



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE REACTORES CON NÚCLEO DE AIRE

Luis Orlando Polanco Vásquez

Asesorado por el Ing. José Guillermo Bedoya Barrios

Guatemala, marzo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE REACTORES CON
NÚCLEO DE AIRE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

LUIS ORLANDO POLANCO VASQUEZ

ASESORADO POR EL ING. JOSE GUILLERMO BEDOYA
BARRIOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton de León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo País Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
SECRETARIA	Inga. Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE REACTORES CON NÚCLEO DE AIRE,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 13 de septiembre de 2007.


Luis Orlando Polanco Vásquez

Guatemala 8 de enero de 2009

Coordinador del Area de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Ciudad

Estimado Ingeniero:

Por este medio tengo el agrado de comunicarle que el trabajo de tesis **Características y Aplicaciones de Reactores con Núcleo de Aire**, elaborado por el Bachiller Luis Orlando Polanco Vásquez con carne No. 200112532 el cual asesore se encuentra totalmente terminado y cuenta con mi total aprobación para la continuación del proceso de tesis.

Sin otro particular, me suscribo de usted

Atentamente



Ingeniero José Guillermo Bedoya
Colegiado No. 4846

JGB



REF. EIME 02.2009.
Guatemala, 19 de ENERO 2009.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE REACTORES CON
NÚCLEO DE AIRE, del estudiante; Luis Orlando Polanco Vásquez,
que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
Coordinador Área de Potencia

JGBB/sro





REF. EIME 03.2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Luis Orlando Polanco Vásquez, titulado: **CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE REACTORES CON NÚCLEO DE AIRE**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
DIRECTOR



GUATEMALA, 20 DE ENERO 2,009.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 010.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE REACTORES CON NÚCLEO DE AIRE**, presentado por el estudiante universitario **Luis Orlando Polanco Vásquez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, marzo de 2009

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS:

Por haberme guiado durante toda la vida, y darme todo lo que tengo, porque para Él es todo honor y toda gloria.

LA SANTISIMA VIRGEN:

Por ser mi ejemplo a seguir en obediencia.

MIS PADRES:

María Pilar Vásquez y Francisco Orlando Polanco, quienes me apoyaron y me dieron el aliento necesario para superar los momentos adversos de la carrera y la vida.

MIS HERMANOS: Carolina del Pilar, Francisco Emmanuel y Carlos Roberto, por ser mis consejeros y amigos.

MIS ABUELOS Y TÍOS:

A quienes agradezco su apoyo en especial a Roberto Chamelé, por su cariño y comprensión.

MI ASESOR:

Ing. José Guillermo Bedoya Barrios, quien colaboró con mi persona brindándome su conocimiento y apoyo en la realización de este trabajo de graduación.

A MI MADRINA:

Jenny Girón, por todo el apoyo que siempre me brindó.

A MIS AMIGOS: de la Universidad, del INBC y la Comunidad de Margaritas, quienes me ayudaron siempre cuando lo necesitaba.

AGUSTO FIGUEROA: Por brindarme su amistad y apoyo en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS A:

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA:

Por ser Alma Mater de mi formación profesional

FACULTAD DE INGENIERÍA:

Por los conocimientos adquiridos durante estos años.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XV
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII

1. PRINCIPIOS Y CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR CON NÚCLEO DE AIRE.	1
1.1 Principios de electromagnetismo para reactores con núcleos de aire.	1
1.1.1 Los núcleos de aire en reactores.	1
1.1.2 Circuito equivalente y diagrama fasorial reactor núcleo de aire	4
1.1.3 Factor de calidad en reactores con núcleo de aire.	5
1.2 Reactores secos con núcleo de aire.	7
1.2.1 Características de diseño	8
1.3.1 Características de diseño.	12
1.4 Aislamiento para reactores con núcleo de aire.....	15
1.4.1 Clasificación de los materiales aislantes	16
1.4.1.1 Aislamientos sólidos	19
1.4.1.2 Aislamientos líquidos	20
1.4.4 Niveles de aislamiento	21

2. APLICACIONES DE REACTORES CON NÚCLEO DE AIRE	27
2.1 Reactor con núcleo de aire limitador de corriente.....	27
2.1.1 Generalidades de la limitación de corriente en sistemas eléctricos.....	28
2.1.2 Normas y cálculos de las Icc	29
2.1.2.1 Cálculo de las Icc. por el método de las impedancias	30
2.1.2.2 Cálculo según la IEC 60909	33
2.1.3 Reactores de reducción de corto circuito.....	40
2.1.4 Reactores para interconexión en paralelo de transformadores	44
2.2 Reactor compensador de línea shunt.....	49
2.2.1 Generalidades de la compensación reactiva inductiva en los sistemas eléctricos.....	51
2.2.2 Compensación paralelo de potencia reactiva en sistemas eléctricos.....	57
2.3 Reactores de puesta a tierra.....	61
2.4 Reactores con núcleo de aire para filtros de armónicos	65
2.5 Reactores controlados por tiristores	77
2.5.2 Descripción del equipo compensador balanceador de cargas trifásicas.	84
3. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA ESPECIFICACIONES DE REACTORES CON NÚCLEO DE AIRE.....	91
3.1 Método directo	91
3.2 Método por curvas de capacidad	92
3.3 Cálculo por computadora	97
3.5 Especificaciones de reactores con núcleo de aire según cálculo.....	99
4. ESTUDIO DE LA MANIOBRA DE APERTURA DE UN BANCO DE REACTORES DE NÚCLEO DE AIRE DE MEDIA TENSIÓN.....	105
4.1 Descripción de la instalación.....	107

4.2 Síntesis de la teoría de maniobra de reactores	108
4.3 Cálculos preliminares.....	111
4.4 Datos para el estudio obtenidos de los ensayos de los interruptores.....	113
4.5 Estudios realizados.....	114
5. COMPARACIÓN DE REACTORES CON NÚCLEO DE AIRE Y REACTORES CON NÚCLEO FERROMAGNÉTICO.....	123
5.1 Comparación técnica.....	123
5.2 Evaluación económica.....	125
5.3 Comparación física.....	128
6. CÁLCULO DE DISTANCIAS MAGNÉTICAS PARA REACTORES DE NÚCLEO DE AIRE CON BASE A CAMPOS Y FLUJOS MAGNÉTICOS DISPERSOS.....	133
6.1 Fórmulas básicas para el estudio y cálculo del comportamiento del campo magnético, alrededor de reactores de núcleo de aire en función de la distancia .	134
6.2 Fundamentos para la limitación de la exposición de campos magnéticos emf en reactores de núcleo de aire.....	157
6.3 Regulaciones internacionales sobre los valores máximos de exposición a frecuencia de 60 hz de campos magnéticos producidos por reactores eléctricos.	159
6.4 Efectos de campos magnéticos en creados por reactores de núcleo de aire.....	160
6.5 Modelamiento y configuraciones de banco de reactores para disminución de efectos de campo magnético.....	164
CONCLUSIONES.....	179
RECOMENDACIONES.....	183
BIBLIORAFÍA.....	185
APENDICES.....	189

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Líneas de flujo magnético en bobinas con núcleo de aire.....	2
2. Circuito equivalente de un reactor con núcleo de aire	4
3. Diagrama fasorial del reactor con núcleo de aire.....	5
4. Columnas de reactor con núcleo de aire	9
5. Tipos de cubiertas para reactor con nulo de aire.....	11
6. Reactor seco con núcleo de aire	11
7. Reactor seco con núcleo de aire inmersos en aceite	15
8. Sistema de aislamiento para un reactor con núcleo de aire.....	21
9. Reactores con núcleo de aire para limitación de corriente de c.c.	27
10. Cálculo de los diferentes cortocircuitos, según método de impedancias	31
11. Variación del factor K en función de R/X o R/L	37
12. Corriente de corto circuito trifásico I_k''/I_r	38
13. Los valores de λ máx y λ mín	40
14. Sistema de potencia para el cálculo de reactor limitador de corriente.....	41
15. Conexión de 2 transformadores en paralelo.....	46
16. Conexiones de 2 transformadores en paralelo con un reactor de balance.....	46
17. Reactores con núcleo de aire de compensación shunt	50
18. Curvas P-V de un sistema de potencia con carga constante	53
19. Curva típica Q-V	54
20. Gráfica Característica de una línea de transmisión.	55
21. Capacidad de transmisión de potencia real de una línea no compensada.....	56
22. Diagrama esquemático de un controlador de reactancia con un (ccv).....	58

23. Variación del voltaje como función de la longitud de la línea.....	60
24. Reactor con núcleo de aire para puesta a tierra.....	61
25. Reactores con núcleo de aire para filtros armónicos.....	65
26. Fuente de corriente monofásica tipo “Switch”.....	67
27. Esquema de conexión de filtros ejemplo.....	70
28. Entrada a un reactor en línea.....	72
29. Salida de un reactor en línea.....	73
30. Entrada a un filtro pasivo.....	73
31. Salida de un filtro pasivo.....	74
32. Entrada a un filtro activo.....	75
33. Salida de un filtro activo.....	75
34. Reactores con núcleo de aire controlados por tiristores.....	77
35. Esquema básico del compensador estático con inductor controlado.....	81
36. Potencia reactiva estable versus el voltaje en terminales de CCV.....	82
37. Carga trifásica y equipo compensador balanceador.....	85
38. Circuito de conexión de condensador.....	86
39. Circuito de conexión de reactor.....	87
40. Interconexión entre filtro activo shunt y equipo TBC.....	88
41. Diagrama circular de las condiciones de transferencia en el extremo recibido.....	94
42. Diagrama circular de las condiciones de transferencia de en el extremo envío.....	94
43. Diagrama circulares en el extremo recibido para varios valores de $ V_s $ y un valor constante de $ V_k $	95
44. Diagrama circulares en el extremo envío para varios valores de $ V_s $ y un valor constante de $ V_k $	95
45. Ventana para parametrizar un compensador en Asp.....	98
46. Diagrama unificar estación “I 500”.....	108
47. Voltaje fase-tierra en terminales del disyuntor ante la apertura del mismo.....	109
48. Circuito equivalente de la red.....	115
49. Circuito equivalente de la red de 31.5 Kv del transformador a los reactores.....	116

50. Circuito equivalente de cada fase de cada reactor	116
51. voltaje fase – tierra que abre el lado del reactor.....	118
52. Gráfico que muestra las pérdidas en los reactores con núcleo de aire versus el factor de calidad.	126
54. Típicos diseños de reactor de núcleo de aire y hierro	129
55. Características de diseño físico	130
56. Reactor vista en sección transversal.....	135
57. Ciclo cerrado de corriente generado por un reactor ce núcleo de aire	138
58. Reactor vista en sección transversal.....	140
59. Gráfica del modelo de campo magnético en el eje paralelo del reactor.....	143
60. Distribución de líneas de campo magnético en reactor con núcleo de aire	144
61. Gráfica modelo de campo magnético en eje perpendicular del reactor	145
62. Distribución de líneas de campo magnético en reactor de núcleo con aire	145
63. Modelo de 2D para la distribución de campo magnético.....	145
64. La distribución de los embobinados de fase de reactor.....	147
65. Campo magnético interior de espiral de reactor	149
66. El solenoide (a) y el campo magnético del área elemental (b)	150
67. Intensidad de campo magnético sobre el eje del embobinado	152
68. Formación del campo magnético cerca del reactor: S_r - el área de superficie lateral del reactor; h_{mat} - la altura de medición del punto P; A, B, C - puntos de centros geométricos de embobinados de reactor.....	154
69. Distribución de H de intensidad de campo magnético y B la densidad de flujo magnético instantánea valuada sobre el eje de reactor, cuando $i_A = I_m$	154
70. Diagrama de H de intensidad de campo magnético y B de densidad de flujo magnético en plano horizontal $h_{mat} = 1,8m$ de entorno del reactor.	155
71. Distribución de B de densidad de flujo magnético en el plano radial obtenido por modelamiento.	155
72. Arreglo trifásico de reactores con núcleo de aire en forma horizontal	165
73. Líneas de campo magnético de reactores con núcleo de aire trifásico.	165

74. Gráfica de B densidad de campo magnético en función de la distancia X entre dos reactores de núcleo de aire colocados en el plano horizontal.	167
75. Visualización distribución de B densidad de cambio continuo de flujo magnético en un banco trifásico de reactores colocados en plano horizontal.....	168
76 Visualización de curvas de contorno de B densidad de campo magnético de banco de reactores trifásico colocado en plano horizontal.....	167
77. Arreglo trifásico de reactores con núcleo de aire en forma vertical.....	169
78. Líneas de campo magnético producidos por reactores con núcleo de aire.	170
79. La gráfica muestra el comportamiento del flujo de de campo magnético en el centro de reactores de núcleo de aire en el plano vertical.	171
80. Visualización distribución de B densidad de cambio continuo de flujo magnético en un banco trifásico de reactores colocados en plano vertical.....	172
81. Arreglo de banco trifásico en forma de matriz.....	174
82. Líneas de campo magnético producidos por un banco de reactores con núcleo de aire trifásico en forma de matriz.....	174
83. Visualización distribución de B densidad de cambio continuo de flujo magnético en un banco trifásico de reactores colocados en forma de matriz.....	175
84. La gráfica muestra el comportamiento del flujo de de campo magnético en el plano horizontal del arreglo de banco de reactores de núcleo de aire	176
85. La gráfica muestra el comportamiento del flujo de de campo magnético en el plano vertical del arreglo de banco de reactores de núcleo de aire.	176

TABLAS

I. Niveles de aislamiento para reactores con núcleo de aire	26
II. Factores de corrección para nivel de aislamiento, según altura	26
III. Valores de factor c para cálculo Icc (IEC 60909)	34
IV. Ecuaciones de cálculo de cortocircuito, según norma IEC	35
V. Análisis de furier de la forma de onda de la corriente.....	68
VI. Comparación en las características del desempeño	76

VII. Comparación de los valores de la norma con la simulación	119
VIII. Valores de pendientes en el reencendidos	121
IX. Valores de pendiente en reencendido para distancia de capacidad en bornes del interruptor	122
X. Eficiencias típicas para reactores de núcleo de aire	126
XI Comparación de los reactores con núcleo de hierro y núcleo de aire	131
XII Valores de máxima exposición de campo magnético a frecuencia industrial 60 Hz	159
XIII Rangos de corrientes de umbral para efectos indirectos, incluyendo a niños, mujeres y hombres.....	161
XIV. Niveles de referencia para la exposición del público en general exposición a campos eléctricos de tiempos variables y magnéticos	162
XV. Niveles de referencia para las corrientes de contacto de tiempo variable provenientes de objetos de conductores de corriente producidos por campos electromagnéticos	163

GLOSARIO

Compensación de potencia:	Acto de colocar dos elementos de generación de potencia reactiva (positiva y/o negativa) para la anulación de la misma.
Flujo de dispersión:	Flujo que no pasa por la parte útil de un circuito magnético.
Pérdidas por Histéresis:	Es la energía gastada en orientar el dominio magnético de un material en dirección del campo magnético aplicado.
Permeabilidad:	Medida de qué tan bueno es un material con respecto al aire para servir de trayectoria, para líneas de fuerza magnética.
Potencia reactiva:	Parte imaginaria de la potencia compleja, equivalente al valor pico de la componente que viaja hacia delante y hacia atrás en una línea, resultando en un promedio igual a cero.
Potencia activa:	Parte real de la potencia compleja y es el valor promedio del producto $V \cdot I$, donde V e I son el voltaje y la corriente alterna respectivamente.

- Reactancia:** Oposición ofrecida al flujo de corriente alterna por la capacitancia o inductancia relacionada con la frecuencia de la corriente, se representa por X.
- Saturación Magnética:** Estado de magnetización más allá del cual un metal o unas aleaciones es incapaz de magnetizarse aún más.
- Suceptancia:** Es el recíproco de la reactancia. La parte imaginaria de la admitancia. Se representa por B y se mide en mhos.

LISTA DE ABREVIATURAS

AT	Alta Tensión
BT	Baja Tensión
CCV	Control continuo de voltaje
BIL	Nivel básico de impulso (<i>Basic Impulse Level</i>)
AC	Corriente Alterna
Hz	Hertz
FP	Factor de potencia
SVC	Stactic Variable Compensator

LISTA DE SÍMBOLOS

$i(\alpha)$	Corriente total controlada por tiristores
$i_F(\alpha\alpha)$	Componente fundamental de corriente controlada por tiristores
B_C	Suceptancia capacitiva paralelo de una línea
B_L	Suceptancia inductiva
X_L	Reactancia inductiva serie.
θ	Ángulo entre voltaje y corriente de un circuito
C	Capacitancia/unidad de longitud
L	Inductancia/unidad de longitud
S_S	Potencia del extremo de envío
S_R	Potencia del extremo receptor
β_L	Constante de fase, radianes/unidad de longitud
α_L	Constante de atenuación, neppers/unidades de longitud
γ	Constante de propagación en una línea
$\frac{d\psi}{dt}$	Cambio continuo de flujo magnético
I_{cc}	Intensidad de corriente de cortocircuito permanente
I_k''	Intensidad de corriente de cortocircuito inicial (IEC 60909)
I_k	Intensidad de corriente de cortocircuito régimen estable o permanente
I_b	Intensidad de corriente de cortocircuito de ruptura o cortada
I_p	Intensidad de corriente de cortocircuito pico (IEC 60909)

I_r	Intensidad de corriente asignada de un alternador
I_g	Intensidad de corriente de falla a tierra de un alternador
THD	Factor total de distorsión de armónicos
∞	Infinito
Z_{cc}	Impedancia de corto circuito
Z⁺, Z⁻, Z⁰	Impedancia de secuencia positiva, secuencia negativa, secuencia cero.
X⁺, X⁻, X⁰	Reactancia de secuencia positiva, secuencia negativa, secuencia cero
R_L	Resistencia unitaria o lineal de línea
c	Factor de tensión
k	Constante determinadas (tablas o ábacos)
λ	Factor dependiente de la inductancia de saturación X _d sat.
Z_K	Impedancia de impulso de una línea
P_n	Potencia natural (SIL)
ϵ_n	Error con números
ρ_n	Polinomios de Legendre

RESUMEN

Un reactor con núcleo de aire es un dispositivo eléctrico utilizado para introducir reactancia inductiva a un circuito eléctrico de potencia.

Las pérdidas en reactores con núcleo de aire en comparación con los que utilizan núcleo de hierro se pueden reducir, además en un sistema de potencia los reactores son elementos que sirven para la reducción de corrientes de cortocircuito, reducción de la susceptancia paralelo de una línea de voltaje, lo cual se vuelve importante en cargas ligeras, ya que cuando el voltaje en el extremo receptor sería de otra manera muy elevado, también se utilizan estos elementos en los filtros de armónicas.

Los reactores con núcleo de aire, han sido utilizados ampliamente en los sistemas eléctricos de potencia de alta tensión, con excelentes resultados técnicos económicos.

El factor de calidad Q es muy importante en los reactores con núcleo de aire es una de sus principales características que indica qué tan eficiente es el reactor. Por esta razón, los reactores con núcleo de aire son mas eficientes que los reactores con núcleo de hierro

Para el cálculo de reactores en los sistemas de potencia tanto para la limitación de corriente como para el cálculo de reducción de la susceptancia paralelo de una línea de voltaje, se realizó a través del programa ASP. este es un software en plataforma Windows con una poderosa interfaz gráfica, altamente amigable al usuario que permite emprender los siguientes estudios:

Cálculo de corrientes de cortocircuito con reactores limitadores de corriente.

Cálculo de flujo de carga con reactores shunt.

Esta herramienta fue concebida en primera etapa, para que el procedimiento cálculo del módulo de corrientes de cortocircuito fuera estandarizado y convalidado bajo normativa del Comité Electromecánico Internacional, específicamente el estándar IEC-60909.

Los reactores monofásicos y trifásicos con núcleo de aire no importando si son usados para limitar corrientes o para conectar a neutro, compensar potencia reactiva, operan a altas densidades de flujo magnético en todo tiempo. Este campo magnético puede causar corrientes circulantes y pérdidas de histeresis en cualquier material magnético que este dentro del campo de dispersión. Esto implica una precaución especial en unidades monofasica como trifásicas con respecto a los miembros estructurales de su base. El campo magnético de reactor puede llegar a veces a valores peligrosos para el ser humano. Por lo tanto, es importante saber la distribución del campo magnético y sus valores extremos para determinar las distancias adecuadas para protección de equipos por flujos magnéticos dispersos y también distancias para proteger la salud de las personas.

El campo magnético en entorno de reactor puede ser calculado cuando la distribución del campo magnético sobre el eje de reactor es conocido. El campo magnético sobre el eje de reactor puede ser calculado y modelado por la ley Biot - Savart de Laplace.

Los campos magnéticos en reactores con núcleo de aire se pueden simular a través del programa *ViziMag*, que logra describir las visualizaciones de líneas de campo magnético además calcula y modela las distribuciones de los flujos de los mismos en función de las distancias, las mediciones de campo magnético se compararon con base en las normas de la asociación internacional protección de la radiación IRPA para poder establecer las distancias adecuadas para los reactores con núcleos de aire con respecto a las personas.

La exposición a campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia, normalmente resulta en una absorción energética insignificante y un aumento de temperatura no medible en el cuerpo y en los materiales. Sin embargo, la exposición a campos electromagnéticos a frecuencias mayores a unos 60HZ puede resultar en una absorción energética y aumentos de temperatura. En general, la exposición a un campo electromagnético uniforme.

Un método para controlar un nivel de campo magnético se comprende en la acción de conectar dos reactores de potencia en serie o paralelos de forma que sus momentos de dipolo son opuestos para formar un cuadrupolo, el cual da como resultado campo magnético que varía inversamente a la cuarta potencia de la distancia de los reactores donde los dos reactores pueden ser conectados como un cuadrupolo .

Reactores con núcleo de aire no se saturan, es poco probable que suelte ruido audible si no está correctamente fabricado, campo magnético disperso alto y mayor eficiencia

OBJETIVOS

Generales:

1. Proporcionar los fundamentos necesarios para implementar los reactores con núcleo de aire en sistemas eléctricos en Guatemala.
2. Obtener los conocimientos necesarios sobre las aplicaciones de reactores con núcleo de aire.

Específicos:

1. Indicar las ventajas de los reactores con núcleo de aire sobre los que utilizan otro tipo de núcleo.
2. Dar una descripción acerca de los reactores con núcleo de aire.
3. Indicar las aplicaciones donde pueden ser útiles los reactores con núcleo de aire.
4. Indicar como se dimensionan y especifican los reactores con núcleo de aire.
5. Indicar las precauciones que se deben de tomar debido a los altos flujos magnéticos dispersos que generan los reactores con núcleo de aire.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo de graduación, el autor analizará la reducción de pérdidas en reactores de núcleo de aire en comparación con los que utilizan otro tipo de núcleo, además métodos de reducción de corrientes de cortocircuito, utilizando reactores serie de núcleo de aire, reducción de la susceptancia paralelo de una línea de voltaje, lo cual se vuelve importante en cargas ligeras, ya que cuando el voltaje en el extremo receptor sería de otra manera muy elevado, también como se utilizan estos elementos en los filtros de armónicas.

Se explicará el funcionamiento de los reactores de núcleo de aire, iniciando con una descripción de las características de los mismos en general.

Antes de describir las funciones de los reactores de núcleo de aire en los sistemas de potencia se indicarán de forma abstracta los principios básicos que fueron la base para la implementación de estos elementos en sistemas eléctricos de potencia.

El cálculo para la implementación de reactores de núcleo de aires en líneas largas se trata en uno de los capítulos de este trabajo, describiendo las fórmulas y las gráficas que se utilizan para este cálculo.

Se realiza un análisis de comparación del uso de reactores con núcleo ferromagnético y reactores con núcleo de aire, junto a una evaluación económica de los reactores en función de costo de equipo y costo de pérdidas, además se analizará los aspectos relevantes de la conocida teoría de maniobra de reactores “*shunt*” utilizando reactores de núcleo de aire.

Con la implementación de reactores con núcleo de aire, se busca la solución para la reducción de pérdidas en los sistemas de potencia, además de la reducción de ruido audible en su funcionamiento y tener una instalación libre de mantenimiento y fallas en los sistemas, además de la protección del público y trabajadores de los efectos a estar expuestos a campos magnéticos dispersos.

El trabajo describe los fenómenos magnéticos que ocurren dentro y alrededor del reactor con núcleo de aire, explicando cómo se pueden proteger a los equipos que pueden sufrir problemas por los flujos magnéticos dispersos y también proteger a las personas de este mismo.

1. PRINCIPIOS Y CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR CON NÚCLEO DE AIRE.

Un reactor con núcleo de aire es un dispositivo eléctrico utilizado para introducir reactancia a un circuito eléctrico de potencia.

En este capítulo, se indicarán los principios básicos que fueron la base para la implementación de estos elementos en sistemas eléctricos de potencia.

1.2 Principios de electromagnetismo para reactores con núcleos de aire.

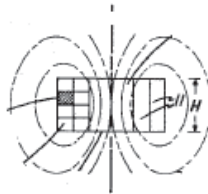
El electromagnetismo representa una parte integral en varios de los dispositivos eléctricos de la industria, en los reactores con núcleo de aire no es la excepción, por esta razón, en este trabajo se presenta una explicación de los fenómenos electromagnéticos en reactores con núcleo de aire.

1.1.1 Los núcleos de aire en reactores.

Consideremos los efectos que tienen un núcleo de aire en los circuitos magnético obsérvese la presencia de los núcleos de aire en las figuras no.1 la dispersión de las

líneas de flujo fuera del área común del núcleo de aire se conoce como aparición de márgenes.

Figura 1. Líneas de flujo magnético en bobinas con núcleo de aire



La densidad del flujo en el núcleo de aire se obtiene mediante

$$B_g = \frac{\phi_g}{A_g}$$

en donde para nuestro proposito (1-1)

$\phi_g = \phi_{nucleo}$ = flujo magnetico del nucleo

$A_g = A_{nucleo}$ =Area del nucleo

Para la mayoría de las aplicaciones prácticas, la permeabilidad del aire se considera igual que la del espacio libre. En tal caso, la fuerza magnetizadora del núcleo de aire se determina por medio de

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_g}$$

En donde H_g = *Intensidad* del campo magnetico en el núcleo de aire

B_g = densidad del flujo magnético en el núcleo de aire

μ_g = Permeabilidad del flujo magnético del aire

Y la caída de la fmm en el núcleo de aire es igual a $H_g I_g$ la siguiente es una ecuación para H_g .

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_o} = \frac{B_g}{4 \times 10^{-7}}$$

$$H_g = (7.96 \times 10^5) B_g \quad (1-3)$$

La capacidad que tiene una bobina para oponerse a cualquier cambio en la corriente es una medida de la auto inductancia L de la bobina. La auto inductancia se mide en henrios los reactores son bobinas de diferentes dimensiones diseñadas para introducir cantidades específicas de reactancias en un circuito. La inductancia de una bobina varía con relación directa a las propiedades magnéticas de la bobina. La inductancia se determina según la ecuación siguiente:

Los reactores se construyen generalmente en forma de discos selenoidal para la cual es adecuada esta ecuación.

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{l} (\text{henrios}) \quad (1-4)$$

En donde N representa la cantidad de vueltas; μ_0 la permeabilidad del núcleo en este caso sería la permeabilidad del espacio A el área del núcleo l la longitud de la bobina.

El diámetro de la bobina se mide entre centros del alambre.

Con esta simple fórmula ya estamos en condiciones de encarar la construcción de un reactor de núcleo de aire.

Calculando el número de espiras del reactor con núcleo de aire

Para calcular el número de espiras, conociendo el diámetro y la longitud del bobinado podemos emplear:

$$N = \sqrt{\frac{L * l}{A * \mu_0}} \quad (1-5)$$

1.1.2 Circuito equivalente y diagrama fasorial reactor núcleo de aire

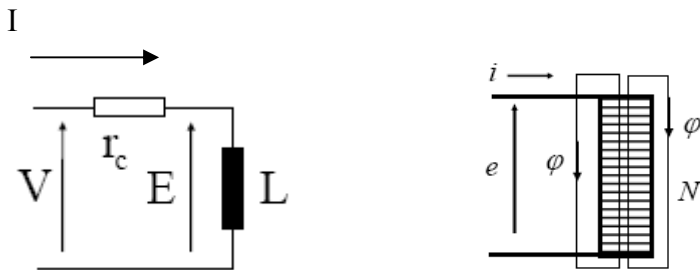
Generalmente este tipo de reactor no se obtiene con alto valor de inductancia solamente aumentando el número de vueltas.

En el caso de hacer crecer N , el reactor se hace muy costoso por la cantidad de cobre o aluminio necesario.

El reactor con núcleo de aire es lineal.

Este tipo de reactor no tiene pérdidas en el núcleo y es lineal. Su modelo o circuito equivalente consiste únicamente en una inductancia de valor L y la resistencia del conductor r_c .

Figura 2. Circuito equivalente de un reactor con núcleo de aire



Análisis de circuito equivalente

voltaje

$$V = I r_c + j I x_L = V_R + j V_L \quad (1-6)$$

corriente

$$I = I_{xL} = I_R \quad (1-7)$$

potencia aparente

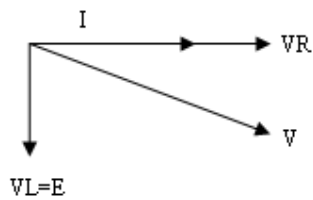
$$S_R = P_R + j Q_R \quad (1-8)$$

$$P_R = P_c = I^2 * r_c = \frac{V_R^2}{r_c} \quad (1-9)$$

$$Q_R = \frac{E^2}{xL} = \frac{V_L^2}{xL} \quad (1-10)$$

No hay pérdidas en el núcleo

Figura 3. Diagrama fasorial del reactor con núcleo de aire



1.1.3 Factor de calidad en reactores con núcleo de aire.

El factor de calidad Q es muy importante en los reactores con núcleo de aire porque es una de sus principales características que indica que tan eficiente es el reactor.

El factor de calidad Q se define como la proporción de potencia reactiva del inductor y la potencia promedio de su resistencia. EL Q es un número que indica cuánto se aproxima el inductor real al ideal, cuanto mayor sea el Q , más perfecto será el inductor. Tanto la resistencia y la capacidad parásita intervienen en el Q .

Así, cuanto más baja sea la resistencia de la bobina, más alto será el Q y más "ideal" será nuestro inductor.

El factor de calidad también es una señal de cuanta energía almacena en comparación con lo que se disipa entre más bajo es el nivel de disipación para la misma potencia reactiva, mas grande es el factor Q y más concentrada e intensa es la región.

El Q se obtiene efectuando el cociente entre la reactancia y la resistencia del inductor. La resistencia es distinta a la de corriente continua por el llamado "efecto pelicular".

$$Q_s = \frac{I^2 X_l}{I^2 R} \quad (1-11)$$

$$Q_s = \frac{X_l}{R_l}$$

Ahora bien, *¿de qué depende el Q de una bobina sin núcleo?*. Pues bien, **depende fundamentalmente de su geometría**. (esto es porque los parámetros físicos quedan "escondidos" detrás de los geométricos y para nosotros esto es una ventaja).

El Q es directamente proporcional al diámetro de la bobina.

El Q de una bobina es mayor a medida que se eleva la frecuencia.

Los reactores de núcleo de aire modernos tienen inherentemente factores de calidad (Factor Q o "Q Factor" en inglés) altos y por lo tanto bajas pérdidas.

Comentemos sobre el factor Q. Mientras el factor de potencia ($\cos \theta$) es usado para describir la potencia activa en cargas eléctricas en general, la componente de pérdidas en los reactores se expresa comúnmente por el factor de calidad del reactor (factor Q) que es:

$$Q_R = \text{Potencia reactiva} = I^2 X \rightarrow X = 2\pi f L \quad (1-12)$$

Pérdidas $I^2 R$

Donde

Q = Factor Q

I = Corriente

X = Reactancia del reactor

R = Pérdida equivalente (serie) de la resistencia de CA del reactor

f = Frecuencia

$$\pi = \text{Pi} = 3.14159$$

La relación entre el factor Q y el factor de potencia se da

$$Q = \tan \vartheta \gg \frac{1}{\cos \vartheta} \quad (1-13)$$

ϑ = Angulo

$\cos \vartheta$ = factor de potencia

Ya regresando al tema de los reactores las pérdidas se dan por:

Pérdidas = KVAR

Factor Q

En general, a mayor tamaño de reactor, es decir mayores KVAR las pérdidas disminuyen.

1.2 Reactores secos con núcleo de aire.

El diseño y la fabricación de los reactores con núcleo de aire exigen ingeniería avanzada, mano de obra de alta calidad y un excepcional grado de limpieza en el taller. Cada reactor de potencia del tipo de núcleo de aire es único, diseñado y construido en estrecha relación con los datos técnicos de aplicación.

Aunque el aspecto sea similar al de un transformador de potencia en diseño y aislamiento del devanado para optimizar la fiabilidad y la relación coste eficacia, y minimizar los costes de ciclo de vida las corrientes de entrada, la linealidad, la generación de armónicas y la simetría entre fases son muy distintas.

Los reactores tienen que soportar frío y calor intenso, rayos y terremotos, además de violentas fluctuaciones de la tensión. Las pruebas

El reactor de núcleo de aire consiste de un arrollamiento de cobre o aluminio enrollado alrededor y apoyado por una estructura de aluminio, concreto o de fibra de vidrio. La estructura de está flotando en un potencial de línea con interruptores de apoyo para minimizar los requerimientos de aislamiento y costo. La inductancia de los reactores de núcleo de aire es principalmente determinada por el número de vueltas, altura y diámetro del reactor

Los reactores secos con núcleo de aire se utilizan para voltajes donde no se requiere tanto nivel de aislamiento, pueden ser utilizados para limitar corrientes de falla, la otra función a la que son aplicables es para el consumo de potencia reactiva en los sistemas de potencia. Dependiendo de la aplicación se construyen en los siguientes rangos: de 5 a 6000 KVA. y de 0 a 34.5 Kv. para la limitación de corriente de falla. Para la compensación de potencia reactiva son los siguientes rangos: 4 a 25 Mvar., y de 0 a 34.5 Kv.

Es esencial que para la limitación de corriente en un reactor su saturación magnética a altas corrientes no reduzca la reactancia del arrollamiento, esto ocurre en los reactores con núcleo de hierro y por eso se prefiere un reactor con núcleo de aire debido a sus características lineales.

Los reactores tipo seco debido a que requieren espacios libres y detalles necesarios para minimizar el efecto corona, se limitan a un nivel de aislamiento máximo de 34.5 Kv.

1.2.1 Características de diseño

Barras de fijación

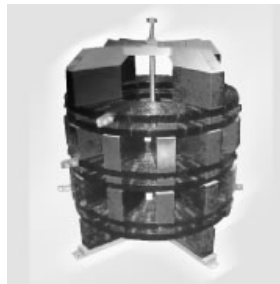
Se utilizan para unir solidamente las abrazaderas que forman las columnas. Están hechas de una resina epoxica reforzada con fibra de vidrio de alta resistencia a la tensión.

Abrazaderas o afianzadores

Pueden estar fabricados de fibra de vidrio o materiales de plástico con altas características dieléctricas, tienen una forma de cuña para amoldarse a la curvatura que presenta al conductor. Se usan para sujetar las vueltas del conductor que forma el reactor.

La separación entre las vueltas del conductor, es fijada por los dientes que presenta la abrazadera, permite una transmisión de calor. El enfriamiento por convección es causado por la corriente de aire que circula por el reactor. El aire que circula a través de los conductores es debido a que el lado inferior del reactor esta cerrado por un disco solidó.

Figura 4. Columnas de reactor con núcleo de aire



El devanado

Los devanados se hacen, literalmente, a mano. Se trata de una habilidad que requiere un largo aprendizaje, dado que la calidad y la precisión del devanado son esenciales para el rendimiento del reactor. Para las voltajes más altas, se dividen los devanados en dos circuitos paralelos, con terminal de línea en el centro, y dos extremos neutrales en las culatas superior e inferior.

Los reactores se pueden equiparse también fácilmente con un devanado secundario de carga limitada para la alimentación en las cercanías del reactor. Esta potencia auxiliar

puede ser el suministro de potencia primaria o secundaria para el servicio de la estación en subestaciones situadas en lugares remotos.

El reactor es devanado en forma de discos continuos de forma circular o formando cilindros concéntricos de paquetes de cables. El conductor utilizado en los arrollamientos en algunas ocasiones están formados por varios hilos con el objeto de reducir las corrientes de eddy.

Para dar al reactor un acabado fino con buena calidad mecánica y dieléctrica el conjunto completo es sumergido varias veces en barniz de buenas características térmicas.

Soportes terminales

Son diseñados para proporcionar baja resistencia de contacto y una superficie adecuada para la conexión de los conductores de cobre o aluminio. Los reactores deben tener terminales del mismo material que el arrollamiento para evitar posibilidades de corrosión por ser materiales distintos.

Para los casos en que el reactor utilice conductor de aluminio es indispensable que los soportes tengan terminales de aluminio y asegurados con arandelas de presión para una adecuada unión del reactor al conductor.

Aisladores de montaje

La resistencia a los esfuerzos mecánicos de la resina de poliéster hacen que este material sea muy utilizado para la fabricación de los aisladores de montaje tipo interior además se utiliza vidrio y una base no magnética. Según se destine el reactor para uso interior o de intemperie se debe de disponer el adecuado tipo de aislador.

Disco plataforma de fijación

La plataforma no tiene contacto directo con los cables, forma un refuerzo destinado a absorber los esfuerzos mecánicos originados por los cortos circuitos y provee una base firme para el sostén de las columnas formadas por las abrazaderas o afianzadores.

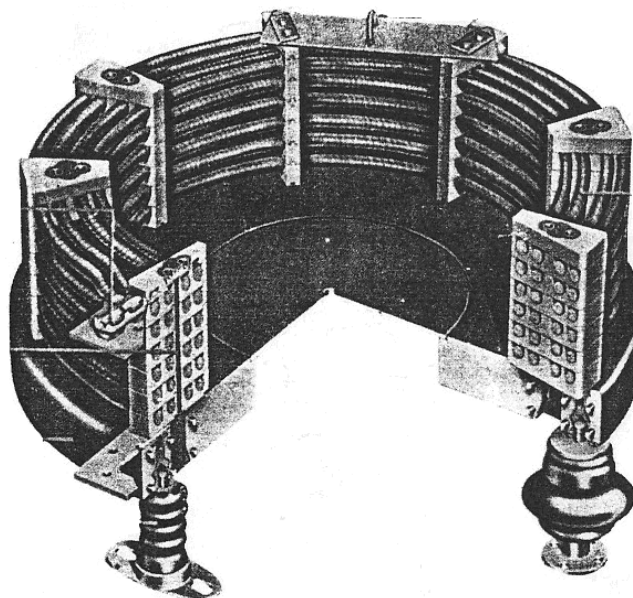
Cubierta

En caso de ser necesario una cubierta para la protección del reactor, esta deberá ser un material antimagnético para evitar radiaciones electromagnéticas.

Figura 5. Tipos de cubiertas para reactor con núcleo de aire



Figura 6. Reactor seco con núcleo de aire



1.3 Reactores con núcleo de aire inmersos en aceite

Se pueden usar con el objetivo de incrementar la impedancia del sistema para limitar las corrientes de falla o para compensación en paralelo de potencia reactiva. Estos reactores se diseñan para estar mecánicamente y térmicamente protegidos de corrientes de cortocircuitos simétricos que pueden fluir cuando ocurre una falla del lado de la carga con un voltaje de 105% del valor nominal del reactor previendo que la corriente no exceda 33-1/2.

1.3.1 Características de diseño.

Devanado

En bobinas de los reactores para corrientes de 100 amp. Y menos se usan tiras de cobre, y para mayores de 100 amp. Se usan tiras de cobre libres de bordes afilados y cable de hilos concéntricos de bajas pérdidas.

Las bobinas se devanan ya sea como placas cilíndricas o como arrollamiento en forma de pilas una de disco de cable. Para voltajes superiores a 34.5 Kv solamente se usa la forma de pila de discos. Las pérdidas por corrientes de eddy se reducen dimensionando adecuadamente las tiras o bandas conductoras.

La bobina se fija mediante varillas de alta resistencia mecánica como dieléctrica entre dos placas de presión. La base de la estructura soporte se centra con pines al fondo del tanque y la parte superior se fija firmemente a las paredes o la parte superior del tanque.

Pasa tapas condensadoras

Tipo de sobre montar, el condensador rodea un tubo central de cobre. A diámetros específicos se insertan placas de chapas de metal que forman el condensador. Así una serie de condensadores de equivalente capacidad se ordenan entre el conductor central y la placa exterior, la cual se conecta a una brida aterrizada.

Equipo de preservación del aceite

Los reactores de alto voltaje y alta potencia, normalmente se protegen con el sistema de inercia. Este sistema consiste de un cilindro de gas nitrógeno seco bajo una alta presión, aproximadamente 2000 PSI cuando se instala inicialmente. Una válvula reductora que baja la presión del nitrógeno a ½ PSI y permite la entrada del gas al tanque siempre que la presión en el tanque baje a ½ PSI. Una válvula limitadora de presión que libera hacia la atmósfera siempre que la presión en el tanque exceda 8 PSI. Este sistema mantiene una capa de nitrógeno sobre el aceite y no posibilita una explosión secundaria en caso de un arco interno.

Equipo de sellado. Este sistema de preservación de aceite excluye el oxígeno y la humedad, evitando así deterioración del líquido y del aislante. El tanque del reactor se llena con aceite bajo vacío. Una válvula de alivio mantiene al reactor sellado en un rango de temperatura de hasta 100°C. las válvulas limitadoras de presión y de vacío se calibran para operar a +/-6.5 Lbs/pulg.

Cuba y tapa. Válvulas

La cuba se construirá en chapas de acero con refuerzo para soportar el peso del reactor completo, el conjunto será lo suficientemente fuerte para evitar que el transporte o movimiento del reactor completo con aceite produzca deformaciones permanentes.

Válvulas de cuba

Las válvulas de aceite de cuba estarán diseñadas específicamente para que no existan perdidas al operar con aceite aislante.

Drenaje completo de cuba

Toma de muestra de aceite

Conexión inferior y drenaje para tratamiento de aceite

Aislamiento del rele buchholz

Radiadores

Los radiadores serán montados a la cuba a través de válvulas estancas, en forma tal que cualquiera de ellos pueda ser removido para revisión o reparación sin que se manifiesten inconvenientes en el servicio.

Rele buchholz- antisísmico

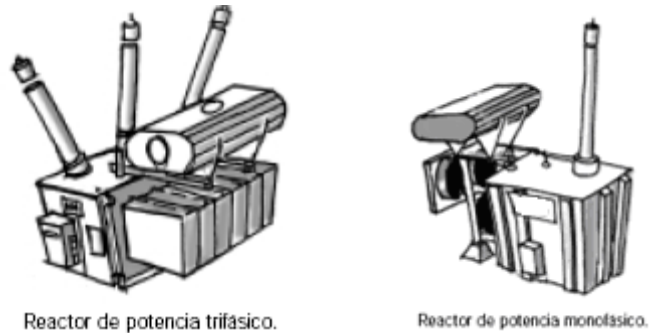
Operara tanto en incremento brusco de presión, como por una acumulación de gases.

Tendrá un indicador a bandera contara con contactos para alarma por baja acumulación de gases, para alta acumulación tendrá otros dos, independientes para disparar y alarma.

Indicador de nivel de aceite

Los indicadores de nivel tipo magnético son los más utilizados, tienen contactos para alarma por bajo nivel o sobre nivel.

Figura 7. Reactores con núcleo de aire inmerso en aceite



1.4 Aislamiento para reactores con núcleo de aire

El aislamiento para los reactores en la mayor parte de los casos está constituido por papel, aceite mineral, fibra de vidrio, cinta de algodón.

Por ejemplo en los reactores con núcleo de aire secos se utiliza para el aislamiento del devanado en cada hilo emanal sintético o con óxido de aluminio cuando se trata de un cable de aluminio. El cable completo es forrado con papel aislante que es tratado por medio de un proceso térmico de alto grado o también con fibra de vidrio.

Para reactores inmersos en aceite de núcleo de aire se usa papel aislante impregnado en aceite entre las tiras del arrollamiento también se utiliza cinta de algodón. Se usan espaciadores para separar los cables tanto en la dirección en que se devanan las capas discoidales como entre capas.

El aceite proporciona características dieléctricas, protección contra la humedad en los aislantes sólidos y actúa como refrigerante.

Los aislantes líquidos de materiales eléctricos de alta voltaje son materiales eléctricos de alta voltaje que permanecen como tales en las aplicaciones eléctricas (máquinas, aparatos, componentes en general) y que cuando se encuentran en servicio no experimentan ninguna transformación física o química importante.

Se emplean para llenar espacios con dieléctrico homogéneo, para disipar el calor y para apagar arcos.

1.4.1 Clasificación de los materiales aislantes

Una forma de clasificación de los materiales aislantes, es conforme la temperatura máxima de funcionamiento continuo que puede alcanzar un material aislante. La clasificación fue hecha en Estados Unidos por la A.I.E.E (American Institute of Electrical Engineers) y adoptada posteriormente por la C.E.I. (Comisión Electrotecnia Internacional).

El fallo del material aislante no puede producirse de una manera brusca, con perforaciones inmediata al llegar a la zona de temperatura crítica si no por deterioro mecánico gradual con el tiempo. Por esta razón la temperatura que puede soportar un material aislante, se basa en la cantidad de tiempo que ha de estar sometido a dicha temperatura.

Por lo general, la rigidez dieléctrica aumenta en su inicio mientras disminuye su resistencia mecánica debido a la eliminación de humedad.

La vida de un material aislante depende del acceso de oxígeno, humedad, productos químicos al exterior de su estructura. La vida de un material aislante depende también del grado de tiempo de trabajo y de la carga que soporta realmente durante su funcionamiento.

La clasificación de los materiales aislantes por sus valores máximos de temperatura son los siguientes.

Clase Y

La temperatura de trabajo es de 90°. Aislamiento compuesto de algodón, seda y papel sin impregnación, papeles cartones, fibra vulcanizada, madera, polietileno reticulado, etc.

Clase A

La temperatura de trabajo es de 105°C. Aislamiento compuesto de materiales como los expuestos en la anterior clasificación pero cuando están sumergidos en un dieléctrico, algunos de estos materiales son.

- Papel, algodón, seda impregnados en dieléctrico líquido.
- Fibra vulcanizada y madera impregnados
- Poli cloruro de vinilo.
- Barnices aislantes con base de resinas naturales.

Clase E:

La temperatura de trabajo es de 120°C. entre estos se pueden citar los siguientes.

- Esmaltes a base de acetato de polivinilo, esmaltados cubiertos con fibra natural o artificial.
- Papel baquelizado, película de tereftalato de polietileno.

- Fenolicas
- Moldeados y estratificados con base de algodón o papel de resinas.
- Barnices de resinas liquidas.

Clase B:

La temperatura de trabajo es 130°C.

- Esmaltes con base de resinas de poliuretanos
- Tejidos de vidrio y amianto impregnados con barnices con base de resinas sintéticas y de aceite.
- Mica y papel de mica aglomerada con goma y laca, compuestos asfálticos y resinas alquidicas.
- Aislamiento de caucho etileno-propileno.
- Moldeados y estratificados de amianto y fibra de vidrio con resinas fenolicas, de melamina, epoxidicas y de poliéster.
- Tejidos de vidrio-*amianto.
- Barnices de resinas de melamina, epoxidicas y de poliéster.

Clase F:

La temperatura de trabajo 150°C.

- Tejido de fibra de vidrio tratado con resina de poliéster
- Mica y papel de mica, aglomerada con resinas de poliéster o con resina epoxidicas.
- Estratificados con base de tejido de vidrio y resina epoxidicas de gran resistencia térmica.
- Estratificado amianto-vidrio.

Clase H:

Temperatura de trabajo 180°C

- Aislamiento de elastómeros de silicona
- Tejido de fibra de vidrio, aglomerado con resinas de siliconas o recubrimiento con elastómeros de siliconas.
- Mica y papel de mica, aglomerada con siliconas.
- Estratificados con fibra de vidrio y resinas de siliconas.
- Barnices aislantes con base de resina de siliconas.

Clase C:

La temperatura de trabajo es superior a 180°C.

- Micas pura y estratificadas de papel de mica con aglomeradas inorgánicas.
- Estratificados de aminato y aglomerados inorgánicos.
- Porcelana y materiales cerámicos. Vidrio y cuarzo.

1.4.1.1 Aislamientos sólidos

Entre los aislantes sólidos más utilizados en la actualidad en los sistemas de aislación de reactores destacan las cintas sintéticas PET (tereftalato de polietileno), PEN (naftalato de polietileno) y PPS (sulfido de polifenileno) que se utilizan para envolver los conductores magnéticos de los bobinados, razón por la cual estas cintas deben exhibir, además de excelentes propiedades dieléctricas, buena adherencia sobre los alambres magnéticos, que poseen cobertura de barnizo otro elemento de gran importancia en el aislamiento entre vueltas de las bobinas de reactores es el cartón prensado o pressboard, el cual da forma a estructuras de aislación rígidas.

