

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica**

IE – 0502 Proyecto Eléctrico

**MAGNIFICACION DE TENSIONES POR
MANIOBRAS DE BANCOS DE
CONDENSADORES**

Por:

HEINER ALFREDO PEREZ ARROYO

**Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
Julio del 2008**

MAGNIFICACION DE TENSIONES POR MANIOBRAS DE BANCOS DE CONDENSADORES

Por:

HEINER ALFREDO PEREZ ARROYO

Sometido a la Escuela de Ingeniería Eléctrica
de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Costa Rica
como requisito parcial para optar por el grado de:

BACHILLER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Aprobado por el Tribunal:

Ing. JUAN CARLOS MONTERO Q.
Profesor Guía

Ing. LESLIE GONZALEZ
Profesor lector

Ing. JUAN CARLOS QUESADA L.
Profesor lector

DEDICATORIA

Quiero dedicarles este proyecto en primera instancia a DIOS y a la Virgen Maria por darme la fuerza y la sabiduría para poder conseguir esta meta.

También a mis padres Alfredo y Ana, y a mis hermanos por haberme brindado un apoyo incondicional en los momentos que más los necesite.

RECONOCIMIENTOS

Al Ing. Juan Carlos Montero, por haber guiado este proyecto de manera comprometida y entrega total, por responder a cada una de las inquietudes que me surgieron de manera atenta y responsable.

A los otros profesores que formaron parte de este proyecto, al Ing. Leslie González y al Ing. Juan Carlos Lacayo, que con su aporte hicieron posible este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
NOMENCLATURA.....	x
RESUMEN.....	xi
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo general.....	3
1.1.2 Objetivos Especificos	3
1.2 Metodología	4
CAPÍTULO 2: Desarrollo Teórico.	6
2.1 Conmutación del capacitor.	6
2.2 La conmutación del capacitor y la magnificación de tensión.	10
2.3 Causas de la magnificación de la Tensión.	11
2.4 Disparos indeseados en variadores de velocidad ajustable.....	18
CAPÍTULO 3: Técnicas de mitigación de sobrevoltajes.....	20
3.1 Impedancia de preinserción.	20
3.2 Inductores de preinserción de impedancia.	22
3.3 Control de cierre sincrónico.....	23
3.4 Supresores MOV.....	24
3.5 Tiempos de Conmutación.	25
3.6 Ubicación del capacitor.	26
3.7 La Experiencia de la Aplicación.	26
3.8 Opciones del cliente para distintas condiciones de potencia.	28
CAPÍTULO 4: Experiencias de las compañías eléctricas.	31
CAPÍTULO 5: Simulaciones	34
5.1 Estudio del fenómeno.	34
5.2 Simulaciones con Técnicas de mitigación.	54
5.3 Efecto de una falla en la industria con capacitores que corrigen el factor de potencia.	60

CAPÍTULO 6: Regulación de la Magnificación de Tensión según el ARESEP.....	69
CAPÍTULO 7: Conclusiones y recomendaciones.	71
7.1 Conclusiones.....	71
7.2 Recomendaciones.	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73
APÉNDICES	75
ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura2.1 Conmutación del capacitor.....	7
Figura2.2 Energización del capacitor de distribución, transitorio de voltaje.	9
Figura2.3Energización del capacitor de distribución. Transitorio de corriente.....	10
Figura 2.4. Diagrama típico de un sistema de potencia.	11
Figura2.5 Transitorio por la conmutación del capacitor y transitorio en los capacitores de la industria.	13
Figura2.6 Diagrama de un sistema de potencia que muestra un sistema que puede ocurrir la magnificación de tensión.	15
Figura2.7 Circuito equivalente de la magnificación de tensión.....	15
Figura2.8 Energía de descarga por magnificación de transitorios.....	17
Figura 3.1. Circuito breaker SF6 con preinserción de resistores	21
Figura 3.2 Inductores de preinserción.....	23
Figura 3.3. Control de cierre sincrónico.	24
Figura 5.1 Diagrama Unificar del circuito típico de la magnificación de la tensión	35
Figura 5.2 Circuito de estudio para la magnificación de tensión.....	35
Figura 5.3. Ondas de tensión por la conmutación del capacitor en la empresa eléctrica con valores base.....	37
Figura 5.4. Ondas de la magnificación de tensión en la industria por la conmutación del capacitor	38
Figura 5.5. Magnificación de tensión con una capacidad de potencia reactiva del capacitor de 75 KVAR.....	39
Figura 5.6. Magnificación de tensión con una capacidad de potencia reactiva del capacitor de 150 KVAR.....	40
Figura 5.7. Magnificación de tensión con una capacidad de potencia reactiva del capacitor de 250KVAR	41
Figura 5.9. Resultados del voltaje pico máximo transitorio al variar el capacitor de la industria.	41
Figura 5.10. Magnificación de tensión con transformador reductor con capacidad de 250 kVA.	42
Figura 5.11. Magnificación de tensión con transformador reductor con capacidad de 500 kVA.	42
Figura 5.12. Magnificación de tensión con transformador reductor con capacidad de 1000 kVA.	43
Figura 5.13. Magnificación de tensión con transformador reductor con capacidad de 2000 kVA.	43
Figura 5.14. Resultados del voltaje pico máximo transitorio al variar la potencia nominal del transformador reductor de la industria.	44

