

TUES
1504
P438s
1995
E7.2

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



TRABAJO DE GRADUACION:

**“SIMULACION BASADA EN COMPUTADORES
PERSONALES, PARA EL ANALISIS TRANSITORIO Y
ARMONICO EN SISTEMAS DE POTENCIA”**

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:

CARLOS RENE PEREZ RAMOS
FRANCISCO ROMERO JOVEL

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA



15101358
15101358

JULIO DE 1995.

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRO AMERICA.

Rec. 17 Julio de 1995

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

DR. BENJAMIN LÓPEZ GUILLEN

SECRETARIO GENERAL:

LIC. ENNIO LUNA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. JOAQUIN ALBERTO VANEGAS AGUILAR

SECRETARIO:

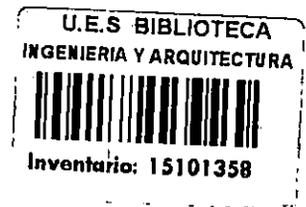
ING. JOSÉ RIGOBERTO MURILLO CAMPOS

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. SALVADOR DE JESÚS GERMAN





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título: **“SIMULACIÓN BASADA EN COMPUTADORES PERSONALES, PARA
EL ANÁLISIS TRANSITORIO Y ARMONICO EN
SISTEMAS DE POTENCIA”**

Presentado por: Carlos René Pérez Ramos

Francisco Romero Jovel

Trabajo de Graduación aprobado por:

Coordinador y Asesor: Ing. José Roberto Ramos



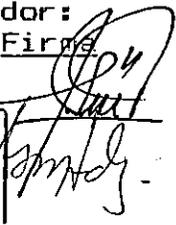
San Salvador, Julio de 1995

ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

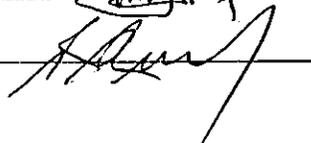
En esta fecha, 7 de Julio de 1995, en el local de Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica a las 10:00 horas, con la presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

- 1- Inq. Salvador de J. German
Director
- 2- Inq. Gerardo Marvín Jorge Hernández
Secretario

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
FACULTAD DE INGENIERIA
Y ARQUITECTURA
Universidad de El Salvador

Firma


Y con el Honorable Jurado de evaluación integrado por las personas siguientes:

- 1- Inq. José Mauricio Quiñónez 
- 2- Inq. José Roberto Ramos 

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

"SIMULACION BASADA EN COMPUTADORES PERSONALES, PARA EL ANALISIS TRANSITORIO Y ARMONICO EN SISTEMAS DE POTENCIA".

A cargo de los Bres.:

Carlos René Pérez Ramos

Francisco Romero Jovel

Habiendo obtenido el presente trabajo una nota final, global de 9.0

(Nueve punto cero — — —)

AGRADECIMIENTOS

A Dios por todo.

A mi familia, por su apoyo constante.

A mi novia, por su comprensión.

A mis amigos, por su ayuda.

A mis profesores, por su enseñanza.

A el personal de la EIE, por su colaboración.

Gracias por contribuir por este logro.

Carlos.

AGRADECIMIENTOS.

A Dios, por prestarme vida

A La Virgen María Auxiliadora

A mi madre, por todo el apoyo que me ha brindado

A mi padre, por sus consejos

A mi esposa, por todo el apoyo y comprensión

A mis hermanos, por su colaboración

A mis maestros, por compartir sus conocimientos

A mis compañeros de la EIE, por su ayuda

A todos mis amigos

Gracias, sin todos ustedes no hubiera logrado esta meta.

Francisco.

DEDICATORIA.

Dedico este trabajo a mi madre,
a mi esposa Norma
y mi futuro hijo Klaus.

Francisco Romero.

PREFACIO

Durante los últimos años se ha consolidado el uso de herramientas de simulación basadas en PC para el análisis transitorio y análisis armónico en sistemas de potencia. Esta área de investigación conocida tradicionalmente como Compatibilidad Electromagnética ha tomado cuerpo propio en el análisis de sistemas de potencia. El análisis y solución de los problemas atribuibles a fenómenos electromagnéticos conducidos en sistemas de potencia es una especialidad conocida como Power Quality en el ambiente IEEE.

Los fenómenos electromagnéticos conducidos en sistemas de potencia tienen repercusiones económicas no despreciables para los usuarios finales de la energía eléctrica. En EE.UU. se estima que el costo del Power Quality oscila entre el 1.5% y el 3% de las ventas para el sector manufacturero. En nuestra región estos costos aún no han sido evaluados, pero sin duda existen.

Los fenómenos que provocan más problemas a los usuarios de energía eléctrica son normalmente los transitorios de voltaje, las disminuciones de corta duración (sags en la terminología IEEE), y los armónicos. El análisis y solución de los problemas asociados requiere usualmente de una inspección con instrumentación dedicada y trabajo de análisis (también simulación) basado en los datos de la inspección y en los modelos del sistema. Este proyecto tiene por objeto iniciar una línea de investigación en el análisis y simulación de fenómenos electromagnéticos conducidos en sistemas de potencia aplicando la versión PC de EMTP conocida como ATP (Alternative Transient Program).

En este documento se estudia el funcionamiento de dispositivos y subsistemas de acondicionamiento de potencia empleados comúnmente como solución contra fenómenos EM conducidos. Entre estas soluciones podemos mencionar: Apartarrays (Arresters), Compensadores Estáticos de VAR's (SVC), Chokes de Línea, Filtros Armónicos, etc. Para propósitos de análisis y simulación se empleara principalmente ATP; pero también PSPICE.

RESUMEN

En términos generales, el contenido de este documento es el resultado de la investigación realizada sobre algunos de los elementos de uso común en los sistemas de eléctricos para el acondicionamiento de potencia; así como las simulaciones necesarias para comprender su funcionamiento y aplicación según diversas técnicas.

Como ya se mencionó, se usa software especializado para la simulación del comportamiento de los sistemas eléctricos. Esto es beneficioso desde el punto de vista de los modelos de los elementos que los conforman, ya que de ésta manera, los códigos de los programas son menos complicados de lo que serían si fuera necesario escribir los modelos.

Además del software especializado, se usan Hojas de Cálculo, cabe mencionar que ésta aplicación se limita a el análisis de datos; esto en aras de la exactitud de los resultados. Los programas para aplicaciones matemáticas presentan ventajas en este respecto; debido a su inherente facilidad por el uso de algoritmos para cálculos complicados y/o extensos (que son bastante frecuentes en el caso que nos atañe, los sistemas de potencia); de modo que también tienen participación en el trabajo realizado, claro está, que su aplicación requiere de cierto preprocesamiento de los datos del sistema eléctrico para poder usarse en forma de ecuaciones matemáticas que modelen el comportamiento de los elementos de los sistemas.

El programa seleccionado (ATP), cuenta con la facilidad suficiente en cuanto al uso de los modelos de dispositivos incluidos así como en la personalización de éstos para necesidades específicas.

Lo antes expuesto concuerda con la orientación de éste trabajo; los modelos tienen que ver en cuanto a la exactitud de la simulación, pero no representan el énfasis del estudio; tal énfasis recae sobre la simulación de problemas representativos en sistemas eléctricos de potencia, como también sobre algunas de las soluciones propuestos a los problemas en cuestión; esto con el fin de obtener datos lo más cercanos posible a las respuestas de un sistema real ante dichas circunstancias. Con tales bases ha podido concluirse sobre los problemas y las soluciones más convenientes.

Los programas y las computadoras son herramientas de la ingeniería moderna; como tales han de ser usadas en la forma más eficiente posible con el fin de que sean ayuda real para el usuario.

La aplicación de las herramientas de simulación para el estudio de casos reales viene a ser la causa de su creación; de ese modo en nuestro caso, la orientación es hacia el estudio de efectos de hornos de arco en el sistema de distribución de energía eléctrica. Como temas preliminares de investigación se desarrollan los siguientes:

Simulación Para Análisis Transitorio y Armónico ...

- Efectos de la conexión-desconexión de bancos de capacitores en la línea.
- Aplicación de medidas correctivas: supresores de sobrevoltajes, filtros armónicos, y chokes.

El enfoque dado a cada caso de investigación es lo más cercano posible a casos en la industria y el medio salvadoreños; es decir, se trató de usar parámetros y/o locaciones reales existentes en el país. De ahí que los resultados obtenidos, las conclusiones sobre las técnicas de acondicionamiento de potencia, son directamente aplicables en nuestro país. Tal aplicabilidad era parte de las metas propuestas y también confirma el alcance de la otra meta principal: el inicio de una línea de investigación sobre Power Quality con herramientas convenientes a disposición del personal encargado de los estudios.

TABLA DE CONTENIDOS

Capítulo	Página
LISTA DE TABLAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
I. HORNOS DE ARCO.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2. ANÁLISIS ARMÓNICO.....	3
1.3. SIMULACIÓN POR COMPUTADORA.....	3
1.4 ANÁLISIS DE FLICKER.....	5
1.4.1 Simulación Del Horno Para Estudios De Flicker.....	6
CONCLUSIONES DEL CAPITULO I.....	7
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	8
II. EFECTOS DE LA CONMUTACIÓN DE CAPACITORES.....	9
INTRODUCCIÓN.....	9
2.1 GENERALIDADES.....	9
2.2 SOBREVOLTAJES PRODUCIDOS POR LOS BANCOS DE CAPACITORES.....	11
CONCLUSIONES DEL CAPITULO II.....	14
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
III. PROTECCIONES CONTRA SOBREVOLTAJE.....	16
INTRODUCCIÓN.....	16
3.1 GENERALIDADES.....	16
3.2 COORDINACIÓN DE SUPRESORES.....	17
3.3 SIMULACIÓN POR COMPUTADORA.....	18
3.4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	19
CONCLUSIONES DEL CAPITULO III.....	26
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27
IV. ANÁLISIS DE FLICKER Y ARMÓNICAS EN HORNOS DE ARCO.....	28
INTRODUCCIÓN.....	28
4.1 FLICKER.....	29
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA DE FLICKER.....	29
4.2.1. El Método SCVD.....	30
4.2.2. El Método Del Medidor De Flicker.....	30
4.3 ESTRATEGIAS DE COMPENSACIÓN DE FLICKER.....	31
4.3.1 Compensadores Controlados Por Tiristores.....	32
4.3.2 Determinación De La Demanda De Potencia Reactiva.....	34
4.4 SIMULACIÓN POR COMPUTADORA.....	35
4.4.1 Simulación Para La Determinación De Flicker.....	36
4.4.2 Simulación Para Determinación De Armónicos.....	36
4.5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	38
CONCLUSIONES DEL CAPITULO IV.....	44

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES.....	47
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES.....	48
ANEXOS.....	49
ANEXO A	50
<i>Simulación En ATP Para La Conexión De Un Segundo Banco De Capacitores.</i>	<i>50</i>
<i>Simulación En SPICE Para La Reconexión De Un Banco De Capacitores Debido A El Redisparo De Un Circuit Breaker.</i>	<i>50</i>
ANEXO B.....	51
<i>Simulación En ATP Para Coordinación De Protecciones.</i>	<i>51</i>
ANEXO C.....	53
<i>Simulación En ATP Para Determinación De Flicker Y Compensación.....</i>	<i>53</i>

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1.1 MÁXIMA DISTORSIÓN DE CORRIENTE ARMÓNICA	5
2.1 STANDARD IEC 831 / IEEE 18. IEC 831 PARA $V_{nom} \leq 660V$; IEEE 18 PARA $V_{nom} > 216V$	10
3.1 DATOS OBTENIDOS PARA LA ONDA 8/20 MICROSEGUNDOS. ENERGÍA EN JOULES, CORRIENTE IMPULSIVA DE 3 kA	20
3.2 DATOS OBTENIDOS PARA LA ONDA 0.5-100 KHZ. ENERGÍA EN JOU- LES, CORRIENTE PICO DE 400 AMP	21
3.3 DATOS OBTENIDOS PARA LA ONDA 10/1000 MICROSEGUNDOS. ENERGÍA EN JOULES, CORRIENTE PICO DE 220 AMP	22
4.1 EJEMPLO DE CONTENIDO ARMÓNICO EN LAS DOS ETAPAS DE TRABAJO DE UN HORNO DE ARCO	31
4.2 MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE FLICKER	32
4.3 LISTADO DE PROGRAMAS PARA SIMULACIÓN DE FLICKER	37

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
1.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA FASE DEL HORNO Y SU CIRCUITO EQUIVALENTE	2
1.2 DIAGRAMA DEL SISTEMA TÍPICO DEL HORNO DE ARCO	2
1.3 MODELO ARMÓNICO DEL HORNO DE ARCO	3
1.4 ESQUEMA DE LA PLANTA ELÉCTRICA DE REFERENCIA	6
2.1 DESCONEXIÓN DE UN BANCO DE CAPACITORES EN -VP	12
2.2 SOBREVOLTAJES Y CORRIENTES EN LA REIGNICIÓN	13
2.3 SOBREVOLTAJES EN EL BREAKER DEL BANCO DE CAPACITORES	13
3.1 DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE SIMULACIÓN	20
3.2 GRÁFICA DE VOLTAJE VRS TIEMPO EN EL ARRESTER Y EL SUPRESOR CON UNA DISTANCIA DE 20 MTS Y ONDA 8/20 μ SEG	22
3.3 GRÁFICA DE POTENCIA VRS TIEMPO EN EL ARRESTER Y EL SUPRESOR CON UNA DISTANCIA DE 20 MTS Y ONDA 8/20 μ SEG	23
3.4 GRÁFICA DE VOLTAJE VRS TIEMPO EN EL ARRESTER Y EL SUPRESOR CON UNA DISTANCIA DE 20 MTS, PARA LA ONDA 0.5 μ SEG - 100 KHZ	23
3.5 GRÁFICA DE POTENCIA VRS TIEMPO EN EL ARRESTER Y EL SUPRESOR CON UNA DISTANCIA DE 20 MTS, PARA LA ONDA 0.5 μ SEG - 100 KHZ	24
3.6 GRÁFICA DE VOLTAJE VRS TIEMPO	

Simulación Para Análisis Transitorio y Armónico ...

EN EL ARRESTER Y EL SUPRESOR CON UNA DISTANCIA DE 20 MTS PARA LA FORMA DE ONDA 10/1000 μ SEG	24
3.7 GRÁFICA DE POTENCIA VRS TIEMPO PARA EL ARRESTER Y EL SUPRESOR CON UNA DISTANCIA DE 20 MTS PARA LA FORMA DE ONDA 10/1000 μ SEG	25
4.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA LA PERCEPCIÓN DE FLICKER	29
4.2 PRINCIPIO DE COMPENSACIÓN DE TSC Y ARREGLO GENERAL PARA LA COMPENSACIÓN DE TCR	33
4.3 CIRCUITO ALGORÍTMICO PARA DE- TERMINAR LA POTENCIA REACTIVA INSTANTÁNEA $Q_L(T)$	35
4.4 DIAGRAMA UNIFILAR DE LA INSTA- LACIÓN BAJO ESTUDIO	35
4.5 UBICACIÓN DE EL FILTRO ARMÓNICO	37
4.6 VOLTAJES RMS EN EL PUNTO MEDIO DE LA LÍNEA	38
4.7 POTENCIA REAL (A) Y POTENCIA REACTIVA (B) DEL HORNO	39
4.8 CORRIENTE (A) Y FACTOR DE POTENCIA (B) DEL HORNO	39
4.9 PORCENTAJES DE VARIACIÓN DE VOLTAJE EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA PARA COMPENSACIÓN DIRECTA Y CASOS VARIOS	40
4.10 PORCENTAJES DE VARIACIÓN EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA PARA COMPENSACIÓN INDIRECTA	40
4.11 PORCENTAJES DE VARIACIÓN DE VOLTAJES EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA PARA COMPENSACIÓN SERIE	41
4.12 FACTOR DE POTENCIA PARA COM- PENSACIÓN INDIRECTA (A) Y PARA COMPENSACIÓN SERIE (B) CASOS ESCOGIDOS	42

4.13 EFECTO DE LA APLICACIÓN DE
FILTROS EN EL FLICKER 43

CAPITULO I

HORNOS DE ARCO

Introducción.