- Estos materiales normalmente son:
 - Madera
 - Papel Kraft
 - Papel Manila

- Papel StCpé
- Cartón prensado
- Cinchos de papel
- Algodón
- Fibra de vidrio

1.4.1.2 Aislamientos líquidos

Los fluidos o líquidos dieléctricos cumplen la doble función de aislar los bobinados en los reactores y disipar el calor al interior de estos equipos. El líquido dieléctrico más empleado es el aceite mineral, el cual se obtiene a través de procesos de refinación del petróleo de manera similar a los aceites lubricantes. El principal inconveniente del aceite mineral es su carácter inflamable, situación que abrió la puerta a la elaboración de fluidos dieléctricos sintéticos o hidrocarburos con alto punto de inflamación (sobre 300°C).

En lo que respecta a los líquidos aislantes sintéticos, el más utilizado desde principios de la década de 1930 hasta fines de los 70's fue el ascarel o PCB. Los ascareles poseían buenas propiedades dieléctricas y además se caracterizaban por no ser inflamables. Estas características justificaron la utilización de los PCB's en reactores con clases de tensión de hasta 34.5 kV, no obstante, el ascarel dejó de utilizarse debido a su impacto ambiental, por tratarse de un líquido extremadamente contaminante. En la actualidad se han desarrollado fluidos sintéticos de características biodegradables o bien con alto punto de inflamación. Entre los nuevos líquidos sintéticos destacan las siliconas y los poly-alfa-olefines. El alto costo de estos nuevos aislantes sumado a su menor disponibilidad constituyen los principales escollos para masificar estos líquidos sintéticos en el aislamiento de reactores.

Figura 8. Sistema de aislamiento para un reactor con núcleo de aire



Construcción del sistema de aislamiento de barrera.



La soldadura de alta frecuencia (soldadura manual por microondas) mantiene el calor donde es necesario, en el punto de soldadura.

1.4.4 Niveles de aislamiento

Generalidades

La coordinación de aislamiento de los reactores es algo parecido a la coordinación de protecciones contra sobre corriente a base fusibles y otros dispositivos limitadores de corriente.

No siempre un sobreaislamiento en algunas partes de la instalación es conveniente desde el punto de vista protección contra sobre tensiones ya que esto podría traer como consecuencia cuando ocurran sobre tensiones intensas que se presentan flameos o rupturas de aislamiento en partes vitales que pudieran ser inaccesibles.

Conexión a tierra del neutro

El factor de conexión a tierra o factor de aterrizaje de un sistema es la relación de la mayor tensión r.m.s. de línea a tierra en una fase no fallada, durante una falla de línea a

tierra a la tensión r.m.s. de línea línea que se tendría cuando la falla as tierra sea eliminada.

Se dice que un sistema esta efectivamente aterrizada, si esta porinicion no excede el 80%, y no efectivamente aterrizado si excede este valor.

Nivel de aislamiento y nivel de protección

El nivel de aislamiento de una parte de equipo de reactor se define como la relación de impulso y tensión permisible.

La tensión permisible de impulso o nivel de aislamiento al impulso se verifica por pruebas de sobre tensión de impulso y son frecuentemente referidas como el nivel básico de aislamiento al impulso B.I.L. (NBI) el nivel de aislamiento el impulso esta relacionado con la máxima tensión del sistema, por las tablas dadas.

El nivel de protección al impulso de un dispositivo de protección es la más alta tensión (valor de cresta) que aparece en sus terminales cuando una tensión de impulso de forma de onda estándar se aplica bajo condiciones específicas. Este nivel de tensión se denomina frecuentemente “el nivel de protección” del sistema al cual dispositivo de protección esta conectado.

Para prevenir fallas por aislamiento, el nivel de aislamiento de las diferentes equipos de reactores conectados al sistema deben ser mayores que la magnitud de sobre tensiones transitorios que aparecen en el sistema.

La magnitud de las sobre tensiones transitorias esta usualmente limitadas a un nivel de protección por medio de dispositivos de protección y entonces el nivel de aislamientos tiene que estar arriba del nivel de protección por un margen de seguridad.

Normalmente, el nivel de aislamiento al impulso se ha establecido en un valor del 20% al 25% arriba del nivel de protección y se verificaron pruebas de sobre tensiones al impulso (con una onda de 1.2/50 microsegundos)

Desafortunadamente, tanto la coordinación de aislamiento como el nivel de protección dependen del número de condiciones que no pueden ser expresados precisamente como simples números. El niveles de protección de las distintas partes de reactores de una instalación depende de otras cosas de la magnitud y repetición, así como de la polaridad de la sobre tensión aplicada.

Niveles de aislamiento reducidos

La proporción de las descargas capaces de producir flameo en el aislamiento de los reactores, decrece a medida que la tensión en el sistema aumenta. A esta conclusión se ha llegado de estudios hechos en otros países para redes de 132Kv, 66 Kv, en sistemas de transmisión y distribución.

Actualmente con los niveles de tensión que se usan en transmisión y la tendencia a incrementarlos arriba 400 KV, la onda de sobre tensión por maniobra en los interruptores representan la causa principal de fallas en el aislamiento y por lo tanto los criterios que consideran solo las sobre tensiones por descarga atmosféricas para la coordinación de aislamiento debe de ser reconsiderados.

El primer problema que se presenta en los niveles de tensiones altas para la transmisión, es que el sistema de las cadenas y claros en el aire (distancia de conductor e estructura y conductor), no se incrementa linealmente con la tensión, se incrementa en forma aproximada como $V^{1.6}$

Es necesario considerar la frecuencia con la cual bajo condiciones normales de operación, las operaciones de maniobra de interruptores causan sobre tensiones.

Generalmente esto conduce a estudios estadísticos el cual se grafican en forma de histograma.

- a) Si el nivel de aislamiento se selecciona arriba del máximo nivel de sobre tensión producido por maniobra de interruptores, la probabilidad de falla de aislamiento es muy baja.
- b) Si se emplea un nivel de aislamiento reducido, la probabilidad de fallas en el aislamiento aumenta con relación al caso anterior.
- c) Si se emplea aislamiento reducido, pero la característica de distribución de sobre tensión se modifica por el uso de apartarrayos o amortiguamiento por resistencia en los interruptores la probabilidad de falla en aislamiento es baja.

Impulso de rayo normalizado

Es un impulso con forma de onda completa que tiene un tiempo de frecuencia de 1.2 microsegundos y un tiempo de cola de 50 microsegundos (cuando la onda requiere un valor equivalente al 50% del de cresta).

Por lo general, la literatura técnica describe esto como un impulso de $1.2*50$ microsegundos.

Tensión permisible al impulso

Se denomina así al valor de cresta de un impulso de rayo que puede ser aplicado al aislamiento bajo prueba sin que se produzca flameo o descarga disruptiva.

Nivel básico de aislamiento al impulso del rayo

Es un valor de referencia para la resistencia de aislamiento al impulso, expresado en términos del valor cresta de la tensión permisible al impulso de rayo normalizado.

En la tabla siguiente, se aplica para reactores monofásicos o trifásicos sumergidos de dieléctricos, aceite o líquido inerte, de los devanados, con una capacidad de 501 kVA o mayor, para operar en sistemas hasta de 138000 voltios de 60 Hz.

El nivel de aislamiento de un reactor sumergido en aceite se especificará por el voltaje de prueba al impulso (NBI) y el voltaje de prueba a baja frecuencia así:

El nivel de aislamiento de un reactor se fija en función de la tensión nominal de operación, las normas correspondientes, y los niveles de sobre tensiones existentes en el sistema. Se conoce con el nombre de Nivel Básico de Impulso y sus unidades en Kilovolts.

En un sistema eléctrico es muy importante coordinar los niveles de aislamiento entre el equipo y reactores para esto se cuenta con tres niveles de aislamientos.

Nivel 1, también llamado nivel alto, se utiliza en los aislamientos internos, no auto recuperable (sin contacto con el aire) de los aparatos como reactores, o interruptores.

Nivel 2, también llamado nivel medio o de seguridad. Este constituido por el nivel de aislamiento autorecuperable de las partes vivas de los diferentes equipos que están en contacto con aire. Este nivel se adecua de acuerdo con la altura sobre el nivel del mar.

Nivel 3, también llamado nivel bajo de protección. Esta constituidos por el nivel de tensión de operación de los pararrayos de protección.

Los niveles medio y alto puede ser entre 0-25% y entre nivel medio y bajo 15%.

Apartir de estos niveles de aislamiento se deben de adoptar las disposiciones necesarias, para evitar que se produzca efecto corona en los conectores de reactores y cualquier punto de la instalación.

En la tabla se maneja nivel de aislamiento al impulso pleno y reducido y también se maneja nivel de aislamiento a baja frecuencia plena y reducida y también

Tabla I. Niveles de aislamiento para reactores con núcleo de aire

Alto voltaje nominal del transformador (KV)	Aislamiento clase (kV)	Nivel básico al impulso (NBI) (kV pico)	Voltaje de prueba a baja frecuencia (kV)
34 400	34.5	200	70
43 800	46.0	250	95
67 000	69.0	350	140
115 000	115.0	550 – 450	230 – 185
138 000	138.0	650 - 550	275 – 230
230	230	750-1000	400-450
400	400	1300-1425	800-850

El efecto de la disminución de la densidad del aire a mayores alturas es reducir el voltaje de arqueo para una distancia determinada. La rigidez dieléctrica de aparatos que dependen total o parcialmente del aire para su aislamiento decrece cuando la altura aumenta. La rigidez dieléctrica de 1000 m.s.n.m. o menos para una determinada clase de aislamiento será multiplicada por el correspondiente factor de corrección por altura así:

Tabla II. Factores de corrección para nivel de aislamiento, según altura

Altura (m)	Factor Corrección
1 000	1.00
1 200	0.98
1 500	0.95
1 800	0.92
2 100	0.89
2 400	0.86
2 700	0.83
3 000	0.80
3 600	0.75
4 200	0.70
4 500	0.67

2. APLICACIONES DE REACTORES CON NÚCLEO DE AIRE

Los reactores con núcleo de aire han sido utilizados ampliamente en los sistemas eléctricos de potencia de alta tensión, con excelentes resultados técnicos económicos sumamente satisfactorios. Su uso aún más extensivo, no se ha realizado por tener poca información acerca de las ventajas y desventajas de los mismos, que al aplicarse sin un estudio más profundo los desechan como opción. El objetivo de este trabajo es poder clarificar esto.

2.1 Reactor con núcleo de aire limitador de corriente

Figura 9. Reactores con núcleo de aire para limitación de corriente de c.c.



Cuando ocurre una falla en un sistema eléctrico de potencia se presentan corrientes del tipo reactivo mucho mas grandes que la nominal, esto ocasionará fallas con la pérdida de

continuidad de servicio. Aparte las fallas de fase a tierra y entre fases, es un factor primordial en la selección de interruptores, el costo de estos se puede reducir con la reducción de corriente de I_{cc} .

Las aplicaciones de los reactores con núcleo de aire no solo se limitan a reducir corrientes de corto circuito en líneas de transmisión sino también para acoplamiento de transformadores de diferentes características.

Los reactores limitadores con núcleo de aire proporcionan, al limitar la corriente de corto circuito

1. Disminución en los requerimientos de equipo, lo que permite usar de menor capacidad o una vida más larga para los actuales.
2. Disminución en los esfuerzos en todo el equipo, lo que da una vida más larga. esto es particularmente importante en los transformadores de potencia.
3. Mantienen el voltaje en partes del sistema bajo condiciones remotas de falla,

2.1.1 Generalidades de la limitación de corriente en sistemas eléctricos.

Principalmente, la corriente de corto circuito en los sistemas eléctricos de potencia es reactiva originadas de la potencia de las fuentes de generación conectadas al sistema y de los efectos originados por motores síncronos y de inducción. El efecto generador de los motores durante los primeros ciclos de la corriente de cortocircuito se manifiesta de la siguiente manera, la intensidad disminuye rápidamente hasta llegar al valor determinado por la impedancia síncrona y las características de excitación de

generadores. A continuación se presenta algunas normas que se toman en cuenta para métodos de cálculos de corriente de cortocircuito.

2.1.2 Normas y cálculos de las Icc.

El estudio de las normas y cálculos de Icc. en los sistemas de potencia se estudia en este trabajo, porque una de las aplicaciones principales de los reactores de núcleo de aire es reducir la Icc. y para poder averiguar qué características debe tener el reactor para la limitación de corriente, por lo tanto es necesario calcular las impedancias que son las que limitan la Icc.

El método de las «impedancias», que permite calcular las corrientes de defecto en cualquier punto de una instalación, con una precisión aceptable. Consiste en sumar separadamente las diferentes resistencias y reactancias. Después del ciclo del defecto añadiendo, después también los generadores, hasta el punto considerado, calculando también la impedancia correspondiente. La Icc. se obtiene aplicando la ley de Ohm

El valor de la corriente de corto circuito se determina básicamente por la ley de ohm.

$$I_{cc} = V_n / \sum (Z_{cc}) \quad (2-1)$$

$$I_{cc} = \frac{V_n}{\sum Z_{cc}}$$

I_{cc} = corriente de corto circuito

V_n = Voltaje nominal

$\sum Z_{cc}$ = *sumatoria* de Impedancias del circuito

Cuando ocurre un corto circuito el valor de la impedancia se considera próximo a cero.

$$I = \frac{V}{0} = \infty$$

Para aplicar este método es imprescindible conocer todas las características de los diferentes elementos del ciclo de defecto (fuentes y conductores).

La norma IEC 60909 (VDE 0102) se aplica a todas las redes, radiales o malladas, hasta 230 kV. Basada en el teorema de Thevenin, consiste en calcular una fuente de tensión equivalente en el punto de cortocircuito, para, seguidamente, determinar la corriente en este mismo punto. Todas las alimentaciones de la red y las máquinas sincrónicas y asíncronas se sustituyen por sus impedancias (positiva, negativa y cero). Con este método se desprecian todas las capacidades de línea y las admitancias en paralelo de las cargas no giratorias, salvo las del sistema de secuencia cero

2.1.2.1 Cálculo de las I_{cc} por el método de las impedancias

Cortocircuito trifásico

Es el defecto que corresponde a la unión de las tres fases. La intensidad de cortocircuito I_{cc3} es:

$$I_{cc3\phi} = \frac{V/\sqrt{3}}{Z_{cc}} \quad (2-2)$$

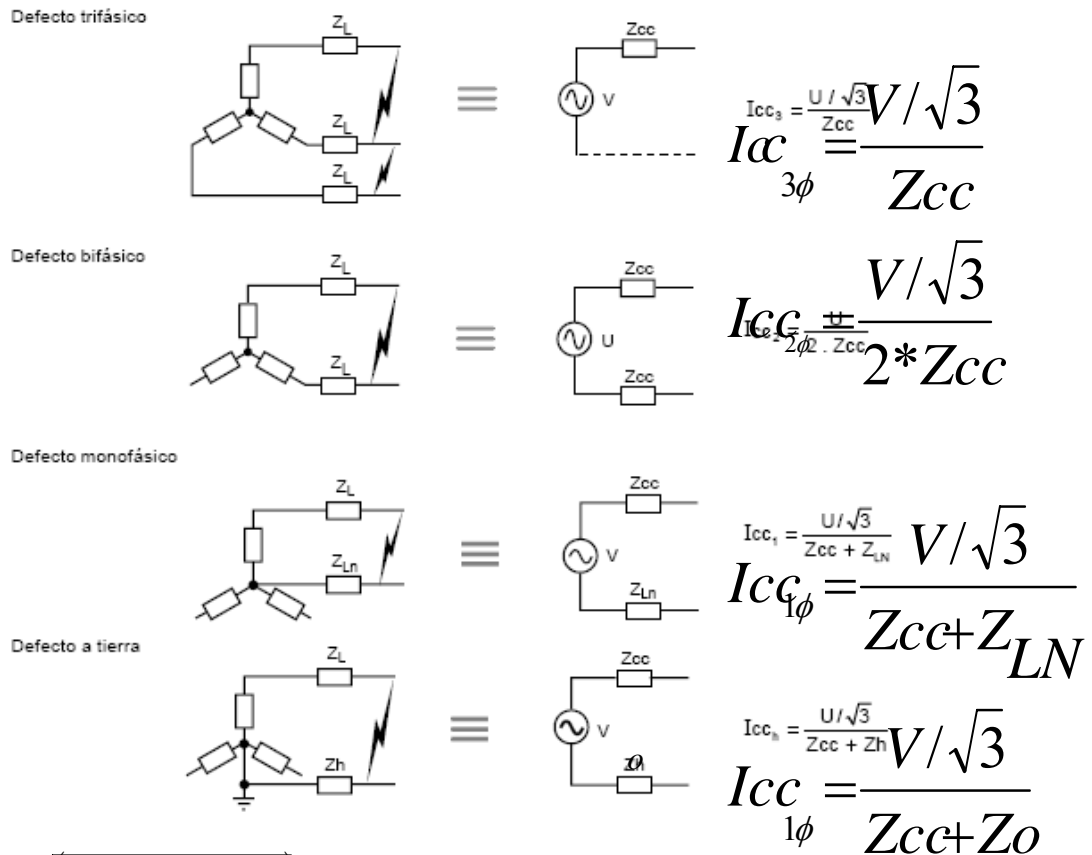
Siendo: V (tensión compuesta entre fases) la que corresponde a la tensión de vacío del transformador, cuyo valor es superior entre un 3% y 5% a la tensión en bornes de la carga.

Por ejemplo, en las redes a 390 V, la tensión compuesta que se considera es $V = 410$ V, y como tensión simple, $V/\sqrt{3} = 237$.

El cálculo de la intensidad de cortocircuito se reduce entonces al cálculo de la impedancia Z_{cc} , impedancia equivalente a todas las impedancias (de la fuente y las

líneas) recorridas por I_{cc} desde el generador hasta el punto de defecto (**Figura 10.**). Es, de hecho, la impedancia «directa» por fase:

Figura 10. Cálculo de los diferentes cortocircuitos, según método de impedancias



$$Z_{cc} = \sqrt{((\sum R)^2 + (\sum X)^2)}$$

Siendo:

$\sum R$ = suma de todas las resistencias en serie,

$\sum X$ = suma de todas las reactancias en serie.

Se considera normalmente que el defecto trifásico es el que provoca las corrientes más elevadas. En efecto, la corriente de defecto, en el esquema equivalente a un sistema polifásico, sólo está limitada por la impedancia de una fase bajo la tensión simple o de

fase de la red. El cálculo de $I_{cc3\phi}$ es pues es indispensable para elegir los materiales (intensidades y esfuerzos electrodinámicos Máximos a soportar)

Cortocircuito bifásico aislado

Corresponde a un defecto entre dos fases, alimentado por una tensión compuesta V . La intensidad $I_{cc2\phi}$ que circulará es inferior a la provocada por un defecto trifásico.

$$I_{cc2\phi} = \frac{V}{2 * Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{cc3\phi} \quad (2-3)$$

$$V_{tension\ simple} = V_{tension\ compuesta} / \sqrt{3}$$

Cortocircuito monofásico aislado

Corresponde a un defecto entre una fase y el neutro, alimentado por una tensión simple. La intensidad $I_{cc1\phi}$, que circulará en este caso será:

$$I_{cc1\phi} = \frac{V / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{LN}} \quad (2-4)$$

En algunos casos concretos de defecto monofásico, la impedancia de secuencia cero del generador es menor que Z_{cc} (por ejemplo, en los bornes de un transformador en conexión estrella-zig zag o de un alternador en régimen subtransitorio). En este caso, la intensidad monofásica puede llegar ser mayor que la de un defecto trifásico.

Cortocircuito a tierra (monofásica o bifásica)

Este tipo de defecto provoca la intervención de la impedancia de secuencia cero Z_0 . Salvo en presencia de máquinas rotativas, en las que la impedancia de secuencia cero se encuentra reducida, la intensidad I_{cc} que circulará es siempre inferior a la del defecto trifásico. El cálculo de esta intensidad puede ser necesario según el régimen de neutro (esquema de conexión a tierra) para la elección de los niveles de regulación de los dispositivos de protección secuencia cero (AT) o diferencial (BT).

resumen de las corrientes de cortocircuito (Figura 10).

2.1.2.2 Cálculo según la IEC 60909

La norma IEC 60909 define y presenta un procedimiento, que pueden usar los ingenieros no especializados, que utiliza las componentes simétricas. Se aplica a redes eléctricas con una tensión de servicio que sea inferior a 230 kV. Desarrolla el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas. Las primeras, las máximas, permiten determinar las características que hay que asignar a los materiales eléctricos. Las segundas, las mínimas, son necesarias para ajustar el calibre de las protecciones de sobre intensidad. Esta norma se completa, para su aplicación sobre redes BT, con la guía IEC 60781.

Procedimiento

1– Cálculo de la tensión equivalente en el punto de defecto, igual a: $V_{Eq} = V_n / \sqrt{3}$. Se introduce un factor "c" de la tensión porque es necesario para tener en cuenta:

- las variaciones de tensión en el espacio y en el tiempo,
- los cambios eventuales en las conexiones de los transformadores,

- el comportamiento subtransitorio de los alternadores y de los motores.

Según los cálculos a efectuar y los márgenes de tensión considerados, los valores normativos de este factor de tensión están indicados en la **Tabla III**.

2– Determinación y suma de las impedancias equivalentes, secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero, aguas arriba del punto de defecto.

3– Cálculo de la corriente de cortocircuito inicial, con ayuda de las componentes simétricas. En la práctica, según el tipo de defecto, las fórmulas a emplear para el cálculo de I_{cc} están indicadas en la Figura 10.

Tabla III. Valores de factor c para cálculo I_{cc} (IEC 60909)

Tensión nominal U_n	Factor de tensión c para el cálculo de	
	I_{cc} máx.	I_{cc} mín.
BT		
230 - 400 V	1	0,95
Otros	1,05	1
AT		
1 a 230 kV	1,1	1

4– A partir del valor de I_{cc} (I_k''), se calculan otras magnitudes como I_{cc} de cresta, I_{cc} permanente o, incluso, I_{cc} permanente máxima.

Influencia de la distancia de separación entre el defecto y el alternador

Con este método de cálculo es conveniente todavía distinguir dos casos:

- El de los cortocircuitos alejados de los alternadores, que corresponde a las redes en las que las corrientes de cortocircuito no tienen componente alterna amortiguada. Es generalmente el caso de circuito BT, salvo los que tienen receptores de gran consumo alimentados por centros de transformación propios.
- El de los cortocircuitos próximos a los alternadores, que corresponde a las redes para las que las corrientes de cortocircuito tienen componentes alternas amortiguadas. Este caso se presenta generalmente en AT, pero, alguna vez puede

también presentarse en BT cuando, por ejemplo, un grupo generador de emergencia alimenta derivaciones preferentes o prioritarias. Estos dos casos tienen como diferencias notables.

- Para los cortocircuitos alejados de los alternadores se presenta igualdad: por una parte, entre los valores de corrientes de cortocircuito inicial (I_k''), permanente (I_k) y cortada (I_b) por una parte ($I_k'' = I_k = I_b$) y por otra, entre las impedancias de secuencia positiva (Z^+) y negativa (Z^-) o sea ($Z^+ = Z^-$).

Tabla IV. Ecuaciones de cálculo de cortocircuito, según norma IEC

Tipo de Corto circuito	I_k'' Caso general	Defecto alejado de los generadores
Trifásico (Z_t cualquiera)	$= \frac{c \cdot V_n}{\sqrt{3}Z^+}$	$= \frac{c \cdot V_n}{\sqrt{3}Z^+}$
En los dos casos, la corriente de corto circuito solo depende de Z^+ . Generalmente Z^+ se reemplaza por Z_k : impedancia de cortocircuito en el punto del defecto con $Z_k = \sqrt{Rk^2 + Xk^2}$ donde Rk es la suma de las resistencias de una fase conectadas en serie Xk es la suma de las reactancias de una fase conectadas en serie.		
Bifásico aislado ($Z_t = \infty$)	$= \frac{c \cdot V_n}{Z^+ + Z^-}$	$= \frac{c \cdot V_n}{2Z^+}$
Monofásico	$= \frac{c \cdot V_n \sqrt{3}}{Z^+ + Z^- + Z^0}$	$= \frac{c \cdot V_n \sqrt{3}}{2Z^+ + Z^-}$
Bifásico a tierra (Z_{cc} entre fases=0)	$= \frac{c \cdot V_n \sqrt{3}}{Z^+ * Z^- + Z^- * Z^0 + Z^+ * Z^0}$	$= \frac{c \cdot V_n \sqrt{3}}{Z^+ + 2Z^0}$
<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje compuesta de la red trifásica=V • Corriente de cortocircuito en valor modular=I_k'' • Impedancias simétricas=Z^+, Z^-, Z^0 • Impedancia de cortocircuito=Z_{cc} • Impedancia de tierra =Z_t Valores de las corrientes de corto circuito en función de las impedancias $+, -, 0$		

en cambio, para los cortocircuitos próximos a los alternadores, se produce la desigualdad siguiente: $I_k < I_b < I_k''$; no siendo además necesariamente Z^+ igual a Z^- . Hay que destacar, además, que los motores asíncronos pueden también alimentar un cortocircuito,

que puede alcanzar su aportación el 30% del valor de I_{cc} de la red durante los treinta primeros milisegundos: la ecuación $I_{k''} = I_k = I_b$ no es, entonces, cierta.

Condiciones a respetar para el cálculo de las corrientes de cortocircuito máxima y mínima.

- El cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas tiene en cuenta los puntos siguientes:
 - el factor de tensión "c" a aplicar corresponde al cálculo de cortocircuito máximo,
 - de todas las hipótesis y aproximaciones citadas en este documento (IEC 60909) sólo deben considerarse las que nos conducen a un cálculo por exceso,
 - las resistencias R_L de las líneas (líneas aéreas, cables, conductores de fase y neutro) hay que considerarlas a una temperatura de 20°C.
 - Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito mínimas, hay que:
 - aplicar el valor del factor de tensión c correspondiente a la tensión mínima autorizada para la red,
 - elegir la configuración de la red y, en ciertos casos, la alimentación mínima para generadores y líneas de alimentación de la red, de tal manera que nos conduzcan al valor mínimo de la corriente de cortocircuito en el punto del defecto,
 - tener en cuenta la impedancia de los JdB, la de los transformadores de corriente, etc.
 - ignorar los motores,
 - considerar las resistencias R_L a la temperatura más elevada previsible:

$$R_L = \left[1 + \frac{0.004}{^{\circ}C} (\mathcal{G}_e - 20^{\circ}C) \right] \times R_{L20} \quad (2-5)$$

Donde R_{L20} es la resistencia a la temperatura de 20 °C y \mathcal{G}_e la temperatura (en °C) admisible para el conductor al acabar el cortocircuito. El factor 0,004 / °C se aplica al cobre, al aluminio y a las aleaciones de aluminio

Ecuaciones de las diferentes corrientes

Corriente de cortocircuito inicial I_k'' El cálculo de las diferentes corrientes de cortocircuito iniciales I_k'' se efectúa por aplicación de las fórmulas de la **figura 10**.

Valor de cresta I_p de la corriente de cortocircuito (pico)

El valor de cresta I_p de la corriente de cortocircuito, en las redes no malladas, puede calcularse, cualquiera que sea la naturaleza del defecto, a partir de la fórmula:

$$i_p = K \sqrt{2} I_k'' \quad \text{donde} \quad (2-6)$$

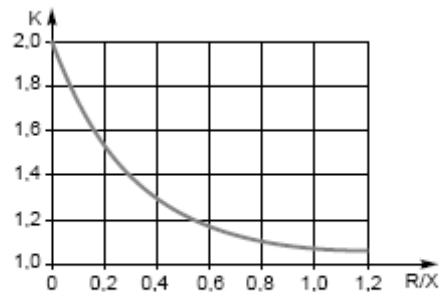
I_k'' = corriente de cortocircuito inicial,

K = factor, función de la relación R/X del

circuito, que se determina sobre la curva de la **figura 11**, o también puede calcularse por la fórmula aproximada

$$K = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}}$$

Figura 11. Variación del factor K en función de R/X o R/L



Corriente de cortocircuito cortada I_b (ruptura)

El cálculo de la corriente de cortocircuito cortada I_b sólo es necesario en el caso de un defecto cercano a los alternadores y cuando la protección queda asegurada por interruptores automáticos retardados.

Recordamos que esta corriente sirve para determinar el poder de corte de los interruptores automáticos.

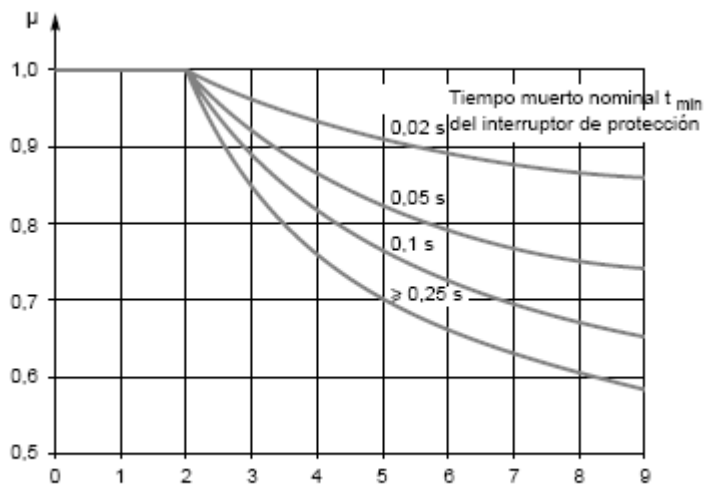
Esta corriente puede calcularse, con una buena aproximación, con la ayuda de la siguiente fórmula

$$I_b = \mu \cdot I_k'' \text{ en donde}$$

(2-7)

μ = factor función del tiempo de retardo mínimo del interruptor t_{\min} . y de la razón I_k''/I_r (**figura 12**) que relaciona la influencia de las reactancias subtransitoria y transitoria con I_r = corriente asignada del alternador.

Figura 12. Corriente de corto circuito trifásico I_k''/I_r



Corriente de cortocircuito permanente I_k

Como la amplitud de la corriente de cortocircuito permanente I_k , depende del estado de saturación del circuito magnético de los alternadores, su cálculo es menos preciso que el

de la corriente simétrica inicial I_k'' . Los métodos de cálculo propuestos podemos considerarlos como encaminados a obtener una estimación suficientemente precisa de los valores superior e inferior para el caso en que

el cortocircuito es alimentado por un alternador o por una máquina síncrona. Así:

- la corriente máxima de cortocircuito permanente máxima, bajo la máxima excitación del generador síncrono, nos viene dada por:

$$I_{k\text{máx}} = \lambda_{\text{máx}} \cdot I_r$$

- la corriente de cortocircuito mínima permanente se obtiene para una excitación constante (mínima) en vacío de la máquina síncrona. Y nos viene dada por:

$$I_{k\text{mín}} = \lambda_{\text{mín}} \cdot I_r$$

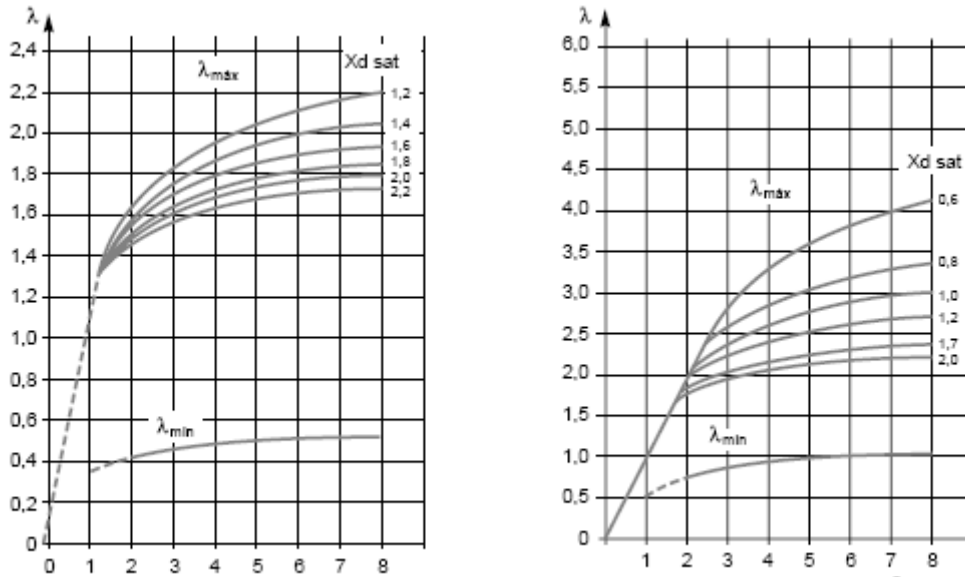
donde

I_r = valor asignado de corriente en los bornes del alternador,

λ = factor dependiente de la inductancia de saturación $X_{d\text{ sat}}$.

Los valores de $\lambda_{\text{máx}}$ y $\lambda_{\text{mín}}$ se obtienen mediante la **figura 13 izquierda** para los turboalternadores y mediante la **figura 13 derecha** para las máquinas de polos salientes.

Figura 13. Los valores de λ máx y λ mín



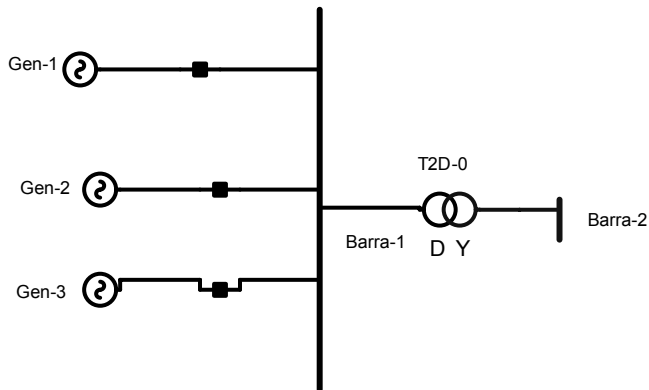
2.1.3 Reactores de reducción de corto circuito.

Este tipo de reactancia se usa principalmente para limitar corrientes de corto circuito, para evitar que las corrientes de falla no alcancen valores peligrosos para los equipos. De esta forma, se pueden usar interruptores, cables y otros equipos de tipo normal en vez de usar otros con mayor potencia de cortocircuito lo que se traduce en un ahorro importante.

Frecuentemente resulta más económico disminuir las corrientes de cc. por medio de reactores, que recibir a plena magnitud.

Para exponer la aplicación de los reactores limitadores de corriente. Se dará una explicación de la forma de cálculo de I_{cc} por medio de impedancias.

Figura 14. Sistema de potencia para el cálculo de reactor limitador de corriente



Los datos de los generadores transformadores y reactores se presentan así

GENERADOR 1:	Zd_{G1}	KVA b	KV d
GENERADOR 2:	Zd_{G2}	KVA b	KV d
GENERADOR 3:	Zd_{G3}	KVA b	KV d
TRANSFORMADOR:	Zd_{T1}	KVA b	KV d
REACTOR:	Zd_{R1}	KVA b	KV d

La línea de alta tensión esta interconectada con la barra por medio de un transformador

Cálculo del corto circuito Trifásico

Se utiliza para el cálculo sistema por unidad

Se toman las bases siguientes

POTENCIA BASE = $MVA_{nb} = KVA_{nb}$

VOLTAJE BASE = KV_{nb} .

CORRIENTE BASE TRIFASICA = $I_{3\phi b}$

$$I_{3\phi b} = \frac{KVA_{nb}}{(\sqrt{3}KV_{nb})} \text{ corriente trifasica base} \quad (2-8)$$

Generalmente, se elige el lado de alta tensión porque de este lado esta el reactor y el cálculo de corto circuito se harán en el lado de alta voltaje.

CAMBIO DE BASE PARA GENERADORES

$$Z_{nb} = Z_d \left(\frac{KVd}{KVnb} \right)^2 \left(\frac{KVAnb}{KVAb} \right) \quad (2-9)$$

Donde

Z_{nb} = Impeadnacia base seleccionada

Z_d = Impeadnacia dada

KVd = Voltaje dado

$KVnb$ = Voltaje base seleccionado

$KVAnb$ = Potencia base seleccionada

$KVAb$ = Potencia dada

El cálculo de cambio de base se realiza para cada generador, transformador y reactor

GENERADOR 1: $Z_{nb_{G1}}$

GENERADOR 2: $Z_{nb_{G2}}$

GENERADOR 3: $Z_{nb_{G3}}$

TRANSFORMADOR: $Z_{nb_{T1}}$

REACTOR: $Z_{nb_{R1}}$

Cuando se obtienen las impedancias en p.u. se dibuja el diagrama de secuencia positiva para el calculo de cortocircuito trifásico en la barra 2 primero se realiza el cálculo sin tomar en cuenta el reactor

El valor de la corriente de corto circuito trifásico en el punto A es.

$$I_{ccpu} = \frac{1}{Z_{th}} = \frac{1}{(Z_{nb_{G1}} // Z_{nb_{G2}} // Z_{nb_{G3}}) + Z_{nb_{T1}}} \text{ en p.u.} \quad (2 - 10)$$

corriente en amperios

$$I_{cc} = (I_{ccp.u.})(I_{3\phi}) \quad (2 - 11)$$

En los siguientes pasos se toma en cuenta el reactor para calcular la corriente de corto circuito en el punto b.

$$I_{ccpu} = \frac{1}{Z_{th}} = \frac{1}{(Z_{nb_{G1}} // Z_{nb_{G2}} // Z_{nb_{G3}}) + Z_{nb_{T1}} + Z_{nb_{R1}}} \text{ en p.u.}$$

corriente en amperios

$$I_{cc} = (I_{ccp.u.})(I_{3\phi b})$$

En esta expresión nos damos cuenta que la corriente de cortocircuito esta limitada por la impedancia de los generadores transformadores líneas y se puede agregar impedancia colocando reactores al final del sistema por esto mismo los reactores serie puede ayudar a limitar corrientes de corto circuito.

$$\frac{1}{(Z_{G1} // Z_{G2} // Z_{G3}) + Z_{T1}} \text{ en p.u.} > \frac{1}{(Z_{G1} // Z_{G2} // Z_{G3}) + Z_{T1} + Z_{R1}} \text{ en p.u.}$$

Por lo tanto, al agregar un reactor en serie al sistema de potencia se puede deducir que la corriente de corto circuito disminuye en proporción al valor de Z del reactor.

Aparte del cálculo realizado por medio del método de impedancias, se realizó una simulación en el programa ASP. Éste es un programa desarrollado para simular sistemas de potencia en el análisis de Flujo de Potencia, Fallas de corto circuito, ruptura y estabilidad.

2.1.4 Reactores para interconexión en paralelo de transformadores

La conexión de transformadores en paralelo se hace necesaria debido a los incrementos de la demanda que superan la capacidad existente o cuando los requerimientos de confiabilidad y continuidad de operación lo exigen, este es el caso, que si un transformador falla, el otro continuará alimentando la carga sin interrupción.

Cuando la demanda de energía se reduce temporalmente, resulta más económico operar un transformador pequeño cerca de su límite de capacidad a plena carga que un transformador mayor a capacidad reducida. Por lo que, cuando la demanda energética es muy fluctuante resulta mas provechoso la instalación de dos o más transformadores en paralelo que utilizar un transformador de gran capacidad. En estas condiciones el sistema es más flexible porque tiene la posibilidad de agregar una parte de los transformadores en paralelo cuando sea necesario.

Por otra parte el reglamento de servicio de compañías de distribución de energía eléctrica por lo menos el 30% de la capacidad de transformación instalada en la industria y si se están operando los transformadores por debajo de ese nivel de carga, resultará costoso mantener un transformador de gran capacidad subutilizado.

Dos transformadores monofásicos operarán en paralelo si se conectan con la misma polaridad. Para conectar dos transformadores en paralelo, los diagramas de tensión deben , coincidir. Por supuesto, es necesario que los dos transformadores tengan impedancia, capacidad nominal y frecuencia similares. La división de la corriente de carga, en proporción a las capacidades de KVA de los transformadores en paralelo está determinada por la igualdad de sus voltajes nominales, relación de vueltas en los devanados, porcentaje de impedancias y relaciones de su reactancia a su resistencia.

Si estas condiciones no se cumplen, las corrientes de carga no se pueden dividir proporcionalmente en las capacidades nominales de KVA de los transformadores, y puede surgir una diferencia de fase entre las corrientes.

Como se menciono anteriormente para la conexión de transformadores en paralelo se deben de cumplir ciertas condiciones, igual relación de transformación en vacío. La falta de esta condición producirá corriente de compensación en los transformadores.

La diferencia de voltaje entre los secundarios de los transformadores conectados son las que provocan estas corrientes de compensación.

Para el cálculo de esta corriente de compensación se utilizan las siguientes expresiones

$$I_c = \frac{E_1 - E_2}{Z_1 - Z_2} = \frac{E_c}{Z}$$

E_1 = Voltaje secundario del transformador 1

E_2 = Voltaje secundario del transformador 2

Z_1 = Impedancia equivalente del transformador 1 (2-12)

Z_2 = Impedancia equivalente del transformador 2

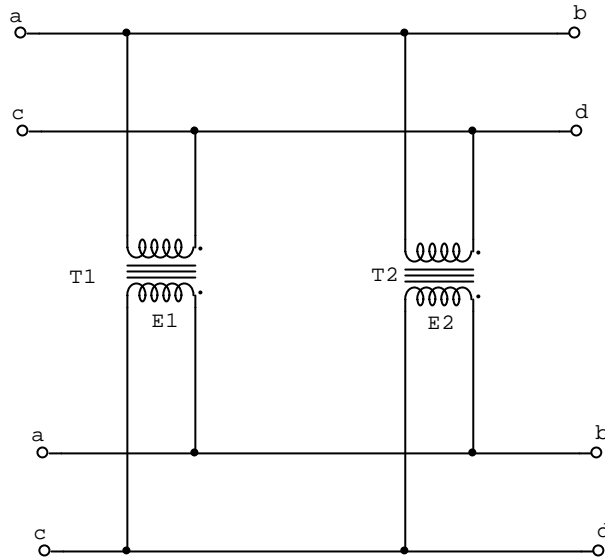
I_c = Corriente de compensación

E_c = Voltaje de compensación

Z = Impedancia equivalente total

Además de la condición anterior deben de presentar igual voltaje de cortocircuito, deben de conectarse a la misma secuencia de fase que presente igual relación de reactancia y resistencia.

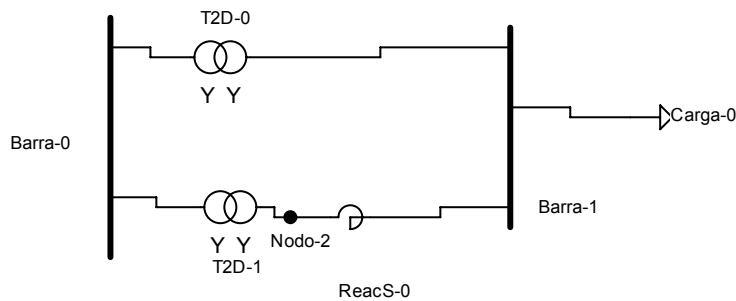
Figura 15. Conexión de 2 transformadores en paralelo



Reactores de balance

En las conexiones de transformadores en paralelo donde no se cumple las condiciones de tener una igual voltaje de corto circuito, no se logra una distribución uniforme de la carga conectada a los transformadores y operan con una corriente mayor que la nominal. La magnitud de la corriente en el trafo se reduce con el empleo de bobinas de balance

Figura 16. Conexiones de 2 transformadores en paralelo con un reactor de balance



La corriente absorbida por la carga es de menor magnitud que la suma aritmética de las corrientes I_1 e I_2 , así:

$$I_C \leq I_1 + I_2$$

La igualdad de esta relación se obtiene al ser el valor del ángulo de fase igual a cero, siendo esta una buena condición para la conexión de transformadores en paralelo.

$$I_C = \sqrt{(I_1 + I_2 \cos \vartheta)^2 + (I_2 \sin \vartheta)^2} \quad (2-13)$$

Cuando el ángulo ϑ aumenta nos podemos dar cuenta que los valores de I_1 e I_2 aumenta en su valor lo que produce el calentamiento de los transformadores.

Realmente para que los transformadores funcionen en buenas condiciones los voltajes de cortocircuito no deben de diferir más de 10%.

Cuando el voltaje de corto circuito difiere bastante los problemas de sobre corriente se evitan utilizando una bobina en el transformador de menor potencia eléctrica. La bobina se calcula de manera que no contribuya al aumento del ϑ .

El voltaje de cortocircuito es la corriente de corto circuito en función del voltaje primario aplicado.

Por la relación directa que hay entre los valores de V_{cc} con I_{cc} , el voltaje de corto circuito correspondiente a la intensidad nominal de trabajo de el transformador, esta dado por:

$$V_{ccn} = \frac{V_1}{I_1} I_n \quad (2-14)$$

En donde:

I_n = Corriente nominal de trabajo

V_{ccn} = Voltaje de corto circuito correspondiente a la intensidad de trabajo.

I_1 e V_1 = son valores obtenidos en prueba de voltaje de corto circuito

CÁLCULO DE LA REACTANCIA DE BALANCE.

Se tiene que alimentar una carga de S_b en Mva a V_b en Kv con un factor de potencia F_p se realiza por medio de un arreglo en paralelo de transformadores.

T1: ST1 Mva, V_1/V_2 Kv, 60 Hz, ZT1

T2: ST2 Mva, V_1/V_2 Kv, 60 Hz, ZT2

El consumo de la carga I_c , será:

$$I_c = \frac{S_b \text{ en Kva}}{\sqrt{3} * V_b \text{ en Kv} * F_p} \quad (2-15)$$

La corriente nominal I_n de cada transformador

$$I_n = \frac{ST \text{ en Kva}}{\sqrt{3} * V_1 \text{ en Kv}} \quad (2-16)$$

I_{n1} e I_{n2}

La corriente que circula por cada transformador en función de la corriente de carga será I_{c1} y I_{c2} .

$$I_{c1} = \frac{\frac{ST1 \text{ en Kva}}{Z1 * I_{n1}}}{\frac{ST1 \text{ en Kva}}{Z1 * I_{n1}} + \frac{ST2 \text{ en Kva}}{Z2 * I_{n2}}}$$

$$I_{c2} = \frac{\frac{ST2 \text{ en Kva}}{Z2 * I_{n2}}}{\frac{ST2 \text{ en Kva}}{Z2 * I_{n2}} + \frac{ST1 \text{ en Kva}}{Z1 * I_{n1}}}$$

Comparando los valores obtenidos de I_n e I_c , para cada transformador, se determina el porcentaje de la corriente bajo la cual esta operando cada transformador para el consumo de la carga.

$$I\% = \frac{I_c}{I_n} * 100 \quad (2-17)$$

$I1\%$ e $I2\%$

Con estos valores se puede obtener la sobrecarga en los transformadores

$$\text{sobrecarga}\% = \frac{I_{c1} - I_{n1}}{I_{n1}} * 100 \quad (2-18)$$

Al saber la sobrecarga y en que transformador se tendrá la misma se trata de disminuir esta el porcentaje de sobrecarga.

$$\text{Isobrecarga} = \% \text{sobrecarga} * I_{c1}$$

$$I_{c1}' = I_{c1} - \text{Isobrecarga}$$

$$I_{c1}' < I_{n1}$$

El valor de la impedancia $Z1'$ a la que estaría operando el circuito paralelo que considera al transformador T1 para que por ella circule la corriente I_{c1}' calculada,

$$Z1' = Z1 + ZR$$

La impedancia del reactor es ZR

La nueva impedancia para el transformador T1 es $Z1'$

$$Z1\%' = \frac{S1 \text{ en Mva}}{S2 \text{ en Mva}} * \frac{(I_{c1} - I_{c1}')}{I_{c1}'} * Z1 * I_{c2} \quad (2-19) \text{ y } (2-20)$$

$$ZR\% = Z1\%' - Z1\%$$

La impedancia que debe agregarse es ZR%

Por ultimo se determinan las condiciones de operación se utilizan los nuevos valores de $Z1'$ y se determinan las corrientes nuevas de operación de cada transformador.

2.2 Reactor compensador de línea shunt

Estas reactancias se usan para compensar la potencia reactiva capacitiva generada por largas líneas de transporte con poca carga. Las reactancias se conectan y desconectan mediante interruptores y se conectan normalmente en el devanado terciario del transformador principal.

Los reactores de potencia de núcleo de aire son el medio más compacto y de mejor relación coste-eficacia para compensar la generación capacitiva en líneas de alta tensión de transmisión larga o en sistemas de cables de gran longitud. Las soluciones alternativas son más costosas, se traducen en mayores pérdidas, requieren más equipos y exigen recursos adicionales. Usados en servicio permanente para estabilizar la transmisión de potencia, o conectados solamente en condiciones de carga ligera para control de tensión, los reactores de potencia combinan alta eficacia con bajos costes de ciclo de vida para reducir los costes de transmisión y aumentar los beneficios.

La reactancia shunt compensa la generación capacitiva en las líneas eléctricas para evitar un aumento descontrolado de la tensión, especialmente en líneas que soportan cargas ligeras. El sencillo diseño y la robusta construcción hacen que la reactancia sea el medio más económico para compensar la generación capacitiva.

