en lugar de transformadores trifásicos.

Con lo que se obtienen las siguientes ventajas:

- 1). La carga se divide en los tres transformadores en partes iguales.
- 2). Se tiene continuidad de servicio, haciendo un banco de cuatro transformadores monofásicos; tres en operación normal y uno de reserva.

3). Se puede trabajar con tensiones muy elevadas (350, 400, 500 KV) debido a que las tres fases se encuentran separadas, no como en el caso de un transformador trifásico que se tienen en un mismo tanque.

La conexión en banco trifásico tiene algunas desventajas como las siguientes:

1). Es un poco más caro comprar tres transformadores monofásicos que uno trifásico.

2). Un banco de transformadores monofásicos en conexión trifásica ocupa mas espacio en la subestación que un transformador trifásico.

De lo anterior se puede tomar como norma que los bancos de transformadores monofásicos de potencia se emplean para transmitir grandes cantidades de energía con tensiones muy elevadas.

En la subestación tipo industrial (5000 KV, 23 KV) se emplean transformadores trifásicos individuales o en operación paralelo.

Para que operen correctamente los transformadores monofásicos conectados en bancos trifásicos, se deben cubrir los siguientes requisitos:

- 1). Que tengan igual capacidad (KVA).
- 2). Que tengan iguales tensiones en el primario y el secundario (igual relación de transformación).
- 3). Que tengan igual o aproximadamente igual porcentaje de impedancia.
- 4). Que tengan la misma polaridad.

Para que las condiciones anteriores se puedan cubrir en forma satisfactoria es recomendable que los transformadores que integran el banco sean de un mismo fabricante.

Las conexiones mas comunes de transformadores monofásicos en bancos trifásicos son:

- 1) Delta-Delta. ($\Delta - \Delta$).
- 2) Delta-Estrella ($\Delta - Y$).
- 3) Estrella-Estrella ($Y - Y$).
- 4) Estrella-Delta ($Y - \Delta$).

1) Conexión Delta-Delta.- La conexión $\Delta - \Delta$ Fig.4.5 es poco usada ya que está limitada para alimentar cargas a tres hilos (motores trifásicos). Tiene la desventaja de que debe operar a tensiones relativamente bajas, (del orden de 23 KV), pero tiene la ventaja de que si algún transformador del banco trifásico falla, se puede seguir alimentando a la carga trifásica con dos transformadores empleando la conexión Δ abierta - Δ abierta.

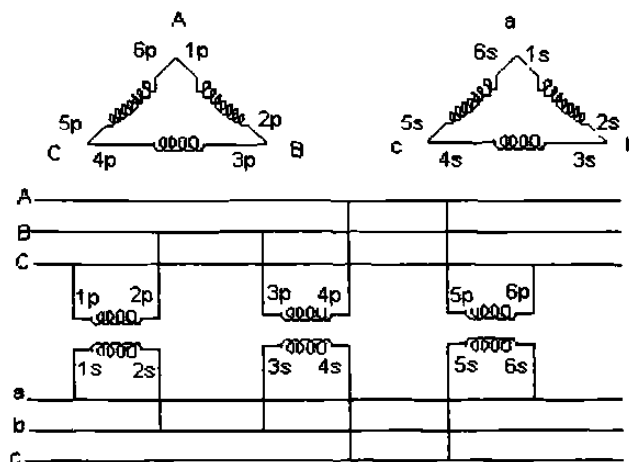


Fig.4.5 Conexión de transformadores en delta

La conexión Δ abierta - Δ abierta Fig.4.6, si falla un transformador es la siguiente:

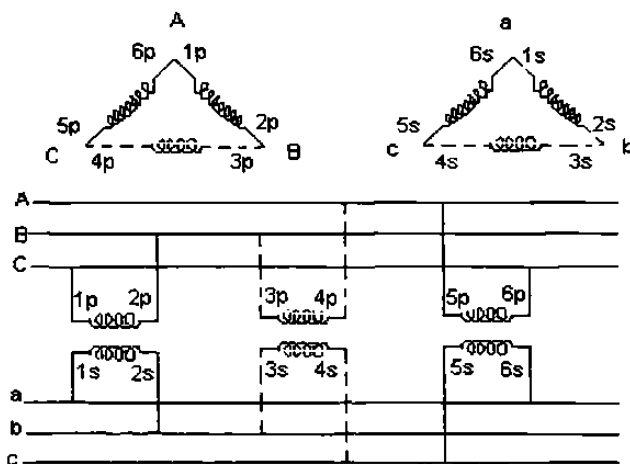


Fig.4.6 Conexión delta abierta

La potencia del banco es aproximadamente 60% de la potencia total.

2) Conexión Delta-Estrella.- La conexión $\Delta - Y$ Fig. 4.7 es la más usada en las subestaciones industriales conectando la Δ en el lado de alta tensión, y la Y en el lado de carga. Con esto se logra tener dos tensiones con el lado de carga. Una tensión entre líneas para alimentar cargas de fuerza (motores), y otra de línea a neutro para alimentar alumbrado.

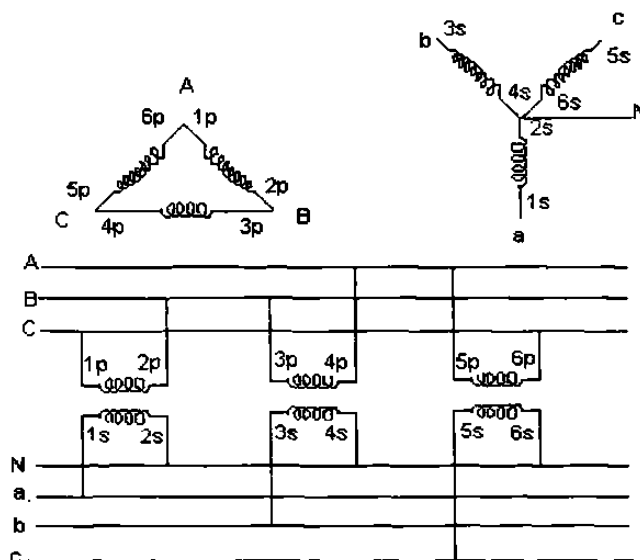


Fig.4.7 Conexión de transformadores en delta-estrella

3) Conexión Estrella-Estrella.- La conexión Y - Y es poco usada. Solo se emplea en las subestaciones donde se trabaja en muy alta tensión en el primario y en el secundario (mayores de 100 KV). En las subestaciones industriales prácticamente no tiene uso.

4) Conexión Estrella-Delta.- La conexión Y - Δ tiene características contrarias a la Δ - Y y es empleada para reducir la tensión y alimentar cargas trifásicas exclusivamente.
Ver apéndice A-6

4.1.5 Capacitores para la corrección del factor de potencia

Como se sabe los motores de inducción en corriente alterna al igual que otros aparatos que operan bajo el principio de inducción electromagnética, requieren de una corriente de magnetización en sus circuitos, esta corriente de magnetización se encuentra 90° atrasada con respecto a la corriente activa que demanda el motor y que se puede considerar en fase con el voltaje.

Como estas corrientes son cantidades vectoriales, la resultante se le conoce como la corriente de línea que demanda el motor y que forma un ángulo ϕ con respecto a la corriente activa. Como se vio en el capítulo 2 párrafo 2.4.2 el coseno de este ángulo se conoce como el **factor de potencia** y el valor de la potencia activa depende del valor de este ángulo.

Debido a que la corriente de magnetización en el motor se mantiene constante cualquiera que sea la carga, el factor de potencia de un motor varia con la carga, siendo menor cuando la carga disminuye.