En este primer capítulo se presentan las características de funcionamiento del sistema general que será abordado durante el desarrollo del trabajo. Es necesario conocer el ambiente de trabajo a fin de poder lograr una forma adecuada de acercamiento a los objetivos que se han fijado.

Se incluye una descripción general de los hornos de arco, los métodos o tipos de análisis que pueden realizarse y la identificación breve de los subsistemas de mayor relevancia. Tal importancia no se limita a su uso en sistemas como los hornos de arco; ya que, en su mayoría, los subsistemas en cuestión tienen aplicaciones importantes en otros campos.

Parte del material expuesto se refiere a los parámetros necesarios con el fin de elaborar los modelos adecuados para cada fenómeno.

Los modelos que se explican brevemente son para simulación de distorsión armónica. El caso del flicker es abordado con mayor extensión en el Capítulo 4 de este documento.

1.1 Generalidades.

Este tipo de horno se utiliza comúnmente en la industria. Su función principal es la fundición de metales y roca metálica, por efecto de calor intenso de un arco eléctrico generado en electrodos de grafito. Estas instalaciones cuentan con un bajo voltaje y una alta corriente; para lograr este efecto, se hace uso de un transformador en el horno, para bajar el voltaje. Estos transformadores están caracterizados por un bajo factor de potencia. Frecuentemente encontramos capacitores conectados a el bus de alto voltaje para corrección de el factor de potencia.

La Figura 1.1 muestra el diagrama esquemático de una fase del horno, y su circuito equivalente. Aquí se pueden utilizar conexiones estrella y delta. En la figura se muestra una fase de una conexión en estrella.

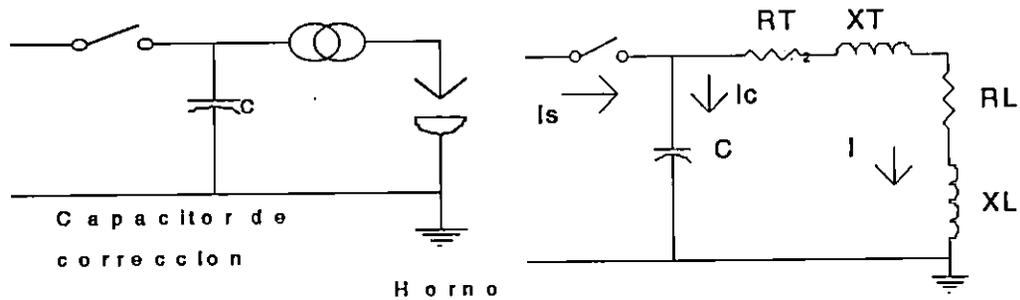


Figura 1.1 Diagrama esquemático de una fase del horno y su circuito equivalente.

Con la simulación podemos hacer muchos tipos de análisis a este circuito, y con ello detectar los problemas que puede producir a la línea de alimentación.

Entre los análisis podemos mencionar:

- Análisis de cortocircuito
- Coordinación de dispositivos de protección
- Análisis de flujo de carga
- Análisis de factor de potencia
- Análisis de flicker
- Análisis armónico
- Análisis de sobrevoltaje transitorio

Haremos énfasis en el análisis de armónicos, y el análisis de flicker.

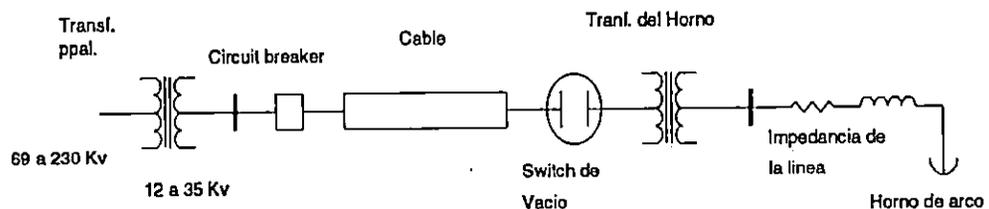


Figura 1.2 Diagrama del sistema típico del horno de arco.

1.2. Análisis Armónico.

Por el hecho de que los hornos industriales tienen características no lineales y gran capacidad concentrada en un solo lugar, resultan ser importantes generadores de armónicas de corriente y voltaje.

Es de hacer notar, que bajo condiciones de desbalance del arco de los electrodos, existe una gran cantidad de terceros armónicos y sus múltiplos. También hay quintos y séptimos armónicos aún en balance que podrían incrementarse en caso de desbalance.

La carga del horno de arco, puede verse como una fuente de armónicas de voltaje detrás de una impedancia serie consistente de los cables secundarios a los electrodos [1]. En el modelo, se deberá incluir para la simulación la impedancia de la línea y un voltaje de fuente constante delante de este para cada armónica de interés. Usualmente, se considera hasta la novena armónica.

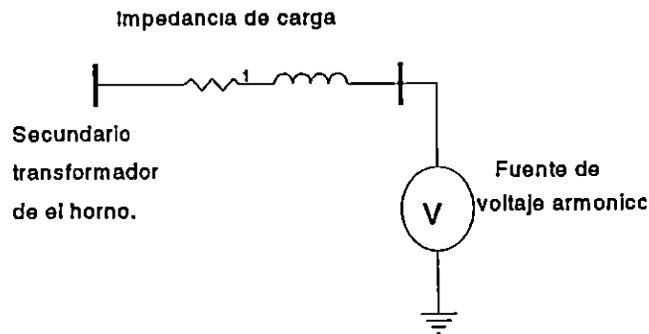


Figura 1.3 Modelo armónico del horno de arco.

Otra razón de interés para el análisis de armónicas es la aplicación de capacitores en paralelo, estos no generan armónicas, pero su interacción con otros dispositivos en el sistema podría crear peligrosas condiciones de resonancia.

1.3. Simulación Por Computadora.

Entre algunas de las ventajas de usar programas de computadoras para la simulación de armónicas podemos mencionar:

- Los problemas armónicos pueden ser resueltos sin una gran cantidad de medidas de campo.
- Los estándares industriales pueden ser implementados definiendo los límites que pueden ser usados.

Simulación Para Análisis Transitorio y Armónico ...

- La distorsión armónica total (THD), el producto I-T, y otras cantidades pueden ser calculadas.
- La respuesta a través del sistema entero puede ser determinada antes de instalar nuevas cargas o equipos.
- Múltiples fuentes de armónicas pueden ser modeladas.
- Fases múltiples desbalanceadas pueden ser presentadas.
- Salidas gráficas como formas de onda, gráficas de frecuencias, etc., pueden ser obtenidas fácilmente.

Generalmente cuando se analizan armónicos por medio de computadoras se necesitan los siguientes datos:

1. El diagrama unifilar de el sistema.
2. La capacidad de cortocircuito y el promedio de X/R para las tres fases y las fallas de línea a tierra.
3. Impedancias de los transformadores, conexiones de los embobinados, taps.
4. Promedios de voltajes y KVAR de los capacitores para factor de potencia o su valor de capacitancia.
5. Información de cualquier banco de capacitores instalados en la vecindad de la planta industrial.
6. Longitudes y configuraciones de las líneas y cables principales.
7. Descripción de los tipos de carga conectados a el sistema.

Con todos los datos que se han recabado, se puede proceder con el análisis del fenómeno. Por ejemplo:

A) Distorsión armónica: ¿Cuánta distorsión es permitida en los sistemas de hornos de arco? Eso esta contemplado en el standard IEEE 519 [2]. Este standard es ampliamente utilizado como una guía para el control de armónicos generados por un horno de arco y se presenta en la Tabla 1.1.

B) Diseño de filtros: Las corrientes armónicas no deseadas pueden ser evitadas por medio de un desvío de ellas a través de un camino paralelo de baja impedancia. También existen bancos de capacitores que podrían ser convertidos a bancos de filtros añadiendo reactores en serie para atenuar las condiciones resonantes en el sistema.

C) Arreglos de bancos de capacitores en paralelo: El mayor problema que existe en los hornos de arco es la interacción de los bancos de capacitores con la inductancia reactiva del sistema.

TABLA 1.1
MÁXIMA DISTORSIÓN DE CORRIENTE ARMÓNICA¹

RAZÓN DE CORRIENTES	ORDEN DE LAS ARMÓNICAS (ARMÓNICAS IMPARES) (% DE LA FUNDAMENTAL)					DISTORSIÓN ARMÓNICA
	I_{hc}/I_1	< 11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 - 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 - 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

1.4 Análisis De Flicker.

Los hornos de arco son de las principales causas de fluctuaciones de voltaje en la red eléctrica, lo cual puede causar el flicker. El flicker consiste en variaciones de luminosidad de las lamparas que pueden afectar la vista humana, dependiendo de su frecuencia y su intensidad. Las fluctuaciones de voltaje no están limitadas a las redes eléctricas que alimentan el horno de arco, sino que también pueden afectar la red de alto voltaje (HV), por consiguiente afectando también las redes medio voltaje (MV) y bajo voltaje (LV). Las soluciones generalmente aplicadas para reducir el flicker son [3]:

- Disminuir la potencia del horno.
- Incrementar la potencia de cortocircuito en el punto de común acople (PCC).
- Instalar aparatos para compensación de flicker.

El disminuir la potencia del horno no es económico con excepción de cortos periodos. Incrementar la potencia de cortocircuito depende de el distribuidor de energía. Entonces la solución practica es instalar aparatos para compensación de flicker. A menudo se utilizan sistemas estáticos de var (SVC) en las plantas de alimentación de los hornos de arco para compensar tanto la fluctuación de voltaje como la distorsión de voltaje. Sin embargo esta solución puede ser un tanto cara dependiendo de el tamaño de la planta.

¹ Limites de armónicas de voltaje para productores. (empresas de distribución Publica o cogeneraciones) en PCC.

Debido a esto, una solución al problema es insertar inductancias serie en el lado de alimentación del transformador del horno de arco [3].

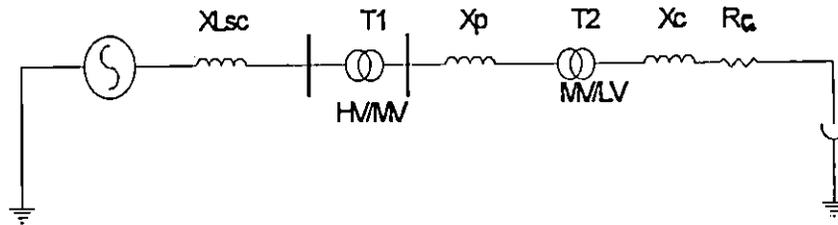


Figura 1.4 Esquema de la planta eléctrica de referencia.

En la figura 1.4, el horno es conectado al PCC por medio del transformador T1 (HV/MV) y este alimenta al transformador T2 (MV/LV). El lado del horno de este transformador usualmente tiene un voltaje ajustable para variar la potencia del horno. X_{lsc} es la reactancia de corto circuito en el PCC, X_p es la reactancia serie para la compensación de flicker. X_c y R_c son las reactancias y resistencias de la línea que esta entre los electrodos del horno y el transformador MV/LV.

~~MM~~ Simulación Del Horno Para Estudios De Flicker.

La simulación de un horno de arco es realizada por un modelo no lineal. La curva característica de voltaje corriente esta dada por:

$$V_a = V_a(I_a) \quad (1.4.1.1)$$

Puede ser descrita de acuerdo con la siguiente relación:

$$V_a = V_{at} + \frac{c}{D + I_a} \quad (1.4.1.2)$$

Donde V_a , I_a , son los voltajes y corrientes, V_{at} es el valor de voltaje al cual tiende cuando la corriente se incrementa, C y D son constantes las cuales determinan la diferencia entre las partes de el incremento y decremento de las característica v-i.

CONCLUSIONES DEL CAPITULO I

1. Por sus características especiales de funcionamiento, un horno de arco puede presentar diversos problemas en las instalaciones cercanas a éste.
2. Los principales problemas que un horno de arco puede presentar se resumen en efectos de: la distorsión armónica de corriente y de voltaje, así como el flicker.
3. Usando los modelos adecuados para cada caso, puede simularse la instalación de un horno de arco. Tal simulación serviría para cuantificar los efectos de este sistema en la red de distribución de energía eléctrica.
4. Para la determinación adecuada de los parámetros de los modelos a usarse en la simulación, es necesario el conocimiento de los principales parámetros del sistema real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Mendis, S. R.; y González, D. A. "Harmonic and Transient Overvoltage Analyses in Arc Furnace Power Systems". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, pp. 336-342, March/April 1992.

[2] Duffey, C. K., y Stratford, R. P. Paper No. PCIC-88-7 "Update of Harmonic Standard IEEE-519 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE/IAS Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC), Dallas, TX, Sept. 12-14, 1988.

[3] Montanari, G. C., et al. "Arc Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, pp. 2026-2034, October 1994.

CAPITULO 2

EFFECTOS DE LA CONMUTACIÓN DE CAPACITORES.

Introducción.

Es frecuente encontrar bancos de capacitores conectados entre línea y neutro ó línea y línea para efectos de corrección del factor de potencia ó para mejorar la regulación de voltaje en un sistema. Muchas veces, tales bancos de capacitores son conectados y desconectados constantemente para producir una corrección según las necesidades instantáneas del sistema en particular; esto en función de la entrada-salida de cargas de diversos tipos en la red. Cabe mencionar que la tendencia actual es hacia combinar bancos fijos con bancos variables. Donde los primeros están permanentemente unidos a la línea, mientras que los últimos son manejados automáticamente para ajuste fino de la compensación.

En este capítulo se presenta información sobre los efectos de la conmutación de bancos de capacitores, esto es, la conexión y desconexión de los mismos. El énfasis recae en los sobrevoltajes. La simulación realizada en PSPICE nos permite considerar resultados comunes, así como de "el peor caso", en los que se presenta también curvas de corriente.

2.1 Generalidades.

El aumento en el uso de dispositivos que contienen electrónica de potencia, nos impulsa a orientar el pensamiento hacia dos puntos principalmente: La distorsión armónica de las formas de onda de corriente y voltaje en la red de distribución, y La calidad de la potencia servida a los dispositivos electrónicos. La distorsión armónica producida en la red (electrónica, dispositivos de arco, reactores saturables, etc.) puede ser amplificada por el uso de bancos de capacitores [1]. Que podrían generar problemas de resonancia serie o paralelo aumentando así la distorsión armónica.

No es de todos conocida la importancia de estos dispositivos en cuanto a la generación de esfuerzos para la red eléctrica en estado transitorio. Por ejemplo, los sobrevoltajes que son producidos durante el Switching de los bancos dañan

equipos cercanos, si son lo suficiente amplios; por otro lado, si no son muy grandes podrían activar las protecciones de los aparatos de forma que los desconecten del suministro de energía.

Hasta este punto, hemos hablado de los posibles efectos nocivos de los bancos de capacitores; pero al principio se mencionaron algunas de las causas principales del uso de estos dispositivos. Cabe entonces preguntarse ¿Qué consecuencias pueden sufrir los capacitores durante los transitorios de conexión?. La respuesta a esta pregunta no es simple, existe una gran dependencia en la configuración del sistema que contiene los bancos. Es decir, cada caso en particular ha de ser analizado para poder predecir sobre la posibilidad de que el banco sobreviva un esfuerzo límite.

Los fabricantes de bancos de capacitores proporcionan información sobre los máximos esfuerzos de voltaje, corriente y energía que sus productos soportan. Es en base a esta información que luego de un análisis podremos afirmar sobre la necesidad de protección al banco, o si es conveniente cambiar el tamaño o el tipo de dispositivo.

Respecto a estas capacidades límites, podemos mencionar que los fabricantes han de cumplir con las normas establecidas internacionalmente. De ahí que resulta más fácil comparar los parámetros de los análisis con los estándares que con la información específica de cada fabricante, a menos que el caso lo amerite.