Figura 17. Reactores con núcleo de aire de compensación shunt



2.2.1 Generalidades de la compensación reactiva inductiva en los sistemas eléctricos.

El comportamiento de las líneas de transmisión, en las líneas media y larga, se puede mejorar por la compensación reactiva del tipo serie o paralelo. La compensación serie es a través de capacitores que proporciona potencia reactiva al sistema, numéricamente consumen potencia reactiva negativa, la compensación paralelo shunt se refiere a la colocación de inductores en cada línea para reducir la susceptancia paralelo provocada por efecto ferranti lo cual importa a cagas ligeras, cuando el voltaje en el extremo de la línea sería muy alto.

La operación confiable de un sistema de potencia requiere dispositivos que ajusten su salida de potencia reactiva, a fin de mantener voltajes dentro de los límites aceptables ante disturbio, tales como fallas, apertura o cierre de interruptores, entre otras situaciones de operación normal como la variación de la demanda.

La compensación del sistema de potencia sirve para mejorar la estabilidad del sistema, el control de voltaje, incrementar la eficiencia de la transmisión de potencia real, reducir los sobrevoltajes transitorios temporales. El uso de los compensadores dependen principalmente de las condiciones de potencia reactiva del sistema, esta a su vez esta ligada a la magnitud de voltaje de transmisión, la longitud de las líneas, el número de líneas en paralelo y el grado de compensación que se requiere.

Dispositivos que proporciona el servicio de control de voltaje y absorción de potencia reactiva.

Unidades de generación. Por medio de su sistema de excitación puede suministrar o absorber potencia reactiva, de igual manera los motores síncronos utilizados como compensadores pero en este trabajo no se estudiara este tema.

Reactores en paralelo shunt. Respectivamente absorben Var de la red. Generalmente se localizan en la subestaciones primarias de la red y conectados por circuitos de interruptores con carga, típicamente están completamente conectados o completamente desconectados en algún momento dado. Estos elementos serán estudiados en este trabajo por ser una de las aplicaciones principales de los reactores con núcleo de aire.

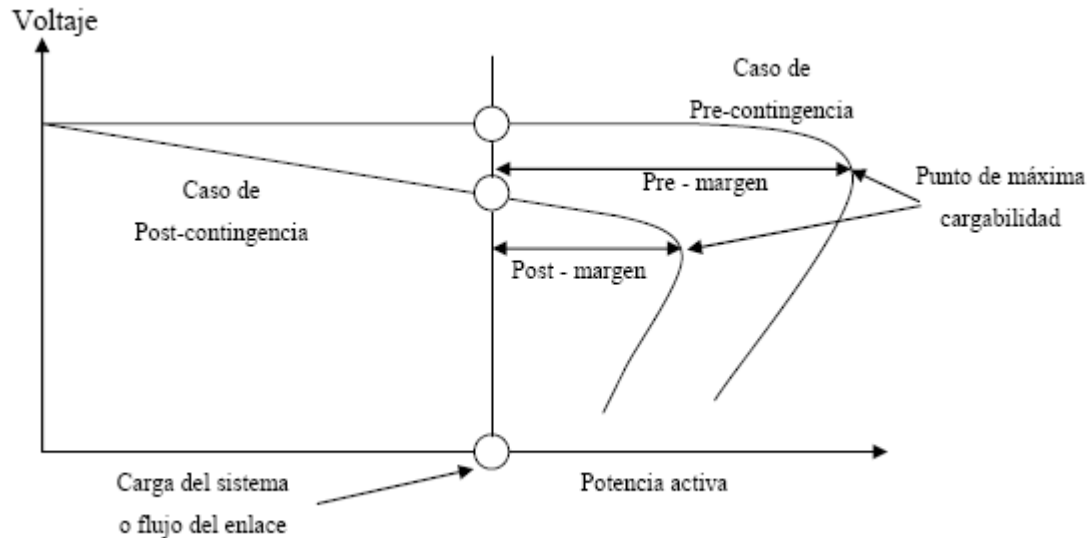
Compensadores estáticos de Var (CEV). Puede regular la compensación capacitiva en derivación o la reactancia inductiva, como sea necesario para minimizar las variaciones de voltaje causadas por las cargas para un estado estable y un balance dinámico. Son compensadores tanto capacitivos como inductivos por lo tanto para la parte inductiva usan reactores con núcleo de aire esta aplicación se estudiara mas adelante.

Márgenes de estabilidad de voltaje por medio de curvas P-V

El margen de estabilidad de voltaje es una medición para estimar la capacidad de transferencia de potencia activa en el sistema. El margen de estabilidad de voltaje es la diferencia entre los puntos de operación y el colapso de voltaje. El punto de colapso de voltaje debe ser valorado para garantizar la operación segura en el punto de operación normal y después de disturbios.

El análisis P-V es una herramienta de estado estacionario que desarrolla una curva, la cual relaciona el voltaje en un nodo con la carga dentro de un área o flujo a través de un enlace. De acuerdo a la capacidad reactiva de reserva, la distancia a los puntos de colapso es mayor, de ahí la importancia de mantener una cantidad adecuada de reserva.

Figura 18. Curvas P-V de un sistema de potencia con carga constante



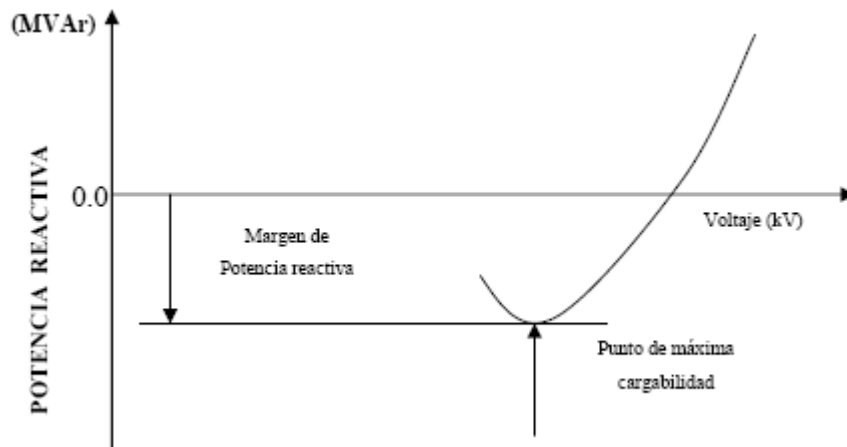
Márgenes de estabilidad de voltaje por medio de curva Q-V

El margen de potencia reactiva es la distancia en Mvar del punto de operación a la parte inferior de la curva o al punto donde la característica cuadrática del voltaje es tangente a la curva Q-V. El nodo de prueba puede ser representativo de todos los nodos en un área de control de voltaje. Las curvas Q-V pueden ser calculadas en puntos a lo largo de la curva P-V para probar la robustez del sistema. Las características de compensación reactiva en derivación en el nodo de prueba pueden ser dibujadas directamente en la curva Q-V. El punto de operaciones es la intersección de la característica del sistema Q-V y la característica de compensación reactiva.

Esto es la unidad debido a que la compensación reactiva es a menudo la solución para los problemas de estabilidad de voltaje. La pendiente de la curva Q-V indica la robustez del nodo de prueba.

La inestabilidad de voltaje o colapso es influenciada por las características dinámicas de las cargas y del equipo de control. El colapso de voltaje inicia en el nodo más débil y después se extiende a otros nodos débiles, por lo tanto, el nodo más débil es el más importante en el análisis de colapso de voltaje usando la técnica de la curva Q-V.

Figura 19. Curva típica Q-V

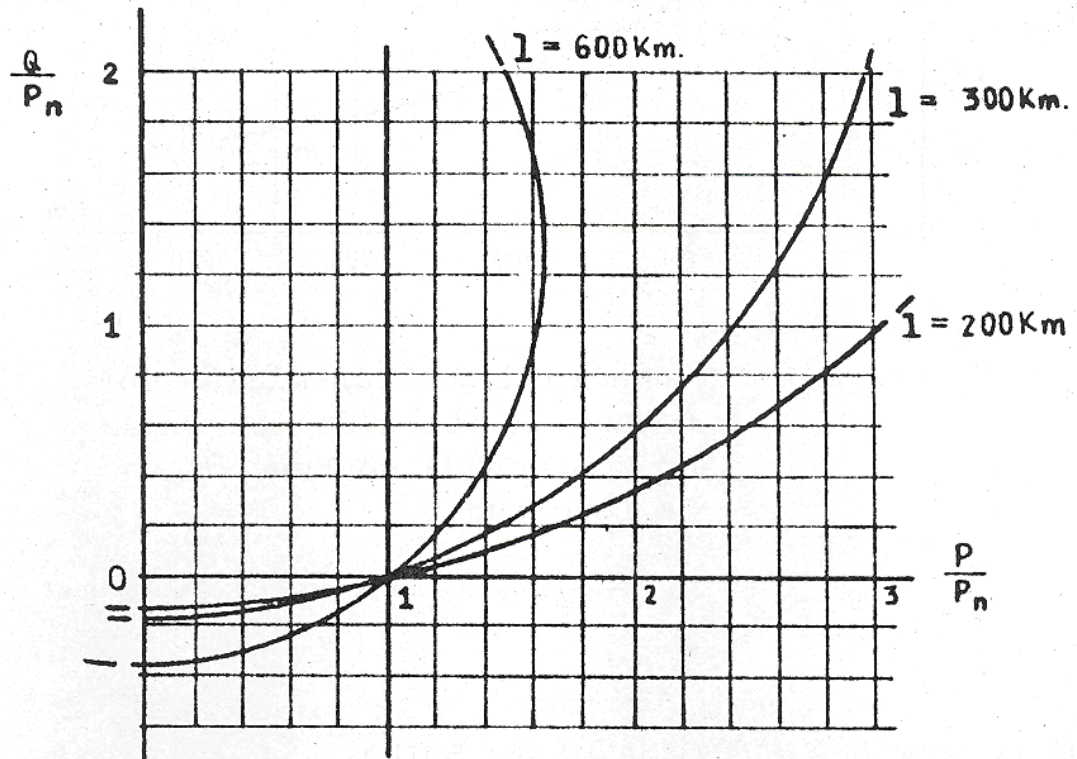


Características de una línea de transmisión.

La naturaleza del sistema de transmisión provoca que en condiciones de demanda mínima que este se comporte como una fuente reactiva, obligando a la absorción de potencia reactiva excedente en el sistema para la regulación de voltaje, por medio de generadores reactores y compensadores estáticos. Este comportamiento es opuesto cuando se opera en demanda máxima, siendo el sistema de transmisión un consumidor de potencia reactiva, de modo que generadores, bancos de capacitores y compensadores estáticos tienen que aportar toda la potencia reactiva. El punto de operación en el cual el sistema de transmisión no absorbe ni genera potencia reactiva es conocido como punto de operación a potencia natural (SIL).

Lo anteriormente dicho se ilustra en la siguiente gráfica, nos damos cuenta que muestra la potencia reactiva de un a línea sin perdidas como una función de la potencia transmitida, tendiendo como parámetro la longitud de la línea se observa que las líneas

Figura 20. Gráfica característica de una línea de transmisión.



La figura anterior muestra como la potencia activa que puede ser transmitida en una línea no compensada decrece con la longitud de la misma.

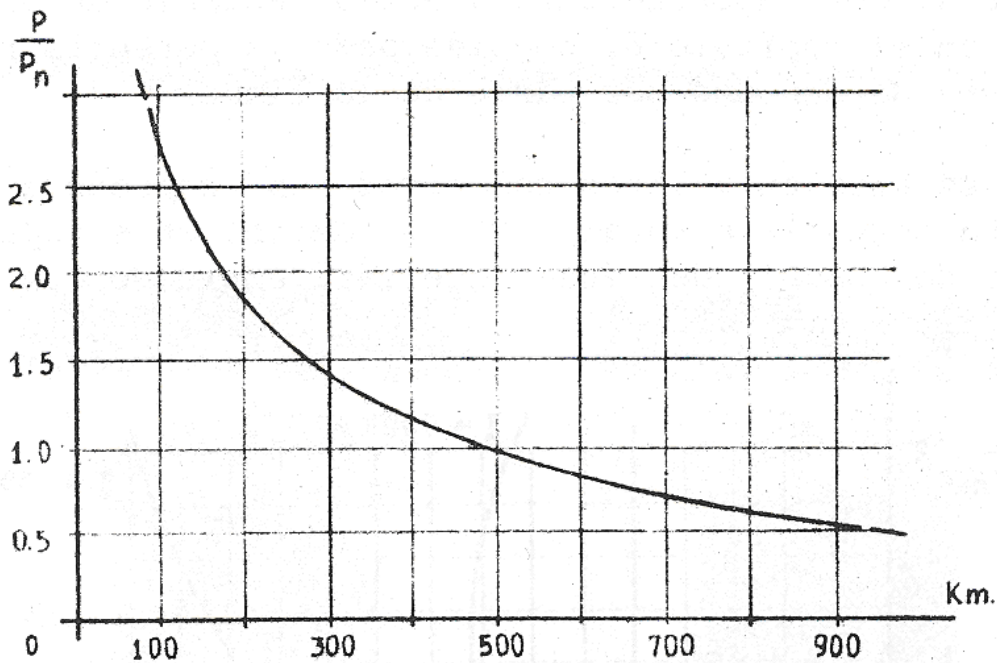
Líneas largas a pequeños cambios de potencia real causan grandes cambios en el balance de potencia reactiva.

Las condiciones de transmisión son más favorables cuando se compensa en forma distribuida a lo largo de la línea, pero por razones económicas no se realiza, por eso se

utiliza la compensación en los extremos las condiciones de compensación mejoran cuando se compensa en igual proporción en ambos extremos de la línea.

En la siguiente figura se muestra cómo la potencia real que puede ser transmitida decrece con el aumento de la longitud, claro si no está compensada. Por otro lado, las líneas largas tienen mayor capacitancia, a un nivel bajo de carga y esto da lugar a un aumento del voltaje, por esto se utiliza la compensación shunt de reactores inductivos con núcleo de aire para eliminar el sobrevoltaje.

Figura 21. Capacidad de transmisión de potencia real de una línea no compensada.



Línea plana

Se le llama línea plana a una línea que tiene una magnitud de voltaje constante a todo lo largo de su longitud, variando únicamente su fase.

Ventajas de la operación a potencia natural (SIL)

Una línea que opera a su potencia natural o SIL se comporta como una línea plana, en una línea no plana, la magnitud del voltaje varía a lo largo de la de la misma, como función de la potencia transmitida, especialmente a la mitad de su longitud, siendo alta a poca carga y baja a altas cargas, si el voltaje es muy alto se puede producir efecto corona en los conductores, produciendo radio interferencia, ruido audible y pérdidas de potencia especialmente cuando se tiene tiempo malo.

2.2.2 Compensación paralelo de potencia reactiva en sistemas eléctricos

Si se logra controlar el voltaje y se mantiene a su valor nominal rms en una línea de transmisión la misma aumenta su capacidad de transmisión de potencia. La compensación shunt constituyen un componente vital para el funcionamiento eficaz de las líneas de transmisión de alta tensión de gran longitud.

Reactancia shunt compensa la generación capacitiva en las líneas eléctricas para evitar un aumento descontrolado de la tensión, especialmente en líneas que soportan cargas ligeras. El sencillo diseño y la robusta construcción hacen que la reactancia sea el medio más económico para compensar la generación capacitiva.

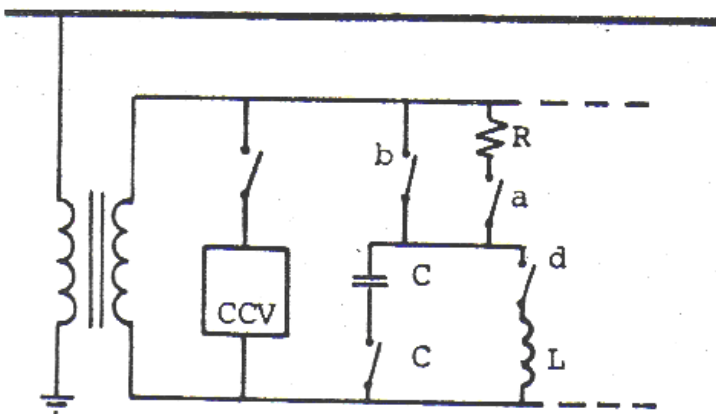
Con la posibilidad un rápido control del voltaje de la línea en las terminales del sistema de control dentro de un margen del 2% o 3% se puede tener un buen número de características ventajosas. Estas ventajas incluyen un reducido límite básico de impulso (BIL) para la línea se disminuye el nivel de corto circuito y se mejora la capacidad de transferencia de potencia y la estabilidad de las líneas.

El control de sobrevoltaje a lo largo de la línea es posible por medio de los métodos

- Reactores lineales conmutables.
- reactores controlados por corriente continua.
- Reactores controlados por tiristores.
- Reactores saturables.
- Condensadores síncronos

Usualmente un dispositivo de compensación paralelo se especifica para acomodar al rango total de los Var requeridos para el control de voltaje de la línea. Un método muy económico e eficiente es la compensación inductiva conectada a pasos discretos, pero teniendo un dispositivo de control continuo de voltaje conectado paralelamente de un rango adecuado para conectar en paralelo más de un pasó de los elementos conmutables. Los dispositivos conmutables se pueden conectar a la línea de transmisión por medio de un transformador que tenga un voltaje secundario considerablemente menor que el voltaje de línea. Aunque el transformador es usualmente necesario, se tiene economía con el uso de reactores y interruptores de bajo voltaje. Además los impulsos causados por la conmutación se ven minimizados por el efecto aislante de la reactancia de dispersión del transformador y por el uso de reactores lineales (reactores de núcleo de aire).

Figura 22. Diagrama esquemático de un controlador de reactancia con un (ccv).



Hay dispositivos de compensación que tiene un control continuo de voltaje generalmente se utiliza un transformador para conectar el dispositivo en el lado de bajo voltaje en el dispositivo se incluyen capacitores e inductores conectados en paralelo y conmutables.

Los elementos conmutables deben de ser controlados por medición de los voltajes limitantes en la banda muerta de control continuo. Cuando no se cuenta con dispositivos continuos de control se utiliza porcentajes fijos para la conexión de capacitores y continuos 95% y 105% del valor de voltaje nominal cuando el voltaje cae a al 95 % se conectan capacitores para elevar el voltaje al nominal, y cuando se presenta un sobrevoltaje del 105% se desconectan capacitores y conectan reactores. La desventaja mas grande de la compensación paralelo para el aumento de la estabilidad es su sensibilidad al punto e instalación.

El principal objetivo de los reactores en un sistema de potencia es compensar potencia reactiva negativa cuando una línea esta cargada por debajo de su potencia natural (SIL). Los reactores inductivos conectados en paralelo, solos, son un medio técnico y económico para controlar los sobrevoltajes y para compensar los requerimientos de carga de un sistema de transmisión. Al abrirse una línea energizada en el extremo terminal se presentan sobrevoltajes en ella esta es una las razones mas comunes, otra razón es cuando su carga de transmisión es baja. El aumento de voltaje fluye de la corriente de la carga capacitiva que se presenta a través de la línea y se conoce como efecto ferranti, esta capacitancia esta directamente ligada con la permisividad, el radio de los conductores y la distancia entre los mismo. Para el caso de una línea trifásica simétrica la capacitancia se da por unidad de longitud.

$$C = \frac{0.02418}{\log(D/r)} \mu f / Km$$

D = distancia entre conductores

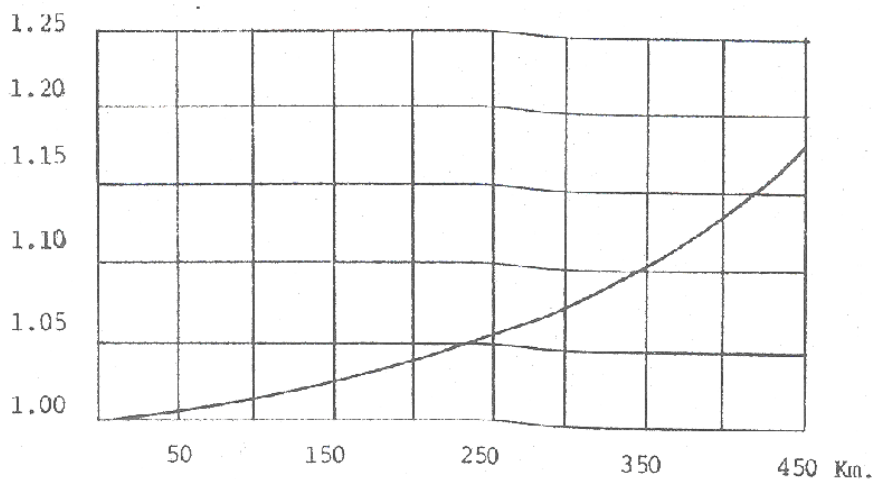
(2-21)

r = radio de cada conductor

Las líneas de mayor voltaje con conductores en lió de longitud larga se caracteriza por su alta generación de potencia reactiva capacitiva los VAR de corriente de carga aumentan con el cuadrado del voltaje. Un valor típico es 50-55 Mvar por cada 100 Km. para una línea de 345 Kv y 125 Mvar por cada 100 KM para una línea de 500 Kv.

La siguiente figura muestra cómo aumenta el voltaje como función de la longitud de la línea y muestra que para líneas largas el voltaje puede sobrepasar el 5% usual como diseño del equipo. Esto empeora si la línea esta alimentada por un sistema débil en capacidad de potencia.

Figura 23. Variación del voltaje como función de la longitud de la línea



Como ya habíamos, hablado otra de las causas de sobrevoltajes es la capacitancia producida por las líneas con la inductancia saturable del sistema. Para condiciones de conexión como por ejemplo, un transformador en el extremo de la línea, se puede llegar a tener suficiente voltaje de saturación del transformador. La capacitancia de la línea con la inductancia saturada puede generar armónicas que causen sobrevoltajes que pueden durar varios ciclos.

La variación del voltaje tiene mucha relación con la reactancia conectada con respecto a la capacidad de corto circuito de la barra, por ejemplo un reactor con núcleo de aire de 32 Mvar da como resultado conecta a una barra de con capacidad de corto circuito 800

Mvar da como resultado $32/800=4\%$ de este modo se determina el tamaño máximo de un reactor que puede ser conectado en un paso para mantener las variaciones dentro de los límites aceptables.

2.2.3 Localización de los reactores en las líneas.

Los reactores pueden localizarse en el terciario de un auto transformador, directamente conectado a la línea, conectados a una barra de alto voltaje.

2.3 Reactores de puesta a tierra

Una reactancia de puesta a tierra se conecta entre el neutro de un sistema trifásico y tierra. Su función es la de limitar la corriente entre fase y tierra de un sistema directamente puesto a tierra, o reducir la corriente entre fase y tierra de un sistema aislado hasta un valor adecuado para su protección.

Figura 24. Reactor con núcleo de aire para puesta a tierra



En este caso vamos a estudiar los reactores para puesta a tierra de los generadores.

El criterio para determinar el valor del reactor a tierra aplicado al neutro de un generador, debe de considerar un valor de reactancia tal que limite la corriente total de falla a tierra, que circula por el generador, a un valor deseado. Esto lo determina la razón entre la corriente de falla minimizada, a la corriente de falla total trifásico que no debe ser menor del 25%.

$$(I_{\text{min}}/I_{\text{falla}}) > 25\%$$

Para reactancias en el neutro de los generadores la corriente en cualquier devanado no será mayor que la corriente total de falla trifásica.

La corriente de falla que circula en cada devanado de la maquina, no debe exceder la corriente total de falla trifásica de la misma.

Cuando el reactor opera bajo los efectos de una corriente de corto circuito, sufre sobrevoltajes y esfuerzos mecánicos internos. El efecto de estos es mas intenso para la corriente de corto circuito subtransitorio, pero, en este caso, existe la ventaja de que la duración de la misma es despreciable si se compara con el tiempo de aplicación de la corriente estabilizada de corto circuito.

En los cálculos relacionados con la corriente de corto circuito, es necesario tener en cuenta el valor de las reactancias transitorias de todos los elementos que interviene en la falla, ya que es durante este tiempo que la corriente de corto circuito causa desperfectos mayores, por ser de duración mas larga que la corriente subtransitoria e igualmente de mayor intensidad que la corriente de falla estabilizada.

Los efectos térmicos internos en los reactores limitadores de corriente se considera desde el punto de vista de su reactancia X' .

Para considerar los efectos mecánicos y sobrevoltajes, los cálculos de los mismos se harán utilizando sus respectivos valores de reactancia.

Al calcular la reactancia de un reactor a tierra de un generador, la secuencia positiva X^+ , se toma igual a la reactancia subtransitoria de la maquina X'' según el siguiente procedimiento.

- 1) Determinar la corriente de falla en el devanado del generador.

$$I_g = \frac{3V}{X^+ + X^- + X^0 + 3X_n}$$

en donde

I_g = Corriente de falla a tierra

V = Voltaje de linea a neutro

(2-22)

X^+ = Reactancia de secuencia positiva del generador(Ω /fase) transitoria

X^- = Reactancia de secuencia negativa del generador(Ω /fase) transitoria

X^0 = Reactancia de secuencia cero del generador(Ω /fase) transitoria

X_n = Reactancia de el reactor neutral (Ω)

- 2) Determinar la corriente de falla trifásica de la máquina.

$$I = \frac{V}{X^+} \quad (2-23)$$

- 3) La reactancia de secuencia positiva se toma de igual valor a la reactancia de secuencia negativa.

$$I_g = I$$

Desarrollando el cálculo de la reactancia de le reactor X_n , bajo estas condiciones e igualando las fórmula $I_g = I$.

$$\frac{V}{X^+} = \frac{3V}{2X^+ + X^0 + 3X_n}$$

de donde (2-24)

$$X_n = \frac{X^+ - X^0}{3}$$

La corriente nominal del un reactor a tierra, es la corriente eficaz en el neutro (RMS). Es decir la corriente que deberá soportar bajo condiciones de tiempo y temperaturas normales.

Para propósitos de cálculos de prueba, la corriente se considera constante durante el tiempo de duración de la falla, el cual es prácticamente el permitido por la protección del circuito, pero para los efectos del diseño considerar un tiempo razonablemente mayor.

2.4 Reactores con núcleo de aire para filtros de armónicos

Figura 25. Reactores con núcleo de aire para filtros armónicos



Reactores de Núcleo de Aire

Los Filtros de Armónicas son una de las mejores opciones para eliminar la distorsión armónica y que al mismo tiempo eleva el factor de potencia de un sistema eléctrico. Están constituidos por un reactor de núcleo de aire conectado en serie con un capacitor. Los reactores, marca por ejemplo Hans von Mangoldt, fabricados en Alemania, calculados, diseñados y fabricados bajo lineamientos de calidad internacional como: IEC no. 289-1988. Los reactores están encapsulados con fibras de vidrio y con resinas sintéticas a prueba de agua.

El filtro como ya mencionamos tiene dos funciones, producir potencia reactiva capacitiva a la frecuencia básica (capacitores) y filtrar los armónicos (reactores). Un filtro armónico se diseña para tener una baja impedancia entre fase y tierra, o entre las fases a la frecuencia armónica requerida. De esta forma la corriente armónica circulara hacia el filtro y no hacia la red. Normalmente cada frecuencia armónica requerida necesita un circuito de filtro independiente. Para frecuencias armónicas altas se usan filtros de banda

ancha. En este trabajo se estudian los filtros debido a que para su construcción se utilizan reactores con núcleo de aire.

Teoría armónica

Las cargas no lineales (rectificadores de corriente directa, variadores de velocidad, computadoras etc.) absorben de la red corrientes periódicas no senoidales. Estas corrientes están formadas por una componente fundamental de frecuencia de 60 Hz, más una serie de corrientes superpuestas, de frecuencias múltiplos de la fundamental que se llaman ARMÓNICAS.

La presencia de dichas armónicas en una red industrial de una empresa ocasiona una serie de inconvenientes tales como:

- Sobre carga en los capacitores.
- Efectos de resonancia en presencia de capacitores de potencia sin protección.
- Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos de control, medición y protección.
- Sobre calentamiento en conductores y equipos eléctricos.
- Disparo de equipos de protección y fusibles sin causa aparente.
- Bloqueo de PLC's y equipo de control.
- Interferencias en equipos de comunicación y telefonía.
- En casos severos quema de tarjetas electrónicas.

Algunos de los efectos adversos de cargas no lineales concentradas sobre una compañía directa de electricidad son:

La distorsión de voltaje dentro de instalaciones

Las corrientes excedentes por el neutro

Los altos niveles voltaje de neutro a tierra

Los recalentamientos en transformadores

Los grandes campos magnéticos que emanan desde transformadores

La reducción en la capacidad de distribución

Penalización por bajo factor de potencia

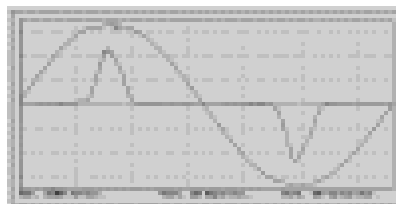
El término carga no lineal se usa usualmente para describir las fuentes de alimentación tipo “switch” que se encuentran en computadoras personal. De hecho, este tipo de fuente de alimentación se usa usualmente en varias aplicaciones. Los hornos de microondas, impresoras de láser, instrumentación médica, stereos, televisores, y la iluminación electrónica están entre unos cuantos dispositivos que usan fuente de alimentación tipo “switch”.

La figura 26 muestra la forma de la corriente en una fuente monofásica tipo “switch”. La corriente está presente por cortos períodos de 2 a 3 ms por cada medio ciclo. En el contraste, a una carga sinusoidal la corriente se encuentra presente durante todo el medio ciclo (8.33ms) y es similar a la forma de onda del voltaje aplicado. La forma de onda de la corriente en las fuentes tipo “switch” causa diversos problemas:

El primero, las pérdidas de voltaje ocasionadas por la forma de la corriente se concentran en un punto dentro de la onda de AC.

El segundo, en sistemas de distribución trifásica, las corrientes para cargas equilibradas comparten el regreso entre fases, y la corriente de regreso podría ser cero o no necesariamente produciendo desbalances.

Figura 26. Fuente de corriente monofásica tipo “Switch”



Tercero, la corriente de pulso para una fuente tipo “switch” se repite a una rata de 60 Hz, pero los componentes de frecuencia en la forma de onda se concentran en los más los armónicos de orden impar.

Tabla V. Análisis de furier de la forma de onda de la corriente

Fnd	9.31 A	86°	18 th	0.8%	210°	35th	0.6%	28°	
2nd	0.0%	51°	19 th	4.4%	81°	36th	0.1%	115°	
3 rd	82.8%	259°	20 th	0.7%	15°	37th	0.5%	179°	
4 th	0.2%	192°	21 st	2.9%	269°	38th	0.1%	204°	
5 th	67.3%	72°	22 nd	0.6%	175°	38th	0.5%	319°	
6 th	0.4%	338°	23 rd	2.0%	119°	40th	0.1%	7°	
7 th	48.8%	244°	24 th	0.4%	332°	41st	0.5%	112°	
8 th	0.5%	143°	25 th	1.8%	321°	42nd	0.2%	178°	
9 th	30.8%	55°	26 th	0.2%	105°	43rd	0.5%	267°	
10th	0.6%	309°	27 th	1.7%	146°	44th	0.0%	348°	
11th	15.8%	220°	28 th	0.2%	235°	45th	0.5%	70°	
12th	0.7%	104°	29 th	1.2%	312°	46th	0.0%	20°	
13th	6.2%	3°	30 th	0.3%	21°	47th	0.3%	229°	
14th	0.7%	259°	31 st	0.9%	105°	48th	0.1%	173°	
15th	4.8%	111°	32 nd	0.3%	182°	49th	0.2%	357°	
16th	0.7%	53°	33 rd	0.7%	243°	50th	0.1%	344°	
17th	5.4%	265°	34 th	0.2%	334°				
T.H.D.: 122.9 %		CONTRIB. IMPARES: 122.9%				CONTRIB. PARES: 2.15			
Frecuencia 60 Hz									

Formulas de cálculo THD factor de total de distorsión de armónico

$$THD_R = \frac{\sqrt{\sum_{v>1}^{\infty} I_v^2}}{I} ; THD_F = \frac{\sqrt{\sum_{v>1}^{\infty} I_v^2}}{I_1} ; THD_R = \sqrt{\frac{THD_F^2}{1+THD_F^2}}$$

POTENCIA

$$S = U \cdot I ; P = U \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1 ; Q_1 = U \cdot I_1 \cdot \sin \phi_1 ; D = U \cdot \sqrt{\sum_{v>1}^{\infty} I_v^2}$$

$$Q = \sqrt{Q_1^2 + D^2}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2}$$

FACTOR DE POTENCIA

$$\lambda = \frac{P}{S} = \sqrt{1 - THD_R^2} \cdot \cos \phi_1$$

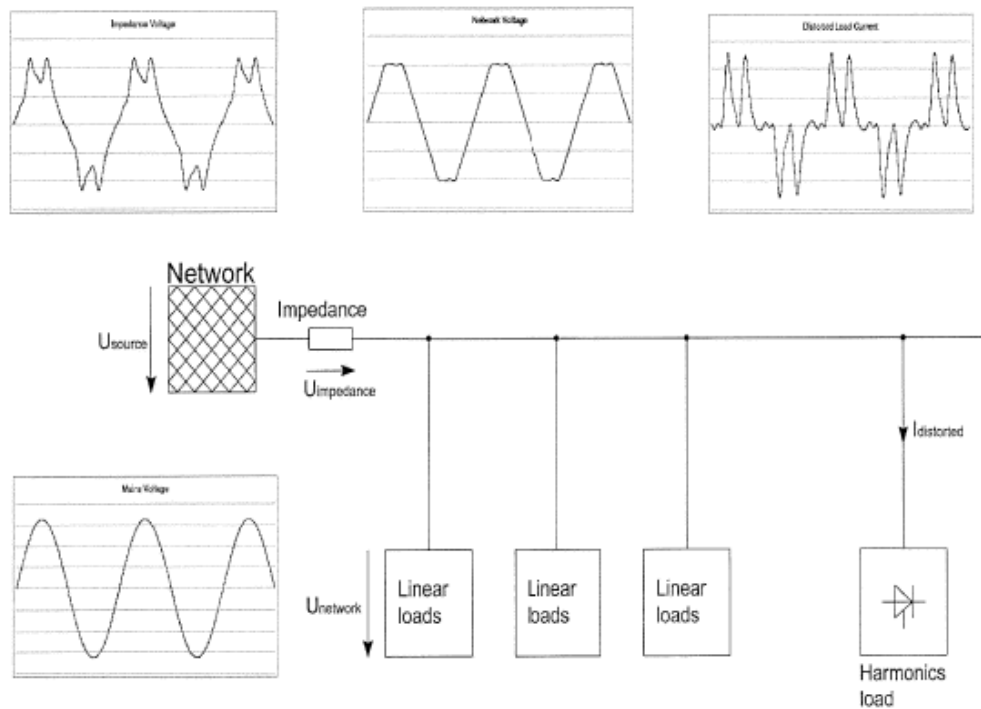
2-25

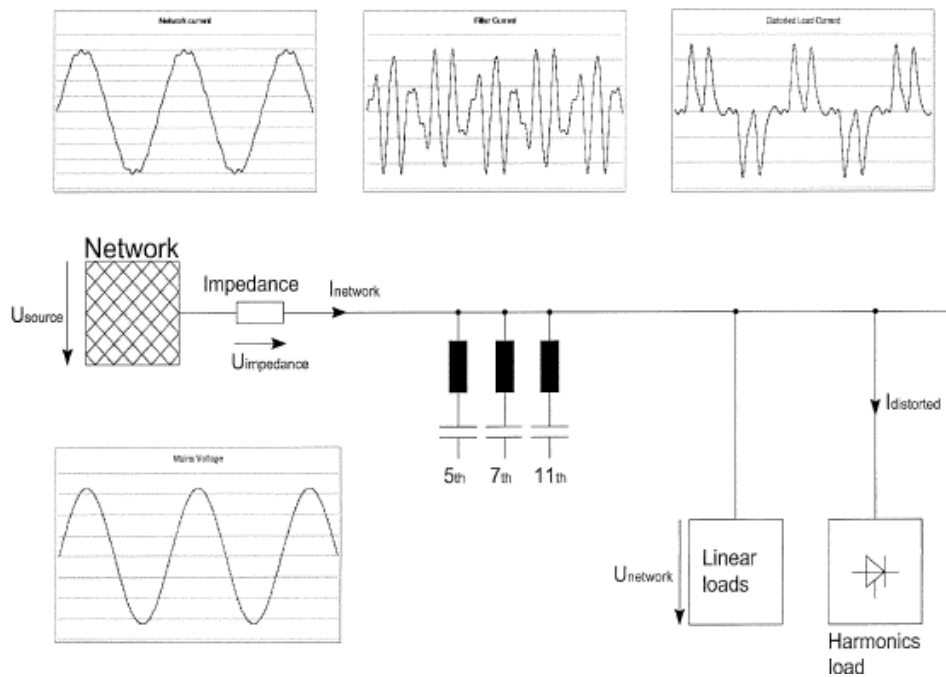
Los componentes de la frecuencia para una fuente de alimentación tipo “switch” incluyen el 3rd armónico (180Hz), el 5th armónico (300Hz), el 7th armónico (420Hz), el 9th armónico (450Hz) y este patrón continúa hasta niveles más altos. De hecho, la capacidad para medir armónicos de alta frecuencia es más una limitación del equipo medidor y el efecto de la impedancia de la fuente que la presencia o ausencia de armónicos. La tabla V muestra el análisis de Fourier de la forma de onda. Los armónicos impares son dominantes y bien extendidos en las gamas más altas de frecuencia. La distorsión armónica total (THD) es 122.9%. El armónico impar influye mayoritariamente en la distorsión

Algunos armónicos se han distinguido por ser especialmente dañinos en los sistemas de distribución. Los 3eros armónicos y múltiplos de este (p. ej., 9th, 15th, 21o) reciben atención especial porque ellos son los “triplens” (6n-3). Los “triplens”, en frecuencia - dominio armónico - análisis de secuencia, retornan a través del neutro. Como se constata donde la corriente de carga retorna a través del neutro con valores superiores a los de fase. Los armónicos de secuencia negativa (p. ej., 5th, 11th, 17th) tienen gran impacto sobre transformadores y motores porque su rotación se opone a la rotación de la fundamental (60Hz componente).

Las combinaciones de armónicos también tienen impacto. Por ejemplo, los armónicos de voltaje a los 5th y 7th combinados dentro de motores producen un evento que está en el orden del 6to armónico. El armónico originado ocasiona una amplia gama de problemas que llevan a elevar la temperatura de motores, vibración y desgaste. El bajo factor de potencia para cargas no lineales ocurre debido a que la corta duración de la corriente eleva los VA sin el correspondiente incremento en los Wats . Como el factor de potencia es igual a los vatios divididos por los voltio-amperios, cualquier aumento en VA sin un aumento correspondiente en los vatios conducirá a un factor de potencia menor.

Figura 27 Esquema de conexión de filtros ejemplo





Constitución de los filtros de armónicas

Muchos de estos problemas pueden ser corregidos mediante filtros de armónicas.

Los filtros de armónicas están compuestos por una o varias secciones L-C (Reactor-Capacitor) en serie, dependiendo si es fijo o automático, capacidad que se requiere para compensar el factor de potencia y de las armónicas que se desean filtrar de la instalación. En este caso se estudiaron los reactores de núcleo de aire que se utilizan para esta aplicación.

Los filtros de armónicas cuentan con reactores de sintonía (3^a, 5^a, 7^a, 11^a, etc. armónicas) sintonizados a la frecuencia de la armónica que se desea filtrar.

La frecuencia de resonancia o de sintonía del filtro de armónicas será aquella para la cual coincidan los valores de X_c y X_L , en donde la impedancia a dicha frecuencia es

mínima. Es decir, se crea un camino de baja impedancia para la frecuencia de las armónicas que se quieren filtrar.

El arreglo típico de un filtro de armónicas consiste en secciones resonantes sintonizadas a las frecuencias armónicas más comunes (5ª y 7ª). Cada sección cuenta con fusibles, contactor, reactor y capacitor. Dichas secciones son generalmente conectadas a un bus principal en el filtro.

La inductancia del reactor se seleccionada de forma que el filtro forme un circuito resonante de baja impedancia a la frecuencia armónica del filtro. Esto asegura que una alta proporción de las armónicas entren al filtro.

Todos los componentes de los filtros de armónicas están diseñados y dimensionados para soportar y filtrar hasta un 50 % de corriente armónica respecto a la fundamental.

El objetivo de instalar filtros de armónicas es disminuir el contenido armónico (THD %) en el sistema eléctrico. Su principio de funcionamiento consiste en desviar las corrientes armónicas emitidas por una carga determinada hacia el filtro y mantener limpia la corriente absorbida de red.

Tipos de filtros de Armónicos

Figura 28. Entrada a un reactor en línea

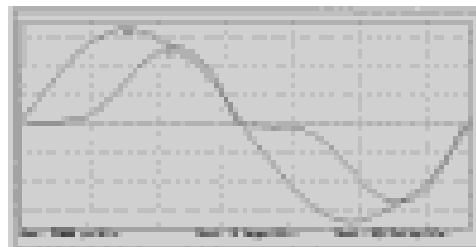
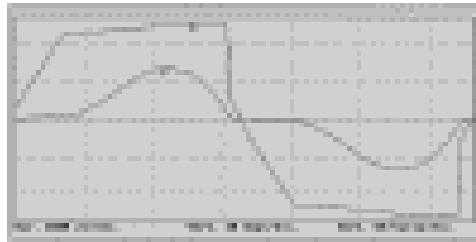


Figura 29. Salida de un reactor en línea



Un reactor en línea, es comúnmente un simple inductor. La reactancia inductiva del inductor resiste la corriente de armónicos de alta frecuencia. Según la ecuación $X_L = 2\pi fL$. Como la frecuencia aumenta, también lo hace la resistencia. Las componentes de 60Hz pasan a través del inductor con poca oposición, pero a los componentes de más alta frecuencia les resulta más difícil pasar. Por lo que las corrientes armónicas disminuyen cuando un reactor se aplica en la línea. El reactor de línea limita las corrientes armónicas, a expensas de una distorsión en el voltaje. El voltaje de salida en el reactor de línea mostrará distorsión en su forma de onda y limitará frecuentemente el voltaje pico. Las figuras 28 y 29 muestran el voltaje y corriente dentro y fuera de un reactor de línea.

Figura 30. Entrada a un filtro pasivo

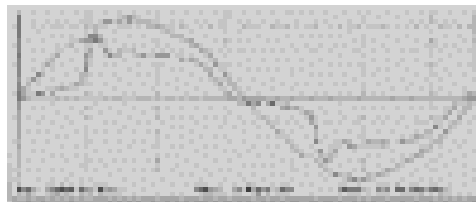
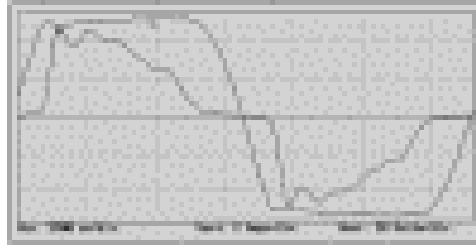


Figura 31. Salida de un filtro pasivo.



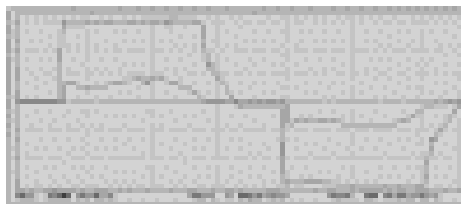
Los filtros pasivos, de armónicas, vienen en una amplia variedad. En algunos casos, ellos no son más que un reactor de línea. En otros casos, pueden usar filtros resonantes en serie o paralelos (uno solo o ambos simultáneamente) para atrapar o resistir a los armónicos. Un filtro serie (con la carga en serie) que usa componentes en paralelo (inductancias y capacitancias en paralelo) se conoce como un “reflector (repelente) de corriente”. En, o cerca la frecuencia de resonancia del conjunto paralelo, el filtro provee atenuación máxima. La “Q” del filtro determina el ancho de banda. Un filtro paralelo (paralelo con la carga) usando componentes en serie (inductancias y capacitancias en serie) es un aceptador de corriente. En o cerca al punto de resonancia del filtro, este dejará pasar mucha corriente y voltaje armónico y la resistencia de corriente continua (dc) del filtro la soportara cuando se sintonizan adecuadamente con la carga estática, los filtros pasivos se convierten en un medio efectivo para controlar los armónicos. Como en el caso de reactores de línea, la distorsión de voltaje de rendimiento puede ser bastante. Las figuras 30 y 31 muestran el voltaje y corriente dentro y fuera de un filtro pasivo.

Se debe tener pendiente: Los filtros armónicos pueden ser bidireccionales. Esto significa que ellos pueden “hundir” (deformar) tanto la onda hacia la carga como la onda hacia la fuente. Algunos usuarios de filtros armónicos simples, se han horrorizado al encontrar que sus filtros les están disparando breakers o rompiendo componentes cuando los filtros intentan atrapar armónicos provenientes de la red de distribución.

Figura 32. Entrada a un filtro activo



Figura 33. Salida de un filtro activo



En la forma más simple, un filtro de armónica activo es un regulador de tipo impulso. El filtro impulsa voltaje a lo largo de cada ciclo medio de corriente alterna (AC), proveyendo la carga con una forma de onda rectangular. La onda de voltaje formada puede completarse con electrónica activa, saturación magnética o ambos. La forma de onda rectangular de voltaje fuerza a los rectificadores en la fuente de alimentación a sacar corriente por un intervalo más largo. Para construir el ciclo correcto (período de conducción de corriente vs el intervalo de voltaje) y mejorando también el factor de potencia. Depender del tipo de filtro armónico activo, la distorsión a la salida puede ser mínima o muy pronunciada. Las figuras 32 y 33 muestran el voltaje y corriente dentro y fuera de un filtro activo.

Comparación de filtros

Hay comúnmente un balance comparativo; la distorsión en el voltaje de salida puede aumentar y su pico puede bajar. En algunos casos, el vatiaje puede aumentar también. La tabla 2.4 provee una recapitulación de las características de desempeño para reactores de línea y otros tipos de filtros. En todos los casos, se utilizaron fuentes de poder

monofásicas tipo “switch” al final de la carga. La carga se varió para proveer una amplitud equivalente a las especificaciones de carga de filtro.

Tabla VI. Comparación en las características del desempeño

	Reactor en Línea	Filtro Pasivo	Filtro Activo	Filtro Electrónico
I rms sin filtro	8.5	8.5	4.1	14.5
I rms con filtro	6.6	6.9	2.9	10.9
FP sin filtro	0.71	0.71	0.66	-0.64
FP con filtro	0.81	0.95	-0.97	-0.98
THD en voltaje de entrada	2.7%	3.1%	2.2%	2.1%
THD en voltaje de salida	27.6%	25.7%	23.4%	0.6%
Voltaje pico de entrada	168V	169V	170V	166V
Voltaje pico de salida	128V	132V	154V	167V
THD corriente de entrada	35.9%	27.0%	23.9%	2.1%
THD corriente de salida	36.1%	32.9%	31.2%	123%
Potencia de entrada (W)	729W	781W	340W	1253W
Potencia de salida (W)	685W	697W	326W	1117W
Eficiencia %	93.9	89.2	95.9	89.1

Las características del filtro ayudaron a determinar el éxito final.

Los filtros armónicas pueden usarse para:

- Mejorar el factor de potencia
- Reducir armónicos
- Reducir corrientes de retorno por el neutro en sistemas trifásicos
- Minimizar el impacto sobre los transformadores de distribución
- Generador depósitos de los efectos armónicos.

- Liberar capacidad de distribución.

Algunos filtros agregan aspectos útiles tales como regulación de voltaje y corrección momentánea por “sags” de voltaje. En las áreas con alta incidencia de tormentas, una combinación de filtro armónico y estabilizador de voltaje puede resultar beneficioso tanto para la compañía de electricidad como para la carga. La evaluación y la planificación cuidadosa del tipo de filtro que se utilizará para controlar problemas con armónicos es esencial. Una de manera para reducir problemas armónicas está con la prevención activa. Si la selección de nuevo equipo contiene posibilidad de controlar internamente el factor de potencia, entonces el impacto de estas cargas sobre la empresa será mínimo. Este es el curso de acción adoptado por países europeos. El equipo vendido en Europa debe reducir armónicos y controlar el factor de potencia.

2.5 Reactores controlados por tiristores

Las reactancias controladas por tiristores, también llamadas reactancia TCR se usan en los compensadores estáticos de energía reactiva (SVC) las reactancias TCR son parecidas a las reactancias en paralelo pero la corriente se controla continuamente por válvulas tiristores. La reactancia trifásica se conecta en triangulo. Cada fase de la reactancia se divide en dos bobinas y los tiristores se conectan entre las bobinas.

Figura 34. Reactores con núcleo de aire controlados por tiristores



Los reactores de núcleo de aire forma parte de los compensadores estáticos y a la vez son empleados en los sistemas eléctricos para mejorar la operación de líneas de transmisión, por esta razón se describen a continuación.

Los compensadores paralelo controlados por válvulas de tiristores son conocidos como compensadores estáticos, que funcionan como una reactancia variable, tanto en el dominio inductivo como capacitivo claro que en este trabajo describiremos como funciona tanto la parte inductiva como capacitiva. Su principal diferencia con los reactores de compensación fijos, es su variación de reactancia en pasos discretos en rangos muy bajos o en forma continua; realizando la operación de control de potencia reactiva con una frecuencia igual al doble de la frecuencia del sistema. 0 ó 120 veces en un sistema de 60 Hz.