Figura 5.15. Magnificación de tensión con impedancia del transformador de 4%.	45
Figura 5.16. Magnificación de tensión con impedancia del transformador de 6%.	45
Figura 5.17. Magnificación de tensión con impedancia del transformador de 7%.	46
Figura 5.18. Magnificación de tensión con impedancia del transformador de 8%.	46
Figura 5.19. Magnificación de tensión con impedancia del transformador de 9%.	46
Figura 5.20. Magnificación con impedancia del transformador de 10%.	47
Figura 5.21. Resultados del voltaje pico máximo transitorio al variar la impedancia porcentual del transformador.	48
Figura 5.22. Magnificación de tensión con tiempo de conmutación de $T=0.102$	49
Figura 5.23. Magnificación de tensión con tiempo de conmutación de $T=0.104$	50
Figura 5.24. Magnificación de tensión con tiempo de conmutación de $T=0.108$	50
Figura 5.25. Magnificación de tensión con tiempo de conmutación de $T=0.116$	50
Figura 5.26. Resultados del voltaje pico máximo transitorio al variar los tiempos de conmutación de la empresa eléctrica.	52
Figura 5.27. Tres fases de la magnificación de tensión.	53
Figura 5.28. Circuito con desconexión de los capacitores de la industria.	54
Figura 5.29. Magnificación de tensión con la desconexión del banco de capacitores de la industria.	55
Figura 5.30. Circuito con filtro armónico.	56
Figura 5.31. Magnificación de tensión con filtro armónico.	56
Figura 5.32. Circuito con control de cierre sincrónico.	57
Figura 5.33. Magnificación de tensión con control de cierre sincrónico.	58
Figura 5.34. Circuito con la conmutación del capacitor a diferentes tiempos.	59
Figura 5.35. Magnificación de tensión con capacitor dividido.	59
Figura 5.36. Circuito con falla en una línea en vacío.	60
Figura 5.37. Efecto en la industria de la falla a 3Km.	61
Figura 5.38. Efecto en la empresa eléctrica de la falla a 3Km.	61
Figura 5.39. Efecto en la industria de la falla a 6Km.	62
Figura 5.40. Efecto en la empresa eléctrica de la falla a 6Km.	62
Figura 5.41. Efecto en la empresa eléctrica de la falla a 9Km.	63
Figura 5.42. Efecto en la industria de la falla a 9Km.	63
Figura 5.43. Efecto de la falla en la empresa eléctrica, a 12Km de la subestación.	64
Figura 5.44. Efecto de la falla en la industria, a 12Km de la subestación.	64
Figura 5.45. Efecto en la empresa eléctrica de la falla en la subestación.	65
Figura 5.46. Efecto en la industria de la falla en la subestación.	65
Figura 5.47. Efecto de la falla en la industria a diferentes distancias.	67
Figura 5.48. Resultados del voltaje pico máximo transitorio en la empresa eléctrica al ocurrir una falla a diferentes distancias.	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Resultado del voltaje pico máximo y frecuencia transitoria en los bornes del capacitor de la planta (para distintos valores) al conectar el banco de capacitores de la subestación.	40
Tabla 5.2 Resultado del voltaje pico máximo y frecuencia transitoria en los bornes del capacitor de la planta al variar la potencia nominal del transformador reductor.	43
Tabla 5.3 Resultado del voltaje pico máximo y frecuencia transitoria en los bornes del capacitor de la planta al variar la impedancia porcentual del transformador reductor.	47
Tabla 5.4 Resultado del voltaje pico máximo y frecuencia transitoria en los bornes del capacitor de la planta al variar el tiempo de conmutación de los capacitores.	51
Tabla 5.5. Efecto de una falla en la tensión de la industria, con banco de capacitores que corrigen el factor de potencia.	66
Tabla 5.6. Efecto de una falla en la tensión de la empresa eléctrica.	68
Tabla 5.7. Variaciones de voltaje de corta duración.	70