Dentro de las normas sobre capacitores que permiten concluir sobre las simulaciones, están:

TABLA 2.1
STANDARD IEC 831 / IEEE 18²
IEC 831 PARA $V_{nom} \leq 660V$; IEEE 18 PARA $V_{nom} > 216V$ [2]

Parámetro	IEC 831	IEEE 18
$I_{max ss}$	130 %	180 %
$I_{max ler pico}$	$100 I_{pico nom}$	
$V_{max ss}$	110 %	110 %
V_{pico}		120 %
KVAR	135 %	135 %

De la tabla 2.1 se toman bases para la evaluación de los resultados de las simulaciones.

Podemos así notar que el uso de la computadora no tiene como fin único el análisis de problemas que ya están ocurriendo; debemos notar que es preferible el prever las consecuencias

² Los porcentajes se refieren a los valores nominales. El exceder cualquiera de los límites establecidos, implica daños graves a las unidades instaladas. Deben cumplirse todos.

de las decisiones de diseño a tener que simular el sistema para encontrar la causa de los problemas que ya ocurrieron. La simulación permite entonces, sintetizar un sistema que ofrezca las mejores características de funcionamiento al más bajo costo. Pudiendo comprobarse el cumplimiento de las normas de seguridad y calidad que rigen la industria moderna.

2.2 Sobrevoltajes Producidos Por Los Bancos De Capacitores.

Anteriormente se habló de las corrientes que pueden darse en casos de bancos de capacitores múltiples, lo que es común en la industria. Un análisis breve del ejemplo numérico mostrado en tal ocasión, permite notar que también el voltaje puede alcanzar niveles peligrosos. En general, al hablar de circuitos con carga capacitiva; hemos de verificar la presencia de voltajes superiores o iguales a 2pu. Esto depende del nivel de voltaje que la capacitancia tenga y de la magnitud del voltaje de línea al momento de la conexión.

Los capacitores tienden a realizar un rebasamiento igual en magnitud a su diferencia de potencial con la fuente que trata de cargarlos. Bajo ciertas condiciones, sin embargo, es factible un escalamiento de voltaje o *sobrevoltaje dinámico*. Este fenómeno se refiere a el crecimiento del voltaje en terminales del capacitor en forma de escalones, lo que es un resultado directo del rebasamiento ya mencionado [3].

Asumamos un caso particular: Un banco de capacitores trifásico de una potencia igual a 5 MVA con neutro aterrizado, está conectado a un sistema de 13.8 kV también con neutro aterrizado e inductancia de línea de 1 mH en el PCC. Tal configuración presenta una impedancia transitoria de 3.789 Ω lo que nos lleva a una corriente de reenergización de 5.947 kA si al momento de desconexión del banco éste se encontraba en el voltaje pico negativo de la línea y la reignición se da en el voltaje pico positivo siguiente. Para el Breaker no es difícil anular la circulación de corriente para el máximo valor mencionado. El problema radica en que este corte deja al capacitor cargado a un nivel de voltaje de 3Vp; mientras que la fuente del sistema continúa normalmente su variación senoidal. La escena recién presentada puede verse en la Figura 2.1. De este modo, medio ciclo después hay 4Vp a través del Breaker; los cuales posiblemente no soportará. Bajo tales circunstancias, una reignición causaría una corriente transitoria del doble de la magnitud de la corriente anterior, ya que el voltaje en el Breaker es el doble del anterior; además, el sobrevoltaje cambiaría de 3Vp a -5Vp. Ver Figuras 2.2 y 2.3 para detalles al respecto.

En toda la descripción anterior hemos despreciado el amortiguamiento (aunque en las Figuras 2.2 y 2.3 se ha tomado en cuenta un ligero amortiguamiento en forma de resistencia de

línea). De continuar con tal aproximación, el sobrevoltaje sigue escalando hasta alcanzar niveles que provoquen rompimiento del aislamiento terminal del banco de capacitores.

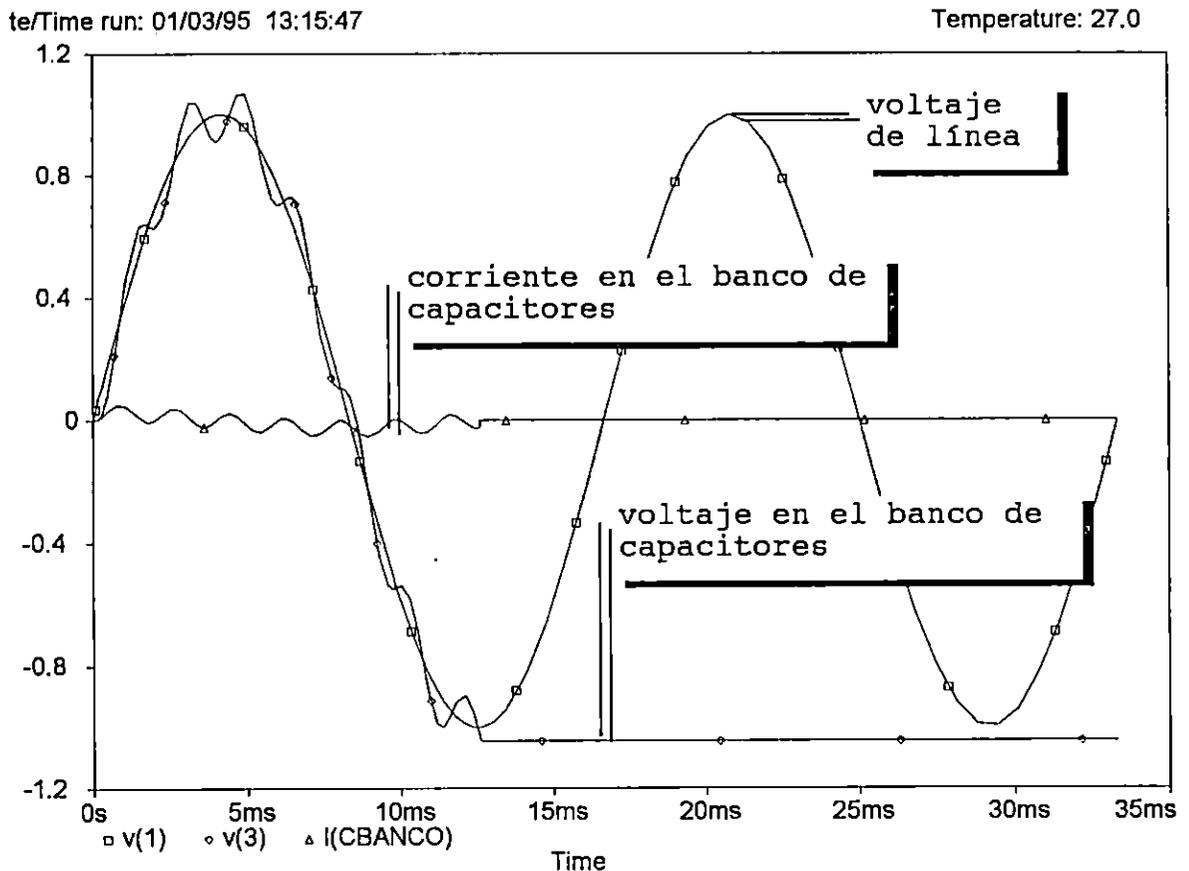


Figura 2.1 Desconexión de un banco de capacitores en $-V_p$.

Es necesario tomar en cuenta el amortiguamiento y el hecho de que no todas las reigniciones ocurren en el voltaje pico; es decir, sí, el voltaje escala de la forma mencionada, pero no lo hace normalmente con tanta rapidez ni a tan alto nivel. Con todo, fenómenos de éste tipo ya han causado daños fatales en bancos de capacitores.

Cap. 2.: Efectos de la Conmutación de Capacitores

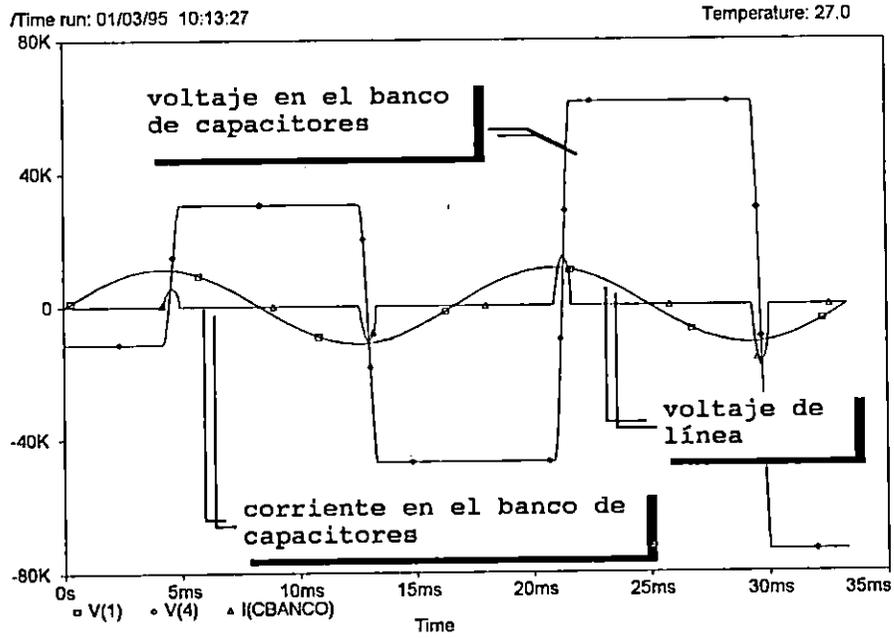


Figura 2.2 Sobrevoltajes y corrientes en la reignición.

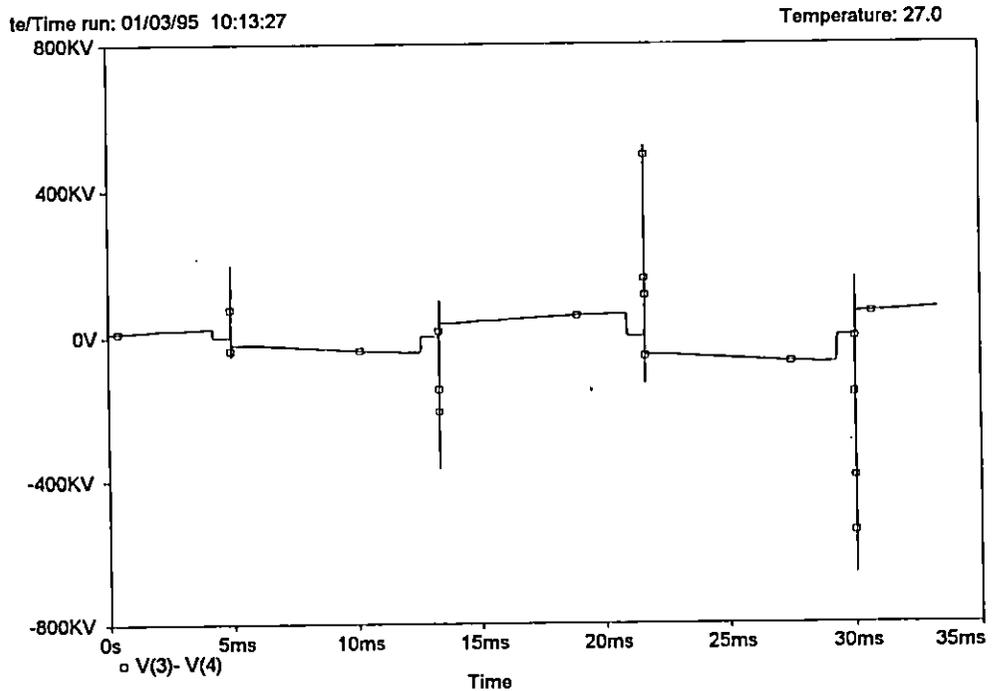


Figura 2.3 Sobrevoltajes en el Breaker del banco de capacitores.

CONCLUSIONES DEL CAPITULO II

1. Los bancos de capacitores son de uso extendido en la industria y demás aplicaciones de energía eléctrica; lo suficiente como para merecer un estudio al respecto.
2. Por medio de la simulación podemos prever los efectos de la instalación de un banco de capacitores en el sistema en particular, así como en la red de distribución.
3. La conexión de bancos de capacitores puede producir sobrevoltajes transitorios de orden capaz de producir daños al sistema o a el banco mismo si no se toman las consideraciones del caso.
4. La forma de conexión adecuada implica la medición del voltaje a través del interruptor del banco de capacitores. Cuando este voltaje es mínimo se producen los menores efectos por la conmutación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Girgis, A. A., et al. "Harmonics and Transient Overvoltages Due to Capacitor Switching". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 6, pp. 1184-1188, November/December 1993.

[2] Standard on Shunt Capacitors, IEEE 18-1992, IEEE, New York.

[3] Greenwood, Allan. "Electrical Transients in Power Systems". John Wiley and Sons Inc. Second Edition, 1990.

CAPITULO III

PROTECCIONES CONTRA SOBREVOLTAJE

Introducción.

Dentro de cualquier sistema eléctrico, debe disponerse de formas de protección contra los eventos que pudieran causar daños o pérdida del flujo de energía. Entre los diferentes tipos de protecciones se cuenta con las protecciones contra sobrevoltajes, sobre las cuales trata este capítulo. Se detallan algunas características operativas de estos dispositivos, y se discute brevemente la coordinación de tales protecciones. La simulación realizada gira en torno las configuraciones de coordinación para los *arresters* en aplicaciones de bajo voltaje. Para casos de mayor voltaje, el comportamiento de los dispositivos es similar, con la diferencia en la capacidad de manejo de energía.

3.1 Generalidades.

Los *arresters* son dispositivos cuya función es la de limitar los niveles de voltaje entre sus terminales (y por ende, los de cualquier elemento al que se conecten en paralelo) a un valor específico. La razón de ser de tales dispositivos se basa en la necesidad de protección de los componentes de un sistema eléctrico contra niveles excesivos de voltaje que podrían causar flameo u rompimiento de sus aislamientos; con el subsecuente daño en la mayoría de los casos irreparable a uno o más elementos del sistema.

Los sobrevoltajes pueden ser causados por variadas razones, por ejemplo:

- Descargas atmosféricas en las líneas del sistema.
- Conmutación de cargas en la red.
- Fallas de diferentes tipos dentro del sistema.

De esta manera, siempre se ha esperado que un *arrester* funcione con las siguientes características [1]:

1. Entrar en conducción a algún voltaje sobre el valor nominal del *arrester*.

Cap. 3.: Protecciones Contra Sobrevoltaje

2. Mantener ese voltaje durante toda la duración del sobrevoltaje con poca variación.
3. Suspender la conducción a un voltaje ligeramente menor que el voltaje de conducción.

Un arrester de este tipo tiene la capacidad de limitar la corriente que fluye por él durante el transitorio a un valor mínimo suficiente para mantener el nivel de protección deseado.

Los primeros arresters eran simplemente entrehierros que durante la conducción prácticamente no poseen voltaje, así, después de concluido el sobrevoltaje transitorio era difícil suspender la conducción de corriente a la frecuencia del sistema.

El siguiente paso consistió en añadir resistencias en serie con los entrehierros. Pero el avance principal se da con la introducción de resistores no lineales que permiten al arrester mantener un mayor voltaje durante el período posterior a el salto de la chispa en el entrehierro, con lo que se logran niveles de protección menores. El último avance en este sentido surge con la aparición de los entrehierros limitadores de corriente, que logran limitar la corriente que fluye durante el transitorio que activó al arrester; de este modo se mantiene un menor nivel de protección en terminales del arrester.

A pesar de todas las ventajas inherentes a los dispositivos mencionados, era ventajoso el poder diseñar un arrester sin entrehierro serie por las siguientes razones:

1. Los entrehierros pueden cambiar su voltaje de disparo si el arrester no está bien sellado.
2. Las aplicaciones pueden ser limitadas por la posibilidad de disparo debido a la contaminación de las superficies.
3. El número de partes usadas en los entrehierros es grande comparado con el del arrester. La posibilidad de errores de ensamblaje o fallas de elementos crece con el número de partes.