Los límites máximos, de voltaje y de capacidad de potencia, están determinados principalmente por el voltaje de operación y la capacidad de las válvulas tiristores de control. Comercialmente, actualmente se encuentra tiristores con capacidad trifásica de 100 Mva a un voltaje de 13.8 Kv. y de 250 Mva a un voltaje de 34.5 Kv.

Generalmente, los reactores que se emplean para formar los compensadores estáticos son del tipo monofásico de núcleo de aire. Se pueden usar instalando dos o más en serie para requerir reactores de menor voltaje y capacidad nominal que el voltaje nominal de la de línea y la capacidad total por fase.

Funcionalmente los compensadores estáticos, se pueden dividir en dos clases: los que usan para compensar variaciones de una carga específica y los que usan para controlar (mantener el voltaje de una línea de transmisión).

El objetivo general de los de la primera clase es compensar carga, donde los requerimientos usualmente son reducir o cancelar la potencia reactiva demandada por

grandes cargas industriales fluctuantes, tales como hornos eléctricos. Este tipo de cargas normalmente están concentradas en una planta servida desde una Terminal de la red, de modo que pueden ser controladas localmente por compensadores conectados a la misma terminal.

La segunda clase de compensadores estáticos, son los que se usan para mantener constante el voltaje de línea de transmisión en una terminal dada cuando se tienen disturbios con las cargas o la generación. En este caso la carga no está localizada en un solo lugar sino que en varias áreas de carga y generación pueden estar conectadas a la red y el objetivo principal es simplemente regular el voltaje en la terminal de compensación.

Las razones por las que se busca hacer dinámica la compensación están relacionadas con el incremento de los límites de la estabilidad transitorias, la disminución de las fluctuaciones de voltaje durante variaciones de carga con la limitación de los sobrevoltajes que siguen después de un gran disturbio.

Los objetivos de aplicación de los compensadores estáticos en los sistemas de transmisión tienen un sistema definido de acuerdo a las características deseables para la compensación de potencia reactiva.

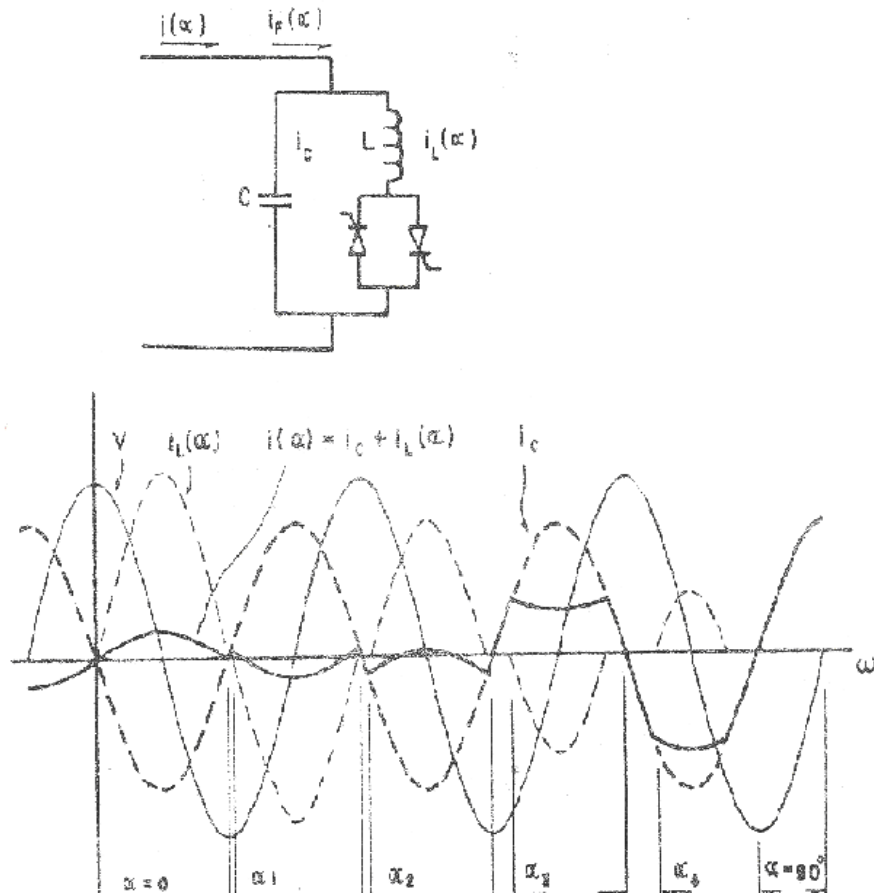
Hay principalmente dos esquemas básicos para reactancia variable. En uno se emplearía reactores controlados por tiristores en conjunción con un capacitor conectado en forma fija o conmutable y se conoce como esquema CF-TCR, condensador fijo, reactor controlado por tiristores. El otro esquema emplea también reactores controlados por tiristores y se conoce como esquema TCC -TCR aunque los dos esquemas tienen un comportamiento comparable en el rango normal de operación, su comportamiento bajo grandes disturbios es significativamente diferente, y sus pérdidas varían en forma complementaria con respecto uno del otro.

Haremos una pequeña descripción de estos esquemas.

Compensadores estáticos de capacitor fijo y reactor controlado por tiristores.

Un compensador estático de capacitor fijo y reactor controlado por tiristores se muestra en forma elemental, la siguiente figura muestra la corriente en el reactor y la corriente total de compensación conforme varía el ángulo de encendido de los tiristores de control. La corriente de compensación puede ser ajustada únicamente a instantes discretos de tiempo, una vez a cada medio ciclo del voltaje aplicado. Los medios de control son válvulas de tiristores de estado sólido que pueden ser encendidas o cerrados cuando se desee, pero que únicamente pueden ser abiertas cuando la corriente que conduce llega a cero (característica de funcionamiento de los tiristores). Sin embargo para asegurar una conexión libre de transitorios, el cierre de los tiristores debe de estar sincronizado con el voltaje alterno.

Figura 35. Esquema básico del compensador estático con inductor controlado



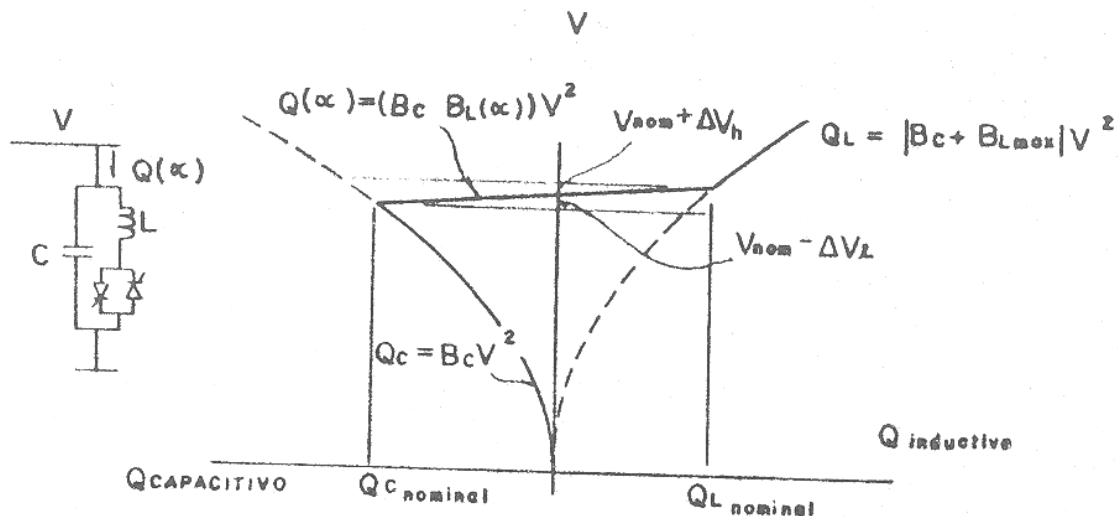
El control de la potencia reactiva se logra atrasando el cierre del interruptor a tiristores por un ángulo α a cada medio ciclo con respecto al valor pico del voltaje. En la figura anterior se muestra la corriente en el inductor $i_L(\alpha)$, la corriente en el capacitor fijo, i_C , la corriente total $i(\alpha)$ con su componente fundamental $i_F(\alpha)$ y el voltaje aplicado, conforme el intervalo de conducción de los tiristores se reduce de un máximo a cero, o sea cuando α se incrementa de 0 a 90° .

En la ilustración se ha asumido que ωL es el mas pequeño que $1/\omega C$, lo que quiere decir que, el régimen del inductor es mayor que el del capacitor, con el propósito de

tener una susceptancia variable con un rango de control tanto en el dominio capacitivo como en el inductivo.

La salida de potencia reactiva versus el voltaje aplicado en terminales en condiciones estables se obtiene con el esquema CF-TCR se muestra en la siguiente figura la relación a estado estable entre la salida de potencia reactiva y el voltaje aplicado puede ser lineal sobre la banda del voltaje de regulación. La pendiente de la curva en esta banda determinada por el control del ángulo de encendido. Fuera del intervalo de regulación la característica de la salida de potencia reactiva versus el voltaje del compensador es como el de un capacitor a bajo voltaje o un inductor a alto voltaje.

Figura 36. Potencia reactiva estable versus el voltaje en terminales de CCV



B_c = Suceptancia capacitiva

$B_L(\alpha)$ = Suceptancia inductiva del reactor al ángulo α

$\Delta V_2 + \Delta V_h$ = Rango lineal de operación de voltaje del compensador

Compensadores estáticos de capacitores conectados por tiristores y reactor controlado por tiristores.

El esquema de compensador estático CCT- TCR consiste en general de un reactor (o banco de reactores) y n bancos de capacitores, cada uno con un interruptor de estado sólido. El número de bancos de capacitores n , es determinado tomando en cuenta consideraciones prácticas que incluyen el nivel de voltaje de operación, el máximo requerimiento de compensación y el régimen de los interruptores de estado sólido.

El rango total de salida de reactiva capacitiva se divide en ' n ' intervalos de operación, donde ' n ' es el número de bancos de capacitores usados. En el primer intervalo de operación la salida del compensador se controla desde cero a un valor VAR_{\max} / n . En este intervalo se conecta un capacitor y al mismo tiempo, la corriente en el reactor controlado se ajusta para que la suma de la potencia reactiva suministrada por ambos elementos sea igual a la compensación requerida. Durante los siguientes intervalos la salida del compensador se controla de una manera semejante hasta llegar a los VAR_{\max} . Utilizando en cada intervalo el banco de reactores para controlar el exceso de potencia reactiva.

Este esquema se puede considerar como uno convencional de capacitor fijo, en el cual del reactor se mantiene relativamente pequeño y el valor del capacitor es cambiado a pasos discretos para mantener la operación del reactor dentro de su rango normal de control.

Para asegurar que los puntos extremos de los intervalos no sean indeterminados, el régimen del banco de reactores ha de ser mayor que el de un banco de capacitores para permitir suficiente traslape entre etapas. En sistemas prácticos también se hace necesario conectar un reactor relativamente pequeño en serie con cada banco de capacitores para reducir las posibles corrientes de impulso en los interruptores de estado sólido y para

asegurar que no ocurra resonancia con impedancia del sistema a la mayoría de las frecuencias armónicas.

Se puede notar que este tipo de compensador puede suministrar potencia inductiva desde cero a un valor máximo determinado por el régimen del banco de reactores. En este caso, naturalmente, los capacitores están completamente desconectados y el banco de reactores es controlado por el ángulo de encendido de la manera usual.

La conexión del banco de capacitores puede realizarse sin transitorios apreciables si el interruptor a tiristores se cierran en el instante de tiempo cuando el voltaje en los capacitores y en el sistema de potencia son equivalente. En ese instante, el voltaje a través de los tiristores es cero.

2.5.2 Descripción del equipo compensador balanceador de cargas trifásicas.

Se analizarán las características relevantes del equipo Compensador-Balanceador de cargas trifásicas, en adelante TBC (*Thyristor Binary Compensator*).

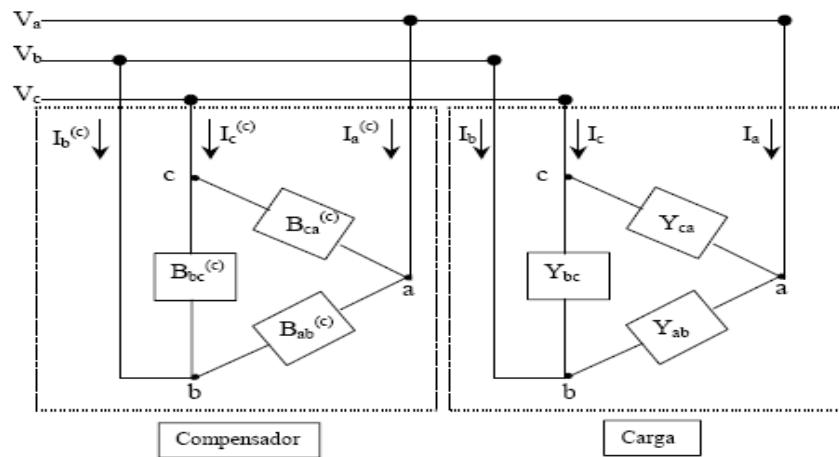
Configuración del equipo TBC.

El equipo Compensador-Balanceador de cargas trifásicas ha sido concebido como una red de susceptancias en configuración delta que es conectada en paralelo a la carga industrial, tal como se aprecia en la figura 37, donde $B_{ij}(c)$ representa la susceptancia de compensación e Y_{ij} la carga existente entre las fases de alimentación i y j .

La compensación y el balance de carga se realiza mediante la adecuada conexión de susceptancias entre cada una de las fases de modo que, para la fuente de alimentación, todo el conjunto sea equivalente a una carga resistiva equilibrada.

Bajo este esquema, para un correcto funcionamiento del equipo, el diseño del sistema de control debe considerar la resolución de dos problemas independientes. El primero radica en procurar una adecuada conexión de los elementos de potencia dentro del equipo que representen físicamente a las susceptancias previamente calculadas. El segundo problema consiste en calcular el valor de las susceptancias que es necesario conectar entre cada fase con el fin de lograr el efecto de compensación y balance anteriormente mencionado, cuestión que depende directamente de la carga trifásica existente.

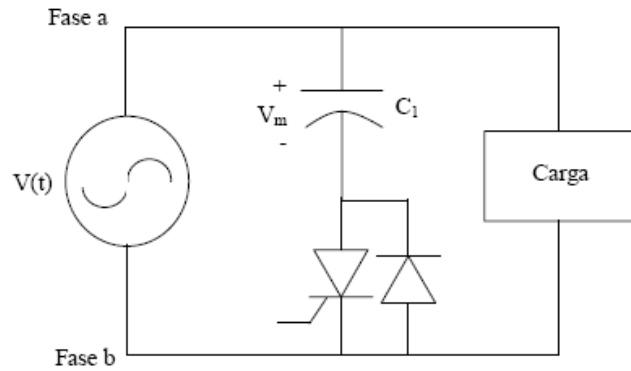
Figura 37. Carga trifásica y equipo compensador balanceador



Principios de conexión para condensadores de cada rama.

Para determinar el momento óptimo de conexión en el caso de los condensadores, se analizará la configuración propuesta para una de las ramas tal como muestra la figura 38.

Figura 38. Circuito de conexión de condensador



Mientras el tiristor esté apagado, el condensador se carga a través del diodo al voltaje máximo negativo $-V_m$ entre las fases correspondientes. El condensador no se puede descargar puesto que el tiristor se encuentra apagado, de modo que la rama se comporta como circuito abierto.

Para poder obtener una conexión suave, es necesario que se cumplan dos condiciones. La primera de ellas es que la variación de tensión al momento de disparar el tiristor sea nula, y la segunda es que el voltaje ánodo-cátodo en el tiristor sea nulo. Matemáticamente es posible demostrar que ambas condiciones se cumplen cuando $v(t)$ alcanza su valor máximo negativo de voltaje. Por lo tanto el encendido del tiristor y la descarga del condensador debe comenzar cuando $\omega t = 270^\circ$. A partir de ese instante debido a que $\sin(270^\circ) = -\cos(0^\circ)$, si el tiristor se enciende, se tiene que el voltaje en el condensador para $\omega t \geq 270^\circ$ está dada por la ecuación 2-26.

$$V_c(t_0) = -V_m \cos(\omega \cdot t_0) \quad (2-26)$$

Luego la corriente en el condensador se rige por la siguiente expresión

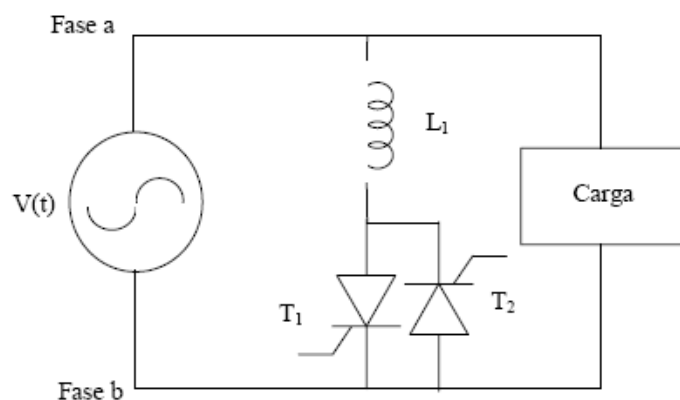
$$i_c = C \cdot \frac{dV_c}{dt} \Big|_{t\omega_0} = C \cdot V_m \frac{d}{dt} (-\cos(\omega \cdot t)) \Big|_{t\omega_0} = C \cdot V_m \text{sen}(\omega \cdot t_0) \quad 2-27$$

Esto muestra que la corriente en el condensador comienza a crecer desde cero en forma sinusoidal hasta completar un ciclo. Cuando la corriente en el tiristor se hace nula (o tiende a hacerse negativa), dicho elemento se apaga por lo que el condensador completa el ciclo de corriente a través del diodo en antiparalelo quedando nuevamente cargado a $-V_m$.

Principios de conexión para inductores de cada rama.

Considerando el circuito de la figura 39, es posible constatar que cuando los tiristores están apagados no existe circulación de corriente a través de la inductancia. Sin embargo, al momento de conectar los tiristores se establece una corriente cuya magnitud depende del ángulo de disparo respectivo de cada tiristor, el cual es medido a partir de los cruces por cero del voltaje.

Figura 39. Circuito de conexión de reactor



Dado que la forma de onda requerida para la corriente es sinusoidal, se requiere que los semiciclos positivo y negativo de corriente sean simétricos, por lo que los ángulos de disparo de los tiristores **T1** y **T2** deben ser idénticos es decir:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \quad (2-27)$$

Además se tiene que el rango de variación de α es

$$\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$$

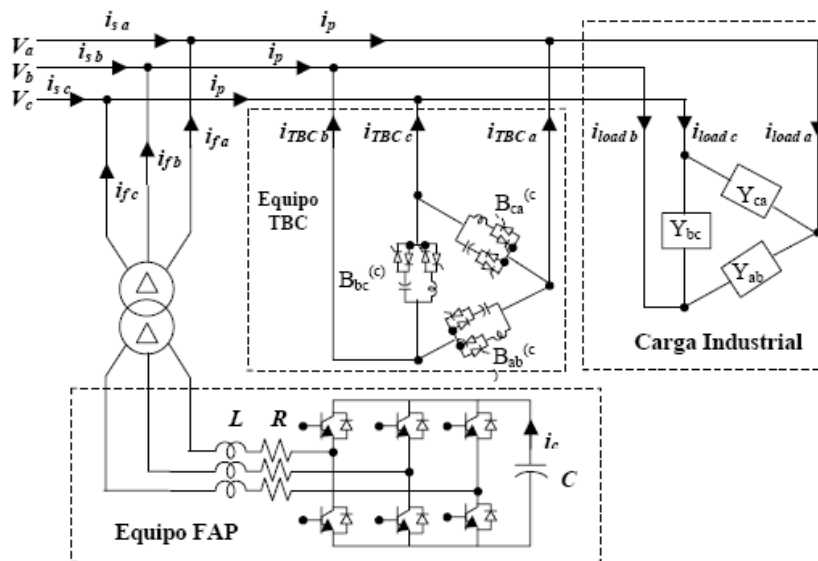
Matemáticamente es posible demostrar que la corriente a través de la inductancia sólo es sinusoidal ideal pura si $\alpha = 90^\circ$.

Conforme a lo anterior, los tiristores deben encenderse con un ángulo de disparo $\alpha = 90^\circ$. De este modo la corriente crece desde cero en forma sinusoidal, sin distorsiones, al igual que en el caso de los condensadores.

Interconexión “Shunt” del equipo TBC y Filtro Activo: Principio de funcionamiento.

La configuración propuesta para la interconexión entre un filtro activo de potencia (FAP) y el equipo TBC con el objeto de lograr el balance y compensación de cargas trifásicas contaminantes se muestra en la figura 40.

Figura 40. Interconexión entre filtro activo shunt y equipo TBC



En la topología mostrada en la figura 40, el Filtro Activo de potencia (en adelante, equipo FAP) y el equipo TBC trabajan en forma independiente en la tarea de compensación sin embargo las potencialidades que cada uno de los equipos ofrecen, se combinan de modo interesante.

El equipo TBC muestrea las corrientes de línea en la carga *iload* y analizando sus componentes de frecuencia fundamental. Posteriormente, calcula mediante el sistema de control basado en evaluación directa de las componentes en cuadratura de corriente, el valor de las susceptancias que es necesario conectar entre cada fase del sistema eléctrico para balancear y compensar dichas fundamentales de corriente.

Puesto que la conexión de las mencionadas susceptancias se realiza mediante un escalamiento binario, siempre existe una diferencia entre el valor teórico y práctico equivalente a la mitad de la potencia reactiva que el condensador de menor valor de cada rama es capaz de inyectar a la red.

Por su parte, el equipo FAP en configuración “*shunt*” mide las corrientes directamente en la fuente del sistema eléctrico, por lo cual considera al conjunto TBC-carga industrial como una única carga dinámica. Puesto que esta “carga” se encuentra balanceada y con factor de potencia muy cercano al unitario, el objetivo del filtro activo se reduce a compensar una pequeña diferencia de potencia reactiva e inyectar las armónicas de corriente necesarias para que la forma de onda de la corriente *is* de la fuente sea sinusoidal.

La operación del equipo FAP para esta configuración sigue el esquema general de dos lazos. Sin embargo, es necesario considerar la razón de transformación entre las corrientes en el primario y secundario del transformador reductor de tensión. De modo de adecuar la respuesta del lazo a las necesidades de corriente en el lado de alta tensión,

notablemente menores a las que existirían si la carga consumiese la misma potencia en baja tensión.

Adicionalmente, dado que las líneas de transmisión son inductivas, la inyección por parte del FAP de los componentes armónicos que la carga trifásica requiere, permite mejorar la forma de onda del voltaje en la carga, lo que contribuye a una mejor operación del equipo TBC en cuanto a la calidad de las corrientes que circulan por los elementos pasivos y al cálculo mismo de las susceptancias a conectar (que dependen de la magnitud V del voltaje).

Finalmente, es interesante destacar que aparte de los factores ya mencionados, la operación del equipo TBC es independiente de la operación del equipo FAP, por lo que depende únicamente de las condiciones existentes en la carga trifásica.

La interconexión del equipo TBC y FAP permite aprovechar las cualidades de cada equipo con sistemas de control independientes y destinados a balancear y corregir el factor de potencia en la carga y cancelar sus componentes armónicas. El equipo TBC se encarga de resolver el problema a niveles de potencia elevados, mientras que el FAP, operando a baja tensión, corrige el error de compensación en el TBC (producido por la conexión de elementos binariamente seleccionados) e inyecta las corrientes armónicas que sean necesarias, por esto en este trabajo se incluyó parte del estudio de este equipo, ya que es un elemento que se utilizan tanto capacitores para elevar el factor de potencia como reactores de núcleo de aire para regular el voltaje y resolver problemas de potencia elevadas.

3. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA ESPECIFICACIONES DE REACTORES CON NÚCLEO DE AIRE

3.1 Método directo

Una forma de calcular la potencia reactiva que se inyectara a una línea que sigue un comportamiento de voltaje constante en ambos extremos y en la que se desprecian las perdidas, es la utilización de la expresión siguiente es para una línea ideal, es una forma sencilla para poder determinar el reactor inductivo de línea.

$$Q_E = P_n \frac{\cos \vartheta - \cos \delta}{\text{sen } \vartheta}$$

ϑ = ángulo de línea
 δ = ángulo de voltaje

(3-1)

P_n = potencia natural

Q_E = potencia reactiva a suministrar en una línea ideal

En la que P_n y ϑ se calculan con los parámetros de la línea y δ se considera cero en el caso extremo de carga mínima.

Las variables se definen como:

$$\text{Potencia natural } P_n = \frac{V^2}{Z_K} = \frac{V^2}{\sqrt{L/C}}$$

(3-2) Y (3-3)

$$\text{Ángulo de línea } \vartheta = \sqrt{B_C X_L} = wl\sqrt{CL}$$

La inductancia serie y la capacitancia paralelo son (L y C) respectivamente, por unidad de longitud de la línea y son propiedades de cada línea. Los parámetros están enlazados con la configuración de la línea, la distancia entre conductores y el tipo de conductor mismo sus valores pueden calcularse teóricamente, pero lo mas fácil es referirse a las

tablas que suministran los fabricantes o a las tablas que tiene algunos libros de análisis de sistemas de potencia.

3.2 Método por curvas de capacidad

Este método es más exacto que el método directo, también sirve para analizar e interpretar el efecto y determinar numéricamente los requerimientos de reactores en paralelo en línea de transmisión es inspeccionado las curvas de capacidad que representan el comportamiento a estado estable de una línea. Estas curvas de capacidad se grafican ordinariamente con las constantes ABCD de la línea, permitiendo un esquema grafico completo del comportamiento de la misma a cualquier condición de voltaje en terminales y del flujo de potencia.

Las ecuaciones que se utilizaran como funciones para las curvar de capacidad son las siguientes.

La potencia compleja en el extremo de recibo y de envío respectivamente, expresada en función de los voltajes en los extremos son:

$$S_R = V_R I_R^* = \frac{|V_S||V_R|}{|B|} \beta - \delta - \frac{|A||V_S|^2}{|B|} \beta - \alpha \quad (3-4)$$

$$S_S = V_S I_S^* = -\frac{|V_S||V_R|}{|B|} \beta + \delta + \frac{|A||V_S|^2}{|B|} \beta - \alpha \quad (3-5)$$

Las figuras 41 y 42 muestran el ploteo de las curvas de capacidad del funcionamiento de flujo de potencia para ambos extremos de una línea dada.

El ploteo de la ecuación (3-4) anterior corresponde a la potencia transmitida al extremo de recibo, se muestra en la primera figura. 41 En esta figura la curva trazada corresponde a diferentes valores de flujo de carga, cuando el voltaje extremo de recibo y en el

extremo de envío se mantiene constantes. Es de notar en la gráfica que el punto 'n' no es dependiente de la corriente de carga y que mientras el voltaje en el extremo de recibo ($|V_R|$) se mantenga constante, el punto 'n' no cambia de posición y, como tampoco cambia el valor del voltaje en el extremo de envío ($|V_S|$), en el punto 'k' debe describir una circunferencia al variar la potencia transmitida (VI^*).

Si se cambia el valor del voltaje en el extremo de envío, la magnitud $|V_S||V_R|/|B|$ cambiara, por lo que el punto 'k' describirá una nueva circunferencia concéntrica a la primera. En las figuras 43 y 44 se muestra esquemáticamente varias curvas diferentes valores de voltaje en el extremo de envío ($|V_S|$).

El ploteo de la ecuación (3-5) correspondiente al flujo de potencia el extremo de envío se muestra en figura 42, en este caso, el punto 'k' también describe una circunferencia cuando se cambia el flujo de potencia y se mantienen constantes los voltajes en los extremos de la línea ($|V_R|$ y $|V_S|/|B|$); de modo que para diferentes valores de V_S se tendrán diferentes circunferencias que no serán concéntricas.

En la figura 44, se muestra esquemáticamente diferentes curvas de comportamiento del flujo de potencia en el extremo de envío para diferentes valores de $|V_S|$, manteniendo $|V_R|$ constante.

De la figura 41, se observa que el valor máximo de compensación de potencia reactiva inductiva se da cuando la potencia activa transmitida es igual a cero. En este punto el valor de ángulo $(\beta - \delta)$ se obtiene de las siguientes relaciones que se hacen con referencia a la figura. Este ángulo se designara como $(\beta - \delta)_{Q_{L\max}}$ por ser el ángulo correspondiente a la máxima compensación de potencia reactiva inductiva cuando solamente se considera una dirección de flujo.

Figura 41. Diagrama circular de las condiciones de transferencia en el extremo recibido

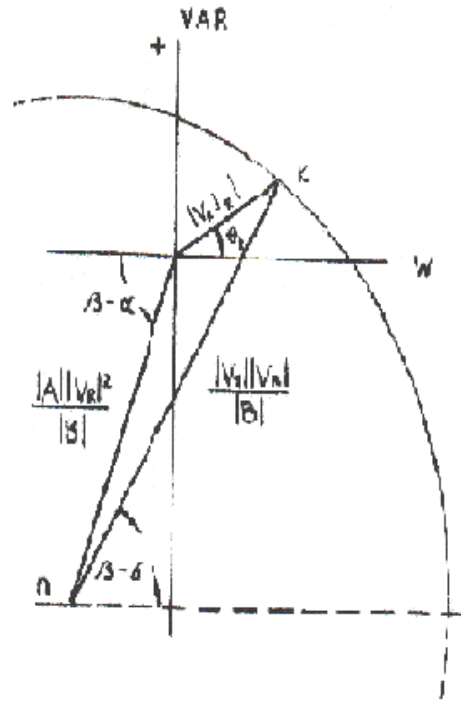


Figura 42. Diagrama circular de las condiciones de transferencia de en el extremo envío

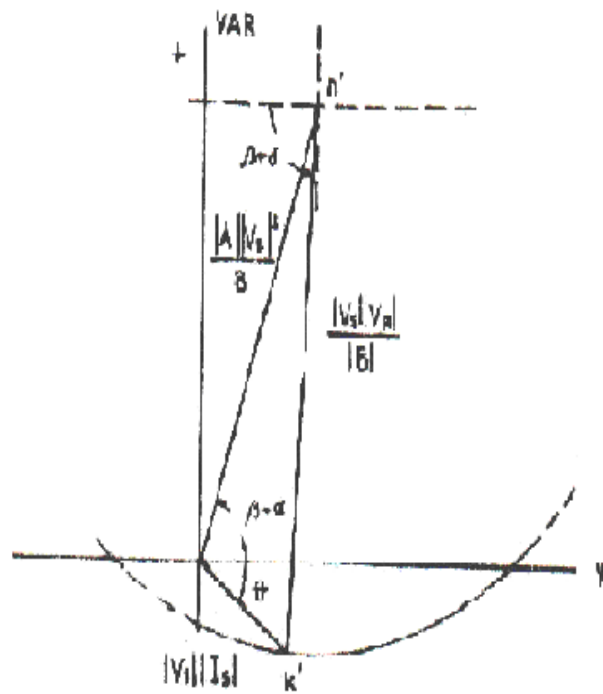


Figura 43. Diagrama circulares en el extremo recibido para varios valores de $|V_S|$ y un valor constante de $|V_R|$.

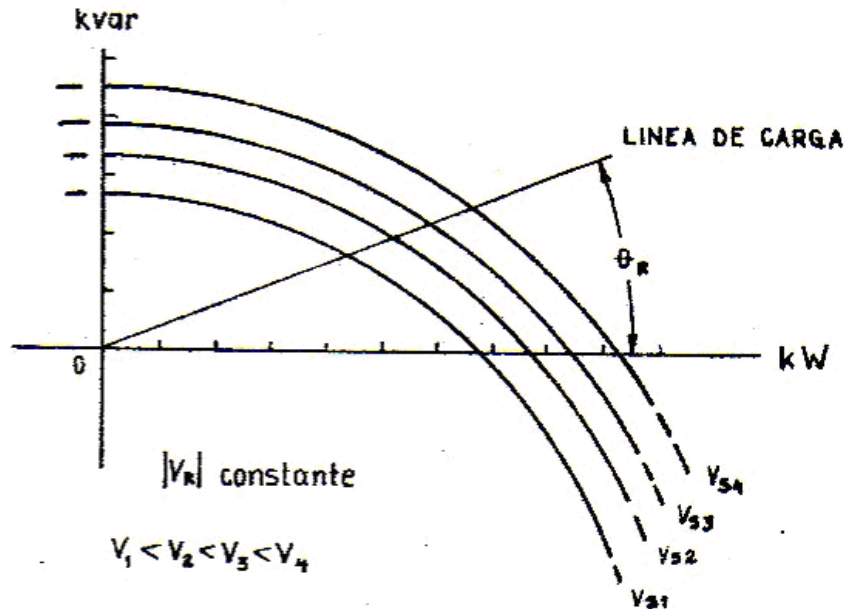
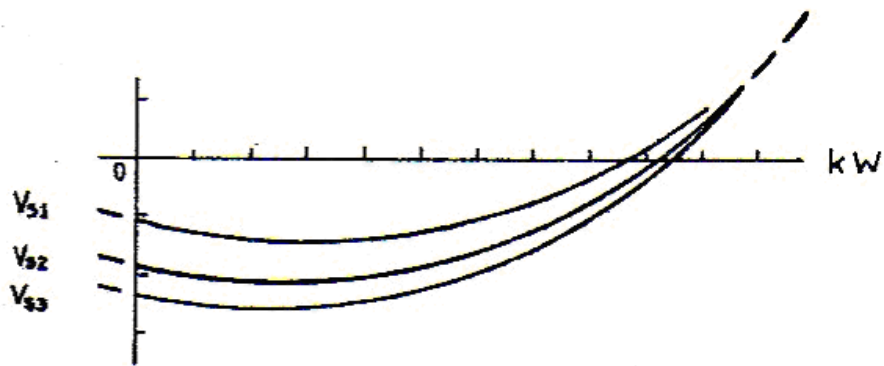


Figura 44. Diagrama circulares en el extremo envío para varios valores de $|V_S|$ y un valor constante de $|V_R|$.



$$(\beta - \delta)_{QL_{\max}} = \cos^{-1} \left[\frac{|A||V_R|}{V_S} \cos(\beta - \alpha) \right] \quad (3-6.1)$$

Entonces, la máxima potencia reactiva inductiva necesaria a suministrar a una línea cuando se tiene valores dados de voltaje en los extremos es.

$$Q_E = \frac{|V_s||V_R|}{|B|} \text{sen}(\beta - \delta)_{Q_{L\max}} - \frac{|A||V_R|}{|B|} \text{sen}(\beta - \alpha) \quad (3-6)$$

donde $(\beta - \delta)$ esta dado por la ecuación (3.6.1)

En la práctica raramente se opera una línea con carga muy próxima a cero o cero en el caso extremo, sino que llega a operar a un límite de carga mínima. Además se permite la variación de voltaje que oscila en el 5% de sobrevoltaje. Esto significa que la compensación necesaria suministrada a una línea tiene un valor menor a 1 que se calcula con la ecuación (3-6). Por otro lado debe de tomarse en cuenta la capacidad de absorción de potencia reactiva que tiene las plantas que alimentan el sistema.

El mejor modo de elegir la capacidad de los reactores de compensación es hacer un análisis de flujo de carga mínima, tomando en cuenta las diferentes condiciones de operación del sistema en su totalidad. Dentro de estas condiciones están: la máxima variación permitida de voltaje en las barras, la capacidad de absorción de potencia reactiva de los generadores, el límite térmico de capacidad de transmisión de las líneas, el punto de operación de las derivaciones de los transformadores existentes, el límite de estabilidad y la operación económica del sistema de potencia.

Así se tiene que, las ecuaciones aquí presentadas, para usos prácticos, solo sirven para encontrar un valor máximo de la potencia reactiva inductiva requerida como compensación para una línea. Este valor puede servir de referencia como punto de partida para análisis detallados que puedan hacerse por computadora.

La ecuación (3-1) corresponde a una línea sin pérdidas, o sea en la que se considera que la resistencia y la conductancia son cero, y, la ecuación (3-6) a una línea larga en la que se consideran las pérdidas. A menudo el grado de exactitud obtenido al hacer un cálculo exacto no justifica las complicaciones adicionales involucradas, lo que significa que

para efectos prácticos , la ecuación (3-1) es suficiente para el cálculo de la máxima potencia reactiva inductiva de compensación.

3.3 Cálculo por computadora

Programa ASP se modelan como una reactancia inductiva constante $X_L=2pfL$, donde L está en henrios. Al igual que los capacitores, pueden ser especificados en KVAR.

Se modelan como una reactancia inductiva (reactor) constante invariante en el tiempo. Este tipo de modelo requiere que a partir del voltaje y de la potencia aparente de operación en régimen permanente del motor, se calcula el valor de la reactancia de la siguiente manera:

$$X_{skunt} = \frac{|V_{oper}|^2}{Q_{oper}^*} \quad (3-7)$$

Para realizar cualquier cálculo de cortocircuito o estabilidad con el ASP, solo es necesario llenar la ventana “General” que se muestra a continuación y para flujo de carga, además de completar los datos de la ventana “General”, es necesario especificar en la ventana de “Flujo de Carga”, si se desea el modo de compensación automática y en caso de que así se desee se debe especificar a que tensión se desea mantener el voltaje de la barra a la cual se encuentra conectado dicho compensador.

Figura 45. Ventana para parametrizar un compensador en ASP.

Compensador

General | Corto circuito | Flujo de carga

Nombre: CmpCap-0

Vnom KV	MVAR	Barra KV	Nombre
0	0	0	

Configuración

Y

Aceptar Cancelar

3.5 Especificaciones de reactores con núcleo de aire, según cálculo.

Las presentes especificaciones son de aplicación para el diseño, la fabricación y los ensayos de los reactores de compensación de reactiva incluyendo algunos equipos auxiliares para su funcionamiento.

Los reactores y sus accesorios son diseñados según normas y recomendaciones particulares. Por ejemplo, normas IRAM, IEC, ANSI, ASTM y NEMA.

Los reactores son suministrado según detalle indicados en los esquemas unifilares, plantas y cortes los reactores completos, con todo el material necesario para su correcto funcionamiento y para el cumplimiento integral de las finalidades previstas según el proyecto, las presentes especificaciones técnicas particulares, las planillas de datos técnicos garantizados.

En este trabajo se menciona únicamente especificaciones para reactores con núcleo de aire.

- | | |
|------------------------------------|--|
| 1. Cantidad de reactores | _____ |
| 2. Normas de diseño de fabricación | _____ |
| 3. Tipo de reactor | 3.1 Blindado tipo seco con
Núcleo de aire _____ |
| | 3.2 Seco con núcleo de aire _____ |
| | 3.3 Inmerso en aceite con núcleo de aire _____ |
| 4. Número de fases | 4.1 Monofásico _____ |
| | 4.2 Trifásico, compuesto por
tres reactores monofásicos _____ |

- 4.3 Trifásico integral _____
- 4.4 Banco vertical compuesto
Por tres reactores monofásicos _____
- 4.5 Banco trifásico vertical _____

- 5. Elevación máxima de temperatura
 - 5.1 Punto medio _____
 - 5.2 Punto mas caliente _____
 - 5.3 Para corriente Nominal térmica 10 s _____
- 6. Tipo de servicio
 - 6.1 Intemperie _____
 - 6.2 Interior _____
- 7. Conexión
 - 7.1 Estrella flotante _____
 - 7.2 Estrella aterrizada _____
 - 7.3 Delta _____
 - 7.4 Neutro y tierra _____
 - 7.5 Limitador de corriente _____

- 8. Voltaje nominal _____
- 9. Frecuencia nominal _____
- 10. Corriente nominal (térmica a 10 s) _____
- 11. Corriente de régimen continuo _____
- 12. Potencia nominal
 - 12.1 Monofásica _____
 - 12.2 Trifásica _____
- 13. Reactancias de características lineal a Voltaje nominal _____
- 14. Tipo de núcleo núcleo de aire
- 15. Lugar a conectarse
 - 15.1 Directamente a las barras de alto voltaje _____

el reactor	15.2 En el terciario de los transformadores	_____
	15.3 Neutro a tierra	_____
16. Nivel de aislamiento		_____
17. Tipo de enfriamiento	17.1 Inmerso en aceite, auto enfriado (OA)	_____
	17.2 Natural	_____
	17.3 Inmerso en aceite con	
	Enfriamiento por aire forzado (OA/FA)	_____
	17.4 Cualquier otro tipo	_____
18. Altura sobre el nivel mar		_____
19 Tolerancia máxima admisible de valor de reactancia		_____

Se debe tomar en cuenta todos los equipos y accesorios que requieren los reactores para su buen funcionamiento por eso en las siguientes líneas se mencionan los accesorios necesarios.

Requisitos de aislamiento

- Voltaje de aguante al impulso por rayo normalizado (valor cresta)
- Voltaje de aguante al impulso por rayo cortado normalizado (valor cresta)
- Tiempo mínimo de flameo
- Voltaje de aguante a 60 Hz, 60 s. (valor eficaz)
- Voltaje inducida nivel de 1 hora (valor eficaz)

Accesorios requeridos

- Pararrayos
- Pasa tapas (Bushings)
- Terminales conectores.

- Transformadores de corriente
- Relé de protección para el reactor
- Relé de bajo voltaje para el reactor
- Interruptores
- Alambrado de control y fuerza
- Gabinete de control
- Placa de datos
- Sistema de enfriamiento
- Radiadores
- Descargadores de sobrevoltaje
- Set de repuestos

Si es un reactor con núcleo de aire sumergido en aceite

- Indicador del nivel de aceite
- Termómetro de aceite
- Dispositivo de alivio de presión
- Válvula de drenaje, muestreo, filtro y vació
- Cuba y tapa
- Placa de conexión a tierra del tanque
- Tuberías y sus accesorios
- Sistema de conservación de aceite
- Rele buchholz-antisísmico
- Aceite aislante

A continuación se presenta la relación de pruebas de rutina (aplicables a cada unidad) que deberán efectuarse a los reactores.

- Medición de resistencia ohmica de los devanados
- Prueba de impedancia
- Prueba de impulso por rayo, onda cortada
- Potencial aplicado
- Potencial inducido
- Pruebas de hermeticidad e hidrostática
- Factor de potencia aislamientos internos
- Factor de potencia en boquillas
- Pruebas de aceite
- Resistencia de aislamiento de los devanados
- Prueba de humedad residual
- Prueba de alambrado

4. ESTUDIO DE LA MANIOBRA DE APERTURA DE UN BANCO DE REACTORES DE NÚCLEO DE AIRE DE MEDIA TENSIÓN

Este es un estudio que se realizó para la instalación que forma parte del equipamiento de compensación de potencia reactiva en media tensión a instalar en la Estación “I 500”, que alimenta una parte importante de las cargas de la zona Este de la ciudad de Montevideo. Fue elaborado por los Inga. Graciela Calzolari, Ing. Michel Artenstein y Ing. Freddy Rabin, miembros de IEEE con el principal propósito de calcular la pendiente de subida de tensión a que queda sometido el reactor automáticamente después del reencendido, compararla con el valor de diseño del reactor y hacer las correcciones necesarias.

En este estudio se comienza describiendo brevemente la instalación en estudio y se sintetiza los aspectos relevantes de la conocida teoría de maniobra de reactores “shunt” que son de aplicación a este ejemplo particular. Se realizan los cálculos teóricos realizados, a fin de tener una primera aproximación a los sobrevoltajes de maniobra esperables, los principales datos obtenidos de los ensayos de tipo realizados sobre los interruptores de maniobra, el modelado detallado de la instalación y los estudios de transitorios electromagnéticos realizados mediante el programa de simulación A.T.P. (Alternative Transients Program). Se destaca en particular la necesidad de implementar medidas correctivas en la instalación a los efectos de respetar las condiciones de diseño de aislamiento que son habituales para este tipo de reactores.

La maniobra de apertura de un reactor shunt puede hacer que se tengan requerimientos críticos a su aislamiento entre espiras, particularmente si el reactor es del tipo de núcleo

de aire. En la etapa de ingeniería de detalle de una nueva instalación de reactores shunt de 30 kV para la red de Montevideo se consideró necesario, por lo tanto, evaluar este tipo de solicitaciones y compararlas con los valores de diseño de la aislamiento del reactor.

Describimos los estudios de transitorios electromagnéticos realizados, la realimentación sobre estos estudios que se obtuvo de los ensayos de tipo de los correspondientes interruptores de maniobra y la aplicación de los resultados obtenidos a la evaluación del diseño del reactor.

Se indican finalmente las principales conclusiones obtenidas del estudio realizado y las medidas correctivas que se debieron implementar en el proyecto de la instalación a fin de respetar las condiciones de diseño de aislamiento del reactor.

Especificaciones de los interruptores de potencia

- Estos interruptores fueron especificados y ensayados exigiéndose que la tensión de supresión al cortar pequeñas corrientes inductivas no supere los 2.5 p.u.
- Son unipolares, del tipo "knee type" con un comando para cada polo.
- "La clase de soportabilidad mecánica de los succionadores es al menos M2 (10000 ciclos de operación sin mantenimiento)
- Interruptor de Hexafloruro de azufre SF₆
- Para instalación a Intemperie
- Para conexión de reactores a terciario de transformador
- Tensión nominal 36 kv
- Niveles de aislamiento nominal 200kv
- Frecuencia nominal 60HZ
- Corriente nominal 1600 a 2500 amp
- Potencia de corte esta dada por la corriente de corto circuito 8 KA

- Potencia de cierre nominal 30 MVAR
- Ciclo de operación nominal 10000 ciclos
- Tiempo de apertura y cierre 2,5 ms o 10 ms
- Tensión nominal de los dispositivos de cierre y apertura 31.5KV
- La conexiones interruptor-reactor son aéreas
- Los valores típicos de la pendiente de la tensión de restablecimiento del dieléctrico son de ms 50 *kV/ms* para disyuntores de este nivel de tensión.

4.1 Descripción de la instalación

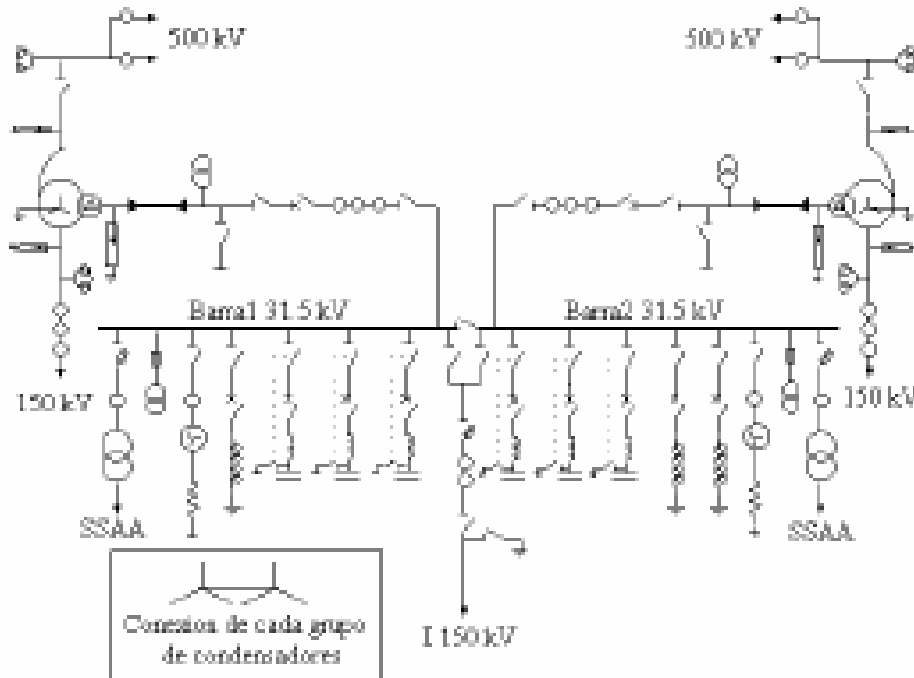
la Estación “I 500”, que alimenta una parte importante de la cargas de la zona Este de la ciudad de Montevideo.

Los equipos a analizar son tres bancos de reactores “shunt” de $31.5/\sqrt{3}$ kV, 30 MVAR conectados a los terciarios de 2 bancos de auto transformadores de 500 /150/31,5 kV, 250/250/90 MVA.

Los reactores son del tipo de “núcleo de aire”, con su neutro rígidamente aterrizado y diseñados para un Nivel Básico de Aislamiento (BIL) fase-tierra y entre espiras de 170 kVp. Los reactores están protegidos por descargadores de ZnO instalados en sus cercanías.

En la figura 45 se incluye un esquema unifilar de la instalación proyectada (en rojo se señalan los reactores en estudio).

Figura 46. Diagrama unificar estación “I 500”

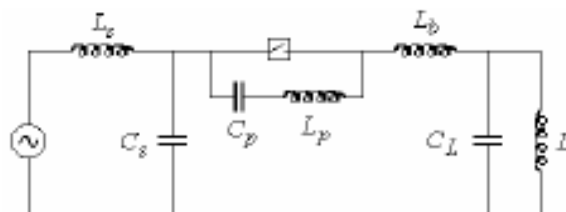


4.2 Síntesis de la teoría de maniobra de reactores

A continuación se describe la teoría de maniobra de reactores “shunt” al sólo efecto de enmarcar los cálculos teóricos y simulaciones que se describen más abajo.