NOMENCLATURA

<i>DC</i>	<i>Corriente directa</i>
<i>pu</i>	<i>por unidad</i>
<i>AC</i>	<i>Corriente alterna</i>
<i>ICE</i>	<i>Instituto Costarricense de Electricidad</i>
<i>CNFL</i>	<i>Compañía Nacional de Fuerza y Luz</i>
<i>ASD</i>	<i>Variador de Velocidad Ajustable</i>
<i>PWM</i>	<i>Modulación de Ancho de Pulso</i>
<i>MOV</i>	<i>Varistor de Oxido de Metal</i>
<i>TVSS</i>	<i>Supresor del impulso transitorio de voltaje</i>
<i>s</i>	<i>Segundos</i>
<i>f</i>	<i>Frecuencia</i>
<i>Xt</i>	<i>Impedancia porcentual del transformador</i>
<i>KVA</i>	<i>Kilo Voltamperios</i>
<i>KVAR</i>	<i>Kilo Voltamperios reactivos</i>
<i>Qc</i>	<i>Potencia reactiva del capacitor</i>
<i>V</i>	<i>Voltaje</i>
<i>S</i>	<i>Potencia nominal o capacidad nominal del transformador</i>

RESUMEN

La factibilidad y grado de ocurrencia del fenómeno de magnificación de la tensión en el sistema eléctrico nacional, es muy alto ya que todas las subestaciones del anillo central poseen bancos de capacitores que son conmutados dos veces al día y crean un transitorio que entra en resonancia con el banco de capacitores de la industria que corrige el factor de potencia, provocando sobretensiones que afectan el funcionamiento del equipo electrónico. En el presente trabajo se realiza un desarrollo teórico, entrevistas sobre experiencias vividas, se presentan técnicas de mitigación y simulaciones del fenómeno con variantes en los parámetros de una red eléctrica, para observar su efecto en los voltajes de la barra del cliente.

Las técnicas de mitigación son un aporte importante ya que en Costa Rica por motivos económicos son escasas las medidas para prevenir las sobretensiones por la conmutación de bancos de capacitores, por parte del cliente y también por parte de la empresa eléctrica. Teniendo como resultado como mejor técnica de mitigación simulada el convertir los bancos de la industria en filtros, ya que disminuye en un 80% la sobretensión

La topología de la red eléctrica del país es adecuada para conseguir valores de voltaje por la magnificación de tensión en el lado de baja tensión, de los 2.0pu hasta llegar a los 3.0 pu (sin tener ninguna medida de mitigación).

CAPÍTULO 1: Introducción

La aplicación de bancos de capacitores en sistemas de transmisión y distribución han sido aceptados a lo largo del tiempo, como un paso necesario en el diseño de sistemas de potencia de la empresa eléctrica. Sin embargo, en los últimos tiempos el fenómeno conocido como magnificación de la tensión, ha tomado relevancia debido a la creciente necesidad de compensar el factor de potencia en las industrias para evitar sanciones de la compañía de suministro eléctrico.

La magnificación de la tensión ocurre cuando se encuentran instalados al menos dos capacitores a diferentes niveles de tensión de la red eléctrica, una mejor descripción del evento es que al energizar el capacitor instalado a mayor tensión, se pueden producir sobretensiones peligrosas en el sistema donde se encuentra instalado el capacitor de menor tensión.