3.2 Coordinación De Supresores.

En los años recientes ha mejorado la disponibilidad de los dispositivos de protección contra sobrevoltajes. Esto se debe a nuevas técnicas de fabricación y mejoras en el uso de los compuestos, cerámicas y elementos, ya sean naturales o sintéticos.

Sumado a la condición mencionada, podemos encontrar el hecho de que cada vez se vuelve mas notoria la necesidad de protección con el incremento de equipos sensibles a lo largo de la vida moderna. Los equipos electrónicos cada vez mas comunes en los hogares y en la industria son gravemente afecta-

dos por los fenómenos transitorios en los sistemas de distribución.

De ahí nace la idea de usar esquemas de protección en cascada. Tales sistemas están formados por un dispositivo principal de gran capacidad de manejo de energía en la entrada de los edificios o instalaciones y dispositivos de menor capacidad energética en los terminales de conexión de los equipos o dispositivos a proteger. Estos equipos pueden ser hornos de microondas, equipos de sonido, computadoras, etc.

Por cuestiones de facilidad de nombramiento, llamaremos al protector principal arrester y al secundario supresor.

Un sistema como el recién descrito está coordinado si el dispositivo con mayor capacidad energética recibe la mayor parte de la energía del fenómeno transitorio; tal elemento se colocó a la entrada del edificio [2].

Con los protectores de resistor no lineal + entrehierro, el arrester bien puede ser diseñado para un MCOV bastante cercano al valor nominal rms del voltaje de alimentación. De esta forma, los supresores pueden ser seleccionados con voltajes de protección menores; siempre y cuando la reactancia entre ambos dispositivos sea lo suficientemente grande como para que el mayor voltaje en el arrester haga saltar el arco en el entrehierro. Así, el supresor soporta una parte menor del transitorio.

Con los protectores sin entrehierro debe prestarse atención a el MCOV que fijará el voltaje de protección del arrester. Con transitorios rápidos, la mayor parte de la energía es obviamente depositada en el dispositivo principal con reactancia inductiva predominante; sin embargo, en la parte lenta del transitorio (la cola) o en el caso de transitorios "lentos" la reactancia inductiva tiene una caída de tensión negativa o de menor valor, respectivamente. Bajo estas condiciones es el supresor quien soporta la mayor cantidad de energía.

Surge entonces la pregunta: ¿Cómo deben ser las relaciones de voltaje de protección entre los dispositivos de protección?, ¿Cuál ha de ser menor?. Para dar opciones de respuesta a estas preguntas es muy conveniente la simulación.

3.3 Simulación Por Computadora.

Para el trabajo de simulación se seleccionó un sistema de dos etapas como los mencionados anteriormente. Los niveles de voltaje considerados son los de un sistema de bajo voltaje. Como se trata de instalaciones de bajo voltaje, y se asume instalaciones en edificios de oficinas y residenciales; puede considerarse para las conexiones el cable #12, con una resistencia de $0.00104 \Omega/m$ y una inductancia para los dos conductores paralelos (como es usualmente el caso) de 1

Cap. 3.: Protecciones Contra Sobrevoltaje

$\mu\text{H/m}$. Para el caso pueden simularse los arresters y supresores de dos formas: por medio de fuentes controladas de corriente, o por medio de modelos específicos. Como el simulador será ATP que ya cuenta con modelos para arresters (usando el término en forma generalizada) [3], tomamos la segunda opción. Hay que hacer notar que el circuito de prueba es bastante simple desde el punto de vista del número de elementos. Sin embargo, para la obtención de las formas de onda standard para las pruebas es necesaria la combinación de varias fuentes exponenciales y sinusoidales, según la señal en particular. Se toman tres formas de onda para las pruebas:

1. El impulso de 8/20 μs .
2. La onda oscilante (Ring Wave) de 0.5 - 100kHz y
3. El impulso largo de 10/1000 μs .

Además se toman en cuenta tres niveles de voltaje y cuatro distancias entre dispositivos. Los resultados de la simulación se describen por medio de las Tablas 3.1 hasta la 3.3. Las formas de onda utilizadas son descritas en el standard ANSI/IEEE C62.41-1991 [4].

3.4 Resultados De La Simulación.

EXCITACIÓN DE 3 kA CON CURVA 8/20 μs . Puede notarse de la Tabla 3.1 que para transitorios de este tipo, la mejor coordinación entre el arrester y el supresor ocurre en la configuración Alto-Bajo. Es decir, cuando el arrester posee mayor voltaje de protección que el supresor; esta coordinación mejora con la distancia entre dispositivos. El fenómeno puede entenderse desde el punto de vista del efecto que produce la reducción de la longitud del cable en la caída de voltaje $l\,di/dt$. A menor longitud, menor caída de voltaje. De este modo, el supresor (con menor voltaje de protección) limita el voltaje en terminales del arrester y por consiguiente la energía depositada en éste resulta ser menor que para longitudes mayores.

Luego, la distribución de energía entre los dispositivos varía con la distancia; siendo creciente la energía en el supresor cuando se acerca al arrester.

En la configuración Bajo-Alto, la energía depositada en el supresor es mínima. Llegando a considerarse que puede eliminarse tal dispositivo sin mayores riesgos, excepto el de los transitorios generados internamente.

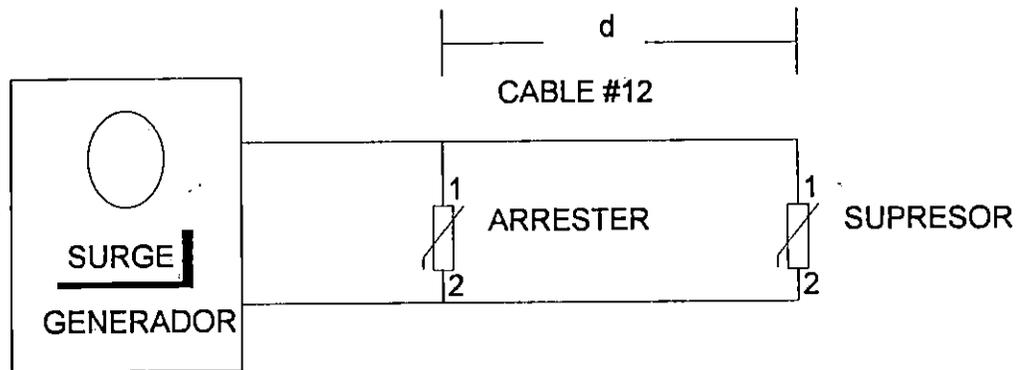


Figura. 3.1 Diagrama del circuito de simulación.

TABLA 3.1
DATOS OBTENIDOS PARA LA ONDA 8/20 MICROSEGUNDOS
ENERGÍA EN JOULES, CORRIENTE IMPULSIVA DE 3 kA

V		5M		10M		20M		40M	
A	S	A	S	A	S	A	S	A	S
	250	28.23	3.68	29.47	2.44	30.35	1.57	30.97	0.99
250	150	19.87	7.35	24.05	4.76	26.97	2.98	28.93	1.83
	130	17.92	6.85	22.70	4.50	26.13	2.85	28.46	1.78
	250	19.96	0.67	19.91	0.67	19.87	0.67	19.87	0.67
150	150	17.98	1.84	18.61	1.20	19.04	0.76	19.35	0.47
	130	15.77	3.18	17.23	2.00	18.21	1.23	18.86	0.74
	250	16.09	0.22	16.02	0.22	15.98	0.22	15.98	0.22
130	150	16.06	0.02	16.01	0.02	15.97	0.02	15.98	0.01
	130	14.55	1.40	15.03	0.91	15.35	0.57	15.59	0.35

EXCITACIÓN DE 400 A CON CURVA 0.5-100 kHz. La Tabla 3.2 demuestra que las condiciones son similares a el caso anterior. Con la excepción de que las cantidades de energía depositadas son menores debido a una intensidad (corriente) menor en la onda excitadora. Entonces, para este tipo de transitorio hay buena coordinación Alto-Bajo mientras la distancia entre dispositivos sea suficiente.

Cap. 3.: Protecciones Contra Sobrevoltaje

TABLA 3.2
DATOS OBTENIDOS PARA LA ONDA 0.5-100 kHz.
ENERGÍA EN JOULES, CORRIENTE PICO DE 400 A.

V		5M		10M		20M		40M	
A	S	A	S	A	S	A	S	A	S
	250	0.763	0.111	0.801	0.075	0.829	0.494	0.847	0.032
250	150	0.488	0.241	0.634	0.159	0.736	0.986	0.800	0.587
	130	0.448	0.216	0.615	0.143	0.728	0.088	0.798	0.052
	250	0.541	0.962	0.541	0.130	0.541	0.171	0.541	0.173
150	150	0.483	0.053	0.503	0.035	0.517	0.022	0.526	0.014
	130	0.402	0.107	0.457	0.067	0.491	0.040	0.513	0.023
	250	0.429	0.000	0.429	0.000	0.429	0.000	0.429	0.000
130	150	0.429	0.000	0.429	0.001	0.429	0.001	0.429	0.001
	130	0.387	0.395	0.402	0.025	0.412	0.016	0.419	0.010

EXCITACIÓN DE 220 A CON ONDA 10/1000 μ S. Los datos de la Tabla 3.3 hacen notar que la coordinación Alto-Bajo no funciona con éste tipo de transitorio aún a distancias mayores. Esto hace obvia la necesidad de coordinación Bajo-Alto (o igual a igual) para poder evitar el ingreso de los transitorios lentos al edificio. En efecto, la onda en cuestión es de mucha mayor duración y lentitud que las dos estudiadas con anterioridad, esto hace que la mayor cantidad de energía se concentre en la cola de la onda. Como el efecto Ldi/dt se ve reducido por la lentitud de la señal, para coordinación Alto-Bajo el supresor limita el voltaje en el arrester, lo que permite que casi toda la energía de la onda se derive al supresor.

CONSIDERACIONES GENERALES. Los resultados de la simulación permiten entrever la necesidad de planificación en la selección de los dispositivos protectores contra sobrevoltaje. En este respecto hay que considerar tres puntos claves:

- La distancia entre dispositivos.
- Los voltajes de protección de los elementos.
- El tipo de transitorio prevaleciente en la localidad.

Parece obvio que no podemos tener bajo control todos estos detalles. Sin embargo, las soluciones de ingeniería deben darse, proporcionando la mejor solución posible a los problemas.

TABLA 3.3
 DATOS OBTENIDOS PARA LA ONDA 10/1000 MICRO SEGUNDOS
 ENERGÍA EN JOULES, CORRIENTE PICO DE 220 A.

V		5M		10M		20M		40M	
A	S	A	S	A	S	A	S	A	S
	250	85.186	82.737	86.685	81.803	89.025	79.64	92.95	75.74
250	150	0.138	104.50	0.429	104.89	1.037	104.7	2.244	103.9
	130	0.772	82.611	0.283	83.079	0.743	82.99	1.667	82.49
	250	104.60	0.000	105.17	0.000	105.33	0.000	105.3	0.000
150	150	52.223	50.084	53.563	49.343	55.510	47.57	58.61	44.48
	130	0.487	82.203	1.028	82.364	2.095	81.62	4.162	79.89
	250	82.662	0.000	83.234	0.000	83.374	0.000	83.35	0.000
130	150	82.613	0.053	83.175	0.053	83.315	0.053	83.29	0.053
	130	41.199	39.363	42.378	38.758	44.047	37.27	46.65	34.68

Para detalles sobre parámetros de los supresores y la generación de las formas de onda, ver la referencia [5].

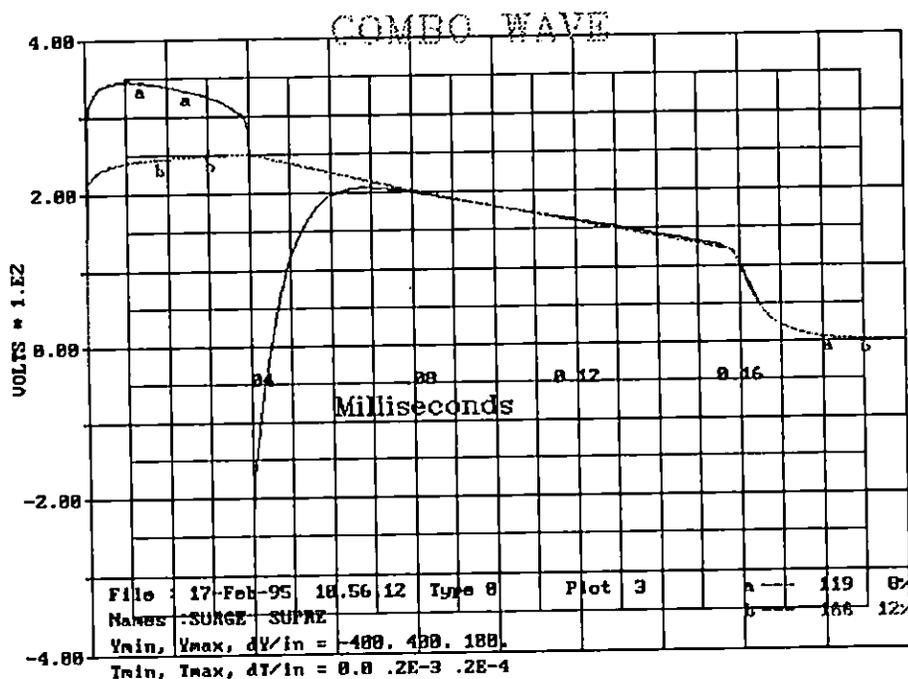


Figura 3.2 Gráfica de voltaje vrs tiempo en el arrester y el supresor con una distancia de 20 mts y onda 8/20 μ seg.

Cap. 3.: Protecciones Contra Sobrevoltaje

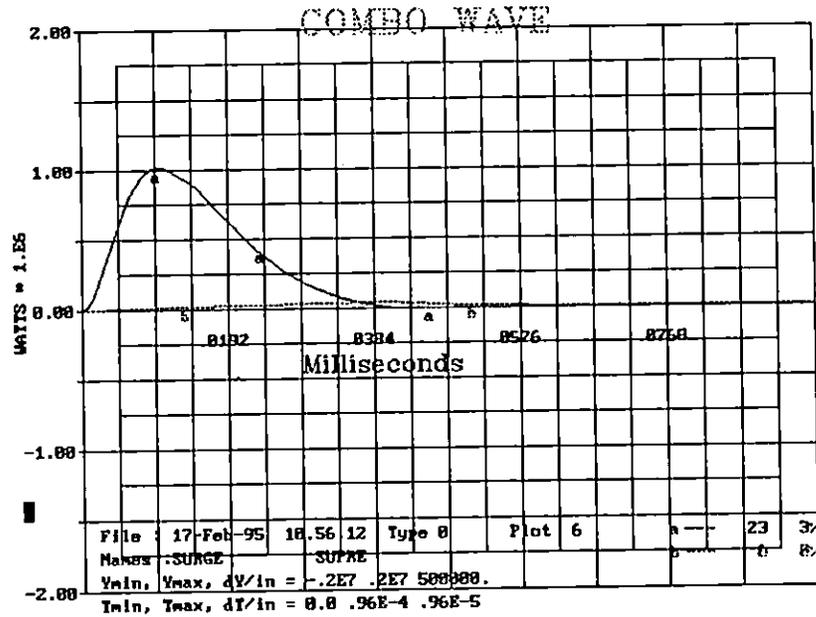


Figura 3.3 Gráfica de potencia Vrs tiempo para el arrester y el supresor con una distancia de 20 mts y onda 8/20 μ seg.