En el circuito equivalente de la figura 46 se identifican los parámetros relevantes que influyen en la maniobra.

Figura 46. Circuito equivalente monofásico

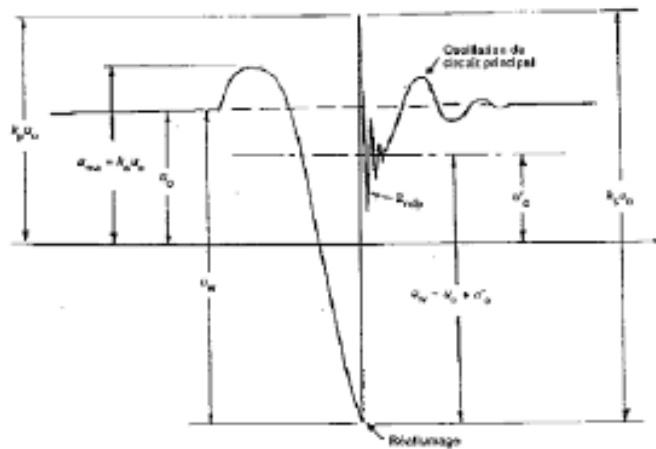


La abertura del interruptor de maniobra impone sobrevoltaje fase-tierra en bornes del reactor cuya grafica aproximada es la vista en la figura 47 y cuyas características principales son las siguientes:

a) la interrupción de corriente no se efectúa en su cero natural, dado que el arco eléctrico entre bornes del interruptor es sumamente inestable en las cercanías del cero natural. Se efectúa, por lo tanto, una interrupción brusca de corriente (“current chopping”) antes de ese cero, en donde la consecuencia es dejar encerrada una carga eléctrica en la capacidad parásita del reactor (C_L), la cuál se descarga en forma oscilatoria en el circuito producido por esa capacidad y la inductancia del reactor (L).

La primer oscilación (“oscilación de carga”, con frecuencia de hasta decenas de kHz) somete al reactor un primer pico de sobrevoltaje (la llamada “voltaje de supresión” $k_u U_0$ en la figura 47) que crece al aumentar el valor de corriente al cuál se produce el “chopping” (“corriente de chopping”), al aumentar la inductancia del reactor y al disminuir la capacidad parásita C_L .

Figura 47. Voltaje fase-tierra en terminales del disyuntor ante la apertura del mismo



b) En vista de la elevada frecuencia de la oscilación de carga, el voltaje del lado de la alimentación casi no cambia cuando el voltaje del lado carga cambia de polaridad, por lo que rápidamente el interruptor queda sometido entre bornes a una tensión importante (uw en la figura 47), con un riesgo de reencendido, particularmente en los casos en que el tiempo de arco es muy corto y, por lo tanto, los contactos del interruptor aun no han tenido tiempo de alejarse lo suficiente.

c) Al efectuarse ese reencendido, el reactor queda bajo a una onda de voltaje (onda de valor de pico $k pu0$ en la figura 47) cuya frecuencia de oscilación cambia en algunas decenas de kHz y algún MHz (es la denominada “segunda oscilación paralela”). El valor de esta frecuencia y el valor de el voltaje de recuperación entre terminales del interruptor antes del reencendido (que, a su vez, es función de el voltaje de supresión) definen la pendiente de subida de voltaje a la cuál quedará sometido el reactor durante el reencendido es recomendable ver que la frecuencia de la segunda oscilación paralela se eleva al disminuir, tanto la capacitancia parásita C_L como la inductancia Lb asociada a las conexiones entre el interruptor y el reactor..

Cabe observar que no es de esperar que el valor de pico de los sobrevoltajes que aparecen durante la maniobra, (tanto durante el “chopping” como durante el reencendido) represente un problema para el reactor, dada la presencia de los descargadores de ZnO en sus cercanías.

Al final podemos contemplar que la instalación en estudio presenta ciertas características que, en caso de reencendido, hacen presumir la aparición de pendientes de voltajes elevadas, en particular:

- los reactores son de potencia moderada (L alto, aumenta el voltaje de supresión).

- Los reactores son del tipo de “núcleo de aire” (C_L muy bajo, aumenta la frecuencia de segunda oscilación paralela).
- Las conexiones interruptor-reactor son aéreas y muy cortas (Lb muy bajo, aumenta la frecuencia de segunda oscilación paralela).

4.3 Cálculos preliminares

En esta sección presentamos los cálculos preliminares, realizados antes de conocer los datos exactos de la instalación.

Cálculo de la corriente de chopping

La corriente de chopping es el valor de corriente por debajo del cual el interruptor abrirá, es decir interrumpirá la corriente, provocando la consiguiente respuesta del reactor y sistema. La corriente de chopping se calcula, de acuerdo a la norma, para reactores de neutro aterrizado, mediante la expresión:

$$i_{ch} = \lambda \sqrt{C_t}$$

donde λ es el número de chopping y $C_t = C_p + \frac{C_s C_L}{C_s + C_L}$ es la

Capacidad total vista desde terminales del interruptor (las capacidades responden al circuito simplificado de la figura 46, donde C_p es la capacidad parásita en bornes, C_L es la capacidad a tierra del lado de carga y C_s es la capacidad a tierra del lado de fuente).

Habitualmente $C_s \gg C_L$ y C_p es muy pequeña, por lo que $C_t \cong C_L$. Para interruptores de SF6 λ está habitualmente entre 4×10^4 y 17×10^4

el voltaje de supresión primer pico en p.u. vale:

$$k_a = \frac{V_{ma}}{V_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{i_{ch}}{V_0}\right)^2 \frac{L}{C_L}}$$

donde L es la inductancia del reactor y V_0 es la tensión fase-tierra de pico de

preapertura. Con la aproximación típica queda $k_a = \frac{V_{m0}}{V_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{3\lambda^2}{2\omega Q}\right)}$ siendo Q la

potencia trifásica del banco de reactores y $\omega = 2\pi f$. Para el caso de los reactores de Montevideo I:

$L = 105 \text{ mHy}$, $C_L \cong 300 \text{ pF}$ y $V_0 = 25.7 \text{ kV}$ se tiene $i_{ch} \cong 3A$ para $\lambda \cong 17 * 10^4$ (valor asumido).

y es en esos instantes y solo en la primer fase que abre que habitualmente se produce el reencendido.

El valor de pico luego del reencendido, en p.u., será:

$$k_p = (1 + \beta)(1 + k_a) \frac{C_s}{C_s + C_L} - k_a$$

donde β es un factor de amortiguamiento (se toma $\beta = 0.5$ en forma conservadora).

En el caso $C_s \gg C_L$ se tiene $k_p = 1 + \beta(1 + k_a)$. La excursión pico – pico durante el reencendido vale:

$$k_s = (1 + \beta)(1 + k_a) \frac{C_s}{C_s + C_L}$$

Para el caso de los reactores de Montevideo I se tiene $k_p \cong 2.75 \text{ p.u.}$ para $i_{ch} \cong 3A$

Las frecuencias de oscilación están dadas por:

Del lado del reactor, antes del reencendido:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_L}}$$

Del lado del reactor, luego del reencendido (“segunda oscilación paralela”):

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_L + C_s}{LbC_LC_s}}}$$

Para el caso de los reactores de Montevideo I se tiene $f_1 = 28.3 \text{ kHz}$ y $f_2 = 2.8 \text{ MHz}$ considerando

$$Lb = (1\mu\text{Hy}/m) = (10m) = 10\mu\text{Hy}$$

En la figura 47 se puede apreciar los distintos parámetros indicados por la norma.

4.4 Datos para el estudio, obtenidos de los ensayos de los interruptores

Los interruptores de maniobra de los reactores fueron sometidos a los ensayos de tipo de maniobra de corrientes inductivas.

Los datos obtenidos de estos ensayos que son relevantes para el estudio son los siguientes:

Corriente de corte (“chopping current”)

A partir de los datos medidos durante el ensayo (voltaje de supresión y voltaje inicial antes del “chopping”) se calculó la corriente de “chopping” durante las maniobras de ensayo, obteniéndose valores máximos del orden de 5 A.

A partir de este valor se cálculo el “número de chopping” (λ) máximo del interruptor. Se obtuvieron valores del orden de 50000.

Dado que λ es un valor característico del interruptor,

aplicando la relación $\lambda \cong \frac{i_{ch}}{\sqrt{C_L}}$ se concluyo que la corriente de “chopping” al maniobrar

el reactor en campo no iba a ser superior a 1 A, por lo que se asumió $i_{ch} = 1 \text{ A}$.

Probabilidad de reencendido

Los oscilogramas de las maniobras mostraron que el interruptor reenciende cuando intenta interrumpir la corriente inductiva con tiempos de arco menores a aproximadamente 2,5 ms. Si asumimos en forma simplificada que el tiempo de arco es una variable aleatoria con distribución uniforme, esto significa que es de esperar un reencendido cada 4 maniobras (dentro de los 10 ms de un medio ciclo se espera reencendido en 2.5 ms), si bien no necesariamente en el pico del voltaje de restablecimiento.

Durante el ensayo no se midió el voltaje previo al reencendido, por lo que no se obtuvo información confiable sobre la curva de soportabilidad dieléctrica del interruptor.

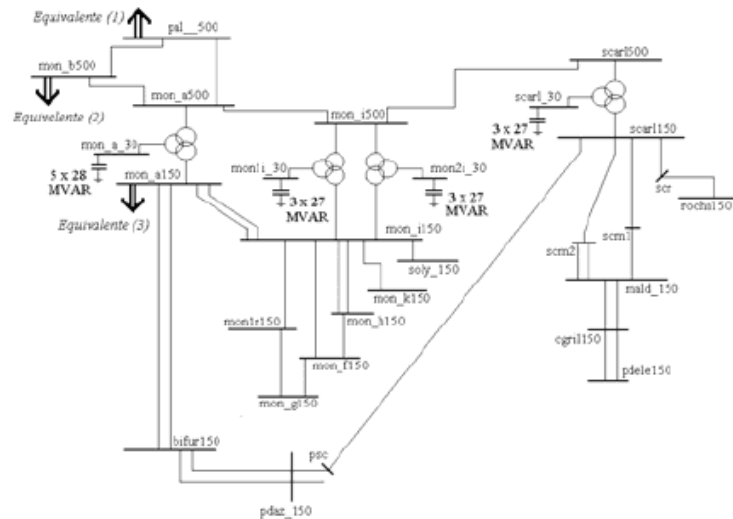
4.5 Estudios realizados

Se simuló la apertura de pequeñas corrientes inductivas a través de los nuevos reactores de la estación Montevideo I y se comparó los resultados obtenidos con los cálculos hechos teóricamente.

Modelado para el estudio

Elaboraron un circuito equivalente para la red, visto desde tres puntos Montevideo A 150 kV, Montevideo B 500 kV y Palmar 500 kV. Se mantuvo este circuito y modelado del resto de la red, salvo para el caso en que se requirió un modelo simplificado que permitiera la utilización de pasos de integración menores para relevar frecuencias más altas. La red modelada en primera instancia se muestra en la figura 48.

Figura 48. Circuito equivalente de la red



Se modeló en detalle las barras de 31.5 kV y llegadas a los reactores y condensadores de la estación Montevideo I. El esquema unifilar del modelado realizado para la estación de 31.5 kV se muestra en la figura 49.

los casos de configuración doble terna o simple terna según corresponda con las longitudes correspondientes.

Modelo del tramo de conductor que va de la barra al reactor

Los tramos de conductor que conectan a los reactores a la barra se calcularon a través de la rutina LINE CONSTANTS de ATP (modelo matricial de salida) para el cual se consideraron los siguientes datos: diámetro exterior 28.56 mm , espesor 7.2 mm, sección 483 mm², resistencia a 20°C 0.0596 Ω /km, separación entre conductores 1.6 m y altura al suelo 3.5 m. Se consideró la disposición de las tres fases, observándose que la fase B tiene mayor longitud de conductor de conexión a la barra.

Representación de los reencendidos

En los resultados presentados en este trabajo se supuso que el reencendido se produce en el peor momento, máximo voltaje en bornes del interruptor.

Valor de la “corriente de chopping”

En principio ellos utilizaron el valor obtenido en los cálculos preliminares de aproximadamente 3 A. Luego, de los ensayos realizados en fábrica se concluyó que 1 A es un valor más adecuado para el interruptor, por lo que los valores que resultaron críticos se calcularon también con este valor.

Descripción de casos y resultados

Apertura del interruptor con reencendido

Se consideró que se producía el reencendido en la primera fase que abre cuando la tensión en bornes del interruptor llega al valor máximo (segundo pico). Como al

producirse el reencendido, se preveía obtener una nueva oscilación de más alta frecuencia se optó por reducir el paso de integración a 5 ns lo cual motivó simplificar la red estudiada. Fue entonces que se dejó de lado el equivalente utilizado hasta ese momento para colocar simplemente una fuente en Mont.I500. Como se entiende que el fenómeno depende esencialmente de la red cercana la simplificación hecha no modifica los resultados.

Se consideró el caso de un solo reactor, el maniobrado, ya que la presencia de los otros reactores en servicio no influye en los resultados. Las gráficas de las figuras 51 (en que la figura 51b es una ampliación de la 51a alrededor del instante de reencendido) muestran los voltajes relevadas:

Figura 51a. Voltaje fase a tierra que abre del lado del reactor

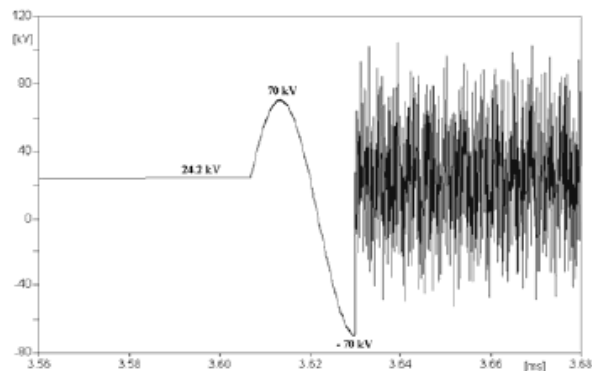
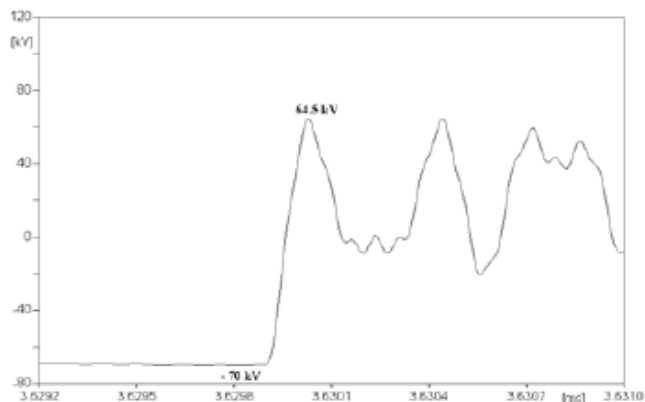


Figura 51b. voltaje fase – tierra que abre el lado del reactor.



La frecuencia de oscilación luego del reencendido resulta 2.5 MHz.

Comparación entre los resultados de las simulaciones y los calculados a partir de teóricos de norma.

La tabla VII compara los valores de los factores definidos en la norma y frecuencias, calculados, según la norma y calculados de la simulación (corresponde a un caso en que se asumió $i_{ch}=3.3$ A)

Tabla VII. Comparación de los valores de la norma con la simulación

Parámetro	Valor de la Norma	Valor de la simulación
k_a	2.59	2.69
k_p	2.89	2.67
Frecuencia previo al reencendido	28.3 kHz	32.2 kHz
Frecuencia posterior al reencendido	2.8 MHz	2.5 MHz

Pendientes producidas en la apertura del interruptor con reencendido

Se analizaron los valores de pendientes obtenidas luego del reencendido. Los valores varían desde bornes del interruptor hasta bornes del reactor. El valor sobre el reactor interesa para determinar si es soportado por éste o es necesaria la adopción de medidas para corregir este problema. También se registran las pendientes en bornes del transformador para su evaluación.

la oscilación producida después del reencendido puede ser representada por (tomando como cero el valor del pico anterior al reencendido) $V - u_w (1 - e^{-\beta t} \cos(\omega t))$ y por lo tanto sus pendientes serán

$$\frac{dV}{dt} = u_w e^{-\beta t} (\omega \text{sen}(\omega t) + \beta \cos(\omega t))$$

La expresión permite observar que el valor obtenido dependerá de tres factores: u_w , ω , β (voltaje en bornes del interruptor antes del reencendido, frecuencia y amortiguación de la oscilación respectivamente). Cabe hacer notar que el valor de u_w depende del instante de reencendido, siendo la peor situación cuando el reencendido ocurre en el segundo pico luego del “chopping” (primer pico en signo opuesto a la tensión de fuente).

En el estudio se analizó el posible efecto de la frecuencia de segunda oscilación paralela y, en particular, su consecuencia en la amortiguación del sistema. A esos efectos, se calcularon los parámetros de los tramos de conductor que une el reactor a la barra a 4.8 MHz, (cálculo teórico realizado por el contratista de obras), que es una estimación razonable de la frecuencia luego del reencendido.

Así a las simulaciones hechas anteriormente se les agregan las dos variantes:

Consideración de la inserción de los parámetros a 4.8 MHz (alta frecuencia) para tener en cuenta el cambio de frecuencia y consiguiente cambio de amortiguación en los parámetros fundamentales y analizar su incidencia en el cálculo de la pendiente. Solo se considera esta inserción en la fase donde ocurre el reencendido para no generar otros transitorios (en esta fase se aprovecha el abrir y cerrar del interruptor que reenciende para insertar los parámetros a 4.8 MHz luego del reencendido).

Considerar la corriente de chopping de 1 A, valor adoptado a partir de los ensayos.

La tabla VIII expresa los valores de pendientes obtenida para los distintos casos:

Tabla VIII. Valores de pendientes en el reencendido

Caso		Pendientes (kV/microseg)		
Con o Sin	Ich (A)	Disy.	Reactor	Trafo
Sin	3	22172	1206	4.6
Con	3	17339	1172	4.1
Sin	1	9056	728	2.8
Con	1	8224	717	3.1

Observando que las pendientes obtenidas no resultan aceptables (la máxima pendiente soportada por el reactor es de $\frac{170}{1.2} = 141.7 \text{ kV}/\mu\text{s}$ se buscó solucionar este problema mediante el agregado de capacidades en bornes del interruptor.

Solución propuesta y verificación de la misma a través de la simulación

Variación de las pendientes producidas en la apertura del interruptor con reencendido con el agregado de capacidades en bornes del reactor

Se realizaron las simulaciones correspondientes al agregado de condensadores de 1 nF y 10 nF considerando en ambos casos la inserción de los parámetros a 4.8 MHz (alta frecuencia) del tramos de conexión del reactor a la barra en la fase del reencendido y la corriente de chopping de 1 A.

La tabla IX expresa los valores de pendientes obtenida para los distintos casos:

Tabla IX. Valores de pendiente en reencendido para distancia de capacidad en bornes del interruptor

Capacidad por fase (nF)	Pendientes (kV/microseg)	
	En bornes del disyuntor previo al reencendido	Fase – tierra en el reactor
No	5.96	717
1	0.80	257
10	0.87	56

Se observa que en cada caso se determinó el instante de recierre como aquel en el que se produce el máximo voltaje sobre el interruptor lo cual maximiza la pendiente obtenida que, como se indicó, es aproximadamente proporcional a esta tensión.

5. COMPARACIÓN DE REACTORES CON NÚCLEO DE AIRE Y REACTORES CON NÚCLEO FERROMAGNÉTICO

La preferencia de uno sobre el otro se debe a la experiencia, familiaridad, o por una buena razón técnica. Este documento debería ayudar en presentar las diferencias y beneficios principales que existen entre estos dos tipos de reactores.

5.1 Comparación técnica.

Normalmente aparece la pregunta de qué reactor es superior para las aplicaciones de sistemas de potencia. La tabla X debería ayudar con esta pregunta. La tabla muestra que hay beneficios y retrocesos para ambos tipos de reactores. Los principales problemas con respecto a los reactores están limitados a los campos magnéticos dispersos, saturación, clasificación de corriente armónica y requerimientos de espacio.

Campos Magnéticos Dispersos

Los reactores de núcleo de aire tienen altos campos magnéticos dispersos más que los de núcleo de hierro. Estos campos pueden interferir con otros equipos de sistema de energía, producir corrientes inducidas (las cuales causan recalentamiento) en estructuras de acero cercanas, y presentan un problema a la salud de las personas con marcapasos y otros mecanismos médicos.

Saturación

La saturación es un problema inherente en los reactores de núcleo de hierro. La cantidad de flujo, o densidad del flujo, que el reactor de núcleo de hierro puede transportar es limitada y es dependiente de su área transversal. Entre más alta sea el área transversal, más alta será la cantidad de flujo que puede transportar. La densidad del flujo está directamente relacionada con la corriente máxima que el reactor transportará, la cual puede ser tan alta como la corriente máxima fundamental además de la suma de las corrientes armónicas máximas individuales. Esto es raramente el caso, pero llevaría a un diseño del reactor muy conservador. Entre menos diseños conservadores asuma un factor de simultaneidad, el cual define la corriente máxima como un porcentaje de la suma de la corriente armónica máxima además de la corriente máxima fundamental. La idea que se quiere hacer aquí, es que se puede eliminar la preocupación de la saturación en los reactores de núcleo de hierro por un diseño apropiado del reactor. Al especificar los reactores de núcleo de hierro, se debería tomar nota de los siguientes puntos:

- El reactor de núcleo de hierro se debería diseñar para que no se sature cuando el flujo armónico y el flujo fundamental sean totalmente aditivos (factor de simultaneidad de 1,0).
- La saturación se debería definir en el punto donde hay un 10% de pérdida de inductancia.
- El espectro de la corriente armónica debería justificar la regulación de voltaje, las tolerancias en la fabricación en los reactores y en los condensadores y un crecimiento de la carga armónica.

Si se especifican los puntos anteriores, la saturación no debería ser una preocupación para los reactores de núcleo de hierro.

Clasificación de corriente armónica (RMS)

La clasificación de corriente armónica es el vector de la suma de las corrientes armónicas y es una preocupación en los reactores de núcleo de hierro y aire. La clasificación de la corriente determina el área transversal del conductor de arrollamiento y debería estar especificado cuando se ordena el reactor. Las corriente debería justificar el crecimiento de carga armónica presente y futura, además de las corrientes armónicas y fundamentales aumentadas debido a la regulación de tensión y tolerancias de fabricación en los reactores. Cuando se especifique el reactor, el espectro de la corriente se debería especificar ya que los armónicos de alto orden tienen una disminución de los efectos de recalentamiento.

Requerimientos de espacio

Los requerimientos de espacio son normalmente una preocupación asociada con los reactores de núcleo de aire debido al campo magnético disperso. Estos campos se pueden reducir blindándolos, pero esto puede añadir costos al resultado neto. También por aumentar el espacio entre reactores el costo del terreno aumenta.

5.2 Evaluación económica.

Como se mencionó anteriormente, los reactores de núcleo de aire modernos, tienen inherentemente factores de calidad (Factor Q o “Q Factor” en inglés) altos y por lo tanto bajas pérdidas y como se mencionó en el primer capítulo en general, a mayor tamaño de reactor, es decir mayores KVAR las pérdidas disminuyen, por lo que se puede considerar lo siguiente:

Reactores mayores a 10 MVAR = Factores Q de 200 a 500

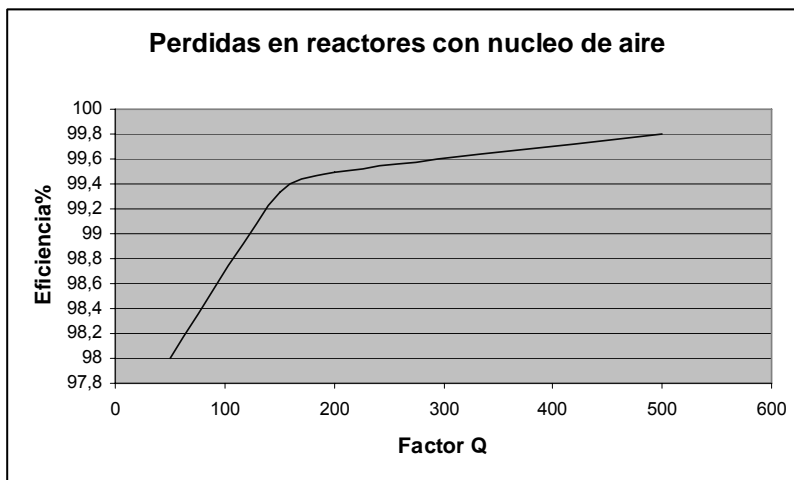
Reactores menores a 10 MVAR = Factores Q de 50 (valores bajos de MVAR) A 150 (Valores altos de MVAR).

La siguiente tabla ilustra las eficiencias típicas de operación para reactores de núcleo de aire.

Tabla X. Eficiencias típicas para reactores de núcleo de aire

Factor Q	0 KVA (%)	KVAR (%)	Pérdidas (%)	Eficiencia (%)
50	100	99.98	2.0	98
150	100	99.998	0.67	99.33
200	100	99.9987	0.5	99.5
500	100	99.9998	0.2	99.8

Figura 52. Gráfico que muestra las pérdidas en los reactores con núcleo de aire versus el factor de calidad.



De la tabla anterior se puede concluir rápidamente que usar los reactores de núcleo de aire es sumamente eficiente. Esto es aún más cierto en sistema de potencia, donde el

tamaño es mayor y por ende el factor Q. Las alternativas como usar transformadores de potencia de mayor impedancia crean mayores pérdidas, tienen un costo más alto y no son tan eficientes.

Adicionalmente a tener pérdidas despreciables, si se involucra al fabricante se pueden minimizar el costo total de adquisición usando el diseño más eficiente. Aquí tenemos la siguiente fórmula:

$$CT = C (\$) + P (KW) * TEP (\$/kw) \quad (5-1)$$

Donde:

CT = Costo total

C= Costo del reactor

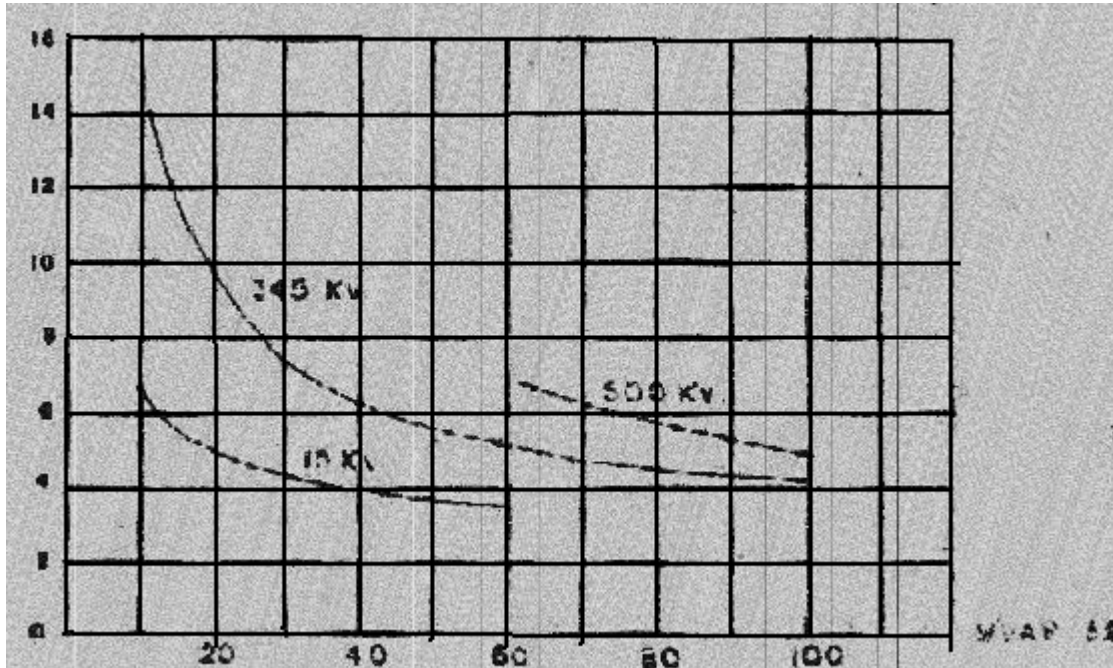
P = Pérdidas del reactor a la corriente de placa

TEP= Tasa de evaluación de pérdidas = Factor de utilización X costo de pérdidas

Comercialmente se pueden conseguir reactores de alto voltaje con grandes regimenes o capacidades. En cambio los reactores conectables al terciario están limitados por la capacidad del mismo. El terciario de un transformador normalmente tiene el 35% de la capacidad nominal. Una capacidad mayor del terciario implica un incremento en los costos del transformador.

Las siguientes gráfica representá los costos estimados de instalación de reactores inmersos en aceite de alto voltaje y de 15Kv. Con los reactores de alto voltaje se incluyen los interruptores de aire y con los reactores de 15 Kv. Se incluyen los costos de los disyuntores. La figura muestra que para reactores de mayor tamaño, el costo por KVA decrece y que los reactores de 15 KV. Tienen un costo mas bajo por KVA. Se entiende que la figura es solamente una relación comparativa de costo.

Figura 53. Costo relativo de reactores de 15Kv, 34.5 Kv como función de capacidad



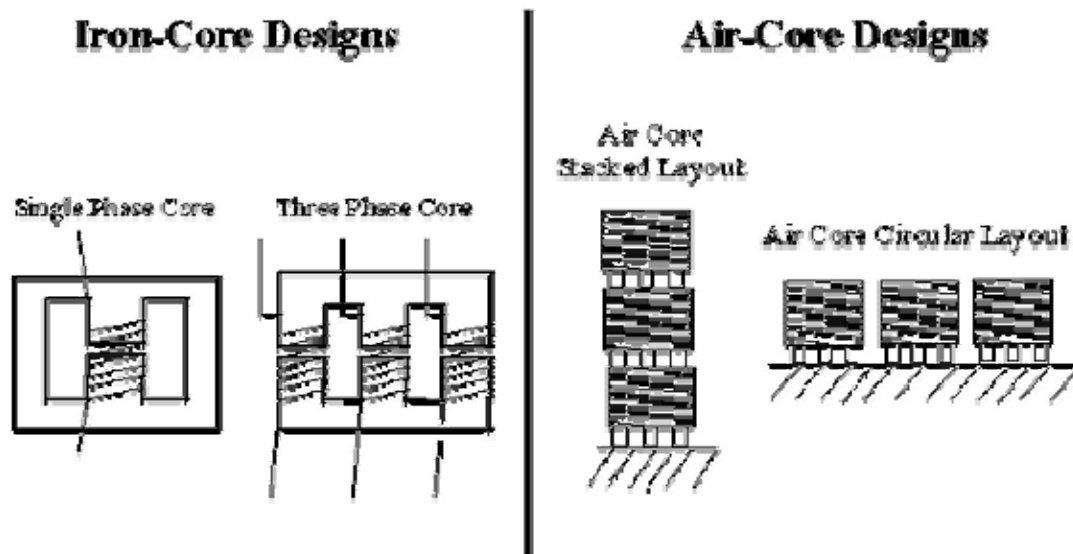
En esta parte nosotros podemos observar que los reactores de núcleo de aire tienen menores pérdidas debido a su factor de calidad alto, además los reactores de núcleo de aire al ser de mayor capacidad de potencia tienen un menor costo por KVA debido a que las pérdidas se reducen.

5.3 Comparación física.

La figura 54 muestra las características físicas de los reactores de núcleo de hierro y de núcleo de aire utilizados en los sistemas de potencia. Los reactores de núcleo de hierro normalmente consisten de arrollamiento de cobre alrededor de un núcleo de hierro que tiene un entrehierro. El número de vueltas de arrollamiento, área del entrehierro, y longitud del mismo, determina la inductancia de los reactores. Debido a la alta permeabilidad del hierro, el campo magnético está confinado al núcleo, y la inductancia del reactor se logra con un bajo número de vueltas. El núcleo de hierro puede ser puesto

en una potencia de línea o a tierra. En un potencial de línea, el núcleo estaría apoyado en aisladores de apoyo y la gradiente de tensión entre el núcleo y el arrollamiento sería mínima. Cuando el núcleo de hierro está en un potencial a tierra, el asilamiento del arrollamiento al núcleo debe ser clasificado para un potencial de línea.

Figura 54. Típicos diseños de reactor de núcleo de aire y hierro



El reactor de núcleo de aire consiste de un arrollamiento de cobre o aluminio enrollado alrededor y apoyado por una estructura de aluminio, concreto o fibra de vidrio. La estructura está flotando en un potencial de línea con interruptores de apoyo para minimizar los requerimientos de aislamiento y costo. La inductancia de los reactores de núcleo de aire es principalmente determinada por el número de vueltas, altura y diámetro del reactor. Es normalmente grande y consiste de muchas vueltas en comparación con un reactor de núcleo de hierro con una inductancia igual.

Ya que no hay hierro, el campo magnético disperso es alto y se debería justificar en las etapas tempranas de un diseño de reactor. El tipo de reactor utilizado normalmente determina el diseño de la instalación. La figura 55 muestra cómo el tipo de reactor cambia las características físicas y diseño de instalación. Los reactores de núcleo de aire

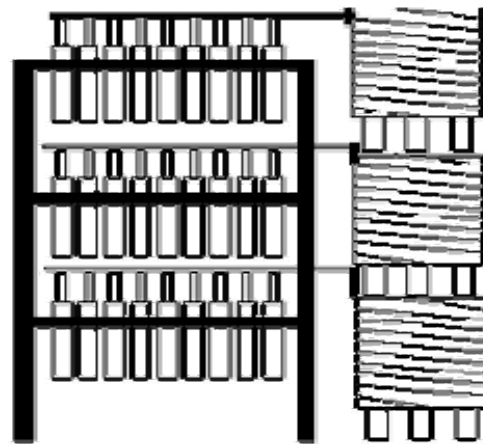
son habitualmente asociados con los bancos de montaje en bastidor y son instaladas en subestaciones. Los reactores de núcleo de hierro están ubicados dentro de los gabinetes que pueden estar clasificados para locaciones internas o externas.

Figura 55. Características de diseño físico

Iron-Core Filter Design



Air-Core Filter Design



En conclusión las diferencias, ventajas y desventajas entre unos y otros se pueden resumir en la siguiente tabla

Tabla XI Comparación de los reactores con núcleo de hierro y núcleo de aire

Comparación de los reactores con núcleo de hierro y aire	
Núcleo de Hierro	Núcleo de Aire
-Puede Saturar	- No se satura
-Bajo campo magnético disperso	- Campo magnético disperso alto
-Requerimientos de espacio bajos y compactos	- Requerimientos de espacio grande
-El núcleo debe ser diseñado para una corriente armónica máxima (suma de las corrientes armónicas individuales) y el arrollamiento debe ser diseñado por la corriente RMS.	- Arrollamiento debe ser diseñado por la corriente RMS.
- Mayor peso	- Menor peso
- Más probable que suelte ruido audible si no está correctamente fabricado.	- Poco probable que suelte ruido audible si no está correctamente fabricado.
- Comparación del vendedor es más difícil	- Comparación del vendedor es más fácil
-Bajo número de vueltas en el arrollamiento	- Alto número de vueltas en el arrollamiento
- Fácil de cerrar	- Difícil de cerrar (debido al recalentamiento de la corriente reducida de los campos magnéticos dispersos).
Menor eficiencia	Mayor eficiencia
Menor costo inicial	Mayor costo inicial

6. CÁLCULO DE DISTANCIAS MAGNÉTICAS PARA REACTORES DE NÚCLEO DE AIRE CON BASE A CAMPOS Y FLUJOS MAGNÉTICOS DISPERSOS

Flujos magnéticos de dispersión

Los reactores monofásicos y trifásicos con núcleo de aire no importando si son usados para limitar corrientes o para conectar a neutro, compensar potencia reactiva, operan a altas densidades de flujo magnético en todo tiempo. Este campo magnético puede causar corrientes circulantes y pérdidas de histeréisis en cualquier material magnético que este dentro del campo de dispersión. Esto implica una precaución especial en unidades monofasica como trifásicas con respecto a los miembros estructurales de su base y también El campo magnético de reactor puede llegar a veces a valores peligrosos para el ser humano. Por lo tanto es importante saber la distribución del campo magnético y sus valores extremos.

Las distancias magnéticas en los reactores se calcula por modelamiento a través de formulas que calculan el campo magnético desde los parámetros básicos que son la corriente, el numero de vueltas , radio interno, radio externo, capas de vueltas, diámetro del conductor, alto del reactor en función de las distancias en el eje X e Y.

A continuación presentamos una serie de formulas y modelos matemáticos que son de utilidad para poder realizar el calculo del campo magnético en función de la distancia en

el eje x e y tomemos en cuenta que en un reactor de núcleo de aire se comporta como un solenoide.

Para los campos magnéticos hay valores normalizados tanto para la interacción de trabajadores y público Este campo magnético puede causar corrientes circulantes y pérdidas de histeresis en cualquier material magnético que este dentro del campo de dispersión y también puede causar corrientes circulantes en órganos del cuerpo humano.

Las fórmulas descritas a continuación son aproximaciones polinomiales logarítmicas y senoidales de diferente tipo para calcular el campo magnético disperso en función de las distancias.

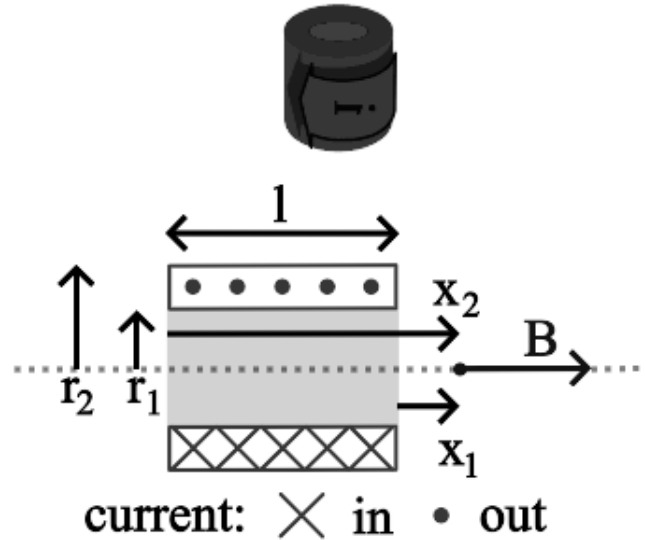
El campo magnético, al estar asociado a una corriente cambiante, varía tanto en el espacio como en el tiempo; es usualmente expresado en unidades de micro tesla (μT) o de mili gauss (mG).

6.1 Fórmulas básicas para el estudio y cálculo del comportamiento del campo magnético, alrededor de reactores de núcleo de aire en función de la distancia

Campos magnético axial de un reactor de núcleo de aire finito en función de la distancia en eje X e Y.

Esta fórmula es usada para el campo atribuible a un reactor de núcleo de aire, integrado sobre una extensión de radios para obtener el campo magnético en cualquier punto sobre el eje de un reactor.

Figura 56. Reactor vista en sección transversal



Caso general

$$B = \frac{\mu_0 i n}{2(r_2 - r_1)} \left[x_2 \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + x_2^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_2^2} + r_1} - x_1 \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + x_1^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2} + r_1} \right] \quad (6-1)$$

B es el campo magnético, en teslas, en cualquier punto sobre el eje del solenoide. La dirección del campo es paralela al eje de solenoide.

μ_0 es la constante de permeabilidad (de 1.26×10^{-6} que Tm / A, Tcm / A de de 1.26×10^{-4} o 4.95×10^{-5} estaño / A, para solenoides medidos en los metros, los centímetros y pulgadas, respectivamente)

I es la corriente en el cable, en amperios.

N es el número de las vueltas en el reactor

r1 es el radio de interior del reactor

r2 es el radio exterior del reactor

x1 y x2 son las distancias, sobre el eje, de los finales del solenoide al punto de medición de campo magnético.

Note que las unidades del largo podrían ser dados en metros, centímetros o pulgadas), mientras el valor correcto de la constante de permeabilidad es usado.

Cuando G es el factor geométrico de unidades

$$G = \sqrt{\frac{1}{8\pi\beta(\alpha^2 - 1)}} \left[(\gamma + \beta) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (\gamma + \beta)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\gamma + \beta)^2}} - (\gamma - \beta) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (\gamma - \beta)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\gamma - \beta)^2}} \right] \quad (6-2)$$

donde $\alpha = \frac{r_2}{r_1}$, $\beta = \frac{l}{2r_1}$ y $\gamma = \frac{x_1 + x_2}{2r_1}$ (6-3)

$$B = \mu_o \sqrt{\frac{P\lambda}{r_1\rho}} G \quad (6-4)$$

P es la energía total consumida por el reactor, en vatios.

λ es igual a (la dirección de área de sección transversal total) / (el área de sección transversal de reactor total), que se extiende 0.6 a 0.8 en reactores típicos.

ρ es el resistividad del conductor, en unidades de los ohmios – el largo Las unidades de longitud deben combinar con éstos de r1.

Casos especiales

El punto de medición de campo *magnético está en el centro*

$$B = \frac{\mu_o i N}{2(r_2 - r_1)} \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + (l/2)^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + (l/2)^2} + r_1} \quad (6-5)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 j l}{2} \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + (l/2)^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + (l/2)^2} + r_1}$$

J es la densidad en curso en la sección transversal de reactor, en los amperios / (el área de unidad).

l es la longitud del reactor.

N es el número total de los vueltas de cable en el reactor

Y el G de factor de geometría de unidades es de manera sencilla.

$$G = \sqrt{\frac{\beta}{2\pi(\alpha^2 - 1)}} \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \quad (6-6)$$

Notar que G es el máximo cuándo $\alpha \approx 3$ y $\beta \approx 3$. Un reactor se desarrolló con un diámetro interior en particular y el poder de contribución repartirá la fuerza de campo principal más alta cuando estas condiciones sean cubiertas.

Ley de biot savart

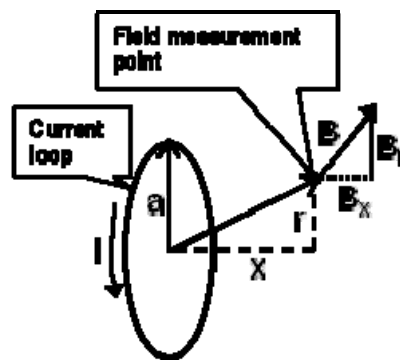
Esta ley pequeña útil es el fundamento sobre el que la mayoría de las fórmulas de reactor de núcleo de aire en esta tesis están basadas para el cálculo de densidad de campo magnético:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \sin \theta}{r^2} \quad (6-7)$$

Campo magnético de eje - debido a un ciclo cerrado de corriente

Esta fórmula simple puede ser obtenida usando la ley de Biot Savart, integrado sobre un lazo de corriente circular de obtener el campo magnético en cualquier punto en espacio compare esto con la fórmula mucho más simple para calcular el campo sobre eje de – campo magnético debido a un ciclo en curso en este caso el ciclo de corriente es la circunferencia del reactor de núcleo de aire.

Figura 57. Ciclo cerrado de corriente generado por un reactor ce núcleo de aire



Bm es el campo magnético, en teslas, en cualquier momento en el espacio que no está en el ciclo en curso de corriente. Es igual a la suma de dos componentes de campo,

$$B_x = B_o \frac{1}{\pi\sqrt{Q}} \left[E(\theta) \frac{1-\alpha^2-\beta^2}{Q-4\alpha} + K(\theta) \right]$$

$$B_y = B_o \frac{\gamma}{\pi\sqrt{Q}} \left[E(\theta) \frac{1+\alpha^2+\beta^2}{Q-4\alpha} - K(\theta) \right]$$

$$B_m = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$

(6-8) (6-9) (6.10)

Bx que el componente de campo magnético que lo es alineó con el eje de embobinado y By el componente de campo magnético que está en una dirección radial.

I es la corriente en el cable, en amperios.

a es el radio del ciclo de corriente, en metros.

X es la distancia, sobre el eje, del centro del bucle de corriente al punto de medición de campo, en metros.

R es la distancia de radial del eje del bucle de corriente al punto de medición de campo, en metros

$$B_x = B_0 \frac{1}{\pi \sqrt{Q}} \left[E(k) \frac{1 - \alpha^2 - \beta^2}{Q - 4\alpha} + K(k) \right]$$

$$B_r = B_0 \frac{\gamma}{\pi \sqrt{Q}} \left[E(k) \frac{1 + \alpha^2 + \beta^2}{Q - 4\alpha} - K(k) \right]$$

cuando

$$\alpha = \frac{r}{a}, \tag{6.11}$$

$$\beta = \frac{x}{a}, \tag{6.12}$$

$$\gamma = \frac{x}{r}, \tag{6.13}$$

$$Q = \left[(1 + \alpha)^2 + \beta^2 \right] \tag{6.14}$$

$$k = \sqrt{\frac{4\alpha}{Q}} \tag{6.15}$$

$K(\vartheta)$ y $E(\vartheta)$ es la integral completa elíptica de la primer y segundo tipo respectivamente, y esta obtenida por una serie de expansión.

$K(k)$ es la función esencial elíptica completa, de la primera clase.

$E(k)$ es la función esencial elíptica completa, de la segunda clase.

Nota que el argumento para k y E es mostrado aquí como el "K" de módulos. Los otros argumentos legítimos son el "M" de parámetro (donde $m = k^2$) y el α de ángulo modular (donde $\alpha = \arcsen(K)$). Sustituya el argumento que es apropiado para la herramienta matemática que usted está usando.

B_o El campo magnético está en el centro del embobinado, en teslas, y $(i\mu_o / 2a)$

μ_o es la constante de permeabilidad (1.26×10^{-6} H / m o 4×10^{-7}).

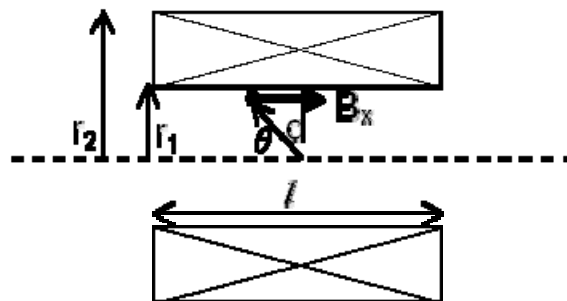
Es siempre, las unidades de la dimensión lineal (a) y campo magnético (B) son regulables usando un valor apropiado por la constante de permeabilidad.

Campo magnético axial de un reactor de núcleo de aire finito

El campo magnético desde la región central a un punto de fuera de un reactor con núcleo de aire

El campo magnético desde la región central a un punto del fuera de un reactor con núcleo de aire puede ser aproximado como un polinomio simple que involucra los polinomios de Legendre. Montgomery y Terrell dicen "afuera a menos de unos pocos por ciento de el radio interior del reactor, el campo puede ser encontrado con exactitud con solamente algunos.... términos."

Figura 58. Reactor vista en sección transversal



Este polinomio puede ser escrito como:

$$\mathbf{B}_x = \mathbf{B}_0 \left(1 + \varepsilon_2 \left(\frac{d}{r_1} \right)^2 \rho_2(u) + \varepsilon_4 \left(\frac{d}{r_1} \right)^4 \rho_4(u) + \dots \right) \quad (6.16)$$

Bo es campo del reactor en el centro

Y los primeros cuatro coeficientes de error con números

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \frac{1}{2\beta^2 c_5} (c_1^{3/2} - c_3^{3/2}) \\ \varepsilon_4 &= \frac{1}{12\beta^4 c_5} \left(c_1^{3/2} \left(1 + \frac{3}{2}c_2 + \frac{15}{2}c_2^2 \right) - c_3^{3/2} \left(1 + \frac{3}{2}c_4 + \frac{15}{2}c_4^2 \right) \right) \\ \varepsilon_6 &= \frac{1}{30\beta^6 c_5} \left(c_1^{3/2} \left(1 + \frac{3}{2}c_2 + \frac{15}{8}c_2^2 - \frac{35}{4}c_2^3 + \frac{315}{8}c_2^4 \right) - c_3^{3/2} \left(1 + \frac{3}{2}c_4 + \frac{15}{8}c_4^2 - \frac{35}{4}c_4^3 + \frac{315}{8}c_4^4 \right) \right) \\ \varepsilon_8 &= \frac{1}{56\beta^8 c_5} \left(c_1^{3/2} \left(1 + \frac{3}{2}c_2 + \frac{15}{8}c_2^2 + \frac{35}{16}c_2^3 + \frac{315}{16}c_2^4 - \frac{2079}{16}c_2^5 + \frac{3003}{16}c_2^6 \right) - c_3^{3/2} \left(1 + \frac{3}{2}c_4 + \frac{15}{8}c_4^2 + \frac{35}{16}c_4^3 + \frac{315}{16}c_4^4 - \frac{2079}{16}c_4^5 + \frac{3003}{16}c_4^6 \right) \right) \end{aligned} \quad (6.17)$$

Cuando

$$c_1 = \frac{1}{1 + \beta^2}, \quad c_2 = \frac{\beta^2}{1 + \beta^2}, \quad c_3 = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2}, \quad c_4 = \frac{\beta^2}{\alpha^2 + \beta^2}, \quad c_5 = \ln \left(\frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}}{1 + (1 + \beta^2)^{1/2}} \right) \quad (6.18)$$

$$\alpha = \frac{r_2}{r_1}, \quad \beta = \frac{l}{2r_1}$$

r_1 , r_2 , y l son radios de reactor interiores, y exteriores, y largo de reactor, respectivamente

d es la distancia del centro de reactor para el punto de medición de campo,

ϑ es el ángulo entre el vector de puesto de punto de medición y el eje de reactor,

Y los polinomios de Legendre correspondientes, ρ_n son:

$$\rho_2(u) = \frac{1}{2}(3u^2 - 1)$$

$$\rho_4(u) = \frac{1}{8}(35u^4 - 30u^2 + 3)$$

$$\rho_6(u) = \frac{1}{16}(231u^6 - 315u^4 + 105u^2 - 5)$$

$$\rho_8(u) = \frac{1}{128}(6435u^8 - 12012u^6 + 6930u^4 - 1260u^2 + 35) \quad (6.19)$$

Cuando

$$u = \cos \theta \quad (6.20)$$

De acuerdo con esta referencia, hay una serie correspondiente para obtener el componente radial del campo magnético en la región central de un reactor

$$\mathbf{B}_R = \mathbf{B}_0 \left(0 + \varepsilon_2 \left(\frac{d}{r_1} \right)^2 \rho_2'(u) + \varepsilon_4 \left(\frac{d}{r_1} \right)^4 \rho_4'(u) + \dots \right) \quad (6.21)$$

Donde ρ^n es derivados del plano Legendre de los polinomios,:

$$\rho_2'(u) = \frac{1}{2} (6u)u' \quad (6.22)$$

Dónde $u' = \sin \theta$ (6.23)

La ecuación usada para la graficación teórica del campo magnético en función de la distancia en el eje Y del reactor

Para el campo magnético de un reactor en función de la distancia desde el centro del mismo al eje paralelo del reactor. Se utiliza esta ecuación modelo que genera una gráfica de este tipo.