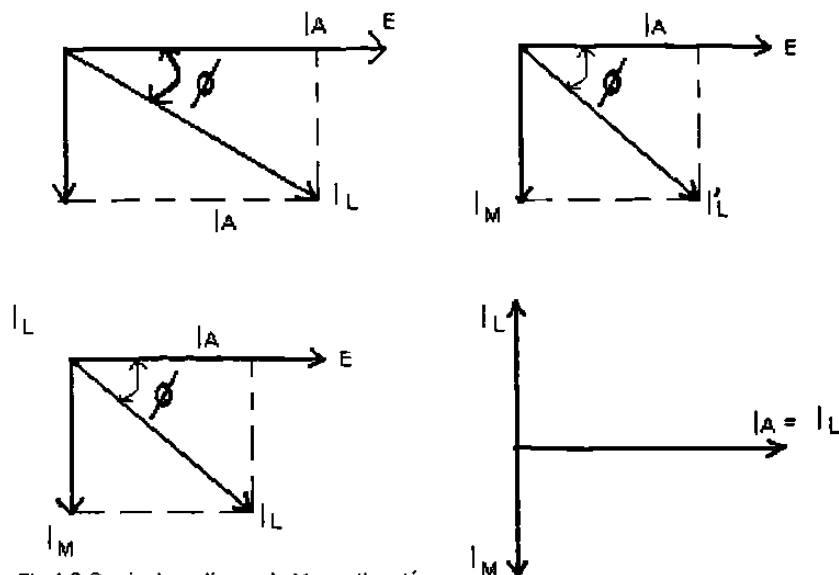


Fig.4.8 Corriente activa y de Magnetización

I_A = Corriente activa

I_M = Corriente de magnetización

I_L = Corriente de línea

E = Voltaje de fase

I'_L = Corriente del motor a media carga = $I_L / 2$

Frecuentemente se emplean potencias en lugar de corrientes para la representación vectorial

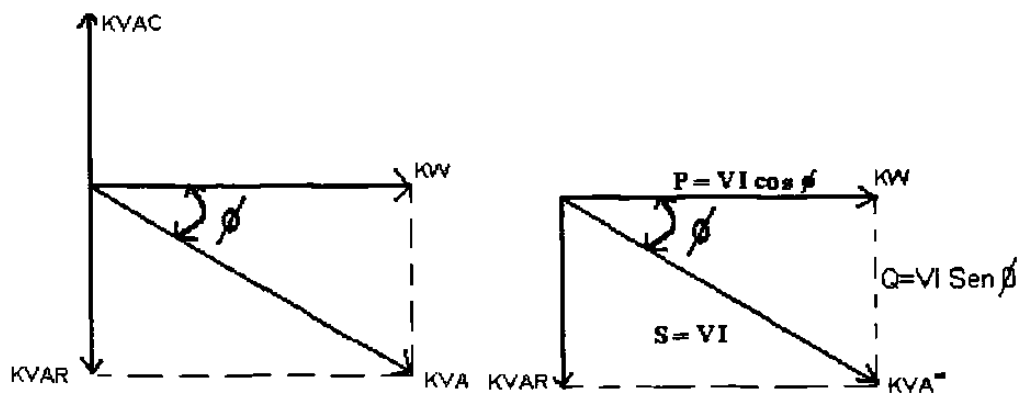


Fig.4.9 . Triangulo de potencia para circuito inductivo

KVA \Rightarrow Potencia aparente = $KW / \cos \phi$

KW \Rightarrow Potencia activa

KVAR \Rightarrow Potencia reactiva (inductiva) = $KVA \sin \phi$

KVAC \Rightarrow Potencia del banco de capacitores $KVAR - KVAR''$

Donde $KVA'' = KVAR - KVAC$

ϕ \Rightarrow Angulo inicial

KVA'' \Rightarrow Potencia aparente después de la corrección

Mientras el factor de potencia se encuentre más próximo a la unidad es mejor para la instalación, por lo tanto conviene tener este factor tan próximo a la unidad , con lo que además de cumplir con los requerimientos de C.F.E que establece un mínimo de 0.9 se tienen calibres de conductores que alimentan las cargas con un costo menor.