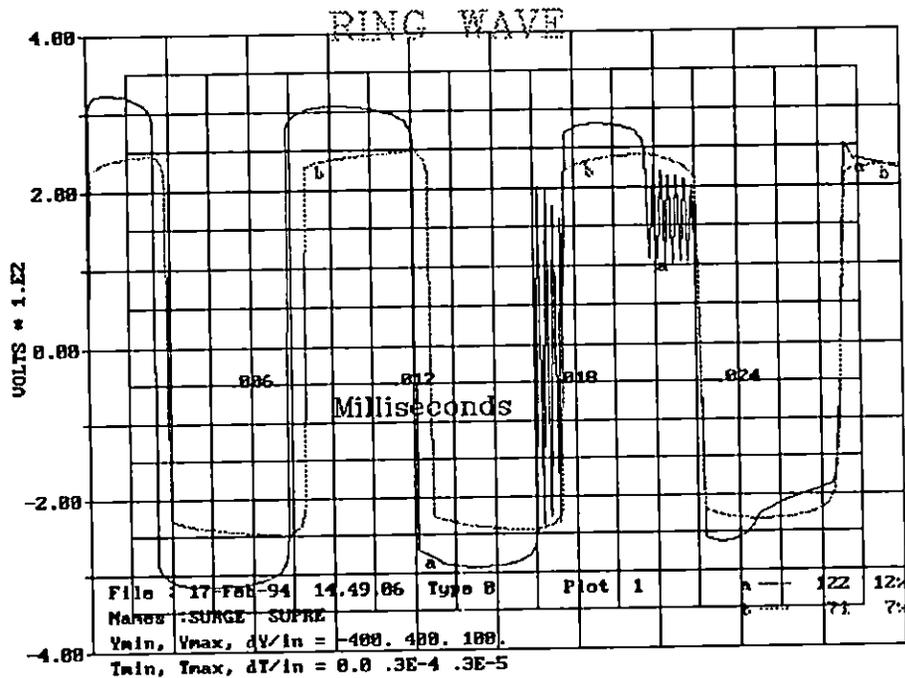


Figura 3.4 Gráfica de Voltaje vrs. Tiempo en el arrester y el supresor con una separación de 20 mts, para la onda 0.5 μ seg - 100 kHz.

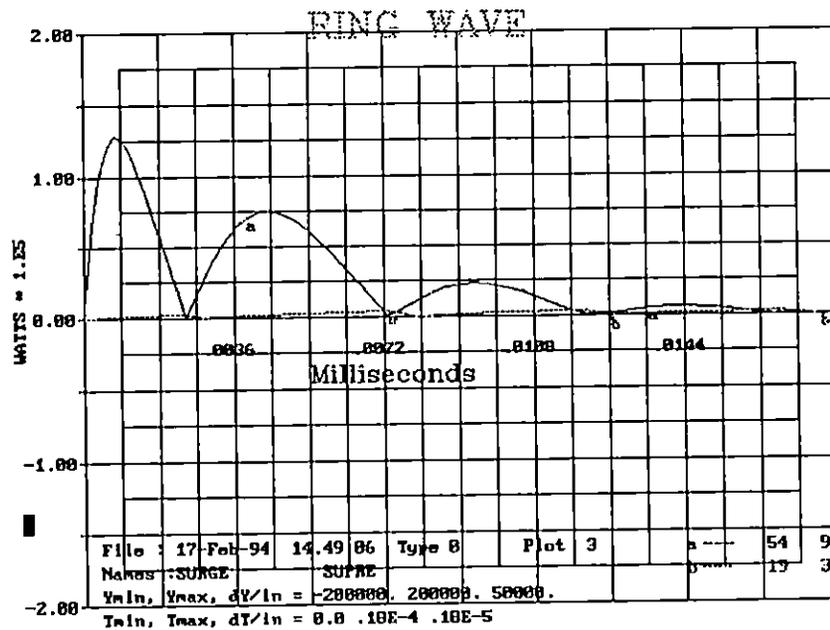


Figura. 3.5 Gráfico de potencia vrs tiempo de arrester y supresor con una separación de 20 mts para la onda 0.5 μ seg - 100 kHz.

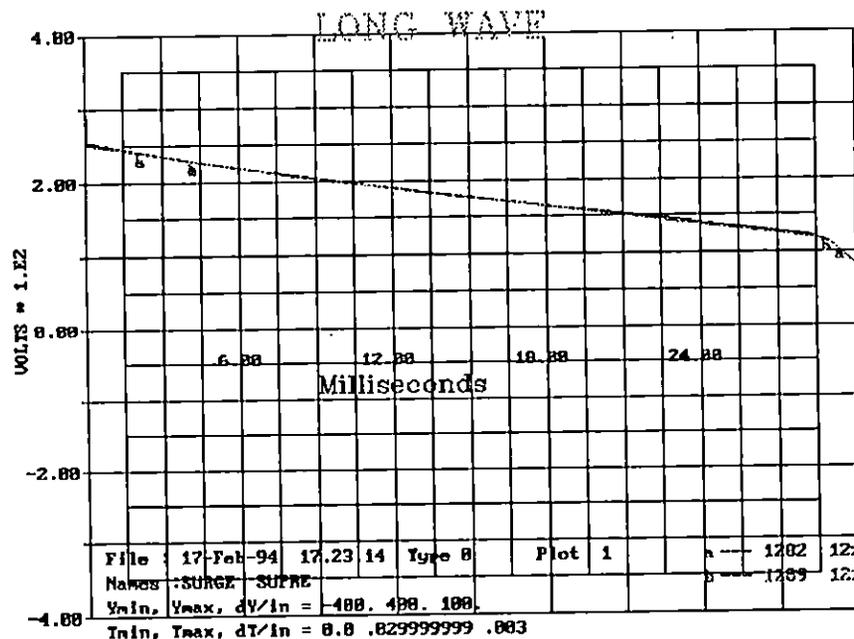


Figura 3.6 Gráfica de voltaje vrs tiempo de arrester y supresor con una distancia de 20 mts para la forma de onda 10/1000 μ seg.

Cap. 3.: Protecciones Contra Sobrevoltaje

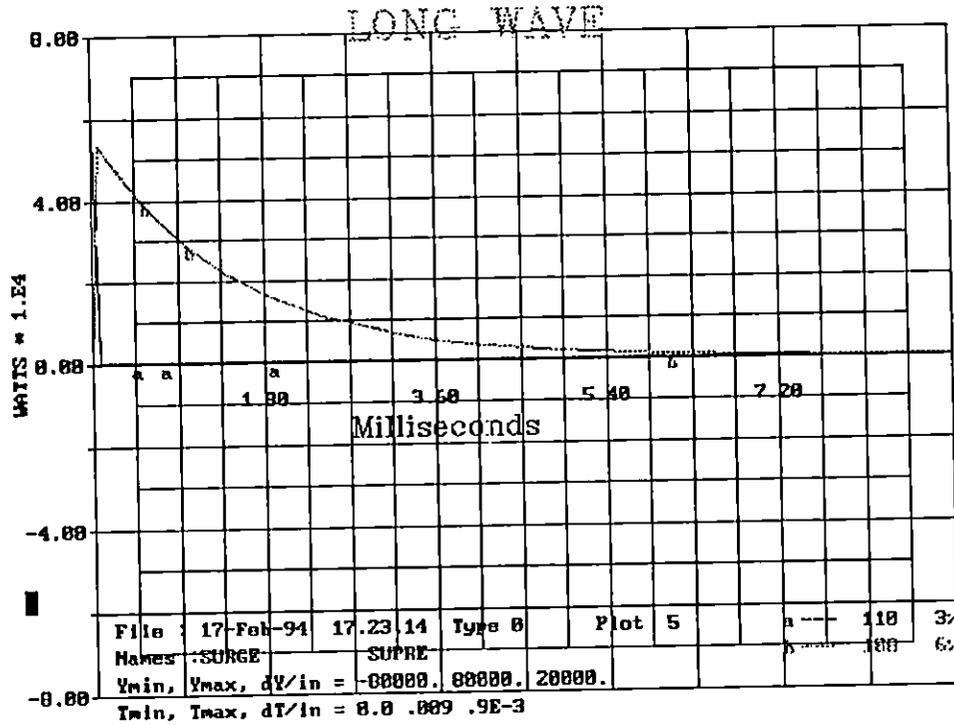


Figura 3.7 Gráfica de potencia vrs tiempo para arrester y supresor con una separación de 20 mts para la forma de onda 10/1000 μ seg.

CONCLUSIONES DEL CAPITULO III

1. Las tendencias de los sistemas eléctricos en general, han provocado el estudio de diversos esquemas de protección para las diferentes causas de fallas.
2. La tecnología actual de supresores de sobrevoltaje, permite su empleo en cascada. Para mayor seguridad de los equipos a proteger.
3. La coordinación de protecciones contra sobrevoltaje debe tomar en cuenta los puntos siguientes:
 - La distancia entre los dispositivos de protección.
 - Los voltajes de protección de los elementos mencionados.
 - Las formas de transitorios comunes en la zona de instalación.
4. La simulación permite saber que no siempre es correcta una coordinación Bajo - Alto. Tampoco puede aconsejarse siempre una coordinación Alto - Bajo.
5. Han de realizarse estudios detallados sobre los puntos del numeral 3 para decidir sobre el tipo de coordinación y dispositivos de protección contra sobrevoltaje a emplear en una instalación determinada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sakshaugh, E. C., et al. "A New Concept in Station Arrester Design". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 96, No. 2, pp. 647-656, March/April 1977.
- [2] Lai, Jih-Sheng y Martzloff, Francois D. "Coordinating Cascaded Surge Protection Devices: High - Low Versus Low - High". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 4, pp. 680-687, July/August 1993.
- [3] Canadian/American EMTP User Group. ATP Rule Book, 1987-92.
- [4] ANSI/IEEE C62.41-1991. IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage ac Power Circuits.
- [5] Pérez Ramos, Carlos René y Romero Jovel, Francisco. "Recopilación de Documentos de Defensas de Trabajo de Graduación: Simulación Para Análisis Transitorio y Armónico en Sistemas de Potencia". Biblioteca de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, 1995.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE FLICKER Y ARMÓNICAS EN HORNOS DE ARCO

Introducción.

La operación de un horno tiene dos períodos: el **período de fundición** caracterizado por fluctuaciones de corriente violentas a un factor de potencia bajo por fase. Cuando se alcanza el **período de refinado** el hierro fundido se encuentra en un estado líquido, por lo tanto las longitudes de arco pueden ser mantenidas uniformes por los reguladores automáticos de los electrodos. Por lo tanto el período de refinado es caracterizado por un factor de potencia alto en sus tres fases.

Cuando se cae en el problema del flicker, la solución probablemente necesitará un buffer de reactores o capacitores serie, o condensadores síncronos. Estos métodos son costosos, aún con la reducción de unas pocas decenas de voltios de flicker.

Usualmente, la impedancia del sistema es predominantemente inductiva, y el flicker es causado por corriente a bajo factor de potencia, entonces la mayor parte de caída de voltaje es debido a la componente reactiva de la impedancia del sistema. Este predominio de componentes reactivos ha llevado frecuentemente a usar condensadores síncronos en paralelo con el sistema como método de reducir la reactancia y así mejorar las condiciones de flicker. Este método no es económico en la práctica, debido a que para reducir la reactancia del sistema por paraleleo con la reactancia de un condensador síncrono, el promedio de los kva del condensador síncrono debe ser al menos muchas veces los kva de la carga.

4.1 Flicker.

Flicker es la impresión de inestabilidad de sensación visual inducida por un estímulo luminoso cuya luminancia o distribución espectral fluctúa con el tiempo [1]. El fenómeno puede ser dividido en dos categorías generales que son: el flicker cíclico y el flicker no cíclico [2].

Hay una gran variedad de curvas de límites perceptibles publicadas por diferentes autores las cuales pueden ser usadas como una guía general para verificar si la cantidad de flicker es un problema o no (ver Figura 4.1). El establecimiento de una tolerancia es subjetivo, debido a que es influenciado por muchas variables. Entre los factores que pueden afectar la determinación de un límite para el flicker tenemos: los niveles de luz ambiental, tamaño y tipo de lámparas, decorado del cuarto, la rapidez, duración e intensidad de los cambios de voltaje, y la ocupación inmediata o interés de el observador.

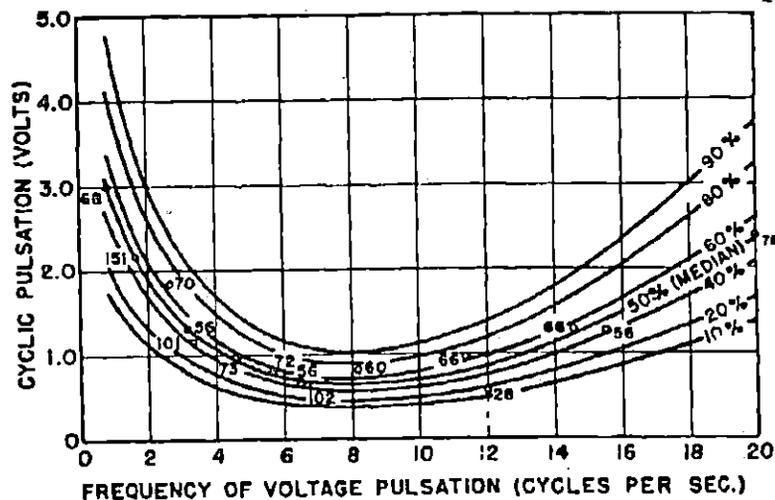


Figura 4.1 Curvas características para la percepción de flicker [3].

4.2 Caracterización Del Problema De Flicker.

Las compañías eléctricas difieren en los métodos que ellos usan para la caracterización del flicker, pero existen dos aproximaciones principales, el método SCVD (short circuit voltage depression) y el método del medidor de flicker.

4.2.1. El Método SCVD.

Está basado en una correlación entre la incidencia de quejas sobre flicker de los consumidores cerca de las cargas generadoras de flicker y la caída de voltaje en el punto común de acople. El SCVD es usualmente expresado como un porcentaje de decremento en el voltaje en el PCC.

El método SCVD tiene importantes ventajas prácticas. Con este método es posible predecir durante la etapa de planificación de una nueva instalación, si causará flicker; debido a que el SCVD puede ser calculado en función de la potencia máxima del horno y la impedancia del sistema de alimentación. Todos estos parámetros están usualmente disponibles en la etapa de diseño.

La fórmula que se usa en este trabajo es [4]:

$$SCVD = \frac{2 * MW_{MAX-HORNO}}{MVA_{SC-PCC}} \quad (4.2.1)$$

4.2.2. El Método Del Medidor De Flicker.

Una dificultad con el SCVD es que este no define flicker, y así no puede ser cuantificado para los propósitos de medida o predicción. Las medidas son importantes en la evaluación de flicker en ambos tipos de instalaciones; las compensadas y las no compensadas, mientras la predicción es importante en el diseño del circuito de control para ciertos tipos de compensación.

La dificultad de definir el flicker se refleja en la gran variedad de medidores existentes; cada uno utilizando un principio diferente. Algunos usan fotoceldas que responden a la luz del filamento de tungsteno de las lámparas, mientras otros son directamente sensitivos a el voltaje. La mayoría de tipos esencialmente miden el valor RMS de la fluctuación (o modulación) de voltaje, debido a que esto es el factor común más importante en el flicker percibido por una gran cantidad de consumidores. Sin embargo, hay variedad en la respuesta en frecuencia y en la interpretación de diferentes medidores de flicker. Algunos intentan reproducir la curva de sensibilidad visual del ojo humano. Algunos incorporan filtros armónicos, pensando que las armónicas pueden afectar la lectura sin contribuir demasiado al valor rms de la fluctuación. Los medidores de flicker también difieren ampliamente en el periodo promedio para determinar el valor rms. Mientras algunos dan una lectura continua, otros dan una muestra o lectura a intervalos de pocos segundos o

Cap. 4: Análisis de Flicker y Armónicas en Hornos de Arco

minutos, otros integran continuamente para la acumulación de una dosis de flicker.

Parece ser relativamente raro que las empresas distribuidoras de energía eléctrica especifiquen el umbral de irritación en términos de la lectura en un medidor particular, pero el incremento en el uso de tales instrumentos puede cambiar esto, y ya algunos distribuidores de equipos de compensación han usado este criterio en sus especificaciones.

El valor principal de los medidores de flicker ha sido en hacer las medidas de flicker antes y después de que un compensador es instalado en una planta existente.