En nuestros días la calidad de potencia es fundamental para el buen funcionamiento del sistema eléctrico por parte de los clientes, que cada vez mas utilizan dispositivos electrónicos en sus instalaciones y se ven afectados por la magnificación de tensión, por ello una consideración importante en el futuro para el diseño de bancos de capacitores es la calidad de energía.

Con el presente trabajo se pretende brindar información sobre este fenómeno a las compañías distribuidoras de electricidad y a las plantas industriales que posean bancos de capacitores para la compensación del factor de potencia, así como conocer en profundidad

2

el estado del arte de la temática y posibilidad de ocurrencia en la red eléctrica nacional para poder establecer posibles medidas de mitigación.

1.1 Objetivos

A continuación se describen los objetivos planteados para la elaboración de este proyecto de graduación.

1.1.1 Objetivo general

Determinar la factibilidad y grado de ocurrencia del fenómeno de la magnificación de la tensión en el sistema eléctrico nacional.

1.1.2 Objetivos Especificos

- Estudiar el evento de magnificación de la tensión y el motivo por el cual ocurre.
- Determinar si se han presentado experiencias del fenómeno en la red eléctrica nacional.
- Realizar simulaciones en MATLAB de la topología clásica del evento con valores representativos a equipos de Costa Rica, para valorar el efecto dentro del contexto nacional.
- Analizar el fenómeno según la norma de Calidad del Voltaje de suministro de la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP).
- Establecer técnicas de mitigación para controlar el fenómeno.

1.2 Metodología

Primeramente se seleccionan para su estudio, situaciones de trabajo que se consideran de primordial interés, destacándose temas como: consecuencias, mitigación, temática y consultar experiencias vividas sobre el tema a las mayores compañías de distribución eléctrica tales como: La Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) y del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Se realiza la investigación bibliográfica de los temas seleccionados en documentos y textos para su efectivo desarrollo, y se formularon las recomendaciones pertinentes para su posible mitigación de acuerdo a las normas. Además se complementa información teórica haciendo uso de Internet, para obtener las herramientas requeridas y poder hacerle frente a las interrogantes planteadas.

Posteriormente se recopila la información necesaria de valores de equipos representativos a Costa Rica, para realizar simulaciones por computadora de la topología clásica del evento y ver la susceptibilidad de los parámetros en los resultados. También se utilizaran programas orientados a dicho fin para estudiar los modelos matemáticos reales del fenómeno.

Finalmente, se realizan entrevistas a las personas encargadas de servicio al cliente en las compañías de suministro eléctrico mencionadas anteriormente, para conocer el grado de ocurrencia del fenómeno y la postura tomada por la empresa ante dicho evento. De la misma manera se realizó una entrevista a la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos,

5

para analizar el fenómeno y conocer si se encuentra documentado en la norma de calidad del ARESEP

CAPÍTULO 2: Desarrollo Teórico.

2.1 Conmutación del capacitor.

La conmutación del capacitor es uno de los eventos más comunes en los sistemas de distribución eléctrica. Se usan los capacitores para proporcionar la potencia reactiva (en unidades de VAR) que se necesita para corregir el factor de potencia que reduce las pérdidas y apoya el voltaje en el sistema. Existen otros métodos alternativos para corregir el factor de potencia como los motores sincrónicos y los compensadores de potencia reactiva electrónicos que son mucho más costosos o tienen los costos de mantenimiento muy altos. Por eso, el uso de capacitores en los sistemas de potencia es bastante común y continuara siéndolo.

Un inconveniente al uso de capacitores es que ellos provocan una oscilación transitoria de tensión cuando se conmutan. Algunos capacitores pasan energizados todo el tiempo (un banco fijo), mientras otros se conmutan según los niveles de carga. Se usan varios medios de control, incluyendo tiempo, temperatura, voltaje, corriente, y la potencia reactiva, para determinar cuando los capacitores se conmutan. Es común para los controladores combinar dos o más de estas funciones, como la temperatura con el voltaje.