Figura 59. Gráfica del modelo de campo magnético en el eje paralelo del reactor

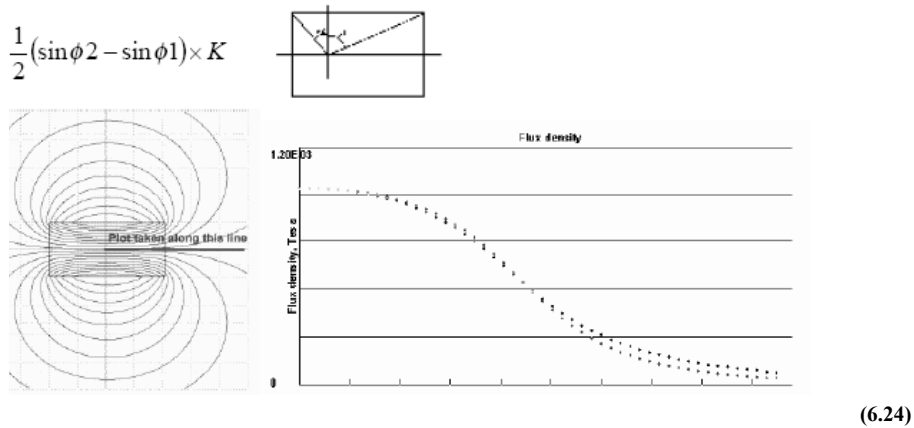
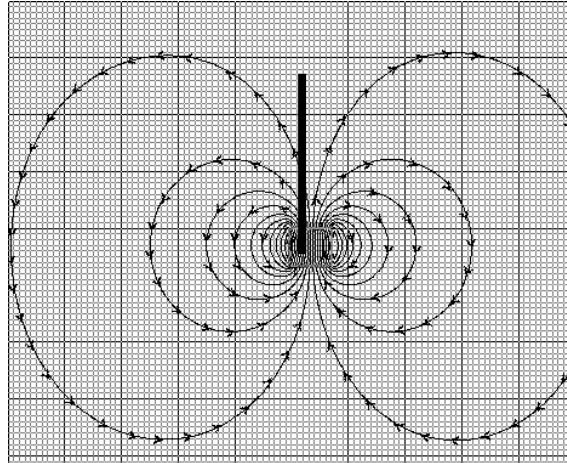


Figura 60. Distribución de líneas de campo magnético en reactor con núcleo de aire



La ecuación usada para la graficación teórica de el campo magnético en función de la distancia en el eje X del reactor

Difusión del campo magnético

El campo magnético en bajo vuelo y difuso muy rápidamente; a decir verdad la fuerza magnética es completamente un fenómeno de alcance breve. He aquí el cambio continuo de caída de densidad saliendo de un reactor de núcleo de aire en función de la distancia sobre el eje perpendicular de un reactor

$$B = \frac{\mu_0 i n}{2(r_2 - r_1)} \left[x_2 \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + x_2^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_2^2} + r_1} - x_1 \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + x_1^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2} + r_1} \right]$$

$$B = B_0 e^{-KX}$$

$$B = \mu_0 \sqrt{\frac{P\lambda}{r_1 \rho}} G$$

Figura 61. Gráfica modelo de campo magnético en eje perpendicular del reactor

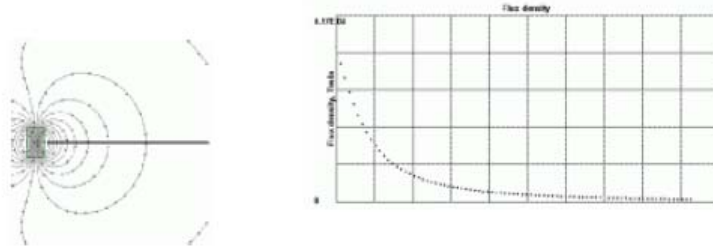
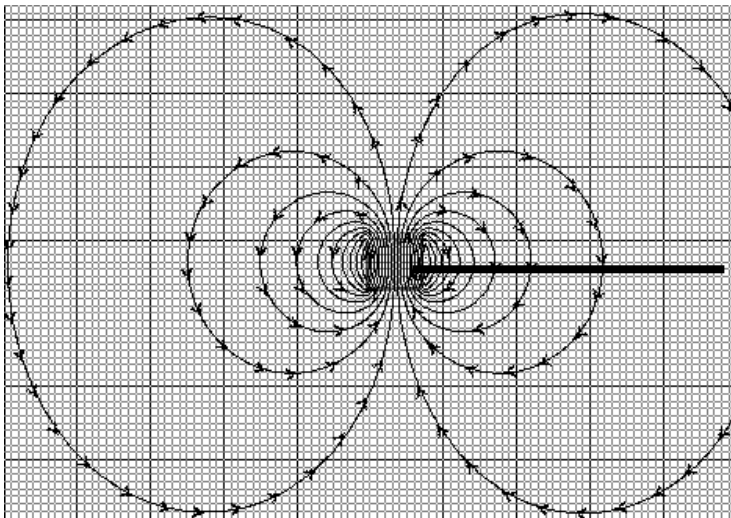
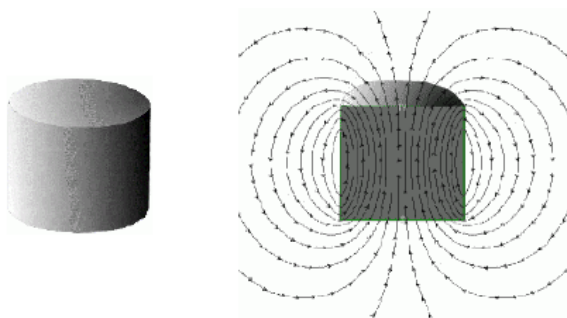


Figura 62. Distribución de líneas de campo magnético en reactor de núcleo con aire



El modelado de 2d se representa

Figura 63. Modelo de 2D para la distribución de campo magnético



$$\begin{aligned}
B_x &= B_o \frac{1}{\pi\sqrt{Q}} \left[E(\theta) \frac{1-\alpha^2-\beta^2}{Q-4\alpha} + K(\theta) \right] \\
B_y &= B_o \frac{\gamma}{\pi\sqrt{Q}} \left[E(\theta) \frac{1+\alpha^2+\beta^2}{Q-4\alpha} - K(\theta) \right] \\
B_m &= \sqrt{B_x^2 + B_y^2}
\end{aligned}$$

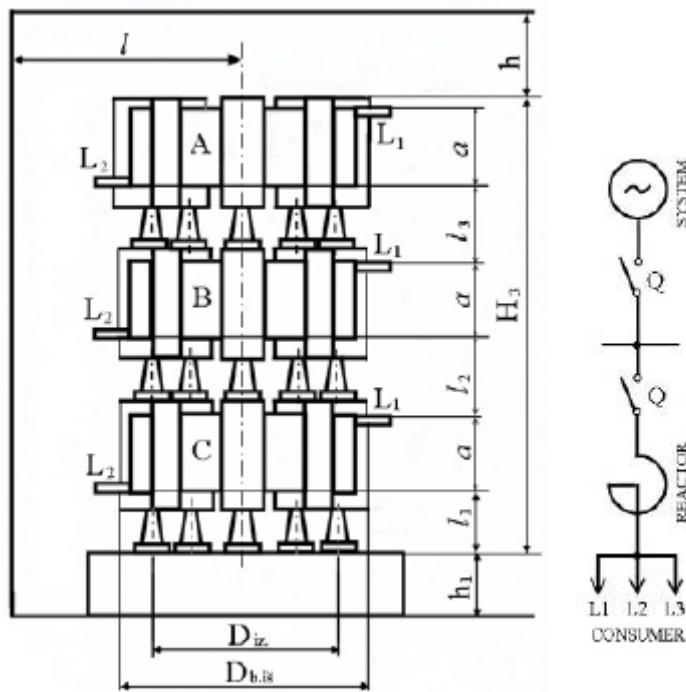
$$\alpha = Abs \left| \frac{y}{r} \right|, \quad \beta = \frac{x}{r}, \quad \gamma = \frac{x}{y}, \quad Q = Abs \left| (1+\alpha)^2 + \beta^2 \right|, \quad \theta = \text{Sin}^{-1} \sqrt{\frac{4\alpha}{Q}}$$

$K(\theta)$ y $E(\theta)$ es la integral completa elíptica de la primer y segundo tipo respectivamente, y esta obtenida por una serie de expansión.

La descripción detallada del reactor con núcleo de aire (modelo de 3d)

Los embobinados de reactor son fabricados por separado para cada fase. Los tres embobinados de fase están distribuidos uno sobre otro (como se muestra en figura. 64, a). Los embobinados son separados por soportes aislantes de esta manera, esa inductancia mutua entre devanados podía ser significativamente menos entonces que (luego) la inductancia de espiral

Figura 64. La distribución de los embobinados de fase de reactor



Proceso electromagnético interno del reactor

Supongamos que el reactor tiene solamente una vuelta. El voltaje instantáneo u y la potencia p pueden ser expresados:

$$u = ir + \frac{d\Psi}{dt}; p = i^2 r + i \frac{d\Psi}{dt} \quad (6-25)$$

En estas expresiones las señales corresponden al aumento de corriente y cambio magnético continuo conectado, cuando el voltaje es positivo.

La energía de campo magnético de reactor W_M es:

$$W_M = W_{M0} + \int_{t_{pr}}^t (p - i^2 r) dt = \int_0^{\Psi} i d\Psi = i\Psi = iN\Phi \quad (6-26)$$

Donde W_{M0} es la energía de campo magnético inicial.

Valuando las ecuaciones:

$$H = \frac{I \cdot N}{h}; B = \mu_o H; \Phi = BS_{\Phi} \quad (6-27)$$

Podemos expresar el valor de energía media valuada \bar{W}_M en un período de corriente alternante de esta manera

$$\bar{W}_M = \frac{I \cdot N \cdot \Phi}{2} = \frac{(I \cdot N)^2 \mu_a S_{\Phi}}{2h} \quad (6-28)$$

Donde h = altura de vuelta S_{Φ} =el área de espacio dentro de los devanados H intensidad de campo magnético y B de densidad de flujo magnético tienen solamente componentes axiales.

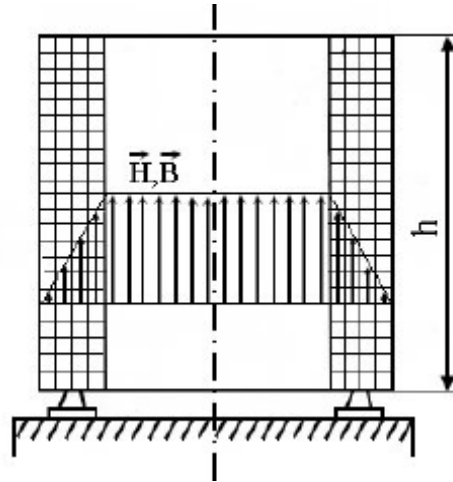
Cuando el reactor tiene espiras redondas, podemos valorar las pérdidas por calor de la siguiente manera W_h :

$$W_h = i^2 r = i^2 \rho \frac{l_{ap} N}{S_{ap}} = \rho \frac{(iN)^2}{V_{ap}} l_{ap}^2 = \frac{8\pi}{\mu_0} \rho \frac{(h + R_o)}{V_{ap}} W_M \quad (6-29)$$

ρ = densidad de carga

donde R_o radio interior de devanados.

Figura 65. Campo magnético interior de espiral de reactor



la potencia reactiva puede ser expresado por la energía de campo magnético:

$$Q = \omega W_M = 2\pi f W_M \quad (6-30)$$

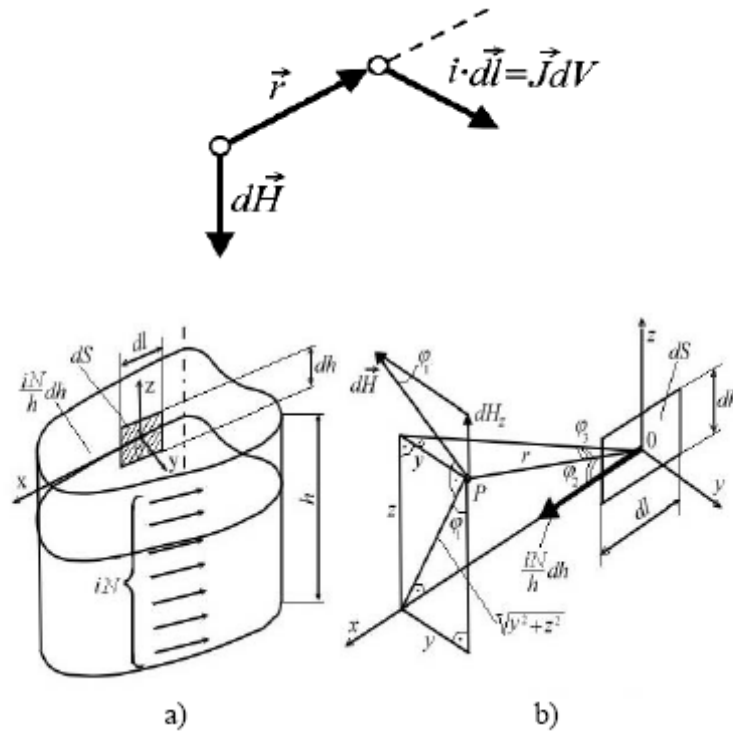
Campo magnético fuera del reactor

La intensidad de campo magnético en cualquier punto de espacio puede ser calculado usando la ley de Biot - Savart - de Laplace (Ver figura 65):

$$H = \oint_{l_1} dH_i; \quad dH = \frac{[r \times dl] \cdot i}{4\pi r^3} = \frac{i \cdot dl}{4\pi r^2} \sin \angle r, dl; \quad (6-31)$$

Donde dl es el elemento de longitud de la corriente, r - radio- vector de punto, en el que el campo es calculado. La integración debe ser hecha para todos los elementos del embobinado de reactor. Permitiendo tener un solenoide con devanados libres en forma plana figura. 66a.

Figura. 66. El solenoide (a) y el campo magnético del área elemental (b)



Si una fuerza de magnetomotriz iN presente es distribuida uniformemente por el eje del solenoide, expresamos la componente axial de la fuerza de campo magnético junto al ángulo sólido (como se muestra en figura 66b). El centro del sistema coordenadas cartesianas está en el centro del área elemental dS el área de dS es situada en el plano de xz ; la corriente I es dirigida a lo largo del eje x , el dl de equipo es dirigido a lo largo del eje x , y el dh de equipo - a lo largo del eje z , el eje del devanado es paralelo al eje z .

Supongamos que las coordenadas de medida del punto P en las que una componente axial de intensidad de campo magnético dH_z están siendo calculada en x, y y z , la distancia hacia el punto P hasta el sistema de coordenadas de origen es $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ y para eje x es: $\sqrt{y^2 + z^2}$ evaluando la estructura geométrica y usando la ley de biot-savart de laplace; nosotros obtenemos.

$$\left\{ \begin{array}{l} dH_z = dH \text{sen} \varphi_1; \quad dH = \frac{1}{4\pi} \frac{i \cdot N}{h} dhdl \text{sen} \varphi_2; \quad dS = dhdl; \\ \text{sen} \varphi_1 = \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \quad \text{sen} \varphi_2 = \frac{\sqrt{y^2 + z^2}}{r}; \\ d\Omega = \frac{dS}{r^2} \text{sen} \varphi_3 = \frac{dhdl}{r^2} \frac{y}{r} \end{array} \right. \quad (6-32)$$

Por lo tanto

$$dH_z = \frac{1}{4\pi} \frac{iN}{h} \frac{dhdl}{r^2} \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}} \frac{\sqrt{y^2 + z^2}}{r} = \frac{iN}{h} \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (6-33)$$

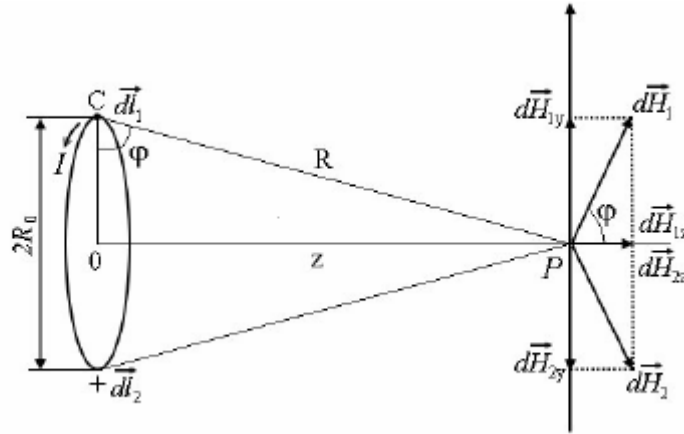
Donde el $d\Omega$ es el ángulo sólido, sustentado por las áreas de dS hacia el punto P.

El campo magnético de todos los embobinados era proporcional a la suma de ángulos sólidos elementales, sustentados por áreas elementales de dS en el punto P:

$$H_z = \frac{iN}{h} \frac{1}{4\pi} \int_S d\Omega, \int_S d\Omega = \frac{S}{r^2} \text{sen} \varphi_3 = \frac{hl}{r^2} \frac{y}{r} \quad (6-34)$$

La intensidad de campo magnético sobre el eje creado por cualquier embobinado de reactor puede ser calculado como campo de una enorme vuelta con corriente I (fig. 6.12) situado en medio del plano de embobinado. En la figura 67 dl_1 y dl_2 son los elementos de embobinado. Son perpendiculares al plano de la figura; dl_1 es dirigido hacia nosotros, y $-dl_2$ desde nosotros, dH_1 es la fuerza de campo magnético creada en el punto P por elemento de corriente $I dl_1$; dH_2 la intensidad de campo magnético creado en el punto P por el elemento de corriente $I dl_2$. El valor total de las componentes radiales H_r es igual al cero. En algún punto del eje de campo magnético es dirigido a lo largo del eje: $dH = e_z dH_x = e_z dH \cos \varphi$.

Figura. 67. Intensidad de campo magnético sobre el eje del embobinado



Biot - Savar - ley de Laplace

$$dH = \frac{INdl \sin \alpha}{4\pi R^2} = \frac{INdl}{4\pi R^2} \quad (6-35)$$

Donde α es ángulo entre dl_1 y R (desde $dl_1 \perp R, \sin \alpha = 1$); I - la corriente de reactor, N – número de vueltas del embobinado.

$$H = \int_0^{2\pi R_0} \frac{INdl}{4\pi R^2} = \frac{INR_0}{2R} \cos \varphi \quad (6-36)$$

Donde R_0 - el radio interior del embobinado. Podemos encontrar R de triángulo OCP :

$$R = \sqrt{R_0^2 + z^2} \quad (6-37)$$

z - la distancia del centro de eje de reactor a punto P de medición. Evaluando (6-38) nosotros obtenemos:

$$H = \frac{INR_0^2}{2(R_0^2 + z^2)^{3/2}} \quad (6-38)$$

Cálculo del campo magnético de reactor

La componente axial de la intensidad de campo magnético creada por algún embobinado de fase puede ser calculada usando.

$$H_A = \frac{I_A \cdot N}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + z_A^2)^{1.5}}$$

$$H_B = \frac{I_B \cdot N}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + z_B^2)^{1.5}} \quad (6-39, 6-40, 6-41)$$

$$H_C = \frac{I_C \cdot N}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + z_C^2)^{1.5}}$$

Donde z_A, z_B, z_C son los centros geométricos de las espirales del reactor las alturas de fase A, B y C correspondientemente.

El valor eficaz de la intensidad de campo magnético axial total es:

$$H_{\Sigma} = \sqrt{H_A^2 + H_B^2 + H_C^2} \quad (6-42)$$

En el campo magnético del plano horizontal es calculado por (6-34). la medición del punto P está en $h_{mat} = 1,8$ m altura (el nivel de cabeza humano promedio). El sendero de medición es perpendicular al eje x ($\varphi_3 = 900$, $\text{sen } \varphi_3 = 1$). Por lo tanto.

$$H_z = \frac{I \cdot N}{h} \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{I \cdot N \cdot S}{h \cdot 4\pi \cdot r^2} \quad (6-43)$$

Los resultados de cálculo de campo magnético valores instantáneos sobre el eje son presentados en figura. 69, Estos resultados son obtenidos para las fases iniciales de corrientes de espiral de fase, correspondientemente, $\varphi_A = 30^\circ$, $\varphi_B = 150^\circ$ y $\varphi_C = 270^\circ$. En figura 70 los resultados de valores eficaces de la intensidad de campo magnético y densidad de flujo magnético son presentados. Son calculados en plano horizontal $h_{mat} = 1,8$ m.

Figura 68. Formación del campo magnético cerca del reactor: S_r - el área de superficie lateral del reactor; h_{mat} - la altura de medición del punto P; A, B, C - puntos de centros geométricos de embobinados de reactor

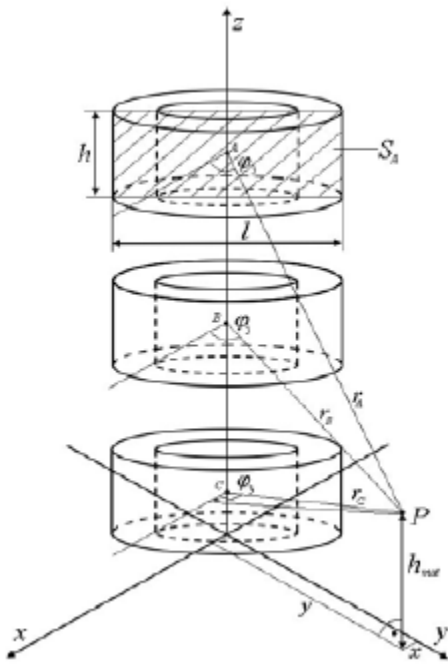
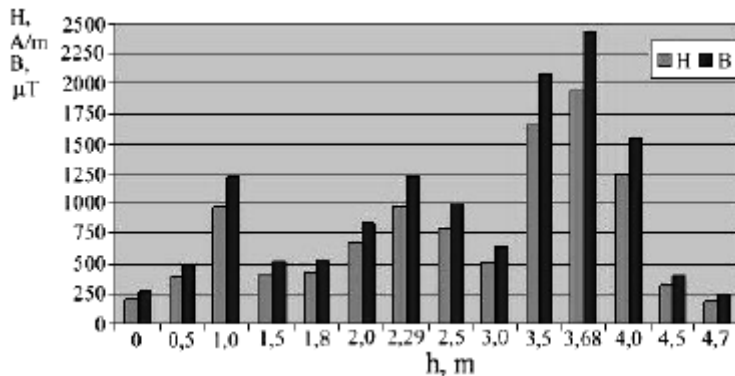


Figura 69. Distribución de H de intensidad de campo magnético y B la densidad de flujo magnético instantánea valuada sobre el eje de reactor, cuando $i_A = I_m$



En el entorno del reactor el campo magnético disminuye aproximadamente En la proporción inversa a la distancia al eje de reactor.

Figura 70. Diagrama de H de intensidad de campo magnético y B de densidad de flujo magnético en plano horizontal $h_{mat} = 1,8m$ de entorno del reactor.

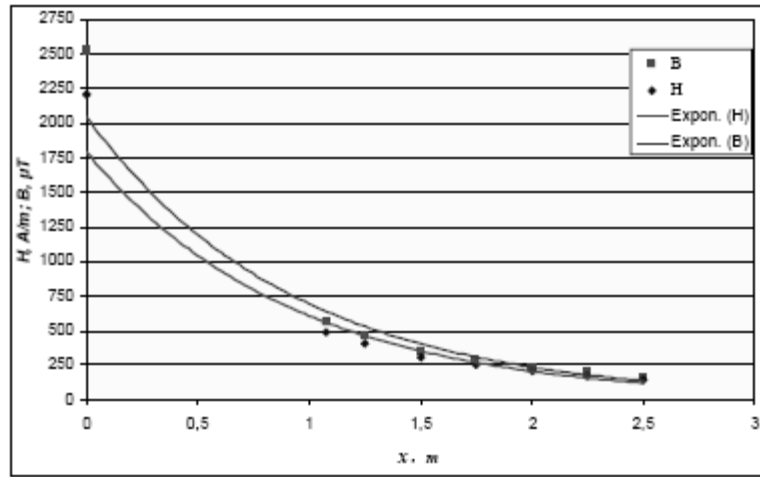
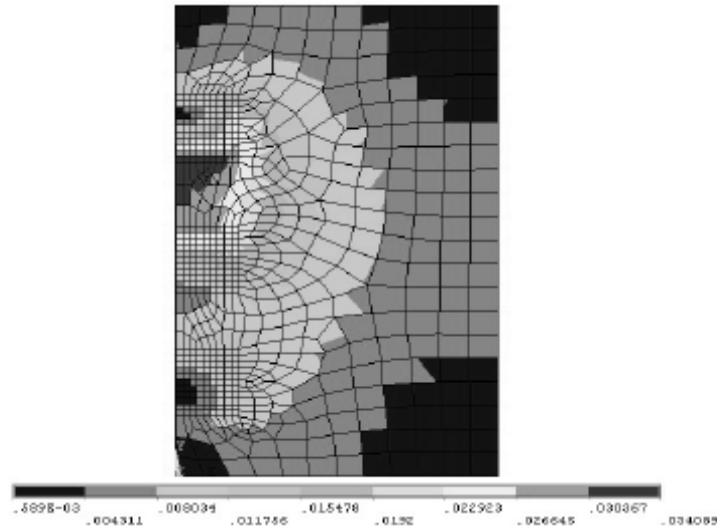


Figura 71. Distribución de B de densidad de flujo magnético en el plano radial obtenido por modelamiento.



Fue aproximado usando análisis de regresión por las ecuaciones:

$$H_{1,8} = H_{1,8}(0)x^{-1,1983} \text{ A/m} \quad (6-44)$$

$$B_{1,8} = B_{1,8}(0) \cdot x^{-1,1982} \mu T \quad (6-45)$$

El campo en el plano $h_{mat} = 1,8$ m es calculado en dos etapas. Al principio, el campo magnético es calculado sobre el eje. luego la distribución del campo magnético es calculada por (6-44) y (6-45) en el entorno de reactor.

La distribución del campo magnético en el plano meridional obtenido por el modelado es presentada en la figura 71 Los resultados de modelado corresponden con los resultados de cálculo.

Campo magnético de reactor puede a veces alcanzar valores peligrosos para el ser humano y para los equipos que estén alrededor. Es importante saber el campo magnético de distribución y sus valores extremos para poder determinar las distancias adecuadas para protección de equipos por flujos magnéticos dispersos y también distancias para proteger la salud de las personas.

El campo magnético en entorno de reactor puede ser calculado cuando la distribución del campo magnético sobre el eje de reactor es conocido. El campo magnético sobre el eje de reactor puede ser calculado por la ley Biot - Savart de Laplace.

Es importante saber que fenómenos magnéticos se presentan en un reactor con núcleo de aire tanto internos como en exterior de su área ya que esto nos ayuda a determinar cuales son la distancia adecuadas para protección de equipos y de las personas.

Las distancias para reactores debido a los campos magnéticos dispersos se calculan usando las formulas que nos proporciona el valor del flujo magnético del reactor en su alrededor en función de la distancia y comparando estos valores con los valores estándares de campo magnético límites y peligrosos para las personas y elementos ferromagnéticos el Vizimag es la herramienta que permite calcular los campos magnéticos y modelarlos en varios puntos continuos además los límites que este trabajo se tomaron para el cálculo de la distancia esta dado por la varias organizaciones internacionales.

6.2 Fundamentos para la limitación de la exposición de campos magnéticos emf en reactores de núcleo de aire.

Campo magnético de reactor puede a veces alcanzar valores peligrosos para el ser humano y para los equipos que estén alrededor. Es importante saber el campo magnético de distribución y sus valores extremos para poder determinar las distancias adecuadas para protección de equipos por flujos magnéticos dispersos y también distancias para proteger la salud de las personas.

El campo magnético en entorno de reactor puede ser calculado cuando la distribución del campo magnético sobre el eje de reactor es conocido. El campo magnético sobre el eje de reactor puede ser calculado por la ley Biot - Savart de Laplace.

Es importante saber que fenómenos magnéticos se presentan en un reactor con núcleo de aire tanto internos como en exterior de su área ya que esto nos ayuda a determinar cuales son la distancia adecuadas para protección de equipos y de las personas.

La estrategia de prevención es práctica en relación con los límites de exposición sentados para el público en general e incluso para trabajadores en el sector de potencia eléctrica. Además de estructuras ferromagnéticas Sobre esta base, los límites de exposición han estado previstos para campos magnéticos de frecuencia a potencia alternantes.

La práctica en curso de está basada en la incrementación de la distancia del origen. Esencialmente, la exposición es limitada por el uso de barreras, controlando el área alrededor de un reactor de núcleo aire de tipo seco así. Las barreras incluyen la seguridad - áreas cercadas, mientras que las barreras impuestas incluyen el uso de las estructuras de soporte elevadas, que incrementan la distancia entre un reactor de núcleo de aire de

tipo seco y una persona individual en el nivel del suelo. Estas medidas obtienen el resultado deseado de limitar la fuerza del campo magnético al que una persona es expuesta y también, por lo menos en parte a las estructuras. Sin embargo, la desventaja es un aumento en bienes raíces requerido para una instalación. Esto tiene consecuencias tanto económicas y la disponibilidad de región es limitada. En muchos ajustes urbanos bienes raíces de subestación eléctricos son limitado.

Estas directrices se basan en efectos de salud inmediatos y a corto plazo, tales como la estimulación de los nervios y músculos periféricos, choque y quemaduras ocasionadas por el contacto con los objetos conductores, y la elevación de la temperatura en los tejidos como resultado de la absorción de energía durante la exposición a los campos electromagnéticos causados por reactores de núcleo de aire. En el caso de los potenciales efectos de la exposición a largo plazo, tales como un aumento en el riesgo de cáncer, la ICNIRP ha concluido que los datos disponibles son suficientes como para constituir un fundamento para la fijación de restricciones de exposición, aunque algunas investigaciones epidemiológicas han, arrojado evidencias sugestivas y convincentes de una asociación entre los posibles efectos cancerígenos de la exposición a niveles de densidad de flujo magnético de 50 / 60 Hz, sustancialmente menores a los recomendados en estas directrices.

Se resumen los efectos en vivo de la exposición a corto plazo a los campos electromagnéticos producidos por reactores de núcleo de aire. Se han observado respuestas transitorias celulares y de tejido ante la exposición a campos electromagnéticos producidos por reactores de núcleo de aire.

6.3 Regulaciones internacionales sobre los valores máximos de exposición a frecuencia de 60 hz de campos magnéticos producidos por reactores eléctricos.

En la tabla XII se presentan las normas y regulaciones más reconocidas, sobre los niveles de máxima exposición a campos magnéticos a frecuencia industrial (60 y 50 Hz), recomendados para ambientes ocupacionales y para el público en general.

Tabla XII Valores de máxima exposición de campo magnético a frecuencia industrial 60 Hz

Estándar	Comentario	Gaus	a teslas	μ tesla
international commission on Non Ionizing Radiation Protection, 1998	ocupacional	4,1677	4,17E-03	4167,7
	público	0,8333	8,33E-04	833,3
European Prestandar ENV 50166-1 (1995)[6]	ocupacional	1,33333	1,33E-03	1333,33
	público	5,3333	5,33E-03	5333,3
Intenational Radiation Protection Association(IRPA)	ocupacional	5	5,00E-03	5000
	público	1	1,00E-03	1000
(national Resources Planning Board) NRPB Reino Unido [7]	ocupacional	16	1,60E-02	16000
	público	16	1,60E-02	16000
American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)[8]	ocupacional	10	1,00E-02	10000

Para el análisis de los resultados se decidió tomar como referencia las recomendaciones del ICNIRP (International Comisión on Non-Ionizing Radiation Protection), por ser esta una organización científica independiente reconocida en el ámbito mundial y porque los valores establecidos son los menores.

6.4 Efectos de campos magnéticos en creados por reactores de núcleo de aire.

Acoplamiento a campos magnéticos de baja frecuencia

La interacción física entre los campos magnéticos de tiempo variable y el cuerpo humano y elementos paramagnéticos resulta en la inducción de campos eléctricos y circulación de corrientes eléctricas. Las magnitudes del campo inducido y la densidad de corriente son proporcionales al radio del circuito, la conductividad eléctrica del tejido o material, y el ritmo de cambio y magnitud de la densidad del flujo magnético. Para una determinada magnitud y frecuencia de campo magnético, los campos eléctricos más potentes son inducidos donde las dimensiones del circuito son mayores. El camino y la magnitud precisos de la corriente resultante inducida en cualquier parte del cuerpo o de la estructura dependerán de la conductividad eléctrica del tejido y la estructura. El cuerpo no es eléctricamente homogéneo; sin embargo las densidades de corriente inducidas pueden ser calculadas utilizando modelos anatómica y eléctricamente realistas del cuerpo y también de la estructura y métodos de computación, los cuales poseen un alto grado de resolución anatómica.

Absorción energética a partir de campos electromagnéticos

La exposición a campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia, normalmente resulta en una absorción energética insignificante y un aumento de temperatura no medible en el cuerpo y en los materiales. Sin embargo, la exposición a campos electromagnéticos a frecuencias mayores a unos 60HZ pueden resultar en una absorción energética y aumentos de temperatura. En general, la exposición a un campo electromagnético uniforme (de onda plana) resulta en una deposición y distribución energética altamente no uniforme dentro del cuerpo, lo cual debe ser evaluado por la medición y el cálculo dosimétrico.

Respecto a la absorción energética por el cuerpo humano, los campos electromagnéticos pueden dividirse En tejidos, la SAR es proporcional al cuadrado de la fuerza interna del campo eléctrico. El promedio de SAR y su distribución pueden ser computados o estimados en base a las mediciones de laboratorio. Los valores de SAR dependen de los siguientes factores: los parámetros incidentes de campo, es decir, la frecuencia, intensidad, polarización, y configuración fuente – objeto (campo cercano o lejano); las características del cuerpo expuesto, es decir, su tamaño y geometría interna y externa, y las propiedades.

Tabla XIII Rangos de corrientes de umbral para efectos indirectos, incluyendo a niños, mujeres y hombres.

Efecto Indirecto	Umbral de corriente (mA) a frecuencia:		
	50 / 60 Hz	1 kHz	100 kHz
Percepción al tocar	0,2 – 0,4	0,4 – 0,8	25 – 40
Dolor al contacto del dedo	0,9 – 1,8	1,6 – 3,3	33 – 55
Choque doloroso / umbral para soltar	8 – 16	12 – 24	112 – 224
Choque severo / dificultad para respirar	12 – 23	21 – 41	160 – 320

Directrices para limitar la exposición a emf

Limites de exposición ocupacional y del público en general. La población con exposición ocupacional consiste de adultos, generalmente expuestos bajo condiciones conocidas, entrenados para ser conscientes del riesgo potencial y tomar las precauciones apropiadas. En contraste, el público en general consiste de individuos de toda edad y diversas condiciones de salud, y puede incluir grupos o individuos particularmente susceptibles. En muchos casos, los miembros del público no son conscientes de su exposición a los EMF. Es más, no se puede razonablemente esperar que miembros individuales del público tome precauciones para minimizar o evitar la exposición. Son

estas las consideraciones que subyacen en la adopción de restricciones de exposición más estrictas para el público que para la población con exposición ocupacional.

Restricciones básicas y niveles referenciales. Las restricciones en los efectos de la exposición se basan en efectos establecidos para la salud y se denominan restricciones básicas. Según la frecuencia, los valores físicos empleados para especificar las restricciones básicas de exposición a los EMF son la densidad de corriente, SAR, y densidad de potencia. La protección contra los efectos negativos para la salud, requiere no sobrepasar estas restricciones básicas. Se ofrecen niveles referenciales de exposición para su comparación con los valores medidos de las cantidades físicas; el cumplimiento de cada uno de los niveles referenciales dados en estas directrices asegurará el cumplimiento de las restricciones básicas. Donde los valores medidos son mayores a los niveles referenciales, esto no necesariamente significa que se ha sobrepasado las restricciones básicas, pero se requiere de un análisis más detallado para evaluar el cumplimiento de las restricciones básicas.

En el rango de frecuencias hasta 1 kHz, los niveles referenciales para el público en general ante campos eléctricos son la mitad de los valores fijados para la exposición ocupacional. El valor de 10 kV m⁻¹ para los 50 Hz o 8,3 kV m⁻¹ para los 60 Hz de exposición ocupacional, incluye un margen de seguridad suficiente para evitar los efectos de estimulación debido a contactos con corriente bajo todas las condiciones posibles. La mitad de este valor fue escogida para los niveles referenciales del público en general, es decir, 5 kV m⁻¹ para 50 Hz o 4,2 kV m⁻¹ para 60 Hz, a fin de evitar los efectos negativos indirectos en más del 90% de los individuos expuestos;

Tabla XIV. Niveles de referencia para la exposición del público en general a campos eléctricos de tiempos variables y magnéticos

Rango de frecuencias	Fuerza del campo E (V m ⁻¹)	Fuerza del campo H (A m ⁻¹)	Campo B (μT)	Equivalente de densidad de potencia de onda plana Seq (W m ⁻²)
hasta 1 Hz	—	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	—
1 – 8 Hz	10,000	$3,2 \times 10^3 / f^2$	$4 \times 10^3 / f^2$	—
8 – 25 Hz	10,000	$4,000 / f$	$5,000 / f$	—
0,025 – 0,8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	—

los niveles referenciales para la corriente de contacto son los que constan en lo anterior, que deben observarse para evitar los peligros de choques y quemaduras. Los niveles referenciales para los puntos de contacto se presentan en la Tabla XV Las corrientes de contactos de umbral que producen respuestas biológicas en niños y mujeres adultas, son aproximadamente una mitad y dos tercios, respectivamente, de los valores para hombres adultos, por lo que los niveles referenciales de corriente de contacto para el público en general se fijan más bajos, por un factor de 2, que los valores para la exposición ocupacional.

Tabla XV. Niveles de referencia para las corrientes de contacto de tiempo variable provenientes de objetos de conductores de corriente producidos por campos electromagnéticos

Características de exposición	Rango de frecuencias	Máxima corriente de contacto (mA)
Exposición ocupacional	hasta 2,5 kHz	1,0
	2,5 – 100 kHz	0,4 f
	100 kHz – 110 MHz	40
Público en general exposición	hasta 2,5 kHz	0,5
	2,5 – 100 kHz	0,3 f
	100 kHz – 110 MHz	20

6.5 Modelamiento y configuraciones de banco de reactores para disminución de efectos de campo magnético.

Métodos de reducción de campo magnético por bancos de reactores

Un método para controlar un nivel de campo magnético, se comprende en la acción de conectar dos reactores de potencia en serie, paralelos, o la combinación de serie y paralelo de forma que sus momentos de dipolo son opuestos para formar un cuadrupolo, da como resultado campo magnético que varía inversamente a la cuarta potencia de la distancia de los reactores donde los dos reactores pueden ser conectados como un cuadrupolo.

Un método para controlar un nivel de campo magnético, que comprende los pasos de conectar dos arreglos de cuadrupolo de reactores de potencia con electricidad, que son arreglado de forma que sus momentos de cuadrupolo son opuestos en serie, una combinación paralelo de serie y línea paralela de formar un arreglo de octopolo, da como resultado campo lejano de que varía inversamente ala quinta potencia de la distancia de la selección donde los cuatro reactores pueden ser conectados, en este caso un octopolo es producido.

Banco de reactores trifásicos colocados en forma horizontal

En este caso los reactores son colocados en forma horizontal con cierta elevación sobre el suelo dependiendo de la potencia de los mismos, las distancias entre los reactores varia dependiendo de la corriente, potencia y voltaje que estén diseñados las distancias que se recomiendan entre cada uno de los reactores se calculan tomando en cuenta regulaciones internacionales sobre los valores máximos de exposición a frecuencia de 60 hz de campos magnéticos producido por reactores eléctricos.

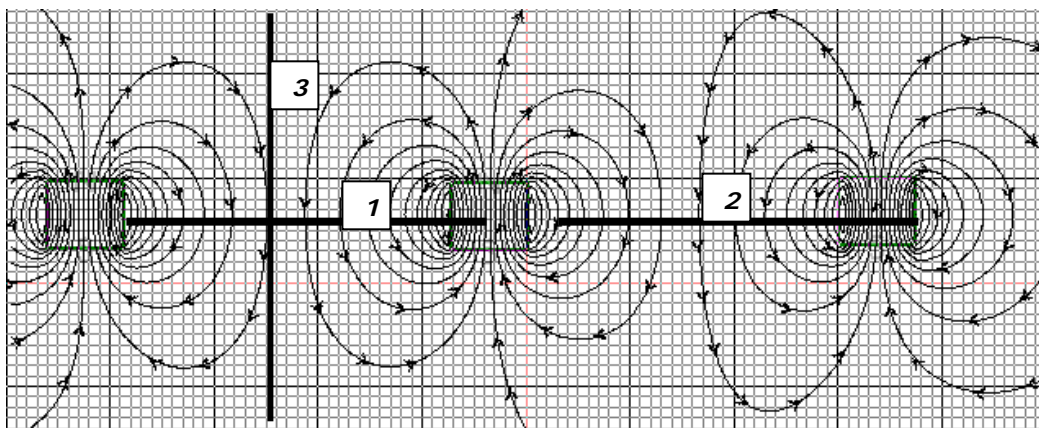
Como podemos observar en las figuras los tres reactores son colocados con los polos de manera que sean iguales uno hacia otro para que los momentos bipolares sean opuestos y la densidad de campo se anulen y de esta manera sean menor la distribución de campo magnético que colocándolos con los polos opuestos en este caso se sumaria y aumentaría la distribución de campo magnético.

En las siguientes figuras vamos observar el comportamiento del campo magnético en este tipo de arreglo para banco trifásico de reactores con núcleo de aire.

Figura 72. Arreglo trifásico de reactores con núcleo de aire en forma horizontal



Figura 73. Líneas de campo magnético de reactores con núcleo de aire trifásico.

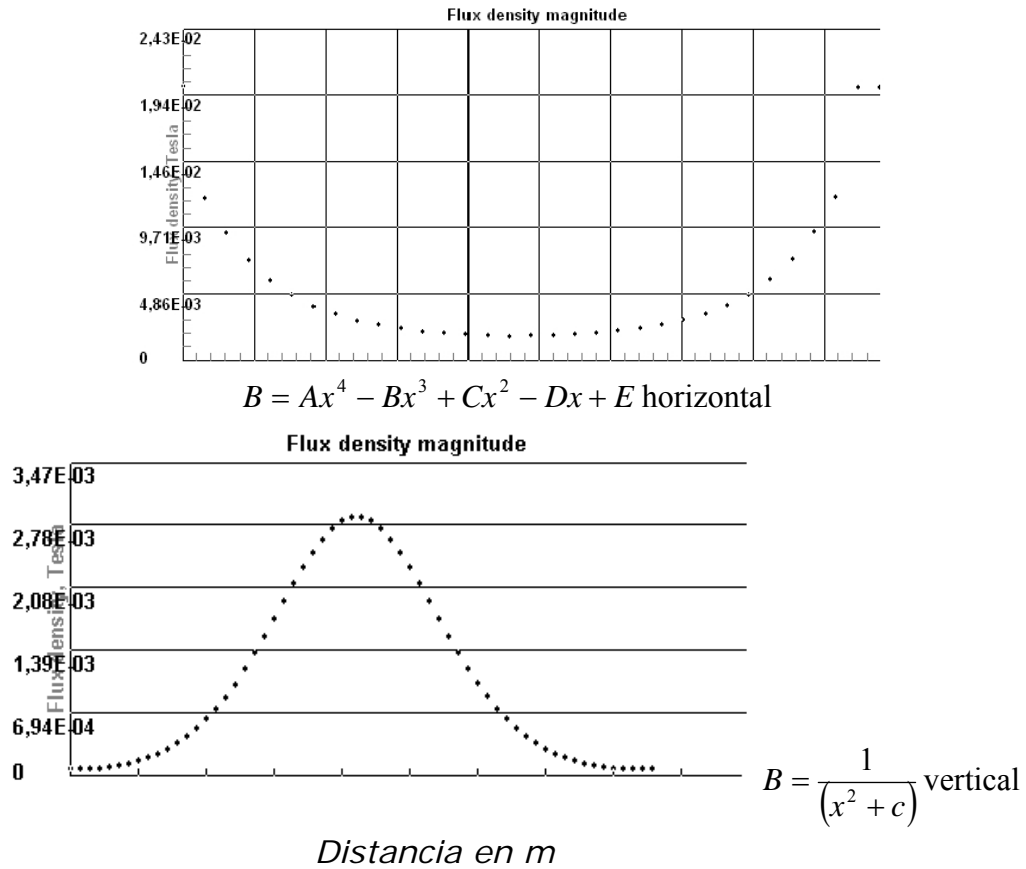


Modelamiento de campo magnético entre dos reactores se realiza a través de una ecuación polinomial de cuarta potencia en función de la distancia para este caso se utiliza un modelo polinomial que nos da la densidad del campo magnético en función de la distancia con estas ecuaciones podemos calcular la distancia necesaria entre reactores para que las densidades de campo magnético no puedan causar corrientes circulantes y pérdidas de histeresis en cualquier parte magnética del reactor o reactores adyacentes además de cualquier elemento magnético como barras y las propias personas los modelos son generalmente de este tipo POLINOMIALES DE CUARTA POTENCIA $B = Ax^4 - Bx^3 + Cx^2 - Dx + E$ para el plano horizontal, para el plano vertical la $B = \frac{1}{(x^2 + c)}$

Graficación del tipo $B = \frac{1}{(x^2 + c)}$ para la línea 3 de la gráfica de campo magnético 72.

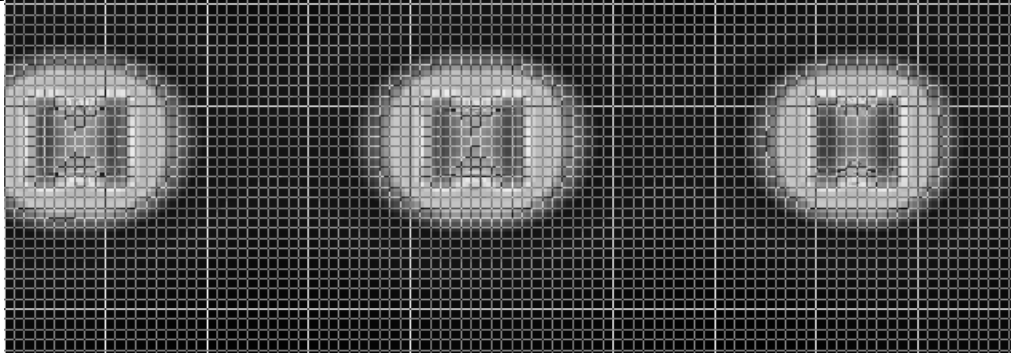
A continuación tenemos un ejemplo de gráfica modelo de densidad de campo magnético para la distancia entre reactores colocados en forma horizontal la primera gráfica es la densidad campo magnético entre el reactor 1, 2 y 3 la segunda gráfica entre el reactor 2 y 3 las dos distancias.

Figura 74. Gráfica de B densidad de campo magnético en función de la distancia X entre dos reactores de núcleo de aire colocados en el plano horizontal.