El análisis espectral de la corriente de horno no resulta en componentes armónicas discretas de orden integral, sino en un espectro continuo. Nunca es tan importante extraer la amplitud espectral a los submúltiplos de la frecuencia fundamental para propósitos de promedio de filtros armónicos asociados con el horno. Ya que usualmente son sintonizados a armónicas de orden 2,3,4,5 y 7.

TABLA 4.1
EJEMPLO DE CONTENIDO ARMÓNICO EN LAS DOS ETAPAS DE TRABAJO
DE UN HORNO DE ARCO [4]

Condición de el horno	Orden armónico	Corriente armónica % de la fundamental				
		2	3	4	5	7
Fundición inicial		7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refinado			2.0		2.1	

4.3 Estrategias De Compensación De Flicker.

Si se calcula el SCVD de una planta, y cae dentro de los límites de flicker objetable, la elección deberá ser entre reducir la carga del horno, aumentar la potencia de alimentación o usar equipo compensatorio en las instalaciones. La potencia de alimentación puede aumentar cambiando los taps a un nivel mas alto, o instalando líneas adicionales, o ambas. Esta opción es muy cara, pero a menudo es adoptada cuando se prevén futuras expansiones en la planta de fundición o en las vecindades.

Cuando se emplea compensación, la elección puede ser hecha entre muchos diferentes tipos, como los mostrados en la siguiente tabla.

TABLA 4.2
MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE FLICKER [4].

Técnica o equipo para compensar el flicker	Ventajas	Desventajas
Reactor controlado por tiristores	Respuesta rápida Operación independiente de fases	Requiere capacitores paralelos para corrección de f.p. Genera armónicos
Capacitor controlado por tiristores	No se generan armónicas. No se requieren reactores. Operación independiente de fases.	Velocidad de respuesta limitada.
Reactor con taps/reactor saturado.	Respuesta rápida, da una gran supresión de flicker. Operación independiente de fases. Construcción tipo transformador.	Requiere una gran cantidad de capacitores paralelos para corrección de f.p. Genera armónicos Se aplica solamente en hornos.
Reactores saturados compensadores de armónicas.	Respuesta rápida Las armónicas generadas son insignificantes. Construcción tipo transformador	Requiere capacitores paralelos para corrección de f.p. Transitorios al energizarlos
Condensador síncrono		Requiere mantenimiento regular. Capacidad limitada para la supresión de flicker, aun con un buffer reactor.
Incremento en el nivel de cortocircuito en la alimentación.	Alta estabilidad Se puede expandir las futuras instalaciones del horno.	Costo elevado.

4.3.1 Compensadores Controlados Por Tiristores.

El elemento básico de todos los compensadores controlados por tiristores es un capacitor o reactor en serie con un tiristor que funciona como switch ac, según se muestra en la Figura 4.2.

La susceptancia efectiva a la frecuencia fundamental es controlada por conmutación. La señal de control es aplicada a las compuertas de los tiristores, conectando la susceptancia en paralelo con los hornos de arco, así suministra o absorbe potencia reactiva de forma que la combinación de potencia reactiva del horno y el compensador se aproxime a una constante.

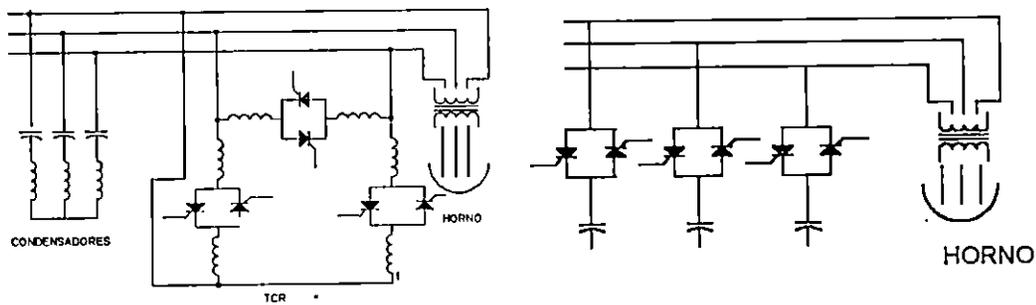


Figura 4.2 (Derecha) Principio de compensación de TSC. (Izquierda) Arreglo general para la compensación de TCR.

En los sistemas compensadores TCR esta potencia reactiva constante es usualmente igual a la máxima frecuencia repetida de los picos de potencia reactiva del horno, el factor de potencia es corregido por la acción de capacitores en paralelo. Esto es llamado **compensación indirecta**. En sistemas de compensación TSC la constante reactiva es casi cero, esto es llamado **compensación directa**. Esta estrategia automáticamente reduce las fluctuaciones de voltaje arriba del punto de compensación.

Los TCR (Thyristor Controlled Reactor) incluyen en cada uno de sus reactores, controles por medio de un SCR. El proceso es llamado control de fase.

Sin embargo, para mantener el balance entre polos opuesto de los tiristores en el switch, y abolir el dc y alguna corriente armónica, los pulsos de disparo están restringidos a el 90% del el periodo inmediatamente seguido de un voltaje pico; esto es $90^\circ < \alpha < 180^\circ$.

La componente de corriente fundamental I_{L1} esta relacionada al ángulo de disparo α por la ecuación [5]:

$$I_{L1} = \frac{V}{\pi \omega L} (2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha)) \quad (4.3.1) \quad \lambda$$

Donde L es la inductancia de la reactancia y ω es la frecuencia fundamental en radianes.

Es de I_{L1} que la potencia reactiva dada por el compensador es determinada de acuerdo a la definición

$$q = VI_{L1} \quad (4.3.2) \quad \lambda$$

Esto debe ser interpretado en términos de un promedio tomado sobre una mitad de periodo, porque I_{L1} en la Ecuación 4.3.2 fue determinada por Fourier como:

$$I_U = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} i_L(\alpha) * \sin(\omega t) dt \quad (4.3.3)$$

La obtención del pulso de disparo a un tiristor a un ángulo α encarga al reactor asociado a conducir hasta el próximo estado de corriente cero. El intervalo de integración en la Ecuación ~~4.3.3~~ 3 es de 90 a 270 grados en la forma de onda de voltaje y a menos que $\alpha = 90^\circ$ este comienza antes que sea dado el pulso de disparo.

4.3.2 Determinación De La Demanda De Potencia Reactiva.

Tanto el TCR como el TSC requieren de una señal que represente la mayoría de valores de potencia reactiva fundamental o potencia reactiva desplazada del horno. Esta potencia reactiva puede ser definida por fase como:

$$q_1(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t v(t)i(t - \frac{T}{4}) dt \quad (4.3.4)$$

la cual es un promedio. Esta relación puede obtenerse de un circuito algorítmico, el cual da una señal continua representado la carga de potencia reactiva en el período que termina en el tiempo t . El compensador está tratando de proveer solamente la potencia reactiva fundamental mientras que las armónicas son absorbidas con los filtros. Otro método usado para determinar $q_1(t)$ está basado en la relación

$$v_i \text{ sen } \phi = -v * \text{sen } \omega t * i_1 \text{ sen}(\omega t - \phi - \frac{\pi}{2}) + -v * \text{sen}(\omega t - \frac{\pi}{2}) * i_1 \text{ sen}(\omega t - \phi) \quad (4.3.5)$$

El lado izquierdo es igual a la carga de potencia reactiva por fase en estado estable. Esta función puede materializarse en el circuito de la Figura 4.3.

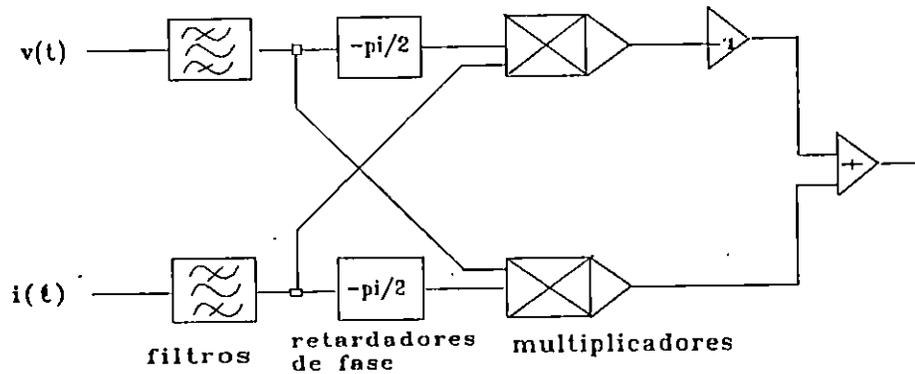


Figura 4.3 Circuito algorítmico para determinar la potencia reactiva instantánea $q_1(t)$.

4.4 Simulación Por Computadora.

Al igual que los casos presentados con anterioridad, los modelos utilizados para la simulación dependen de los objetivos que se persigan con esta.

En lo que respecta a los hornos de arco, existen dos puntos principales a investigar: La generación de Flicker y La generación de Armónicas [6]. Es así que se presentan dos modelos del arco propiamente dicho. El sistema general, sin embargo, puede mantenerse; ya que pudo concluirse que su modelo de características terminales es lo suficientemente adecuado para ambas ocasiones, que son de estado estable.

Los parámetros utilizados han sido tomados de un sistema real, la configuración es la siguiente:

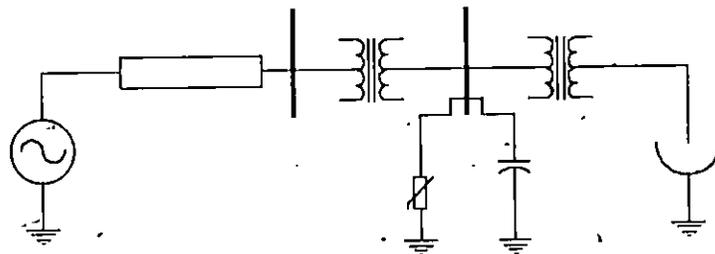


Figura 4.4 Diagrama unifilar de la instalación bajo estudio.

4.4.1 Simulación Para La Determinación De Flicker.

El programa en sí consta de tres partes principales [7]:

El modelo del arco. Las variaciones de longitud del arco durante el proceso de fundición no permiten la aplicación de modelos lineales, se recurre a modelos no lineales que imiten el comportamiento aleatorio de la variación de longitud del arco, y por ende de su resistencia; este método es llamado de Resistencia Aleatoria o Resistencia No Lineal.

La medición de potencia. Se desarrolla por medio de un circuito algorítmico. ATP proporciona la potencia instantánea [8], pero como la compensación se hace para la potencia reactiva, es necesario obtener información respecto a ésta. Una vez calculada la potencia reactiva, puede compararse con la curva de potencia en función del ángulo de disparo de los tiristores en el compensador, para determinar el ángulo adecuado.

El circuito eléctrico. Según se dijo, todo el sistema eléctrico es modelado por sus características terminales de voltaje, corriente y factor de potencia. El rango de frecuencias involucradas es tal que nos permita esta simplificación. De igual forma se modelan los compensadores. El circuito de impedancias es referido al lado de alta tensión del transformador reductor del sistema. Los compensadores se colocan entre los dos transformadores del circuito del horno, es decir, entre el transformador reductor y el transformador del horno. Esta es la configuración de uso generalizado, ya que se ha podido comprobar que produce los mejores resultados de los compensadores, cualquiera que sea su tipo.

Uno de los programas utilizados en la simulación puede verse en el apéndice. Sin embargo en la Tabla 4.3 se listan los programas junto a sus casos.

4.4.2 Simulación Para Determinación De Armónicos.

La configuración del sistema para este caso es mucho mas simple que la anterior debido a que no es necesario medir la potencia reactiva que el horno necesita. De igual manera, el arco del horno es sustituido por fuentes de voltaje a las frecuencias armónicas relevantes. Las corrientes armónicas son extraídas de datos reales y luego se prueban los filtros desarrollados para la anulación de los armónicos en la línea. Como es usual, se aprovechan los capacitores para corrección del factor de potencia en los fil-

tros sintonizados [9]. Se presentan los resultados de la instalación de filtros en el sistema. En la Figura 4.5 puede verse la posición de los filtros que se representan como uno solo.

Es de hacer notar que a pesar de la presencia de armónicos de orden 2 y 4, solo se implementaron filtros para tercero y quinto armónicos, los elementos de orden par tienen magnitudes menores y con representatividad temporal también reducida. De igual manera sucede con el séptimo armónico.

TABLA 4.3
LISTADO DE PROGRAMAS PARA SIMULACIÓN DE FLICKER.

Nombre de el programa	Caso que representa
arcfurna	Sin compensación, banco de 200 kvars
arcfurn2	Sin compensación, sin banco
arcfu301	Compensación directa por TCR, banco completo, margen de disparo de 1%
arcfu305	Igual que el anterior, margen de 5%
arcfu310	Igual que el anterior, margen de 10%
arcfurn4	Condiciones actuales de operación
arcfurn5	TCR, banco de 200 kvars, margen de 1%
arcfurn6	Compensación serie, banco de 200 kvar
arcfurn7	TCR, compensación indirecta, banco de 200 kvars, $Q_{compe} = 0.5$ Mvars
arcfurn8	TCR, compensación indirecta, banco completo, $Q_{compe} = 0.7$ Mvars
arcfu901	Compensación serie de 0.1 pu
arcfu903	Compensación serie de 0.3 pu
arcfu905	Compensación serie de 0.5 pu

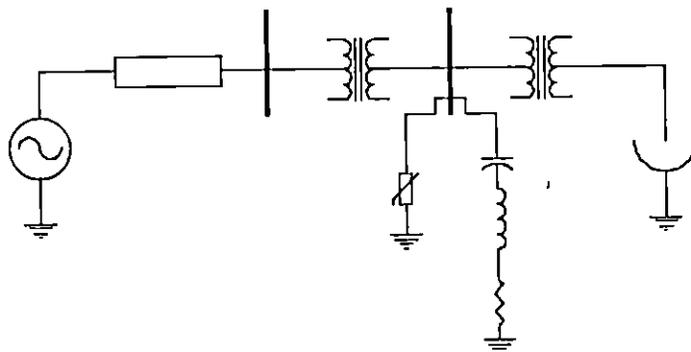


Figura 4.5 Ubicación del filtro armónico.

Para este caso se decidió simular los efectos del filtro solo en aquellos casos que representaron las mejores condiciones de flicker según los resultados obtenidos previamente; también se trabajó con el caso de condiciones actuales de operación. Los nombres de los archivos fueron alterados a 3furxxx, donde xxx representa el número que contienen los programas según se describe en la Tabla 4.3.

4.5 Resultados De La Simulación.

El primer paso en la realización de un estudio sobre la instalación de hornos de arco es el cálculo del SCVD que para el caso que nos interesa resulta ser de 0.202. Según la literatura al respecto [4] este valor se encuentra un orden de magnitud por arriba de los límites que presentarían flicker objetable en el sistema; tal resultado es una muestra de la fuerza de la línea de alimentación respecto a el horno de arco.

En lo que respecta a el comportamiento del sistema en condiciones normales, la simulación nos permite presentar las siguientes gráficas de voltaje:

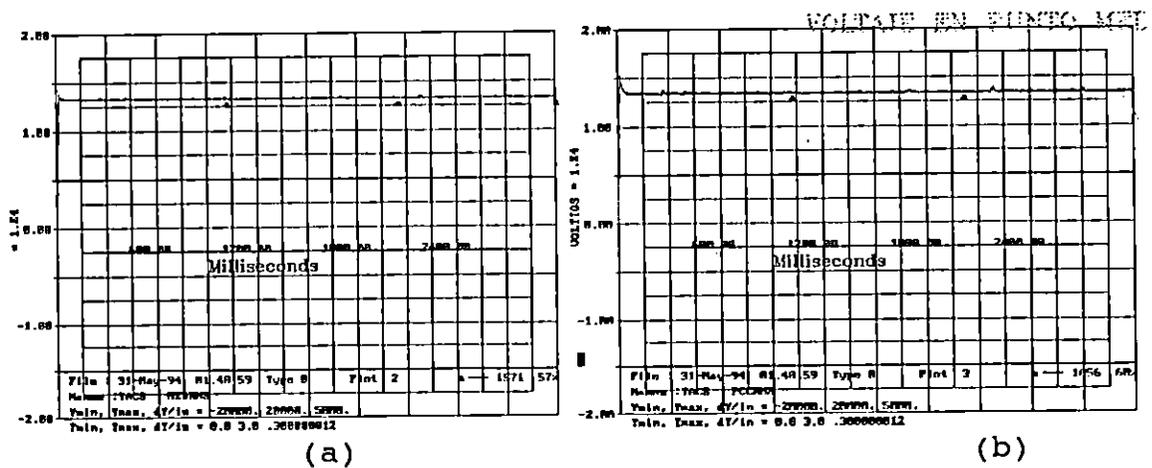


Figura 4.6 Voltajes rms en el punto medio de la línea (a) y en pcc (b).