Los síntomas que relacionan la calidad de potencia con la conmutación del capacitor de distribución incluyen: daños o fallas en el equipo del cliente(debido al sobrevoltaje excesivo), variadores de velocidad ajustable o otro equipo de proceso de cierre(debido al sobrevoltaje DC en la barra), fallas de TVSS, y los problemas en la red de computadoras

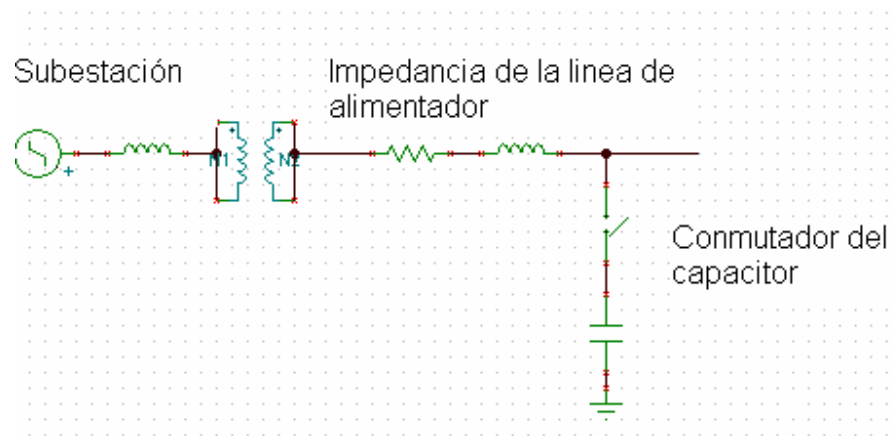


Figura2.1 Conmutación del capacitor.

Uno de los síntomas comunes en los problemas de calidad de potencia relacionado a la conmutación del capacitor es que los problemas aparecen casi al mismo momento cada día. Los capacitores frecuentemente son conmutados por un reloj de tiempo que anticipa el aumento en la carga con el inicio del día activo en las industrias. Los problemas más comunes son el mal funcionamiento de equipos de carga que sean controlados electrónicamente. La Figura 2.1 muestra el diagrama de una línea de alimentación típica de una empresa de distribución eléctrica con la conmutación del capacitor. Cuando el interruptor está cerrado, un transitorio similar a un voltio es lo que se observa en la Figura 2.2. En este caso particular, el interruptor del capacitor se cierra en el punto más cercano al pico de voltaje del sistema. Ésta es una ocurrencia común para muchos tipos de interruptores porque el aislamiento por los contactos del interruptor tiende a estropearse cuando el voltaje por el interruptor está en un valor máximo. En el momento de conexión, la tensión sobre el capacitor es nula, por lo cual la tensión del sistema se hace cero ya que

es imposible lograr un cambio de tensión inmediato, incrementándose a medida que aumenta la carga sobre el capacitor. Esta tensión sobrepasa el valor de régimen estable, produciéndose una oscilación a la frecuencia natural del sistema. Supervisando la situación mostrada, el cambio inicial en el voltaje no es completamente cero debido a la impedancia entre el punto de observación y la conmutación del capacitor.

Se generará entonces un transitorio entre 1.0 y 2.0 pu dependiendo de la oscilación del sistema. En este caso el transitorio observado en la situación mostrada en la figura 2.2 es aproximadamente 1.34 pu. El transitorio mostrado en la figura 2.1 se propaga en el sistema de potencia local y generalmente atraviesa los transformadores de distribución en los medios de carga del cliente. Si hay capacitor en el sistema secundario, el voltaje realmente puede magnificarse en el lado de carga del transformador si se alinean apropiadamente las frecuencias naturales de los sistemas. Mientras los tales transitorios cercanos a los 2.0 pu no están dañando generalmente al aislamiento del sistema, ellos pueden causar a menudo daños en los equipos sensibles de electrónica potencia. Los controladores pueden interpretar el alto voltaje como un signo de que hay una inminente situación peligrosa y como consecuencia se desconecta la carga para que se encuentre segura.

Las frecuencias transitorias debido a la conmutación del capacitor de la empresa de distribución eléctrica, usualmente falla en el rango de los 300-1000 Hz. Los resultados de los sobrevoltajes transitorios normalmente no son de preocupación de la empresa eléctrica, desde que las magnitudes máximas están por debajo del nivel de la protección del impulso, debido a que los supresores empiezan a operar. Sin embargo, debido a la frecuencia

relativamente baja estos transitorios pasaran a través del transformador reductor a las cargas del cliente. Los sobrevoltajes secundarios pueden causar la magnificación de voltaje o molestias de disparo en los variadores de velocidad ajustable.