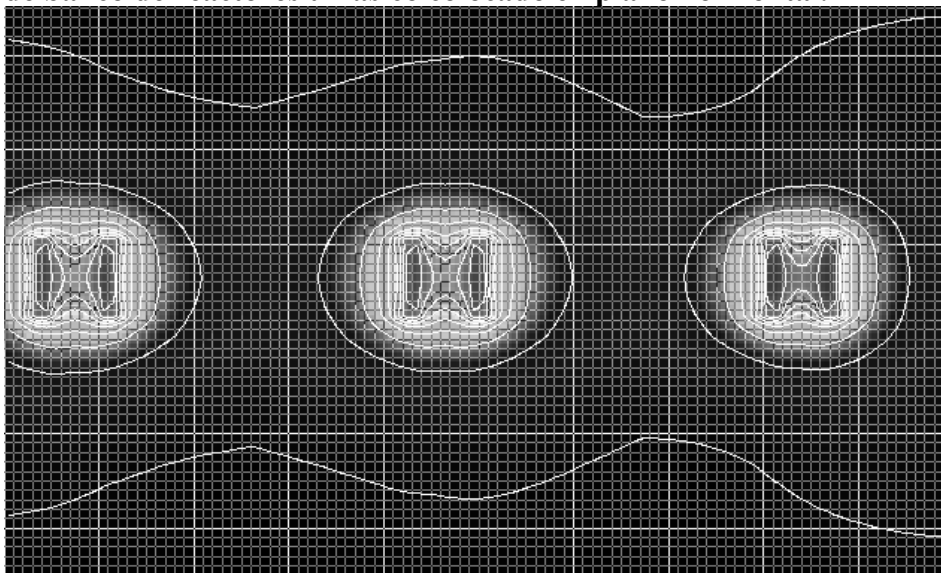
Gráfica de modelación característica de distribución de flujo de campo magnético entre dos reactores de mismas características en función de la distancia tomamos como referencia la graficación de la línea horizontal de la figura 73 línea 1 podemos observar que el flujo de campo magnético entre un banco de reactores trifásico colocados en plano horizontal se comporta como una función polinomial de cuarta potencia mientras la línea 3 de la figura 73 se comporta como una función polinomial inversa.

Figura 75. Visualización distribución de B densidad de cambio continuo de flujo magnético en un banco trifásico de reactores colocados en plano horizontal.



En la anterior figura podemos observar la visualización de densidad de cambio continuo de flujo magnético en cada reactor y como se entrelaza en el arreglo para un banco trifásico de reactores de núcleo de aire colocándolos en el plano horizontal tomando en cuenta que sus polaridades son opuestas para reducir el campo magnético generado por ellos, las áreas internas son donde se encuentra los campos magnéticos máximos, las áreas externas son donde se encuentran los campos magnéticos mínimos.

Figura 76 Visualización de curvas de contorno de B densidad de campo magnético de banco de reactores trifásico colocado en plano horizontal.

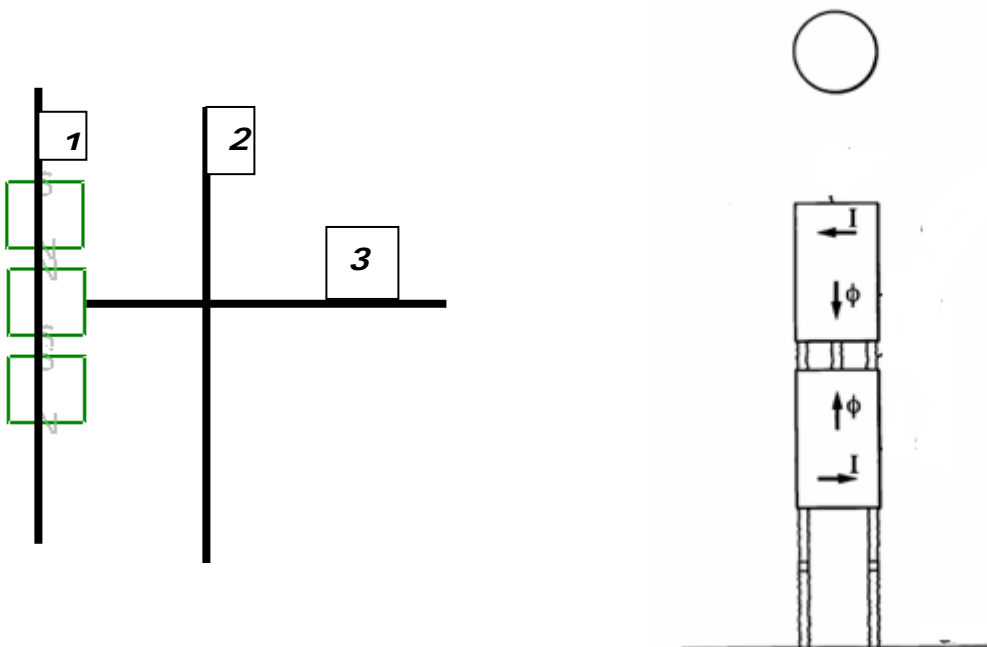


En esta figura se grafican las curvas de contorno de los reactores que permiten visualizar fácilmente las áreas de flujo magnético máximas mínimas e intermedias y la relación entre los flujos de campo magnético de los reactores en conjunto, las curvas de contorno están dibujadas de color blanco.

Banco de reactores trifásicos colocados en forma vertical

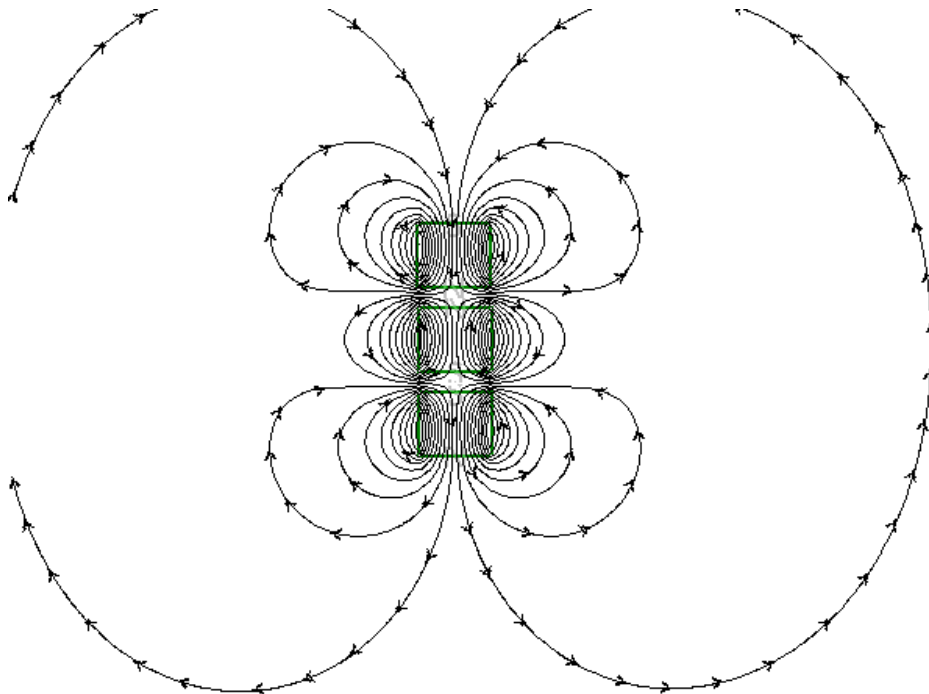
Un método para controlar un nivel de campo magnético, que comprende los pasos de poner reactores de potencia en serie o paralelo consiste en poner uno encima de los demás y conectar los reactores a potencia eléctrica, de forma que los momentos de dipolo de los reactores de potencia son opuestos para constituir un cuadrupolo, el resultado da campo magnético repeliéndose y que varía inversamente con la distancia de los reactores.

Figura 77. Arreglo trifásico de reactores con núcleo de aire en forma vertical



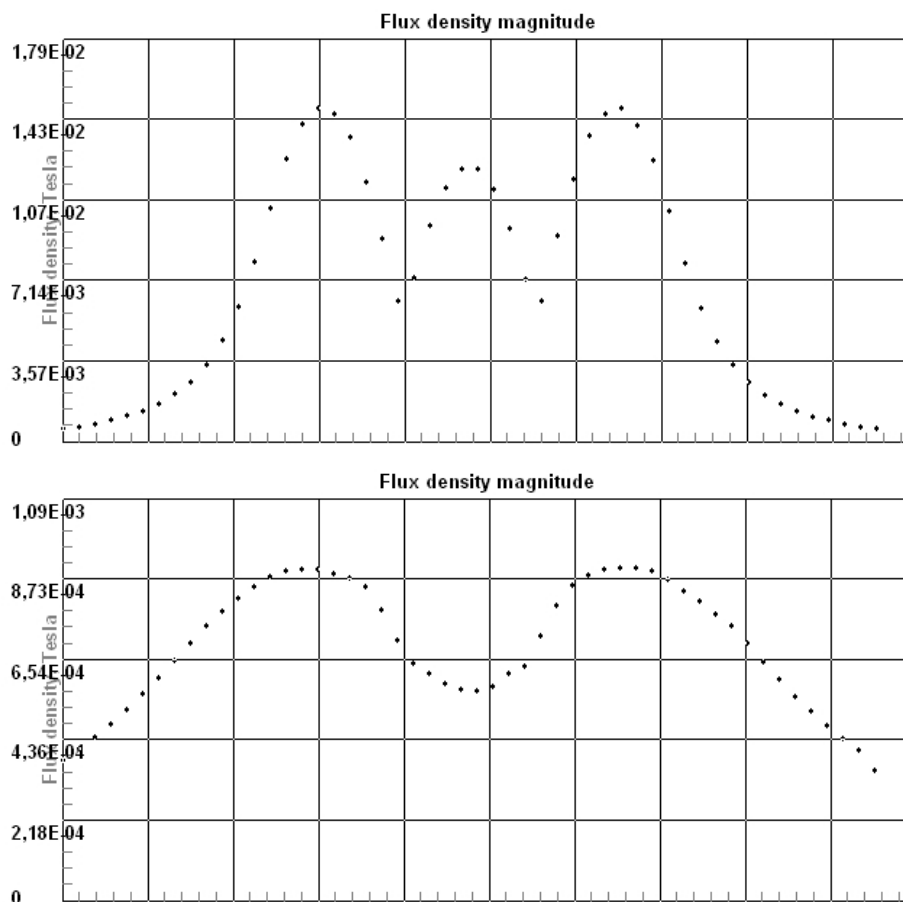
Modelamiento de campo magnético entre reactores se realiza a través de una ecuación polinomial de sexta potencia en función de la distancia para este caso se utiliza un modelo polinomial que nos da la densidad del campo magnético en función de la distancia con estas ecuaciones podemos calcular la distancia necesaria para los elementos paramagnéticos que se encuentran cerca del banco de reactores para que no puedan causar corrientes circulantes y perdidas de hestérisis en cualquier parte magnética del reactor o reactores adyacentes además de cualquier elemento magnético como barras y las propias personas los modelos son generalmente de este tipo POLINOMIALES de sexta potencia $B = AX^6 \pm BX^5 \pm CX^4 \pm DX^3 \pm EX^2 \pm FX \pm G$ en el plano vertical mas específicamente la línea 1 y 2 de la gráfica 77 y logarítmica en el plano horizontal $B = Ce^{KX}$ de la línea 3 den la gráfica 77.

Figura 78. Líneas de campo magnético producidos por reactores con núcleo de aire.



La figura anterior muestra el comportamiento de las líneas de campo magnético en un banco trifásico de reactores de núcleo de aire colocados en forma vertical y con los polos iguales entre cada reactor a manera de disminuir el campo magnético generado

Figura 79. La gráfica muestra el comportamiento del flujo de de campo magnético en el centro de reactores de núcleo de aire en el plano vertical.



Las gráficas anteriores se pueden modelar de la siguiente manera

$$B = AX^6 \pm BX^5 \pm CX^4 \pm DX^3 \pm EX^2 \pm FX \pm G$$

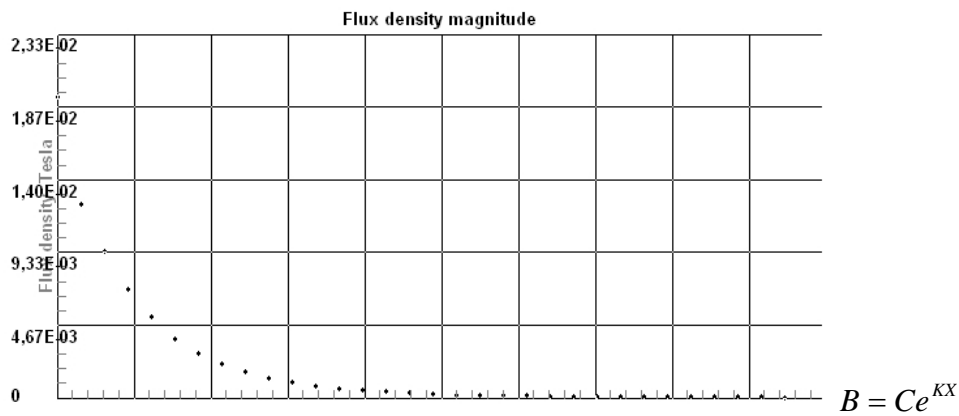
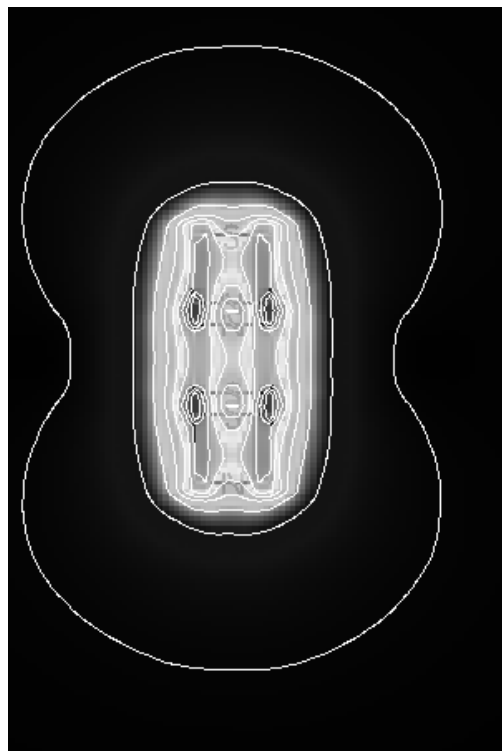


Figura 80. Visualización distribución de B densidad de cambio continuo de flujo magnético en un banco trifásico de reactores colocados en plano vertical



En esta figura se muestra el comportamiento por áreas del flujo magnético continuo de un banco de reactores trifásico colocados verticalmente observamos las áreas internas son donde se encuentra los campos magnéticos máximos, las áreas externas son donde se encuentran los campos magnéticos mínimos.

Además en esta figura se grafican las curvas de contorno de los reactores que permiten visualizar fácilmente las áreas de flujo magnético máximas mínimas e intermedias y la relación entre los flujos de campo magnético de los reactores en conjunto, las curvas de contorno están dibujadas de color blanco.

Banco de reactores configuración de matriz

Un método para controlar un campo magnético creado por reactores de distribución eléctrica, comprende los pasos de conectar dos arreglos de cuadrupolos de reactores, que son configurados de forma que sus momentos de cuadrupolos son opuestos conectados en serie o una combinación paralelo serie y constituir una matriz de octopolos, da como resultado campo lejano que varía inversamente como la quinta potencia de la distancia entre el arreglo. Un método donde los arreglos de cuadrupolos cada uno comprenden dos reactores de distribución de energía eléctrica conectados en serie y montados al lado de sí el uno al otro en dos hileras de dos reactores formando un octopolo cada uno.

Un método para controlar un nivel de campo magnético, que comprende los pasos de conectar reactores de distribución de energía eléctrica de $2n$, donde n es un entero, de forma que la mitad de ellos tiene momentos de dipolo en la misma dirección y la otra mitad tiene momentos de dipolo en dirección contraria para formar un multipolo de $2n$ de orden, el campo lejano que varía con la distancia inversamente como la distancia para la potencia $(3 + n)$.

Figura 81. Arreglo de banco trifásico en forma de matriz

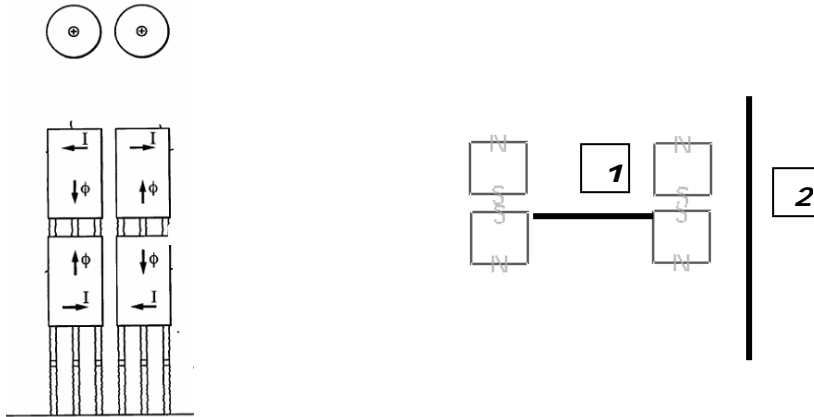


Figura 82. Líneas de campo magnético producidas por un banco de reactores con núcleo de aire trifásico en forma de matriz

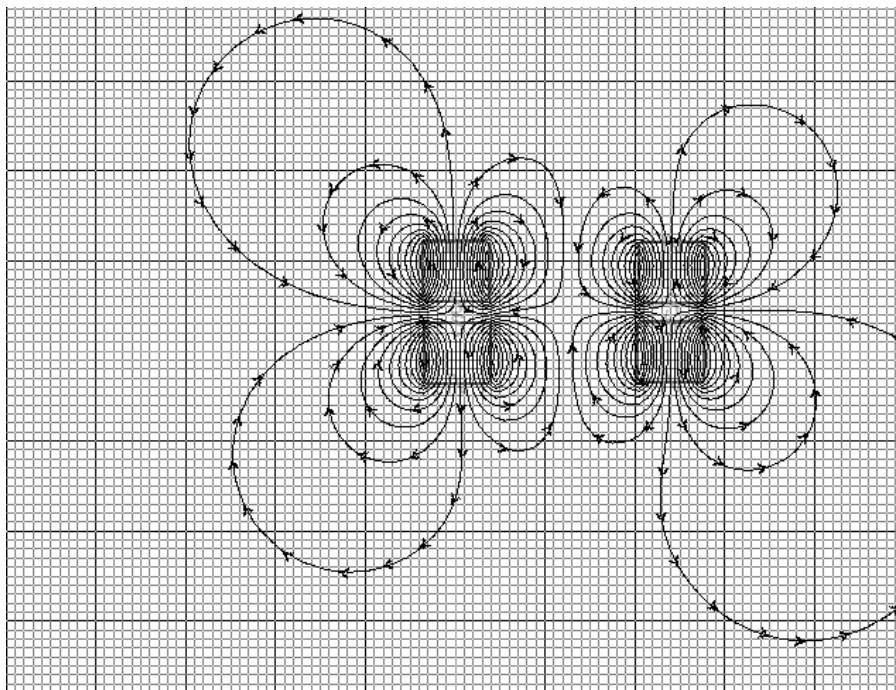
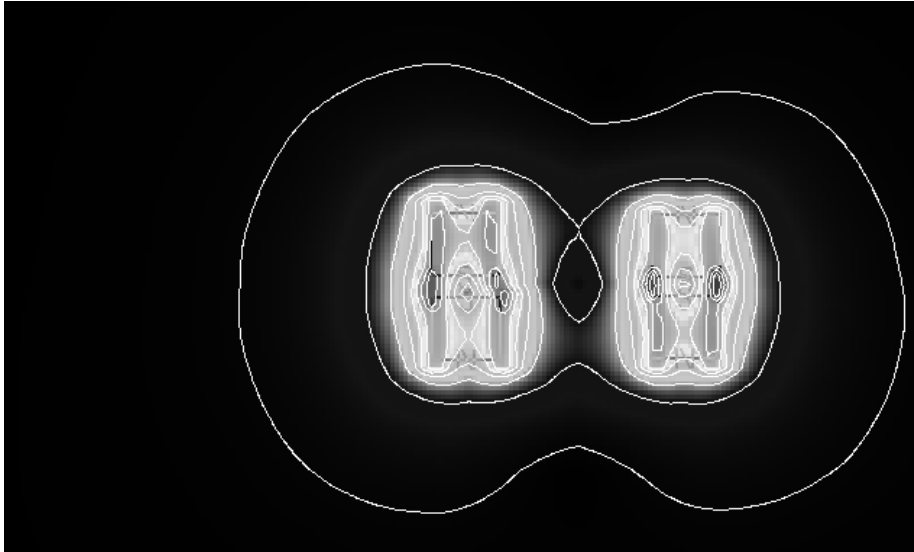


Figura. 83. Visualización distribución de B densidad de cambio continuo de flujo magnético en un banco trifásico de reactores colocados en forma de matriz



La figura anterior muestra un arreglo de octopolo que se utiliza para disminuir el efecto del campo magnético en los reactores de núcleo de aire y las áreas de flujo magnético continuo las áreas internas son donde se encuentra los campos magnéticos máximos, las áreas externas son donde se encuentran los campos magnéticos mínimos.

Modelamiento de campo magnético entre reactores se realiza a través de una ecuación polinomial inversa de potencia dos en función de la distancia para este caso se utiliza un modelo polinomial que nos da la densidad del campo magnético en función de la distancia con estas ecuaciones podemos calcular las distancia necesaria para los elementos paramagnéticos que se encuentran cerca del banco de reactores para que no puedan causar corrientes circulantes y perdidas de hestérisis en cualquier parte magnética del reactor o reactores adyacentes además de cualquier elemento magnético como barras y las propias personas los modelos son generalmente de este tipo POLINOMIALES inversas $B = \left[\frac{1}{(x^2 + c1)} \right]$ en el plano vertical mas específicamente la

línea 1 de la gráfica 81 y logarítmica en el plano horizontal $B = Ax^5 - Bx^4 + Cx^3 - Dx^2 + Ex + F$ de la línea 2 de la gráfica 81.

Figura 84. La gráfica muestra el comportamiento del flujo de de campo magnético en el plano horizontal del arreglo de banco de reactores de núcleo de aire, (sobre la línea 1, gráfica 81)

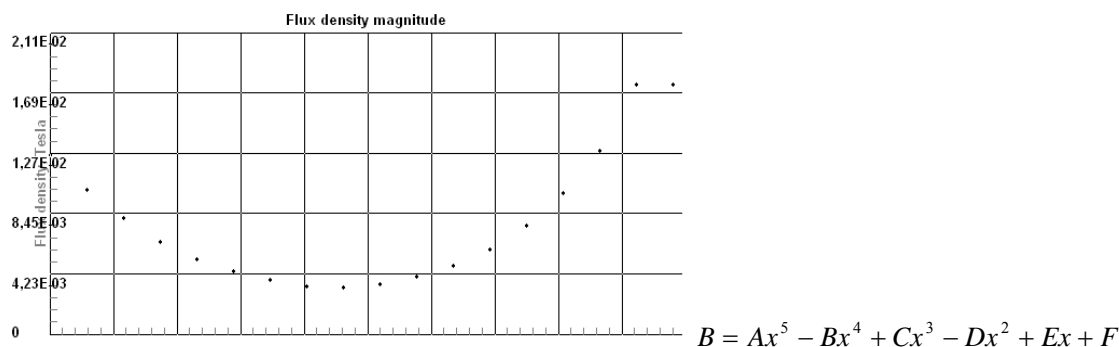
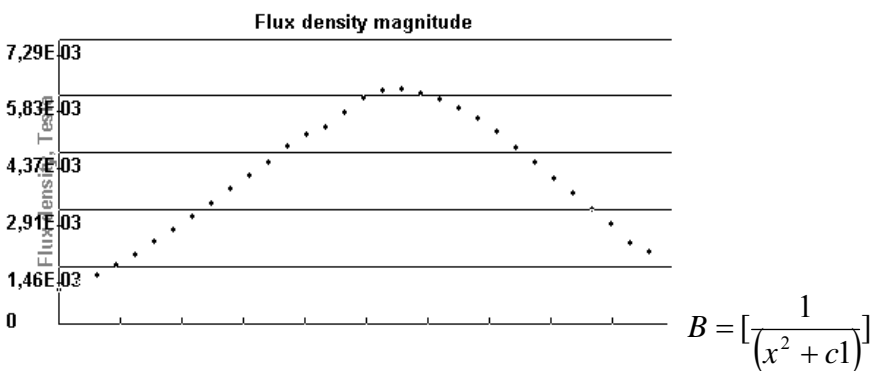


Figura 85 La gráfica muestra el comportamiento del flujo de de campo magnético en el plano vertical del arreglo de banco de reactores de núcleo de aire, (sobre la línea 2, grafica 81)



Las distancias magnéticas de reactores de núcleo de aire pueden ser calculados a través del modelamiento de la distribución de flujo magnético alrededor del mismo reactor tomando en cuenta las regulaciones internacionales para la exposición de personas trabajadoras y elementos magnéticos alrededor de los reactores

Como se dijo antes, en la aplicación de reactores de núcleo de aire, una de la técnica utilizada para conocer un límite de campo magnético fue usar distancia incrementadas

del origen. En otras palabras, el acceso para seres humanos fue limitado por el uso de estructuras de materiales no magnéticos en aumento y altas.

Es conocido que las instalaciones usuales de reactores de núcleo de aire generalmente emplean un simple embobinado por fase. En algunos casos, donde la capacidad de potencia eléctrica es muy grandes los embobinados múltiples por fase pueden ser empleados donde los embobinados usualmente son configurados para conseguir la máxima acoplamiento positivo en ordenes de reducir costos.

Usar sistemas de embobinado múltiples por fase en orden consigue la reducción de campo magnético sobre un área física grande. A decir verdad, el uso de embobinado múltiples por la fase no es generalmente deseable ya que un rollo solo por el sistema de fase es siempre más barato.

Esto puede añadir costos al resultado neto. Si el blindaje es necesario, se debería especificar cuando se ordene el reactor, ya que puede tener un efectos en la inductancia del reactor. Las siguientes prácticas son las que se toman cuando se utilizan los reactores de núcleo de aire:

- Ningún objeto metálico que forme un bucle cerrado (barra doble, red de conexión a tierra, tabla de tracción, etc.) deberá estar dentro de un diámetro del reactor. Normalmente, esto crearía un área alrededor del reactor (asumiendo que los reactores están amontonados) con el reactor al centro. Si los reactores no están amontonados, se necesitaría más espacio en el piso.
- Si una barra doble esta directamente debajo del reactor es una preocupación (u otros metales que forman bucles), se pueden usar pedestales para elevar las alturas de reactores lejos del suelo, techo o tierra. Si los reactores no se pueden elevar debido a limitaciones de altura, una gruesa placa de aluminio. Puede servir como blindaje Si los efectos en la salud son una preocupación, la fabricación del reactor se debería de utilizar las fórmulas y recomendaciones anteriormente expuestas para determinar los

requerimientos de distancia para alcanzar los niveles seguros de campo magnético. Para obtener campos más bajos, se puede proporcionar más espacio, o se podría usar una cortina de aluminio (blindaje) alrededor del reactor. Si el personal puede entrar en contacto con la cortina de aluminio, se podría necesitar una doble pared gabinete debido a la temperatura excesiva del aluminio y el peligro de quemaduras.

Para todas las simulaciones se utilizó ViziMag un programa diseñado para dar la visualización del circuito magnético para reactores y banco de reactores, líneas de campo y densidad de cambio continuo. ViziMag ha sido creado con el objetivo de Creación de modelo de distribución de campo magnético en función de distancia para reactores y elementos magnético, y cálculo equitativamente y rápida visualización de líneas de campo y densidad de cambio continuo.

CONCLUSIONES

1. Realmente, los reactores de núcleo de aire como principal objetivo tienen que reducir costos para las instalaciones de cualquier voltaje, son capaces de reducir las corrientes de corto circuito, absorber potencia reactiva para la regulación de voltaje en líneas largas, filtrar armónicas etc. disminuyen las inversiones en los equipos de transmisión y distribución de energía eléctrica.
2. Disminuyen los esfuerzos en varios equipos, lo que permite usar de menor capacidad o una vida más larga para los equipos actuales. Esto es particularmente importante en los transformadores de potencia e interruptores de potencia.
3. Los compensadores estáticos realizan una compensación continua de potencia reactiva, tanto inductiva como capacitiva son controlados por tiristores ayudan dar más estabilidad al sistema, tanto bajo pequeños o grandes disturbios en los sistemas eléctricos.
4. El empleo de reactores con núcleo de aire se hace necesario cuando se requiere consumir la potencia reactiva generada por las líneas transmisión, cuando trabajan por debajo de la potencia natural (SIL) donde el límite de voltaje permisible es de un 5%.
5. Para los reactores de núcleo de aire se deben tomar en cuenta los requerimientos de espacio y protección magnética, el cual es necesario para evitar los efectos de la inductancia mutua, para los equipos y los efectos dañinos para la salud del ser humano por los campos magnéticos dispersos alrededor de ellos.

6. Los reactores con núcleo de aire que se fabrican de mayor potencia tienen un menor costo por KVA o MVA debido a que presentan mayores eficiencias por su alto factor de calidad.
7. Los reactores de núcleo de aire para la absorción de potencia reactiva en los sistemas son menos costosos que los compensadores síncronos, porque estos presentan movimiento mecánico y requieren mayor mantenimiento y desgaste de piezas.
8. Se reafirma que la maniobra de apertura de corrientes inductivas puede resultar muy exigente para los reactores y por lo tanto debe estudiarse con cuidado.
9. Adicionalmente, son elementos pasivos prácticamente libres de mantenimiento y una historia comprobada libre de fallas.
10. El uso de reactores limitadores de corriente de núcleo de aire es una herramienta poderosa que debe utilizarse extensivamente en los sistemas de potencia.
11. Se diseñó e implementó un procedimiento de simulación de campos magnéticos en reactores con núcleo de aire a través del programa *ViziMag*, que describe las visualizaciones de líneas de campo magnético calcula y modela las distribuciones de los flujos de campo magnético en función de las distancias, las mediciones de campo magnético se compararon con base en normas y recomendaciones internacionales para poder establecer las distancias adecuadas para los reactores con núcleos de aire.

12. Se verificó que los valores máximos de campo magnético encontrados durante las mediciones en los reactores con núcleo de aire, están muy por debajo de los límites ocupacionales propuestos por los estándares internacionales de acuerdo a las distancias establecidas de restricción.

RECOMENDACIONES

1. Una buena opción para el cálculo de reactores de núcleo de aire y cualquier otro tipo de reactor es la de los programas simuladores como Asp. que proporciona buenas herramientas para la simulación y cálculo de flujo de carga y corrientes de cortocircuito que es donde mayormente se emplean los reactores con núcleo de aire.
2. Para el cálculo a mano de corrientes de corto circuito en un sistema donde se evalúa colocar un reactor de núcleo de aire, ya que es más práctico utilizar el método de impedancias que da un resultado muy confiable del valor de reactor que se necesita para limitar corriente.
3. En el caso particular de la instalación de banco de reactores de núcleo de aire de media tensión de Montevideo, se encontró que para permitir la maniobra de apertura de corrientes inductivas es necesario tomar medidas precautorias como la instalación de capacitores en bornes del disyuntor a maniobrar de al menos 10 nF por fase. Las capacidades parásitas de la conexión a los reactores, dada la configuración particular de ésta, no son suficientes para solucionar el problema presentado.
4. Informar a los trabajadores y las empresas sobre los posibles peligros de los campos magnéticos.

5. Aumentar la distancia del trabajador a la fuente de campo magnético, ya que los campos disminuyen dramáticamente con la distancia.

6. Usar diseños de bajo campo magnético cuando sea posible

7. Reducir el tiempo de la exposición a los campos eléctricos y magnéticos.

BIBLIORAFÍA

1. Boylestad, Robert L. Análisis introductorio de circuitos eléctricos. Octava edición. Editorial Pearson Educación. 1998, 412 -413 816-818 pp.
2. Boletín Universidad Técnica Federico Santa María Departamento de Electrónica Valparaíso-Chile sistemas electromecánicos
http://ar.geocities.com/maquinas_unlm/0372/Apunte_Sist_Electromecanicos/capitulo1.pdf 16-17 pp.
3. Alves Baraciarte Roberto, Boletín de conversión de energía electromagnética 1 Universidad Simón Bolívar. 1-4 pp.
http://prof.usb.ve/robert/Archivos_Compartidos/Cursos%20USB/CT1311/T3%20-%20CT1311%20-%20%20Reactores.pdf
4. Sajquin Estacuy, Edwin Waldemar. Uso de los Reactores en Sistemas de Potencia. Trabajo de graduación Ing. Electricista Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1984. 5 -8, 39-48 50- 51 59-64 , 73 -75 11-14 pp.
5. Franco Aquino, Julio Rene. Reactores limitadores de corriente. Trabajo de graduación Ing. Electricista Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1976. 9-18 , 26-31 ,33---36 pp.
6. Boletín comité de administración del fondo fiduciario para el transporte eléctrico federal
<http://www.cfee.gov.ar/caf/Interconexion%20NEA%20NOA/Bajar/com/Anexo%20VI%20-%20Subanexo%20VIb3%20-ETG%20Reactor%20Neutro-Esp.T%C3%A9c.Gral.pdf> 5 -2 pp.
7. Martín, José Raúl. Diseño de Subestaciones eléctricas. Primera edición. Editorial McGraw-Hill. 1992. 19-26 pp.
8. B. de Metz Noblat ,F. Dumas, G. Tomaste. Cuaderno técnico No.158 cálculo de corriente de corto circuito . Schneider electric.. <http://www.schneider-electric.com.ar/recursos/catalogos/CT1581.PDF> 16-33 pp

9. Grainger William, John j. D.Stevenson. Análisis de sistemas de potencia. Primera edición. Editorial McGraw Hill. 2004. 443-488 ,204-207 , 193-204 pp.
10. Tequiltlalpa Gómez, Gustavo Carlos. Asignación de cargos por control de voltaje y reservas reactivas en mercados de energía. Trabajo de graduación Ing. electricista. Instituto Tecnológico de Morelia. 2002. 22-26 pp.
<http://elec.itmorelia.edu.mx/Gustavo%20Tequiltlalpa.pdf>
11. Catalogo de reactores Nokian Capacitor (SP-RE01-01/2004)
http://www.nokiancapacitors.es/documents/03%20-%20products/reactors/SP-RE01-01_2004-air_core_reactors.pdf
12. Dünner, Rodrigo. Artículo filtros de armónicos en media tensión,
<http://www.nepsi.com/es/pthfb.htm>
13. Shaunghnessy, Tom. Artículo armónicos y filtros armónicas Power Quality. PowerCET, Santa Clara, C.A.2007.
<http://members.tripod.com/JaimeVp/Electricidad/FPyArmonicos.htm>
14. Orchard Concha, Marcos Eduardo. Sistema de control para un compensador trifásico de reactivos y balanceador de cargas contaminantes. Trabajo de graduación Ing. Electricista Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile.2001. 18-25 pp.
<http://www2.ing.puc.cl/power/paperspdf/dixon/tesis/Orchard.pdf>
15. Artículos instalación típica de un SVC. Nokian Capacitor SP-TH.2005.
www.nokiancapacitors.com 9-15 pp.
16. Programa de simulación de sistemas de potencia ASP
<http://www.giaelec.org/ASP/ASP-10barras.exe>
17. Boletín comisión federal de electricidad México características particulares de de reactores para colocar en derivación. 1-7 24-30 pp.

18. Dünner Rodrigo. Artículo reactores de núcleo de hierro contra núcleo de aire,
<http://www.nepsi.com/es/reactn.htm>

19. Article magnetic field of power plant air core reactor J. Morozionkov, J. A. Virbalis
http://www.ee.ktu.lt/journal/2007/7/16_ISSN_13921215_Magnetic%20Field%20of%20Power%20Plant%20Air%20Core%20Reactor.pdf

20. Hayt, William H. Teoría electromagnética. Quinta edición. Editorial McGraw-Hill.2003. 241-295 pp.

21. Calzolari, Graciela. Artenstein, Michel. Artículo estudio de la maniobra de apertura de un banco de reactores de media tensión para la red de Montevideo.
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/vol4issue3May2006/4TLA3_2Artenstein.pdf 1-4pp.

22. Barcon Santiago. Aplicación de reactores (INELAP)
<http://www.energizaonline.com/notas.ssp>

23. Dennison, Eric. Axial field of a finite solenoid Calculator for Off-Axis Fields Due to a Current Loop *Off-Axis Field Due to a Current Loop*, Off-Axis Axial Field of a Finite Solenoid <http://www.netdenizen.com/emagnet/index.htm>

24. Directrices de la ICNIRP directrices para limitar la exposición a los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos de tiempo variable,
<http://www.icnirp.com>

25. J. Beeteson. ViziMag 3.16 Tutorial <http://www.vizimag.com/>

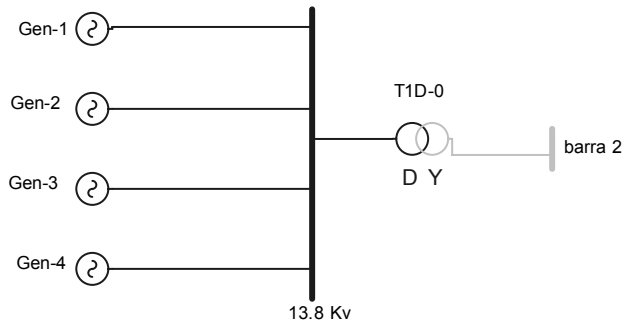
26. Stephen Jackson W. Method for magnetic field reduction using the decoupling effects of multiple coil systems. [http:// Patent 7061741.htm](http://Patent 7061741.htm)

27. Stephen ,A.Sebo Qin, Yu. Simplified Magnetic Field Modeling and Calculation of Large Air-Core Reactor Coils www.ieee.org

28. Aponte, Guillermo. Escobar, Adolfo. Evaluación del campo magnético al que están expuestos los trabajadores de subestaciones y circuitos energizados de las empresas de energía <http://www.epsa.com.co>

APÉNDICE 1

Ejemplo de cálculo de reactor para limitación de corriente realizado por método de impedancias



Sistema de potencia ejemplo cálculo numérico de reactor método de impedancias

En este ejemplo el cortocircuito se presenta en la barra 2

El primer cálculo se hará sin tomar en cuenta el reactor
datos del sistema

G - 1 10 Mva $Z_{G1} = 10\%$ $V = 13.8 \text{ Kv}$

G - 2 20 Mva $Z_{G2} = 15\%$ $V = 13.8 \text{ Kv}$

G - 3 15 Mva $Z_{G3} = 9\%$ $V = 13.8 \text{ Kv}$

G - 4 17 Mva $Z_{G4} = 10\%$ $V = 13.8 \text{ Kv}$

T - 1 D - Y 75 Mva $Z_{T1} = 7\%$ $V_1/V_2 = 13.8/69 \text{ Kv}$

R - 1 : 75Mva. $V = 69 \text{ Kv}$ $Z = 8\%$

$S_b = 75 \text{ Mva}$

$V_b = 69 \text{ Kv}$

$$I_{3\phi} = \frac{S_b \text{ en Kva}}{\sqrt{3} V_b \text{ en Kv}} = \frac{75000}{\sqrt{3} * 69} = 627.55 \text{ A}$$

se comienza el cálculo de cambio de base para los generadores

$$Z_{nb} = Z_d \left(\frac{KVd}{KVnb} \right)^2 \left(\frac{KVAnb}{KVAd} \right)$$

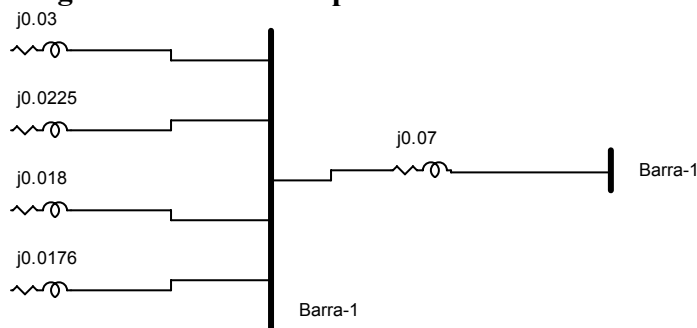
$$Z_{nb_{G1}} = 0.10 \left(\frac{13.8}{69} \right)^2 \left(\frac{75000}{10000} \right) = 0.03$$

$$Z_{nb_{G2}} = 0.15 \left(\frac{13.8}{69} \right)^2 \left(\frac{75000}{20000} \right) = 0.0225$$

$$Z_{nb_{G3}} = 0.09 \left(\frac{13.8}{69} \right)^2 \left(\frac{75000}{15000} \right) = 0.018$$

$$Z_{nb_{G1}} = 0.10 \left(\frac{13.8}{69} \right)^2 \left(\frac{75000}{17000} \right) = 0.0176$$

Diagrama de secuencia positiva



ejemplo cálculo numérico de reactor método de impedancias diagrama de secuencia positiva

Cálculo de Impedancia de cortocircuito.

Para el cálculo de la impedancia de corto circuito primero calcularemos la impedancia equivalente de la zona de generadores.

$$Z_{aregeneradores} = \frac{1}{\frac{1}{0.03} + \frac{1}{0.0225} + \frac{1}{0.018} + \frac{1}{0.0176}} = 0.00525$$

Para el transformador la Sbase y V base es el mismo por lo tanto se toma la impedancia como j0.07

El cálculo de Icc en sin tomar en cuenta el reactor en el punto a es

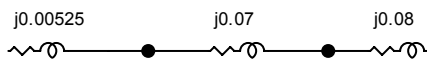
$$I_{ccpu} = \frac{1}{Z_{th}} = \frac{1}{0.00525 + 0.07} = 13.29 p.u$$

$$I_{cc} = I_{p.u} * I_{3\phi b} = 13.29 * 627.55 = 8340.13A$$

Ahora el cálculo se realiza tomando en cuenta un reactor con $Z = 8\%$ igual que con el transformador la potencia del reactor y el voltaje es el mismo que la potencia base y el voltaje base.

$$I_{ccpu} = \frac{1}{Z_{th}} = \frac{1}{0.00525 + 0.07 + 0.08} = 6.44 p.u$$

$$I_{cc} = I_{p.u} * I_{3\phi b} = 6.44 * 627.55 = 4041.42 A$$



ejemplo cálculo numérico de reactor método de impedancias diagrama de secuencia positiva simplificado

Podemos ver que al incluir un reactor en serie podemos reducir la corriente de corto circuito de un sistema.

Ejemplo de Calculo de reactor para limitación de corriente de corto circuito por computadora

En el siguiente ejemplo la simulación del programa ASP utiliza el cálculo de corto circuito trifásico según norma IEC 60909 anteriormente explicado. Donde se utiliza la matriz de impedancia de secuencia positiva según lo descrito en el apartado de cálculo de I_{cc} , según norma IEC.

Los datos del problema

G-1: 5Mva, 6.9 Kv, $Z=12\%$

G-2: 13 Mva, 6.9 Kv, $Z=14\%$

G-3: 6 Mva. 6.9 Kv, $Z=8\%$

T-1: 25Mva. 6.9/34.5 Kv $Z=10\%$

R-1: 25Mva. $Z=3\%$

Potencia base=25Mva

Voltaje base=34.5Kv

$$\text{Corriente base trifásica} = I_{3\phi} = \frac{KVAb}{\sqrt{3}KVb} = \frac{25000}{\sqrt{3}(34.5)}$$

En la primera simulación no se toma en cuenta el reactor por lo tanto arroja una corriente pico y de ruptura de cortocircuito muy alta.

MVA base: 25 KV base: 34.5 en la barra: Barra-2
CORTO CIRCUITO MÁXIMO

```

Corto circuito trifásico (en KA) en la barra Barra-2, N° 1
=====
Corriente subtransitoria Ik" = 1.970<-73.9°
  Corriente pico Ip = 3.992
  Corriente de ruptura Ib = 1.561
  Corriente de rég. estable Ik = 1.970

Perfiles de tensión en las barras para esta falla
=====
Barra      N°      KV      |      Barra      N°      KV
-----
Barra-2    1    0.000<0.0  |  Barra-1    2    1.705<-24.2
-----

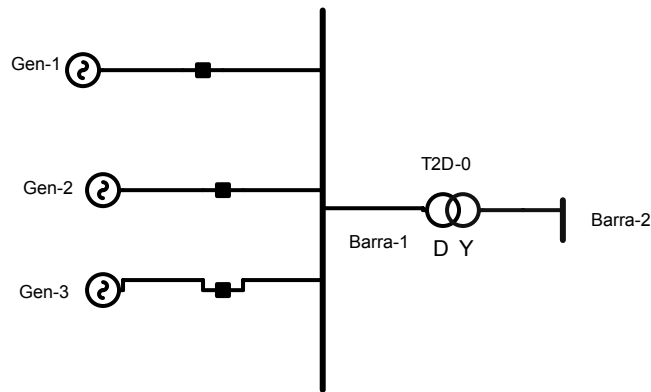
Contribuciones de corriente a la barra fallada (KA)
=====
Barra-1    1.970<-73.9
=====

```

```

VERIFICACIÓN DEL SISTEMA... 0.000 seg.
PREPARACIÓN DE DATOS...    0.000 seg.
CÁLCULO DEL CORTOCIRCUITO... 0.010 seg.

```



Simulación No. 1 sin el reactor

Segundo se realiza la simulación tomando en cuenta el reactor serie y arroja los siguientes resultados.

Autor:
MVA base: 25 KV base: 34.5 en la barra: Barra-2
CORTO CIRCUITO MÁXIMO

Corto circuito trifásico (en KA) en la barra Barra-2, N° 2

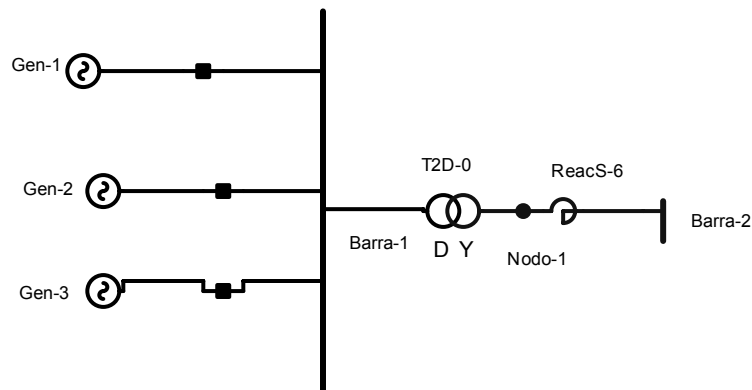
Corriente subtransitoria $I_k'' = 1.422 \angle -79.4^\circ$
Corriente pico $I_p = 3.175$
Corriente de ruptura $I_b = 1.257$
Corriente de rég. estable $I_k = 1.422$

Perfiles de tensión en las barras para esta falla

Barra	N°	KV	Barra	N°	KV
Nodo-10	1	5.514<10.6	Barra-1	3	2.216<-8.7
Barra-2	2	0.000<0.0			

Contribuciones de corriente a la barra fallada (KA)

=====



Simulación No. 2 incluyendo el reactor

Según lo anterior podemos observar que la corrientes de cortocircuito subtransitoria, pico, de ruptura y la corriente de régimen estable dan los siguientes valores.

Valores sin tomar en cuenta el reactor limitador

$I_k'' = 1.970 \text{ KA} = 1970$ $I_p = 3.992 \text{ KA} = 3992 \text{ A}$
 $I_b = 1.561 \text{ KA} = 1561 \text{ A}$ $I_k = 1.970 \text{ KA} = 1970 \text{ A}$

Valores tomando en cuenta el reactor limitador

$I_k'' = 1.422 \text{ KA} = 1422 \text{ A}$ $I_p = 3.175 \text{ KA} = 3175 \text{ A}$
 $I_b = 1.257 \text{ KA} = 1257 \text{ A}$ $I_k = 1.422 \text{ KA} = 1422 \text{ A}$

Como nos damos cuenta el reactor colocado en serie al sistema de potencia dependiendo del valor de impedancia puede reducir los valores de corto circuito y por ejemplo reduce la corriente de ruptura I_b que es la corriente que sirve para determinar el poder de corte de los interruptores automáticos en los sistemas de potencia.

En conclusión la reducción de corrientes de corto circuito se traduce en beneficios económicos y técnicos ya que reduce la capacidad requerida para los interruptores, los reactores se diseñan para obtener una caída de voltaje mínima, los reactores se colocan en lugares estratégicos para su mayor eficacia.

APÉNDICE 2

Ejemplos de cálculo

Características técnicas y eléctricas de línea área de 230 Kv.

Datos generales

1	Voltaje nominal de la red	230 Kv
2	Frecuencia	60 Hz.
3	Longitud de la línea	150 Km
4	Tipo de línea	Línea doble terna
5	Configuración de los conductores de fase	Cada circuito trifásico en triangulo Hawk 2* 477
6	Corriente nominal del conductor (según DIN 48204)	2*645 A.