De ésta forma podemos observar que la carga, al variar su demanda de potencia reactiva del sistema; produce variaciones de voltaje a lo largo de la línea de alimentación. Esto es la causa del flicker. A continuación se presentan las curvas de potencia del horno en funcionamiento.

Cap. 4: Análisis de Flicker y Armónicas en Hornos de Arco

Es importante mencionar en este momento que el modelo usado para la simulación se refiere a la primera etapa del proceso de fundición que se menciona en la sección 4.0.

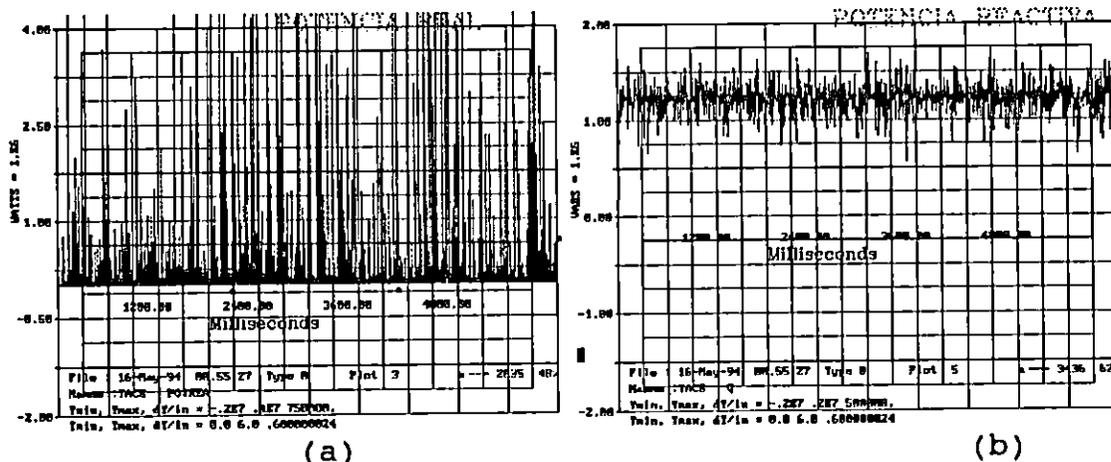


Figura 4.7 Potencia real (a) y potencia reactiva (b) del horno.

Como es de esperarse, la corriente que supla tales potencias ha de ser poco uniforme. Consecuentemente, el factor de potencia presenta variaciones bastante grandes. Lo anteriormente expuesto puede verse en la figura 4.8 y pone de manifiesto el comportamiento "normal" del sistema.

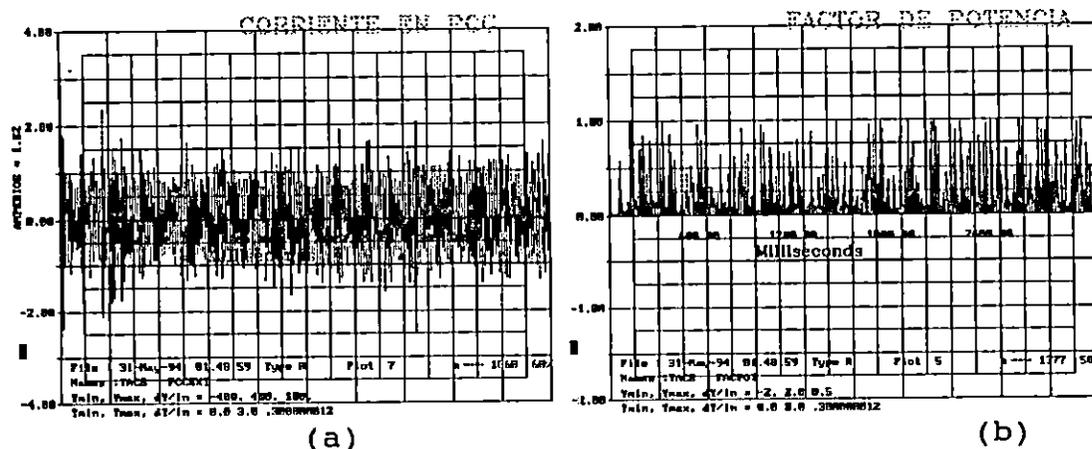


Figura 4.8 Corriente (a) y factor de potencia (b) del horno.

Como las gráficas para los resultados de las simulaciones para los diferentes casos son similares a las ya presentadas, no se muestran.

Los porcentajes de variación de voltaje en función de la frecuencia sirven para calificar el flicker, de forma que se presentan estos para ser comparados con las curvas de percepción de flicker de la Figura 4.1.

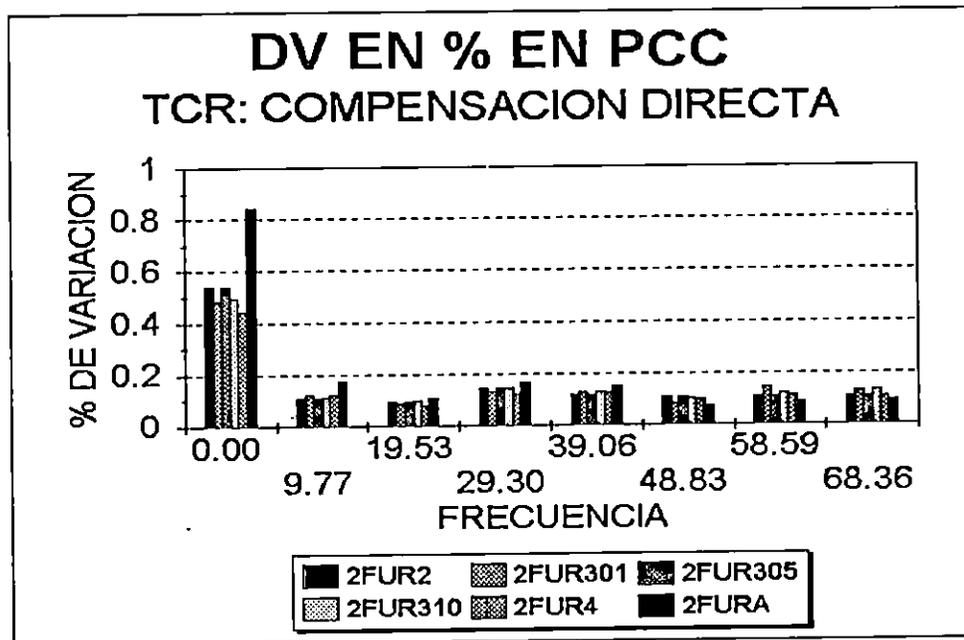


Figura 4.9 Porcentajes de variación de voltaje en función de la frecuencia para compensación directa y casos varios.

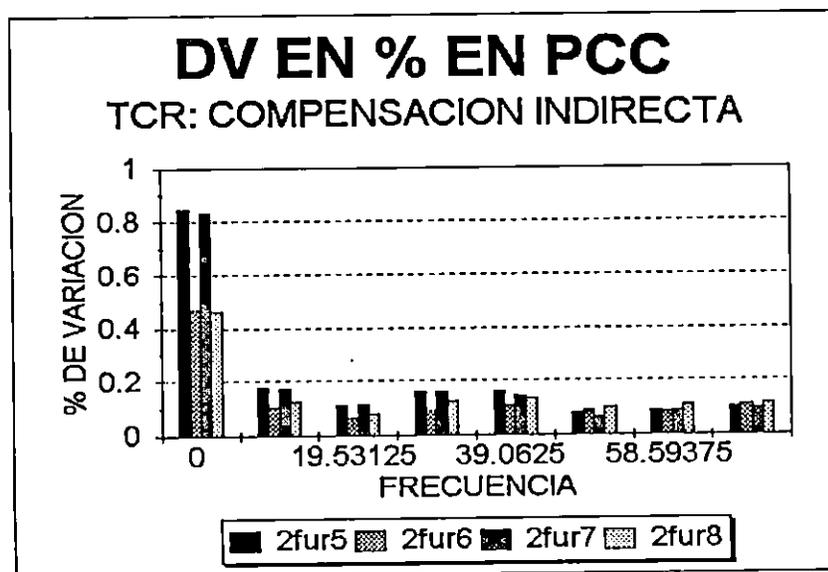


Figura 4.10 Porcentajes de variación de voltaje en función de la frecuencia para compensación indirecta.

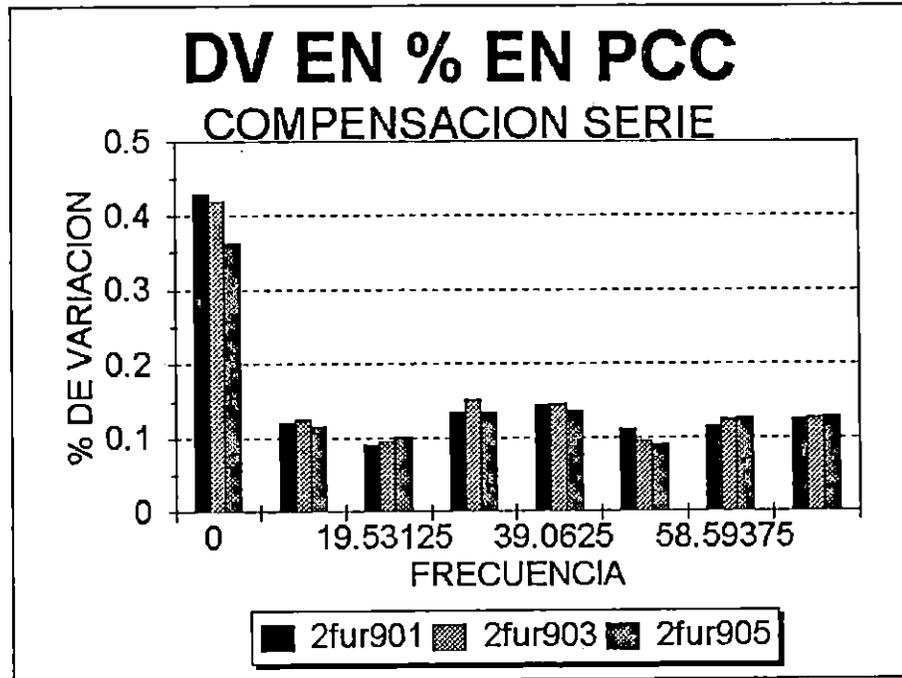


Figura 4.11 Porcentajes de variación de voltaje en función de la frecuencia para compensación serie.

Los resultados presentados permiten notar los efectos de los diferentes tipos de compensación en la reducción del flicker.

Compensación directa: En términos generales, podríamos decir que la compensación directa con TCRs no es adecuada; puede observarse que todos los esfuerzos en este sentido produjeron un incremento del flicker. Era de esperarse, ya que aunque se ampliara el rango de disparo, la tendencia del compensador de reducir a cero la potencia reactiva vista por la fuente solo agranda las variaciones de ésta; y como tal es la causa de las desviaciones de voltaje, la consecuencia directa es el incremento del problema.

Compensación indirecta: El resultado para este caso es mejor, es decir, efectivamente existe una reducción del flicker, sin embargo no es tan significativa. De nuevo se hicieron pruebas reduciendo el banco de capacitores, esto con el objetivo de mejorar el factor de potencia, y a partir de los datos obtenidos puede notarse que no es conveniente tal operación con el empleo de TCRs.

Compensación serie: Presenta resultados similares a la compensación indirecta. Con la diferencia de que una reducción en el banco de capacitores reduce el flicker. Respecto a la reducción de la potencia que recibe el horno, los datos de la simulación no revelan una reducción sustancial. Puede verse mas sobre esto en la referencia [7]. Entre las reactancias usadas (valores) la que mayor reducción logra es la

de 0.5 pu, sin embargo, su aplicación dependerá de cada caso en particular, ya que puede llegar a ser grande.

Hasta este punto se ha mencionado la existencia de variaciones de voltaje en el PCC del sistema bajo estudio, las variaciones para el punto medio de la línea también fueron medidas y se verificó una reducción en las variaciones de un 50% respecto a las variaciones en el PCC. Tales porcentajes de cambio en el PCC caen en la categoría de flicker objetable o perceptible en los rangos bajos, es decir, poco perceptibles.

Enseguida se presentan dos gráficas de factor de potencia de casos de simulación.

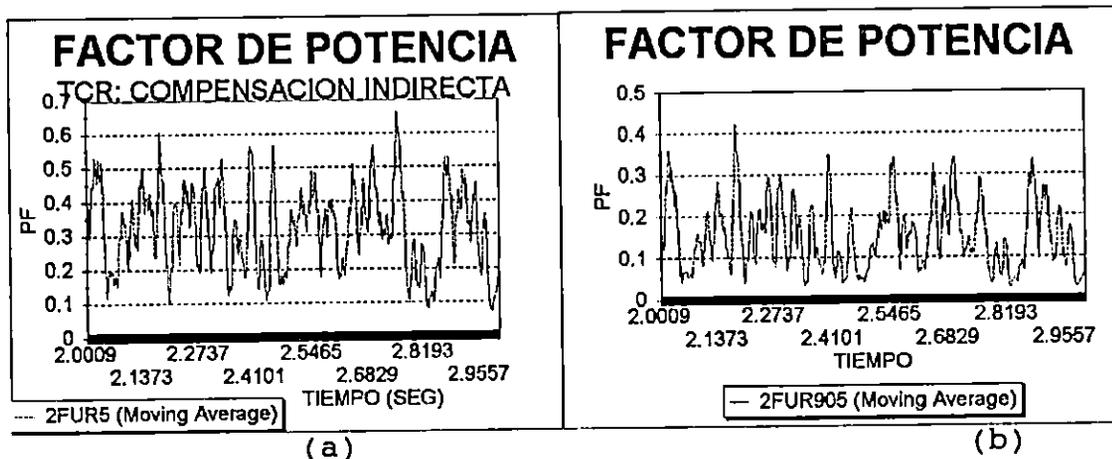


Figura 4.12 Factor de potencia para compensación indirecta (a) y para compensación serie (b) casos escogidos.

Para las simulación sobre distorsión armónica los análisis demuestran presencia de armónicos pares e impares, siendo predominantes los impares hasta el quinto, el séptimo es perceptible pero los armónicos que sobrepasan las normas [10] son básicamente el tercero y el quinto; de forma que se realizó la simulación sobre aplicación de filtros solo para estas armónicas.

Los filtros fueron añadidos a el caso de condiciones actuales de operación y a dos casos escogidos por presentar mejores resultados en cuanto a flicker; curiosamente, pudo observarse el incremento del flicker con la aplicación de los filtros que a pesar de todo, operaron satisfactoriamente, es decir, reduciendo las armónicas sin esforzar ninguno de sus elementos con voltajes o corrientes excesivos [11]. El compensador que mejor se comportó luego de la aplicación del filtro fue el tipo reactor serie, para las mas bajas frecuencias los niveles casi se duplicaron para el TCR en com-

pensación indirecta y el caso de no compensación, los cambios a partir de los 10 Hertz, sin embargo, son pequeños.