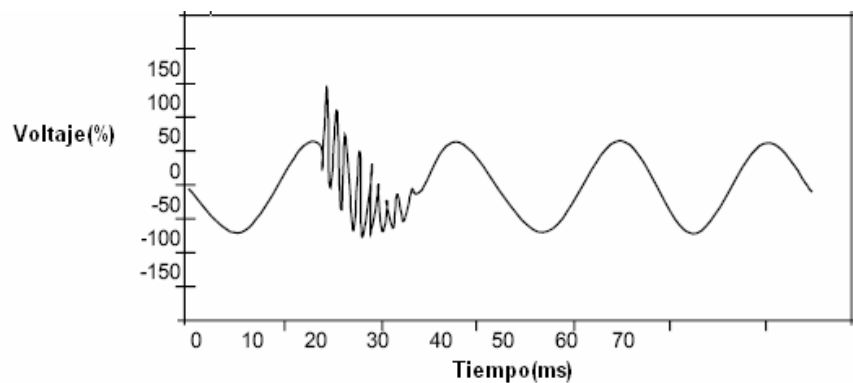


Figura2.2 Energización del capacitor de distribución, transitorio de voltaje.

La conmutación al conectar un banco de transformadores estrella a tierra también puede producir voltajes transitorios inusuales en el sistema aterrizado debido al impulso de corriente que acompaña la energización. En la Figura 2.3 se observa la corriente de fase para la conmutación del capacitor descrita anteriormente. La corriente transitoria que fluye en el alimentador alcanza el pico en casi 4 veces la carga de corriente.

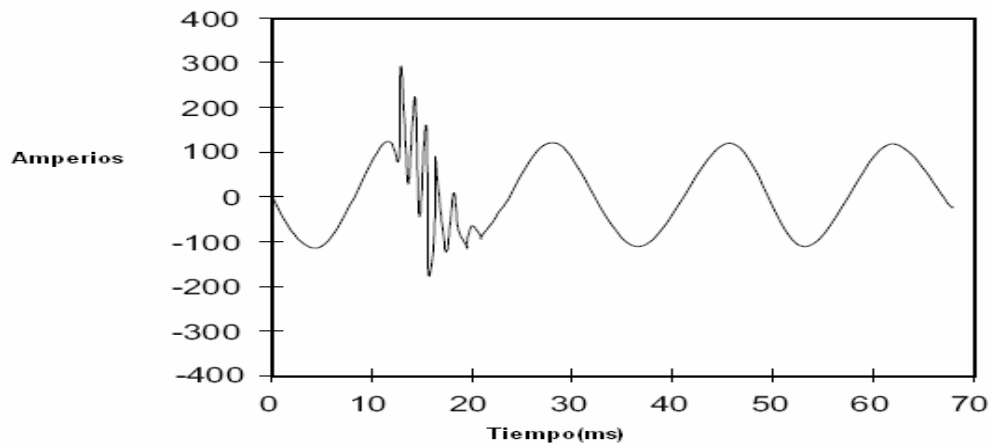


Figura 2.3 Energización del capacitor de distribución. Transitorio de corriente.

2.2 La conmutación del capacitor y la magnificación de tensión.

El incremento de las aplicaciones de los bancos de capacitores en los sistemas de potencia, junto con el aumento en la instalación de bancos de capacitores en las industrias para corregir el factor de potencia, ha producido cada vez mas reportes que relacionan la conmutación transitoria del capacitor con las perturbaciones a los equipos electrónicos sensibles de los clientes.

El inversor de fuente de voltaje en un variador de velocidad ajustable son los equipos más susceptibles a los disparos indeseados por sobrevoltajes siendo el resultado de un fenómeno conocido como magnificación de la tensión. La magnificación del transitorio por la conmutación del capacitor inicia en los capacitores localizados a larga distancia en la subestación eléctrica y tiene sus efectos en las industrias donde se aplican los bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia. Tales ASDs (Variadores de velocidad ajustable) son a menudo aplicados en procesos industriales o comerciales donde los

disparos indeseados pueden ser disociadores con el tiempo y tienen implicaciones en el costo de la industria. Desde que se conmutan los capacitores de la empresa eléctrica durante el máximo pico de carga de la industria, la probabilidad de disparos indeseados en los ASDs ha aumentado, mientras también se eleva el riesgo de pérdidas sustanciales en la producción.