Los capacitores producen un efecto contrario al efecto reactivo, o sea una corriente adelantada 90° con respecto a la corriente activa y al voltaje, por lo que si se conecta junto al motor un condensador de capacidad adecuada de tal forma que contrarreste el efecto de la reactancia IM , el ángulo ϕ se puede variar de tal forma que se ajuste a un valor conveniente.

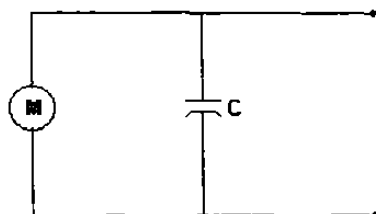


Fig. 4.10 . Condensador conectado a las terminales de un motor

Instalación de capacitores.- En las instalaciones de fuerza existen básicamente tres formas distintas de instalar capacitores para corrección del factor de potencia .

a).- Conexión del banco de capacitores en alta tensión como lo muestra la Fig. 4.11

Con este método se corrige el factor de potencia de toda una planta, ofrece las

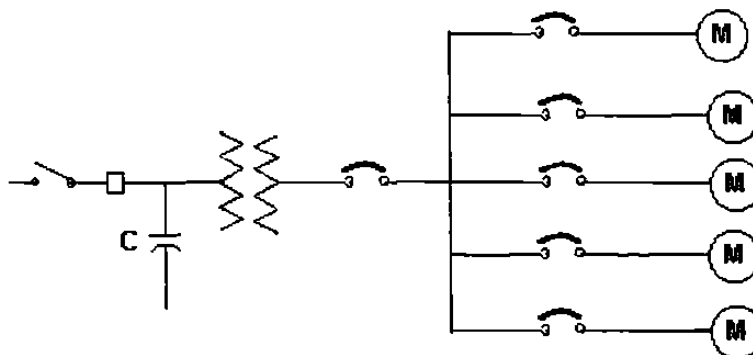


Fig.4.11. Condensador conectado en el lado de alta tensión

ventajas siguientes:

- 1).- Reduce el pago a C.F.E. por bajo factor de potencia
- 2).- El costo del banco de capacitores es menor debido a que es mas barato comprar capacitores para alta tensión.

Entre las desventajas que se pueden tener son:

- 1) .- Requiere de mayor cuidado para su instalación, protección y operación.
- 2) .- No se tiene un ahorro por reducción en el calibre de los conductores en alimentadores y circuitos derivados de motores instalados en el secundario del transformador.

Este método se recomienda en instalaciones pequeñas.

b).- Conexión de capacitores en las terminales del motor.

Como se ha descrito la demanda de potencia reactiva de un motor de inducción varia con las condiciones de carga, disminuyendo apreciablemente en condiciones de baja carga. Por consiguiente, 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 opera el motor en condiciones de baja carga o marcha en vacío.

Por otra parte , el tamaño del banco de capacitores también resulta limitado por el fenómeno de auto excitación del motor, que se puede originar en el momento de la desconexión. Cuando se desconecta un motor de inducción al que se le han instalado capacitores de potencia, la tensión entre bornes de conexión no baja rápidamente a cero, como sucede cuando se desconecta un motor sin capacitores. Esto es debido a que la corriente de descarga de los capacitores mantiene un cierto campo magnético en las bobinas del motor, induciéndose una tensión de auto excitación mientras el motor sigue girando por su propia inercia. Si los capacitores están excedidos en potencia reactiva, esta tensión puede alcanzar valores considerablemente mas altos que la tensión nominal del motor, poniendo en peligro tanto al aislamiento del motor, como a los capacitores mismos.

Para evitar estos problemas, debe procurarse que las potencias del banco de capacitores no exceda a la potencia reactiva requerida por el motor para la marcha en vacío. Corrigiendo el factor de potencia en vacío a un valor próximo al 100%, puede obtenerse un factor de potencia a plena carga del orden del 95%, sin que se exceda en ningún momento la demanda reactiva del motor. Se han elaborado tablas que dan orientación sobre la potencia reactiva máxima del banco de capacitores, que puede