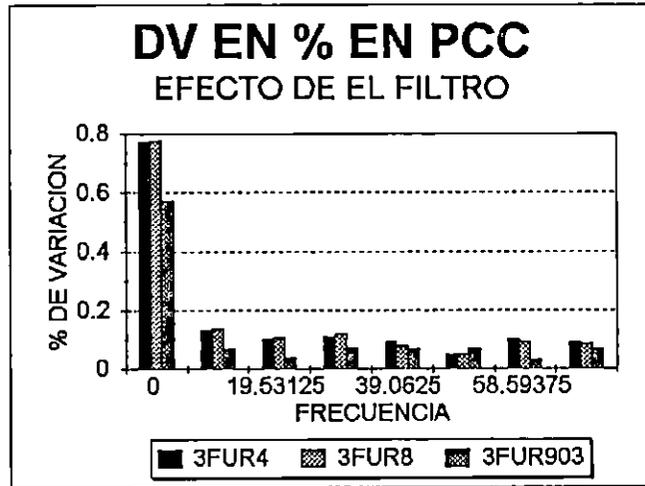


Figura 4.13 Efecto de la aplicación de filtros armónicos en el flicker.

CONCLUSIONES DEL CAPITULO IV

1. Pudo demostrarse que para el uso de TCRs, resulta mas conveniente un esquema de compensación indirecta, o sea, sin tratar de corregir con el compensador el factor de potencia. El mejoramiento de este último tiene límites de operación impuestos por el sistema
2. La compensación por reactores en serie con el equipo presenta una alternativa simple a el uso de los TCRs. La reducción del flicker presenta niveles similares para ambos casos; ligeramente mejores con los reactores serie.
3. Algunos esquemas de compensación pueden resultar en el empeoramiento del flicker, tal es el caso de intentar compensación directa con los TCRs.
4. La introducción de filtros armónicos, si bien reduce la distorsión armónica en el sistema, también puede producir efectos secundarios negativos como el incremento del flicker. Con todo, los límites de perceptibilidad (4-14 Hertz) son poco afectados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 50(161)(1990). International Electrotechnical Vocabulary, Chapter 161: "Electromagnetic Compatibility".
- [2] Mendis, S. R., et al. "Investigation of Transmission System Voltage Flicker due to Multiple AC and DC Furnace Operations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, pp. 483-496, January 1995.
- [3] Electric Utility Engineers of the Westinghouse Electric Corporation. Electric Utility Engineers Reference Book: Distribution Systems. First Edition, Fourth Printing, 1965.
- [4] Miller, T. J. E. Reactive Power Control In Electric Systems. John Wiley and Sons, 1989.
- [5] Mohan, Ned., et al. Power Electronics: Converters, Applications and Design. John Wiley and Sons, 1982.
- [6] Mendis, S. R. Y González, D. A. "Harmonic and Transient Overvoltage Analyses in Arc Furnace Power Systems". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, pp. 336-342, March/April 1992.
- [7] Montanari, G. C., et al. "Arc Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, pp. 2026-2034, October 1994.
- [8] Canadian/American EMTP User Group. ATP Rule Book, 1987-92.
- [9] Vilcheck, William y González, Damián. "Measurements and Simulation - Combined for State-of-the-Art Harmonic Analyses". Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE, New York, 1988.

Simulación Para Análisis Transitorio y Armónico ...

[10] Project IEEE-519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE, New York, October 1991.

[11] Standard on Shunt Capacitors, IEEE 18-1992, IEEE, New York.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. La simulación de los sistemas eléctricos permite conocer y entender el funcionamiento de éstos; lográndose un punto de vista mas claro sobre la participación de cada elemento dentro del sistema.
2. La confiabilidad de los resultados de la simulación depende de los modelos usados para cada elemento y del conocimiento de los parámetros del sistema real.
3. No debe perderse de vista que las computadoras y la simulación, son herramientas para el ingeniero. Para que tales herramientas sean útiles, es necesario conocer los sistemas bajo estudio, las normas que deben cumplir y lo que se espera que realicen. Esto en aras de una correcta interpretación de los resultados obtenidos y de la toma de decisiones adecuadas.
4. La simulación puede utilizarse tanto en análisis de sistemas, como en el diseño de éstos. Así los diseños incluirán los elementos que garanticen el cumplimiento de las normas correspondientes a cada sistema en particular. Mientras que para sistemas existentes pueden encontrarse mejoras ó soluciones a problemas.
5. El análisis dinámico de los sistemas deja ver los elementos funcionando; de forma que pueden encontrarse las circunstancias que llevan a los sistemas a los mayores esfuerzos (eventos transitorios).
6. Los sistemas eléctricos contienen muchos elementos no lineales, de aquí que el análisis armónico es de gran importancia en gran número de casos de estudio.

RECOMENDACIONES

1. La simulación de sistemas eléctricos es muy ventajosa. Sin embargo, no hay que sobrestimarla ni subestimarla.
2. Los modelos de los elementos que se usan en las simulaciones, han de corresponder con los objetivos de éstas. Deben usarse los modelos adecuados a cada caso de análisis o diseño.
3. Para obtener mejores resultados en la simulación es conveniente la medición de los parámetros de los elementos. Hacer esto siempre que sea simple y/o necesario.
4. El estudio dinámico de los sistemas es suficientemente útil como para considerarlo parte de la formación del ingeniero. Con las herramientas adecuadas ésta labor se facilita. Resultará provechoso el continuar la aplicación de las técnicas de simulación con tales fines.

Anexos

ANEXOS

ANEXO A

Simulación En ATP Para La Conexión De Un Segundo Banco De Capacitores.

```

C          1          2          3          4          5          6          7          8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
BEGIN NEW DATA CASE
C NOMBRE DE ARCHIVO = CAPABANK2.DAT "SIMULACION DE EFECTOS DE INTERCONEXION DE
C                                BANCOS DE CAPACITORES"
      5.0E-6  4.0E-3
          25      1
C INICIO DE RAMAS RLC
OOFUENTEBUS                                1.4                {INDUCTANCIA DE "FUENTE"}           1
OOFUENTE                                  1.0E+9 {PARA MEDICION DE VOLTAJE DE FUENTE}           2
OOBUS                                    175.00 {RES EQUIVALENTE DE BUSES PARALELOS}           2
OOBUS                                      90.26 {BANCO DE CAPACITORES 1}           1
OOBUS INTERR                              1.000.0192 {CONEXION ENTRE BANCOS}           1
OOBANCO2                                  22.28 {BANCO DE CAPACITORES 2}           2
BLANK TERMINACION DE RAMAS
OOINTERRBANCO2  0.1E-3  200.0E-3
BLANK TERMINACION DE INTERRUPTORES
14FUENTE 1  18.779E3      60.0                                -1.0E-3
BLANK TERMINACION DE TODAS LAS FUENTES
FUENTEBUS
BLANK TERMINACION DE PEDIDO DE VOLTAJES DE NODO
    
```

Simulación En SPICE Para La Reconexión De Un Banco De Capacitores Debido A El Redisparo De Un Circuit Breaker.

```

BANCO DE CAPACITORES CON RLINEA
*SIMULACION DE RESTRIKING
VFUENTE 1 0 SIN(0 11.2676K 60 0 0 0)
VREFERE 5 0 PWL(0 0 0.0041 0 0.0043 1 0.0048 1 0.005 0
0.0125 0
+ 0.0127 -1 0.0132 -1 0.0134 0 0.0208 0 0.021 1 0.0215 1
+ 0.0217 0 0.0292 0 0.0294 -1 0.0299 -1 0.0301 0)
RREFERE 5 0 1
RLINEA 1 2 0.1
LLINEA 2 3 1mH
SBREAKER1 3 4 5 0 SMOD
SBREAKER2 3 4 5 0 SMOD2
CBANCO 4 0 69.64uF IC=-11.2676KV
.MODEL SMOD VSWITCH(ROFF=1E9 VON=1 VOFF=0)
.MODEL SMOD2 VSWITCH(ROFF=1E9 VON=-1 VOFF=0)
.TRAN 0.1mS 33.33mS UIC
.PROBE
.END
    
```

ANEXO B

Simulación En ATP Para Coordinación De Protecciones.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C NOMBRE DE ARCHIVO = ARRELONG.DAT SIMULACION PARA "COORDINACION DE PROTECCIONES
C                               CONTRA SOBREVOLTAJES" ONDA 10/1000 us.
C
C AVERAGE OUTPUT
C ZO,20,4.0E-6, , ,0.9,
  1.0E-6  1.1E-2
  1000    2          0          1
C
C INICIO DE RAMAS RLC
C DEFINICION DE LOS PARAMETROS PERTINENTES A LA DISTANCIA ENTRE EL ARRESTER
C Y EL SUPRESOR, PARA CABLE # 12, LA INDUCTANCIA ESTA EN MILIHENRIOS
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
OOSURGE SUPRE          0.00520.0050 {ESTOS SON R/D Y L/D MULTIPLIC POR D} 1
OOSURGE                1.0E8        1.0E-3    {ESTAS DOS LINEAS SON PARA}
OOSUPRE                1.0E8        1.0E-3    {CONVERGENCIA DE RUTINA}
C
C DEFINICION DE EL ARRESTER
92SURGE                5555.          4
  520.0                -1.0          0.0          0.0
  3.0E2                36.0         0.01
  9999.
C DEFINICION DE EL SUPRESOR
92SUPRE                5555.          4
  520.0                -1.0          0.0          0.0
  3.0E2                36.0         0.01
  9999.
BLANK TERMINACION DE RAMAS
C
BLANK TERMINACION DE INTERRUPTORES
C
C AQUI SE DA LA GENERACION DE EL TRANSITORIO
C
15SURGE -1222.9      -0.65E3    -4.5E5
C
BLANK TERMINACION DE TODAS LAS FUENTES
C
C ESTABLECIMIENTO DE CONDICIONES INICIALES DE VOLTAJE
C
O2SURGE  0.0
O2SUPRE  0.0
C
C PETICION DE VOLTAJES DE NODO A TIERRA
C
SURGE SUPRE
C
BLANK TERMINACION DE SALIDA DE NODOS DE VOLTAJE

```

Simulación Para Análisis Transitorio y Armónico ...

BEGIN NEW DATA CASE

C NOMBRE DE ARCHIVO = ARRECOMB.DAT SIMULACION PARA "COORDINACION DE PROTECCIONES CONTRA SOBREVOLTAJES" ONDA 8/20 uS.

C

AVERAGE OUTPUT

C ZO,20,4.0E-6, , ,0.9,

0.5E-7 0.2E-3

300

2

0

1

C

TACS HYBRID

C AQUI COMIENZAN LAS EXPONENCIALES DOBLES

C

98ONDAA = EXP(-50*TIMEX) - EXP(-1.0*10**4*TIMEX)

98ONDAB = EXP(-16.0*10**4*TIMEX) - EXP(-20.5*10**5*TIMEX)

98ONDAC = EXP(-200*TIMEX) - EXP(-6.0*10**4*TIMEX)

C

C ASI SE DEFINE LA FORMA DE ONDA FINAL

C

98SURGE = 116.2991*ONDAA*ONDAB*ONDAC*3000 {3000 ES LA MAG DE LA CORRIENTE}

BLANK FINALIZACION DE LOS TACS

C

C INICIO DE RAMAS RLC

C DEFINICION DE LOS PARAMETROS PERTINENTES A LA DISTANCIA ENTRE EL ARRESTER

C Y EL SUPRESOR, PARA CABLE # 12, LA INDUCTANCIA ESTA EN MILIHENRIOS

C 1 2 3 4 5 6 7 8

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C

00SURGE SUPRE 0.02080.0200 {ESTOS SON R/D Y L/D MULTIPLIC POR D} 1

00SURGE 1.0E8 1.0E-3 {ESTAS DOS LINEAS SON PARA}

00SUPRE 1.0E8 1.0E-3 {CONVERGENCIA DE RUTINA}

C

C DEFINICION DE EL ARRESTER

92SURGE 5555. 4

520.0 -1.0 0.0 0.0

3.0E2 36.0 0.01

9999.

C DEFINICION DE EL SUPRESOR

92SUPRE 5555. 4

285.0 -1.0 0.0 0.0

6.0E3 27.0 0.01

9999.

BLANK TERMINACION DE RAMAS

C

BLANK TERMINACION DE INTERRUPTORES

C

C AQUI SE DA LA CONEXION DE EL TRANSITORIO GENERADO PREVIAMENTE

C

60SURGE -1 {ESTA CORRIENTE FUE CALCULADA EN LOS TACS}

C

BLANK TERMINACION DE TODAS LAS FUENTES

C

C ESTABLECIMIENTO DE CONDICIONES INICIALES DE VOLTAJE

C

02SURGE 0.0

02SUPRE 0.0

C

C PETICION DE VOLTAJES DE NODO A TIERRA

C

SURGE SUPRE

C

BLANK TERMINACION DE SALIDA DE NODOS DE VOLTAJE

ANEXO C

Simulación En ATP Para Determinación De Flicker Y Compensación.

```

C ARCHIVO PARA DETERMINACION DE FUNCIONAMIENTO DEL HORNO DE ARCO SIN
C COMPENSACION DE NINGUN TIPO
BEGIN NEW DATA CASE
C ESPECIFICACIONES DE TIEMPO
  0.1E-3      3.0
C ESPECIFICACIONES DE SALIDA
  1000      10
                                                    1
TACS HYBRID
C
C RESISTENCIA ALEATORIA CON SU FILTRO PASABANDA
98ALEA1      = (RAN(1))
02FILTRO    +ALEA1      23.0
0.0          19.646E-3
1            19.646E-3 3.127E-4
98REALEA    =ABS(FILTRO) * 8400.0
C
C ETAPA DE CALCULO DE Q
90PCCINT      {VOLTAJE EN EL PCC}
91PCCEXT      {CORRIENTE HACIA HORNO}
02VFILTR    +PCCINT
0.0          80.814
60.63E3     80.814      0.427
02IFILTR    +PCCEXT
0.0          80.814
60.63E3     80.814      0.427
99VDESFA53+VFILTR      0.00416
99IDESFA53+IFILTR      0.00416
99VI1        =IFILTR*VDESFA
99VI2        =VFILTR*IDESFA
99Q           =VI2-VI1      {POTENCIA REACTIVA}
C
C CALCULOS DE POTENCIAS Y FACTOR DE POTENCIA
90TERMIN      {VOLTAJE EN TERMINALES DE EL HORNO}
99QQQCUA     = Q*Q
99REALTO     =REALEA+0.624
99POTREA     = TERMIN*TERMIN/REALTO  {POTENCIA ACTIVA}
99PORECU     = POTREA*POTREA
99SUMPOT     = PORECU+QQQCUA
99POTAPA     = SQRT(SUMPOT)          {POTENCIA APARENTE}
99FACPOT     = POTREA/POTAPA        {FACTOR DE POTENCIA}
90MITAD1
99MEDRMS66+MITAD1      60.0
99PCCRMS66+PCCINT      60.0
C
33MEDRMSPPCCRMSFACPOTPCCEXT  {VARIABLES DE SALIDA}
BLANK FIN DE TACS
C
00GENERAMITAD1      0.776 5.143      {MITAD DE LA LINEA}
00MITAD1PCCEXT      0.776 5.143      {HASTA PCC}
00PCCINTACOMET      77.E-3      {ACOMETIDA TRAF0 REDUCTOR
R=0.016}
C
00ACOMETTRAFRE      10.58      {Z EQ TRAF0 REDUCTOR}

```

Simulación Para Análisis Transitorio y Armónico ...

OOTRAFRE			9.015	{BANCO DE CAPACITORES 12.02}
OOTRAFRETRAFHO		11.218		{TRAFO DE EL HORNO}
OOTRAFHOTERMIN		4.226		{BARRAS DE CONEXION}
OOTERMINLECTR		0.624	9.363	{CABLES A GRAFITOS
C				CR=0.608+0.016}
91ELECTR	TACS	REALEA		{RESISTENCIA DE EL HORNO}
OOPCCEXT		665.2	1174.2	{SUBESTACION 5}
OOPCCEXTSUBES3		0.026	0.127	{HACIA SUBESTACION 3}
OOSUBES3			3.045	{BANCO DE CAPACITORES}
OOSUBES3		1309.539	10.1	{SUBESTACION 3}
BLANK				
C				
OOPCCEXTPCCENT				MEASURING
BLANK				
C				
14GENERA	18.66E3	60.0		
BLANK				
C				
MITAD1PCCEXT				
BLANK				