Característica eléctrica

1	Resistencia total a 20° C	R =8.23 ohm/fase
2	40° C	8.85 ohm/fase
3	Reactancia inductiva total	$X_L = 49.32$ ohm/fase
4	Impedancia serie	$ Z = 50.00 \angle 80.50^\circ$
5	Capacitancia media de operación	$C=1.61 * 10^{-6}$
6	Impedancia característica	$Z = 286.38 \angle -4.4218$
7	Potencia natural	P=188MW
8	Corriente límite térmico T 80°C	792.2 A
9	Potencia a límite térmico	630 Mva

Cálculo de la máxima potencia reactiva inductiva de compensación para la línea

Considerando sin pérdidas.

Los cálculos que aquí se hacen se consideran para un solo circuito trifásico.

$$Q_E = P_n \frac{\cos \vartheta - \cos \delta}{\sin \vartheta}$$

Para esto primero calculamos antes el ángulo de línea.

$$\theta_L = \sqrt{B_C X_L} = \sqrt{(2\pi f C) * (X_L)} = \sqrt{2\pi 60(1.61 * 10^{-6})(49.32)} = 0.17301$$

En grados = 9.91°

En la ecuación (6-0), $\cos\delta$ se pone igual a uno porque en el caso extremo de carga mínima δ es cero.

$$Q_E = P_n \frac{\cos(9.91) - 1}{\text{sen}(9.91)} = -0.08669 * 188 = -16.30$$

$$Q_E = -16.30 \text{ Mvar}$$

El resultado indica que deben consumirse -16.11 Mvar a cada extremo de la línea para que esta conserve la característica de voltaje constante en ambos extremos.

Cálculo de la máxima potencia reactiva inductiva de compensación para las líneas tomando en cuenta las pérdidas.

La ecuación a utilizarse es la 6-4

$$Q_E = \frac{|V_S||V_R|}{|B|} \text{sen}(\beta - \delta) Q_{L_{\max}} - \frac{|A||V_R|^2}{|B|} \text{sen}(\alpha - \beta)$$

Antes de la aplicación de la fórmula se calculan por separado las variables que la forman. Se designaran aquí a la constante de fase y a la constante de atenuación como β_L y α_L respectivamente para no equivocarlas con los ángulos de los parámetros B y A que se designan como β y α respectivamente.

$$A = \cosh \gamma l \quad \text{y} \quad B = Z_C \text{senh} \gamma l$$

Y de la ecuación (A2-4) del apéndice 2:

$$\gamma = \sqrt{yz} = \alpha_L + j\beta_L$$

Por lo que

$$\gamma l = \sqrt{yz} = \sqrt{YZ}$$

$$= \sqrt{(2\pi 60)(1.61 * 10^{-6})(50.0)} \angle \frac{90 + 80.5}{2} = 0.1742 \angle 85.25^\circ$$

$$= 0.01442 + j0.1736$$

$$A = \cosh \gamma l = \cosh(\alpha_L - j\beta_L) = \cosh \alpha l \cdot \cos \beta l + j \sinh \alpha l \cdot \sin \beta l =$$

$$\cosh(0.01442) \cdot \cos(0.1736) + j \sinh(0.01442) \cdot \sin(0.1736)$$

$$= (1.0001) * (0.9849) + (0.01442) * (0.1727) = 0.9849984 + j0.002490 = 0.9850 \angle 0.1444^\circ$$

$$Z_c \sinh \gamma l = Z_c [\sinh \alpha_L l \cdot \cos \beta_L l + j \cosh \alpha_L l \cdot \sin \beta_L l]$$

$$= 286.36 \angle -4.4218 [(0.01442) * (0.9849) + j(1.0001) * (0.1727)]$$

$$= 286.36 \angle -4.4218 [0.01420 + j0.1727] = 0.1733 \angle 85.29^\circ$$

$$= 49.63 \angle 80.86^\circ$$

$$\text{Asumiendo que se requiere } |V_R| = |V_S| = 230 \text{ Kv}$$

$$(\beta - \delta)_{QLMAX} = \cos^{-1} \left[\frac{|A||V_R|}{|V_S|} \cos(\beta - \alpha) \right] = \cos^{-1} [0.9850 \cos(80.86 - 0.1444)] = 80.856^\circ$$

$$Q_E = \frac{|V_S||V_R|}{|B|} \sin(\beta - \delta)_{QLMAX} - \frac{|A||V_R|^2}{|B|} \sin(\beta - \alpha)$$

$$= \frac{230^2}{49.63} \sin(80.856) - \frac{0.9850(230)^2}{49.63} \sin(80.7156) = 1052.34 - 1036.1452 = 16.194 \text{ M var}$$

Cálculo del error al considerar la línea sin pérdidas

$$\%ERROR = \frac{Q_{E \text{ línea ideal}} - Q_{E \text{ línea real}}}{Q_{E \text{ línea real}}}$$

$$\%ERROR = \frac{16.30 - 16.194}{16.194} = 0.65\%$$

Si nos damos cuenta el error al considerar una línea sin pérdidas para el cálculo de máxima potencia reactiva inductiva de compensación no es significativo, por lo tanto para el cálculo de la potencia reactiva de compensación en condiciones de carga mínima basta con utilizar la ecuación de línea ideal.

Simulación de flujo de potencia de potencia para un sistema en ASP.

Datos del problema

```

ASP Versión 1.0 Marzo 2001
Reporte de datos del sistema de potencia
Archivo: C:\Documents and Settings\luia\Escritorio\escritorio 2007 octubre\ASP2.0 10 bases\Ejemplos\Flujo de carga\ejemplo.asp
Fecha: 27/06/2002 hora: 1:14:23
Titulo:
Autor:
MVA base: 100 KV base: 230 en la barra: Barra-0
-----

```

Datos de las Bases			
Nombre	N°	KV nom	KVbase
Barra-1	1	230.00	230.00
Barra-0	2	230.00	230.00

Total Bases: 2

Líneas de transmisión										
Nombre	Desde barra	Hasta barra	KVbase	L (km)	R1 pu	X1 pu	Y1 pu	R0 pu	X0 pu	Y0 pu
Línea-1	Barra-0	Barra-1	230.00	123.000	0.014183	0.086030	0.005049	0.000000	0.000000	0.000000
Línea-0	Barra-0	Barra-1	230.00	123.000	0.014183	0.086030	0.005049	0.000000	0.000000	0.000000

Total Líneas: 2

Cargas estáticas						
Nombre	a la barra	P MW	Q MVAR	KVbase	R pu	X pu
Carga-0	Barra-1	49.900	11.000	230.00	1.9111	0.4213

Total Cargas: 1

Compensadores capacitivos e inductivos					
Nombre	a la barra	Tipo	Q MVAR	KVbase	X1 pu
Reactor Shunt	Barra-1	Ind	30.000	230.00	3.33

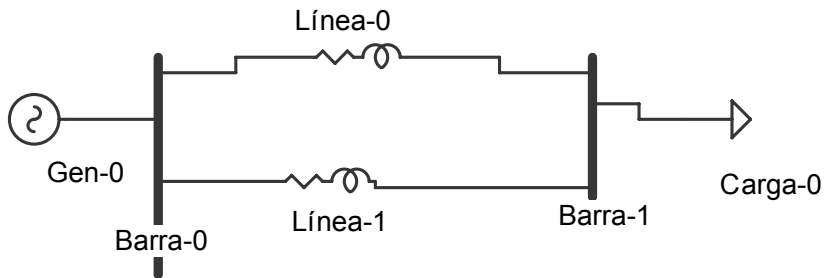
Total Compensadores: 1

Máquinas síncronas										
Nombre	a la barra	KV nom	MVA	KVbase	Rsin pu	Xsin pu	X' pu	X'' pu	R0 pu	X0 pu
Gen-0	Barra-0	230.00	53.850	230.00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	10000000	10000000

Total máquinas síncronas: 1

Primera simulación de flujo de potencia y voltaje sin reactor de compensación shunt de una línea a flujo básico de carga mínima.

Como podemos observar en esta simulación el voltaje en barra eslack es constante en $103.913\% = 239 \text{ Kv}$. la longitud de la línea es de 123 Km. y tenemos que la potencia reactiva consumida es 29.4 Mvar. y potencia real 50MW como podemos observar una línea cargada con un flujo de potencia mínimo presenta un sobrevoltaje en la barra de carga igual $102.35\% = 235.43 \text{ Kv}$. que representa un peligro para las cargas la solución de este problema se explica en la segunda simulación.



```

Fecha: 27/06/2002 hora: 1:18:27
Título:
Autor:
MVA base: 100 KV base: 230 en la barra: Barra-0
FLUJO DE CARGA
Precisión: 1E-3 en p.u. -> Error: 0.000 MW 0.000 MVAR
Resultado obtenido en 23 iteraciones

```

Datos de operación de las barras

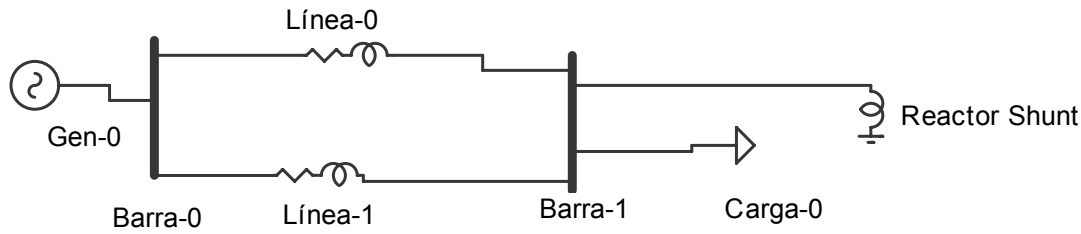
Nombre	N°	Tipo	Voltaje	grados	Estado	Pgen MW	Qgen MVAR	Pcarga	Qcarga
Barra-1	1	Carga	102.359	0.35	Normal	0.000	0.000	49.900	29.400
Barra-0	2	Slack	103.913	1.40	Normal	50.123	28.604	0.000	0.000
Totales =						50.123	28.604	49.900	29.400

Flujo a través de líneas, cables y transformadores

Barra A	Barra B	A->B		B->A		Inom amp	Carga	Pérdidas	
		P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR			MW	MVAR
Barra-0	Barra-1	25.1	14.3	-25.0	-14.7	88.4	794	0.11	-0.40
Barra-0	Barra-1	25.1	14.3	-25.0	-14.7	88.4	794	0.11	-0.40

Total pérdidas = 0.223 MW -0.796 MVAR

Segunda simulación de flujo de potencia y voltaje con reactor de compensación shunt
 En esta simulación se agrega un compensador shunt de 30 Mvar e la carga reactiva es de 30 Mvar también en el voltaje de carga lo reduce de 102.35 % hasta 101.037%=232.32 Kv. Debido a que el reactor colocado en paralelo esta consumiendo una parte de la potencia reactiva creada por las propias líneas de transmisión y esto provoca que el sistema se compense a casi su potencia natural donde hay menos perdidas y mejores condiciones de transmisión.



Fecha: 26/12/2007 hora: 13:38:24
 Título:
 Autor:
 MVA base: 100 KV base: 230 en la barra: Barra-0
 FLUJO DE CARGA
 Precisión: 1E-9 en p.u. —> Error: 0.000 MW 0.000 MVAR
 Resultado obtenido en 23 iteraciones

Datos de operación de las barras

Nombre	N°	Tipo	Voltaje %	grados	Estado	Pgen MW	Qgen MVAR	Pcarga	Qcarga
Barra-1	1	Carga	101.037	0.46	Normal	0.000	0.000	49.900	60.025
Barra-0	2	Slack	103.913	1.40	Normal	50.315	60.420	0.000	0.000
Totales =						50.315	60.420	49.900	60.025

Flujo a través de líneas, cables y transformadores

Barra A	Barra B	A→B		B→A		Inom Amp	Carga	Pérdidas	
		P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR			MW	MVAR
Barra-0	Barra-1	25.2	30.2	-24.9	-30.0	88.4	107%	0.21	0.20
Barra-0	Barra-1	25.2	30.2	-24.9	-30.0	88.4	107%	0.21	0.20

Total pérdidas = 0.415 MW 0.394 MVAR

En conclusión podemos observar en las simulaciones realizadas en Asp. el flujo de potencia al agregar un reactor shunt en el sistema se puede reducir el sobrevoltaje que se presenta por la capacitancia de una línea muy larga manteniéndolo en un porcentaje que no presente riesgo para la carga o las mismas líneas.

Además Asp. permite colocar un reactor de compensación automática en este caso para mantener el voltaje del extremo de recibo en 230 v y según la simulación se necesita un reactor compensador de 54.074 MVar para mantener el voltaje en este nivel.

A continuación presentamos la simulación:

Datos del sistema

```

=====
Nombre      Desde barra  Hasta barra  KVbase  L(km)  Rl pu  Xl pu  Yl pu  Ro pu  Xo pu  Yo pu
-----
Línea-1     Barra-0      Barra-1      230.00  123.000  0.014183  0.086030  0.005049  0.000000  0.000000  0.000000
Línea-0     Barra-0      Barra-1      230.00  123.000  0.014183  0.086030  0.005049  0.000000  0.000000  0.000000
=====

```

Total Líneas: 2

Cargas estáticas

```

=====
Nombre      a la Barra  P MW  Q MVAR  KVbase  R pu  X pu
-----
Carga-0     Barra-1      49.900  29.400  230.00  1.4876  0.8765
=====

```

Total Cargas: 1

Compensadores capacitivos e inductivos

```

=====
Nombre      a la barra  Tipo  Q MVAR  KVbase  Xl pu
-----
Reactor Shunt  Barra-1      Ind  54.000  230.00  1.85
=====

```

Total Compensadores: 1

Máquinas sincrónicas

```

=====
Nombre      a la barra  KV nom  MVA  KVbase  Rsin pu  Xsin pu  X' pu  X''pu  Ro pu  Xo pu
-----
Gen-0       Barra-0      230.00  53.850  230.00  0.000000  0.000000  0.000000  0.000000  10000000  10000000
=====

```

Total máquinas sincrónicas: 1

Simulación del sistema

```

-----
Fecha: 20/01/2008  hora: 20:48:17
Título:
Autor:
MVA base: 100  KV base: 230  en la barra: Barra-0
FLUJO DE CARGA
Precisión: 1E-9 en p.u.  -> Error:  0.000 MW  0.000 MVAR
Resultado obtenido en 24 iteraciones

```

Datos de operación de las barras

Nombre	N°	Tipo	Voltaje %	grados	Estado	Pgen MW	Qgen MVAR	Pcarga	Qcarga
Barra-1	1	Carga	100.003	0.54	Normal	0.000	0.000	49.900	83.404
Barra-0	2	Slack	103.913	1.40	Normal	50.558	85.294	0.000	0.000
Totales =						50.558	85.294	49.900	83.404

Flujo a través de líneas, cables y transformadores

Barra A	Barra B	A->B		B->A		Inom Amp	Carga	Pérdidas	
		P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR			MW	MVAR
Barra-0	Barra-1	25.3	42.6	-25.0	-41.7	88.4	135%	0.33	0.95
Barra-0	Barra-1	25.3	42.6	-25.0	-41.7	88.4	135%	0.33	0.95

Total pérdidas = 0.658 MW 1.891 MVAR

Como podemos observar el voltaje en la barra de carga es igual al 100.003% =230 Kv el voltaje nominal del sistema, para mantener en la barra de carga ese voltaje se necesita un reactor compensador de 54.074 MVar

APÉNDICE 3

Ejemplo de reactancia de balance para acoplamiento de transformadores.

Supóngase que se quiere alimentar una carga de 30 Mvar a 13.2Kv con un factor de potencia de 0.85 por medio de un arreglo paralelo de dos transformadores T1 y T2 los siguientes valores

T1= 15 Mva, 69/13.2 Kv, 60hz, Z=4%

T2= 25 Mva 69/13.2 kv, 60hz, Z=7%

El consumo de la carga I_c , será:

$$I_c = \frac{Kva}{\sqrt{3} * Kv * fp} = \frac{30 * 10^3}{1.73 * 13.2 * 0.8} = 1642.14 Amp$$

La corriente nominal I_n de cada transformador será:

$$I_n = \frac{Kva}{\sqrt{3} Kv}$$

$$I_{n1} = \frac{15 * 10^3}{1.73 * 13.2} = 656.86 Amp$$

$$I_{n2} = \frac{25 * 10^3}{1.73 * 13.2} = 1094.76 Amp$$

La corriente que circula por cada transformador, en función de la corriente de carga, será I_{c1} y I_{c2} los valores se obtienen de la siguiente relación.

$$I_{c1} = \frac{\frac{Kva_1}{Z_1 I_1}}{\frac{Kva_1}{Z_1 I_1} + \frac{Kva_2}{Z_2 I_2}} * I_c$$

En donde suponiendo que la caída de potencial indicada por $Z_1 * I_1$ y $Z_2 * I_2$ o caída de voltaje por impedancia, sea el por ciento de impedancia, tendremos:

$$Z_1 I_1 = 0.04 \text{ y } Z_2 I_2 = 0.07$$

Siendo que

$$Kva_1 = 15, Kva_2 = 25, I_c = 1642.14 \text{ Amp}$$

Los valores de I_{c1} y I_{c2} serán

$$I_{c1} = \frac{375}{375 + 357.14} * 1642.14 = 841.1 \text{ Amp}$$

$$I_{c2} = \frac{357.14}{375 + 357.14} * 1642.14 = 801.04$$

Se observa que $I_{c1} + I_{c2} = I_c$

Comparando los valores obtenidos de I_n E I_c , para cada transformador se determina el porcentaje de corriente bajo la cual esta operando cada transformador para el consumo de la carga.

$$I\% = \frac{I_c}{I_n} * 100$$

$$I_1\% = \frac{I_{c1}}{I_{n1}} * 100 = \frac{841.10}{656.86} * 100 = 128.05\%$$

$$I_2\% = \frac{I_{c2}}{I_{n2}} * 100 = \frac{801.04}{1094.76} * 100 = 73.17\%$$

Se observa que e transformador T1 esta sobrecargado en 28.055 que se comprueba por:

$$\text{Sobrecarga \%} = \frac{I_{c1} - I_{n1}}{IN1} * 100$$

Se trata de disminuir en 28.05% la carga del transformador T1 según esta nueva condición, sería:

$$\text{sobrecarga\%} = \frac{I_{c1} - I_{n1}}{IN1} * 100$$

Se trata de disminuir en 28.05% la carga del transformador T1, así:

$$28.05\% \text{ de } I_{c1} = 0.2805 * 841.1 = 235.93 \text{ Amp}$$

La corriente bajo la cual operaría el transformador T1, según esta nueva condición, sería:

$$I_{c1} = 841.1 - 235.93 = 605.17 \text{ Amp}$$

Se observa que siendo $I_{n1} = 656.86 \text{ Amp}$ se tiene

$$I_{c1}' \leq I_{n1}$$

Por lo que la corriente I_{c1}' estará dentro de los límites normales de operación del transformador T1

El valor de la impedancia Z_1' a la que estaría operando el ramal del circuito paralelo que considera al transformador T1 para que por ella circule la corriente I_{c1}' calculada.

$$Z_1' = Z_1 + Z_R$$

Siendo Z_R = impedancia adicional

El ramal del transformador T2 no se modifico, por lo que $Z_2\% = 70$ y $Z_2 I_2 = 0.07 = 7\%$.

La nueva impedancia para el ramal del transformador T1, será Z_1' y esta dada por $Z_1'\% = Z_1' \cdot I_{c1}'$.

$$Z_1'\% = \frac{Mva_1}{Mva_2} \cdot \frac{(I_c - I_{c1}')}{I_{c1}'} \cdot Z_2' \cdot I_{c2}$$

En donde

$$Z_2' \cdot I_{c2}' = 7\%$$

$$I_c = 1542.14 \text{ Amp}$$

$$I_{c1}' = 605.17 \text{ Amp}$$

$$Mva_1 = 15$$

$$Mva_2 = 25$$

Operando obtenemos

$$Z_1'\% = 7.2\%$$

siendo que

$$Z_1'\% = Z_1\% + Z_R\%$$

el valor de la impedancia adicional sera

$$Z_R\% = Z_1'\% - Z_1\%$$

$$Z_R\% = (7.2 - 4)\%$$

de donde la reactancia que debe agregarse es :

$$Z_R = 3.2\%$$

Se procede luego a determinar las condiciones finales de operación de los transformadores, cuando el transformador T1 fue compensado para trabajar de su rango nominal así:

- 1) La corriente en la rama del transformador T1 se calcula utilizando el valor de la impedancia prevista para esa rama. Que es $Z'_1 = 7.2\%$ la impedancia en la rama del transformador T2 continua siendo $Z_2 = 7\%$.

Corriente de carga $I_c: 1642.14 \text{ Amp}$.

Corriente en la rama de T1

$$I'_{c1} = \frac{\frac{15}{0.072}}{\frac{15}{0.072} + \frac{25}{0.07}} * 1642.14 = 604.99 \text{ Amp}$$

Corriente en la rama de T1

$$I'_{c2} = \frac{\frac{25}{0.07}}{\frac{15}{0.072} + \frac{25}{0.07}} * 1642.14 = 1037.14 \text{ Amp}$$

Comparando estos valores obtenidos, con los valores nominales de cada transformador, tenemos.

$$(I'_{c1} = 604.99 \text{ Amp}) < (I_{n1} = 656.86 \text{ Amp})$$

$$(I'_{c2} = 1037.14 \text{ Amp}) < (I_{n2} = 1094.76 \text{ Amp})$$

Por lo que al agregar una bobina de balance con una impedancia de $Z_R = 3.2\%$ en el ramal del transformador sobre cargado T1.

Los dos transformadores estarán trabajando dentro de su rango nominal de corrientes.

- 2) Si por cualquier razón no se puede lograr este balance se recomienda separar los circuitos de la carga, de manera que cada transformador trabaje independientemente.

APÉNDICE 4

Ejemplo de modelamiento de distancias magnéticas para reactores con núcleo de aire

Los datos siguientes son los datos del reactor modelo que se tomó para realizar los ejemplos de cálculo de distancias magnéticas para reactores con núcleo de aire y bancos trifásicos de reactores.

Descripción	Datos
radio exterior	0,8m
radio interior	0,5m
diámetro del conductor	0,024 m
capas	6
vueltas por capa	13
alto de reactor	0,66 m
corriente nominal	250 A
voltaje	4160 V
reactancia	1,16E+00 ohmios
inductancia	3,06E-03 henrios

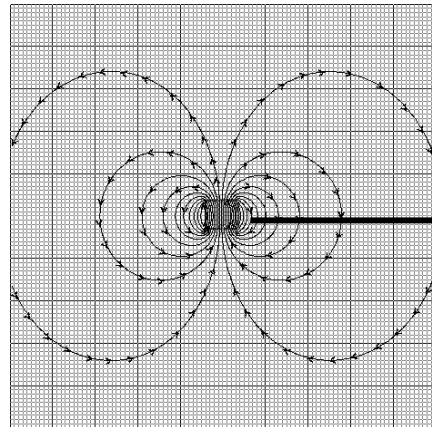
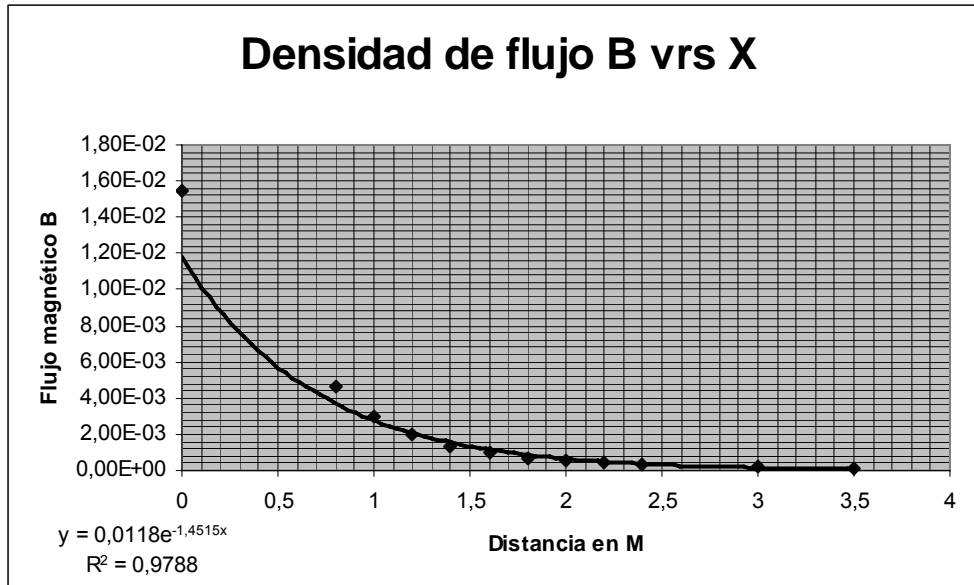


Tabla que presenta los datos de flujo de campo magnético B en el eje horizontal del reactor en una distancia de 3.5 m modelando el flujo de campo magnético en eje horizontal.

X m	Y m	Bo teslas	B teslas	Bx teslas	By teslas
0	0	1,54E-02	1,54E-02	1,54E-02	0,00E+00
0,8	0,25	1,54E-02	4,60E-03	4,14E-03	1,30E-03
1	0,25	1,54E-02	2,96E-03	2,85E-03	7,88E-04
1,2	0,25	1,54E-02	1,97E-03	1,91E-03	4,82E-04
1,4	0,25	1,54E-02	1,36E-03	1,32E-03	3,03E-04
1,6	0,25	1,54E-02	9,65E-04	9,45E-04	1,97E-04
1,8	0,25	1,54E-02	7,08E-04	6,95E-04	1,32E-04
2	0,25	1,54E-02	5,32E-04	5,25E-04	9,14E-05
2,2	0,25	1,54E-02	4,10E-04	4,04E-04	6,49E-05
2,4	0,25	1,54E-02	3,21E-04	3,18E-04	4,72E-05
3	0,25	1,54E-02	1,70E-04	1,69E-04	2,05E-05
3,5	0,25	1,54E-02	1,09E-04	1,09E-04	1,14E-05

A continuación se presenta un gráfico de la tabla anterior mostrando los puntos evaluados del flujo de campo magnético. Y se presenta una ecuación modelo del comportamiento de flujo magnético alrededor del reactor



Como podemos observar el modelo es de tipo exponencial para la distribución de campo magnético en el reactor. Para el análisis de los resultados se decidió tomar como referencia las recomendaciones del ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), por ser esta una organización científica independiente reconocida en el ámbito mundial y porque los valores establecidos son los menores.

$$4167.7 \mu T = \text{ocupacional}$$

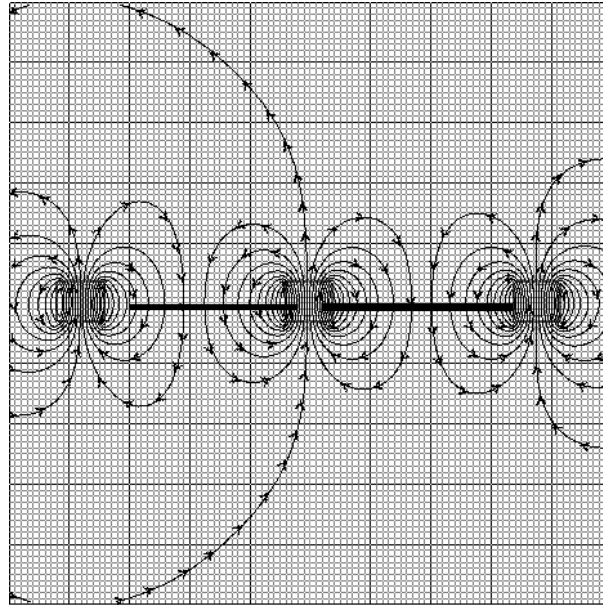
$$833 \mu T = \text{Publico}$$

Como podemos observar según los parámetros que tomamos como estándar a la distancia que este reactor genera un flujo magnético menor del establecido para público es de 1,8 m y para ocupacional a 1 m a igual que para elementos magnéticos la ecuación que modela el flujo magnético alrededor del reactor es $B = 0,0158e^{-1,700x}$ con un 97 % de confianza con el flujo expresado en teslas y la distancia en metros, podemos definir que la distancia magnética para cada reactor depende del modelo que expresa la distribución de flujo magnético vrs la distancia.

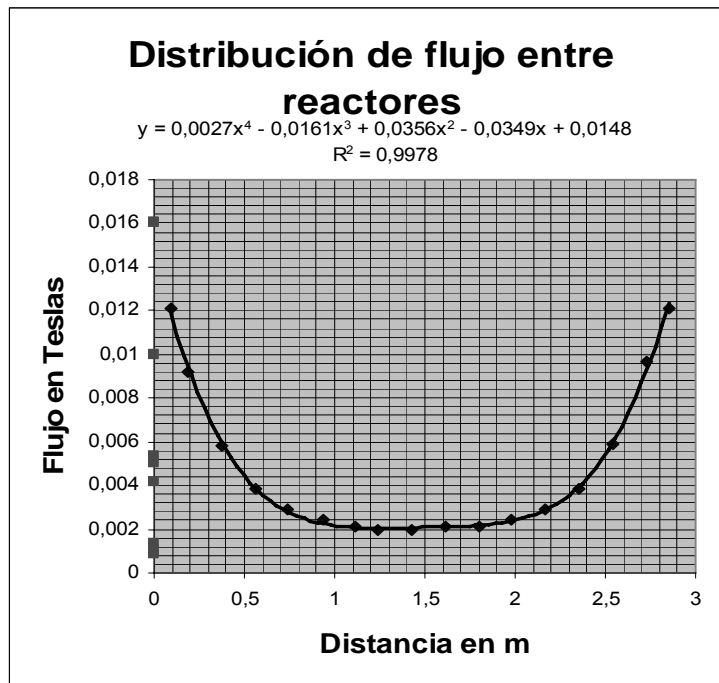
Para un banco de reactores trifásicos colocados en forma horizontal

Tabla que presenta los datos de flujo de campo magnético B en el eje horizontal entre los reactores en una distancia de 3m modelando el flujo de campo magnético en eje horizontal

Distancia en m	Flujo B en teslas
0,093	0,012132
0,186	9,23E-03
0,372	5,83E-03
0,558	3,89E-03
0,744	2,92E-03
0,94	2,43E-03
1,116	2,11E-03
1,24	1,94E-03
1,426	2,00E-03
1,61	2,10E-03
1,798	2,15E-03
1,98	2,42E-03
2,17	2,91E-03
2,356	3,89E-03
2,542	5,86E-03
2,73	9,69E-03
2,85	1,21E-02



A continuación se presenta un gráfico de la tabla anterior mostrando los puntos evaluados del flujo de campo magnético y se presenta una ecuación modelo del comportamiento de flujo magnético en el eje horizontal entre dos reactores con características iguales como en el ejemplo anterior.



Como podemos observar según los parámetros que tomamos como estándar a la distancia entre reactores desde 0,5 m a 2,5 m el flujo magnético es menor del establecido para ocupacional igual que para elementos magnéticos la ecuación que modela el flujo magnético alrededor del reactor es $B = 0,0027x^4 - 0,0161x^3 - 0,0349x + 0,0148$ con un 99.7 % de confianza con el flujo expresado en teslas y la distancia en metros, la recomendación que se establece para este caso es que no se pueden colocar entre los reactores elementos magnéticos que puedan provocar un bucle cerrado.

Para un banco de reactores trifásicos colocados en forma vertical

Tablas que presenta los datos de flujo de campo magnético B en el eje vertical entre los reactores colocados en forma vertical en una distancia de 5 m modelando el flujo de campo magnético en eje vertical a 0,30 m de los reactores e igual 0,60 m.

Distancia X m	Flujo B teslas
0	6,18E-04
0,2	7,90E-04
0,4	1,30E-03
0,6	2,00E-03
0,8	2,28E-03
1	3,00E-03
1,2	4,20E-03
1,4	5,30E-03
1,62	7,37E-03
1,8	7,80E-03
2	9,20E-03
2,2	1,00E-02
2,4	9,10E-03
2,6	8,84E-03
2,866	8,58E-03
3,08	9,04E-03
3,35	9,90E-03
3,48	8,88E-03
3,67	7,63E-03
3,8	5,37E-03
4	3,68E-03
4,2	2,28E-03
4,4	1,70E-03
4,6	1,30E-03
4,8	8,32E-04
5	8,36E-04

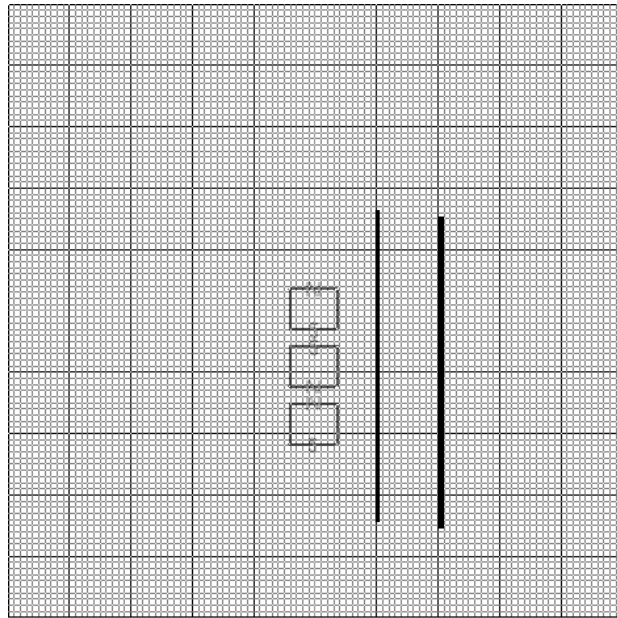
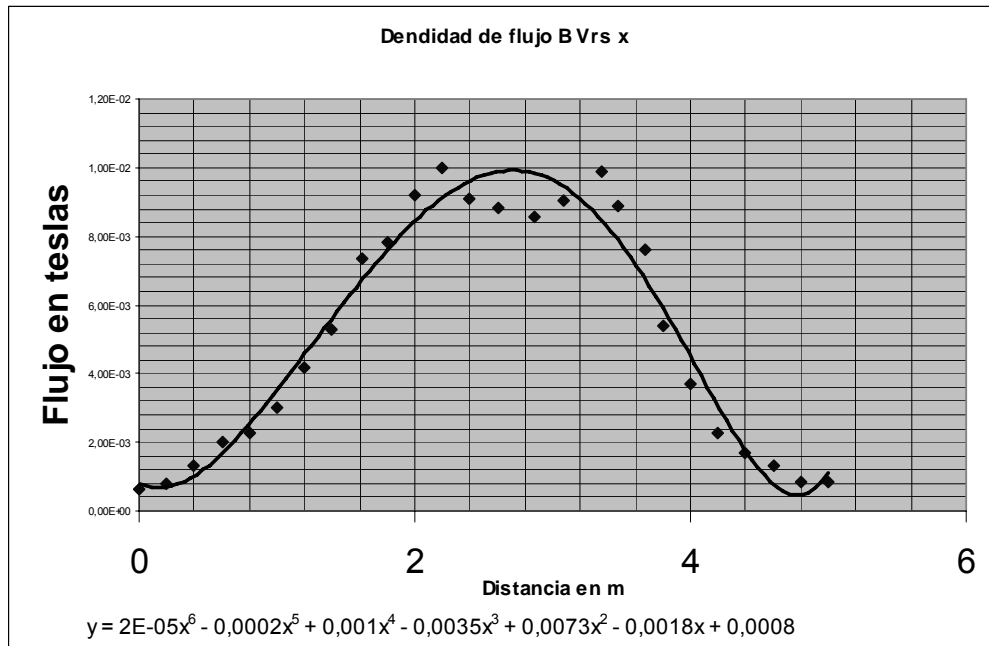


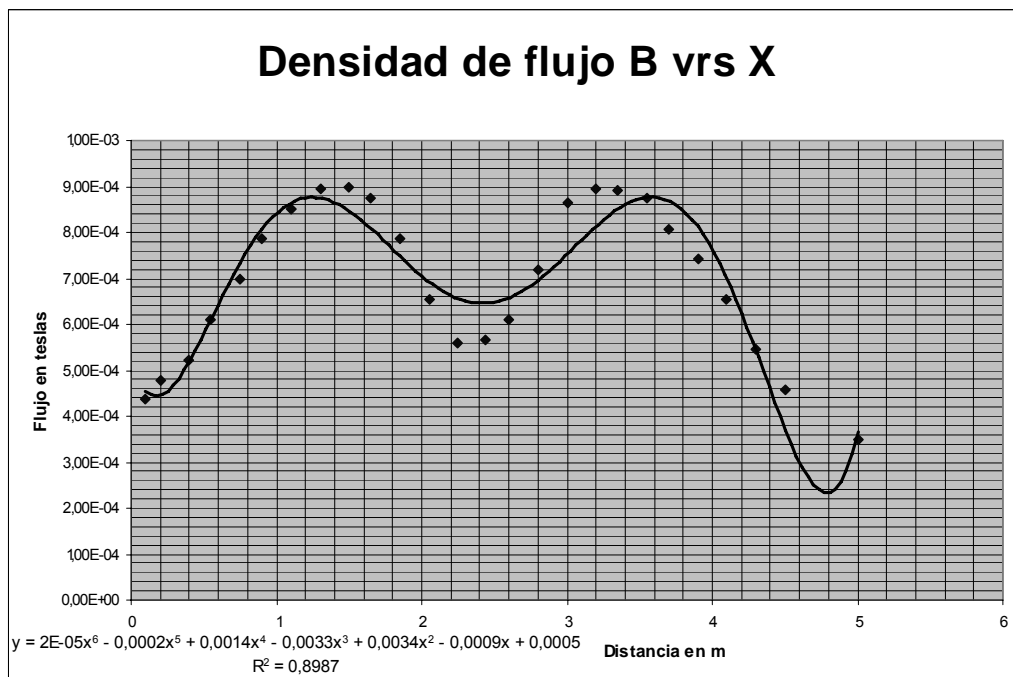
Tabla de valores de flujo magnético para la primera línea

Distancia X m	Flujo B teslas
0,1	4,36E-04
0,2	4,80E-04
0,4	5,23E-04
0,55	6,10E-04
0,75	6,98E-04
0,9	7,85E-04
1,1	8,50E-04
1,3	8,94E-04
1,5	8,99E-04
1,65	8,73E-04
1,85	7,85E-04
2,05	6,54E-04
2,25	5,60E-04
2,44	5,67E-04
2,6	6,10E-04
2,8	7,19E-04
3	8,65E-04
3,2	8,94E-04
3,35	8,90E-04
3,55	8,73E-04
3,7	8,08E-04
3,9	7,42E-04
4,1	6,54E-04
4,3	5,45E-04
4,5	4,58E-04
5	3,49E-04

A continuación se presenta un gráfico de la tabla anterior mostrando los puntos evaluados del flujo de campo magnético. Y se presenta una ecuación modelo del comportamiento de flujo magnético en el eje vertical entre el banco de reactores con características iguales como en el ejemplo anterior.



$$B = 2e - 5x^6 - 0,0002x^5 + 0,001x^4 - 0,0035x^3 + 0,0073x^2 - 0,0018x + 0,0008$$



$$B = 2e - 5x^6 - 0,0002x^5 + 0,0014x^4 - 0,0033x^3 + 0,0034x^2 - 0,0009x + 0,0005$$

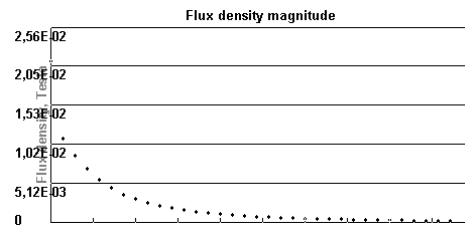
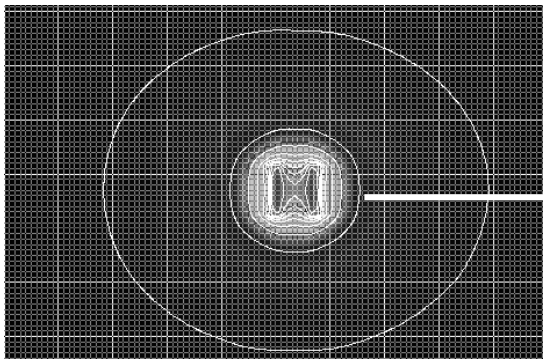
$$R2 = 0,8987$$

Como podemos observar según los parámetros que tomamos como estándar a la distancia de 0,30 m desde el banco de reactores el flujo magnético no es menor en ningún punto de la línea del valor establecido para el público y del establecido para ocupacional igual que para elementos magnéticos solo los valores de los extremos son menores al estándar, las distancias para este banco de reactores se debe de establecer de acuerdo a los valores dados por la función modelo, las ecuación que modela el flujo magnético en una línea vertical a una distancia de 0,30 m es $B = 2e - 5x^6 - 0,0002x^5 + 0,001x^4 - 0,0035x^3 + 0,0073x^2 - 0,0018x + 0,0008$ y para 0,60m es $B = 2e - 5x^6 - 0,0002x^5 + 0,0014x^4 - 0,0033x^3 + 0,0034x^2 - 0,0009x + 0,0005$ con un 89.87% de confianza con el flujo expresado en teslas y la distancia en metros.

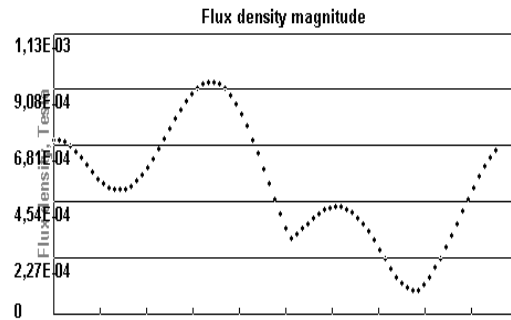
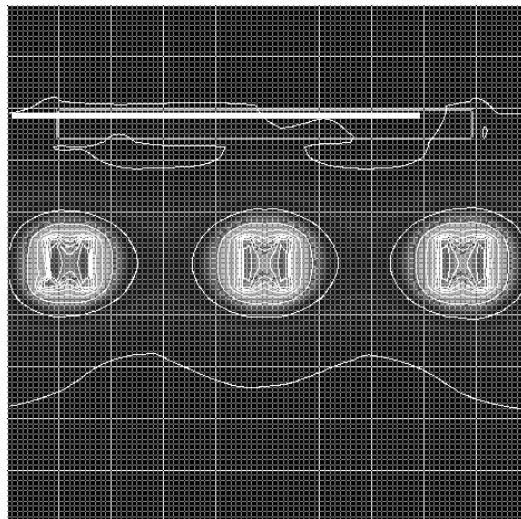
APÉNDICE 5

Modelamiento campo magnético para banco de reactores con elementos magnéticos cercanos.

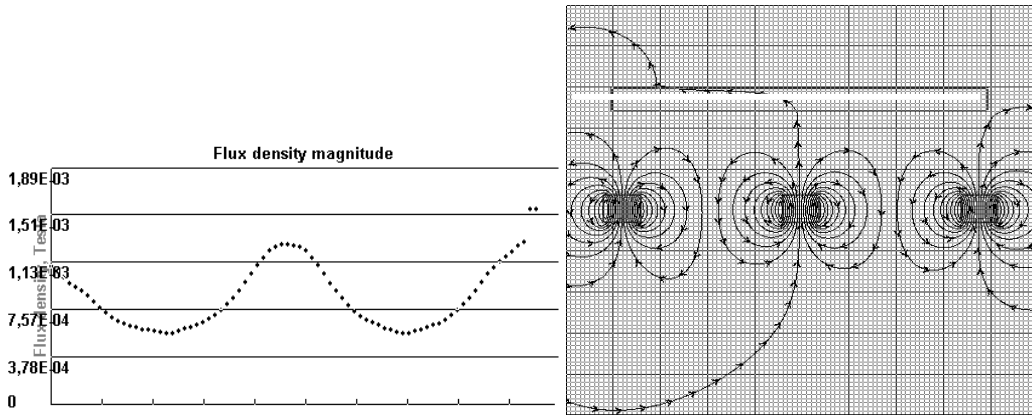
En las siguientes figuras las líneas de color blanco es la línea sobre la cual se gráfico los puntos de flujo magnético para los elementos magnéticos y la gráfica puesta a la par es la gráfica característica del comportamiento de la distribución en cada elemento.



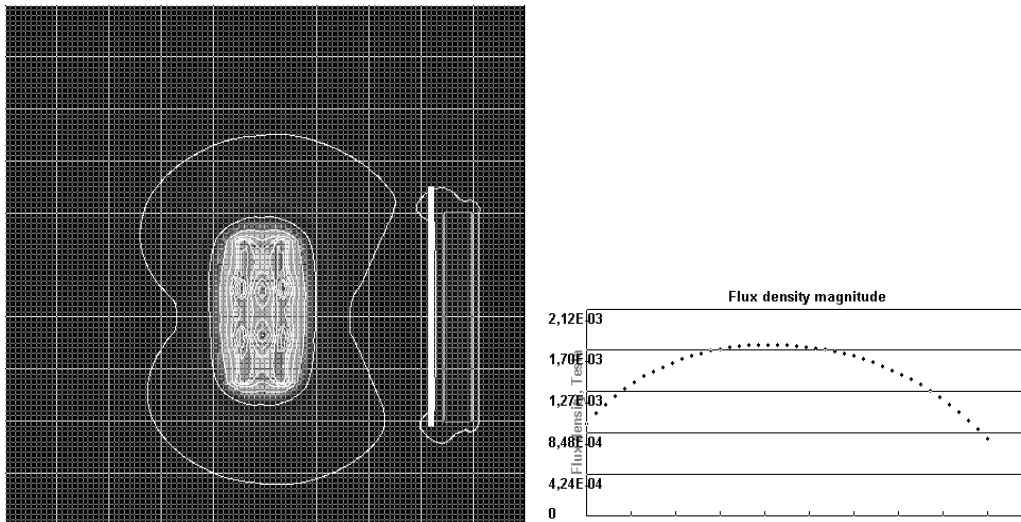
La gráfica muestra el comportamiento del flujo de campo magnético en el eje horizontal de un reactor de núcleo de aire. .



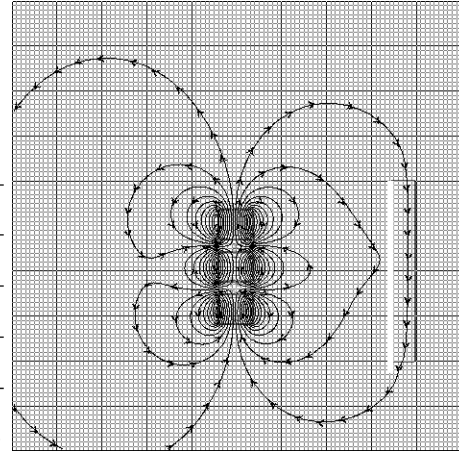
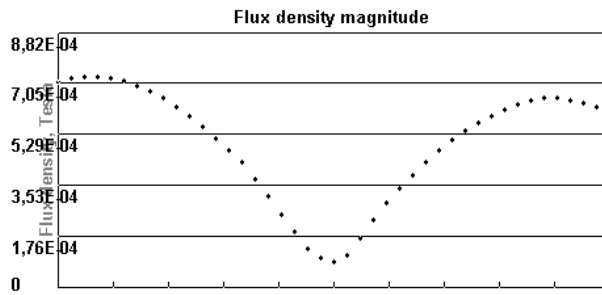
La gráfica muestra el comportamiento del flujo de campo magnético en el eje horizontal sobre un elemento magnético colocado en parte superior del arreglo de banco de reactores de núcleo de aire. .



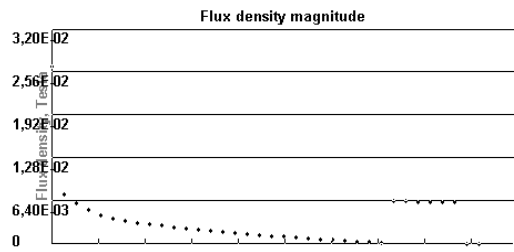
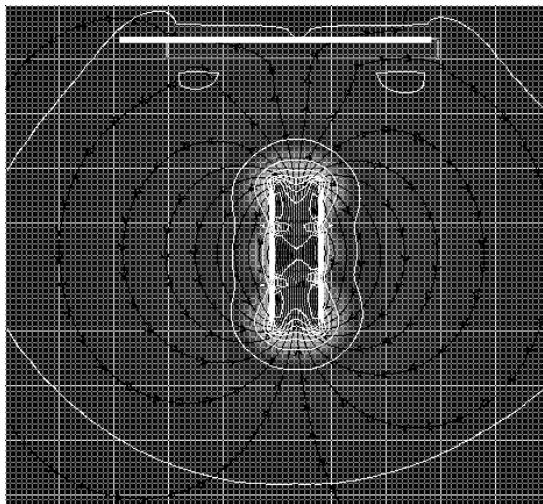
La gráfica muestra el comportamiento del flujo de de campo magnético en el eje horizontal entre la parte superior de los reactores y la parte inferior del elemento magnético del arreglo de banco de reactores de núcleo de aire.



La gráfica muestra el comportamiento del flujo de de campo magnético en el eje vertical sobre un elemento magnético colocado a la par del arreglo de banco de reactores de núcleo de aire.



La gráfica muestra el comportamiento del flujo de de campo magnético en el eje vertical entre el banco de reactores y un elemento magnético colocado a la par del arreglo de banco de reactores de núcleo de aire.



La gráfica muestra el comportamiento del flujo de de campo magnético en el eje horizontal sobre un elemento magnético colocado en parte superior del arreglo de banco de reactores de núcleo de aire