2.3 Causas de la magnificación de la Tensión.

El uso de bancos de capacitores en los sistemas de potencia, incluyendo los capacitores de corrección de factor de potencia instalados en las industrias, crea la posibilidad de que parte del sistema de potencia se acerque a un estado de resonancia con la frecuencia transitoria generada por la conmutación del capacitor. Ver Figura 2.4.

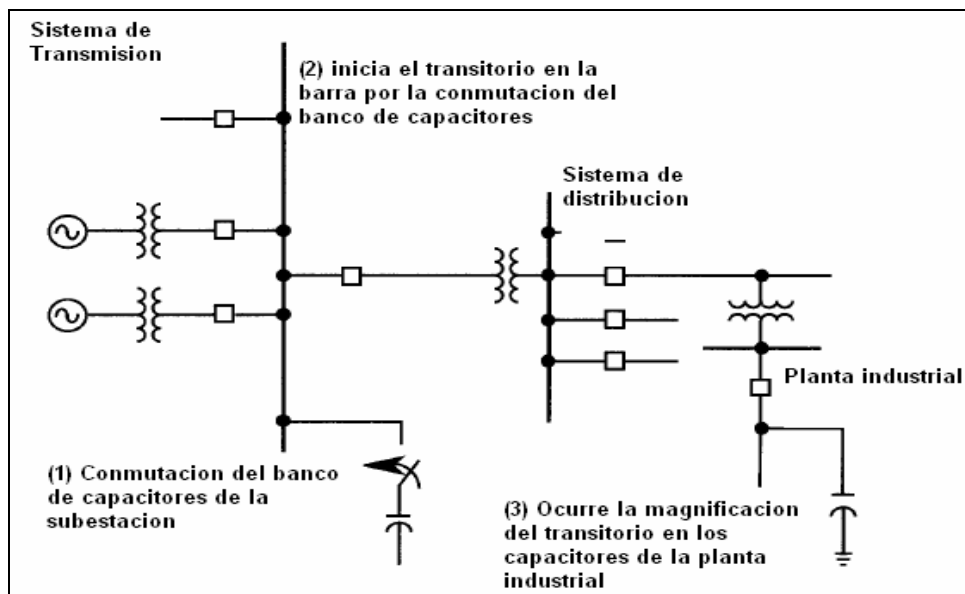


Figura 2.4. Diagrama típico de un sistema de potencia.

Si la frecuencia natural de oscilación del circuito LC en serie formado por la inductancia del transformador reductor, líneas y cables entre la barra del banco de capacitores conmutado y los capacitores ubicados a larga distancia, esta dentro de la frecuencia transitoria generada por la conmutación del banco de capacitores durante la energización, la posibilidad de que ocurra la magnificación de tensión es bastante alto. La magnificación de tensión ocurre cuando el circuito LC ubicado a larga distancia esta excitado por la conmutación transitorio del capacitor inicial y entonces continúa oscilando a su propia frecuencia natural, mientras también sigue la oscilación transitoria inicial. Vea figura 2.5. La magnitud del sobrevoltaje transitorio magnificado en los capacitores ubicados en baja tensión puede ser tan alta como los 4.0 pu, cuando se da la energización del banco de capacitores sin poseer algún método de control del sobrevoltaje transitorio.

La frecuencia natural de oscilación de la conmutación transitoria del banco de capacitores es determinada por la inductancia y el capacitor en serie colocados a diferentes niveles de tensión.

En el caso de los capacitores que corrigen el factor de potencia instalados en las plantas industriales, la frecuencia natural de oscilación en la barra de voltaje se encuentra en el rango de 400 a 800Hz, para capacitores de bajo voltaje típico entre los 60 a 1000KVAR y los transformadores reductores en distribución los valores típicos se encuentran entre 500 a 3750 KVA. Basado en los datos de estas frecuencias, esta claro que la magnificación de tensión puede ocurrir en un gran numero de sistemas de potencia.

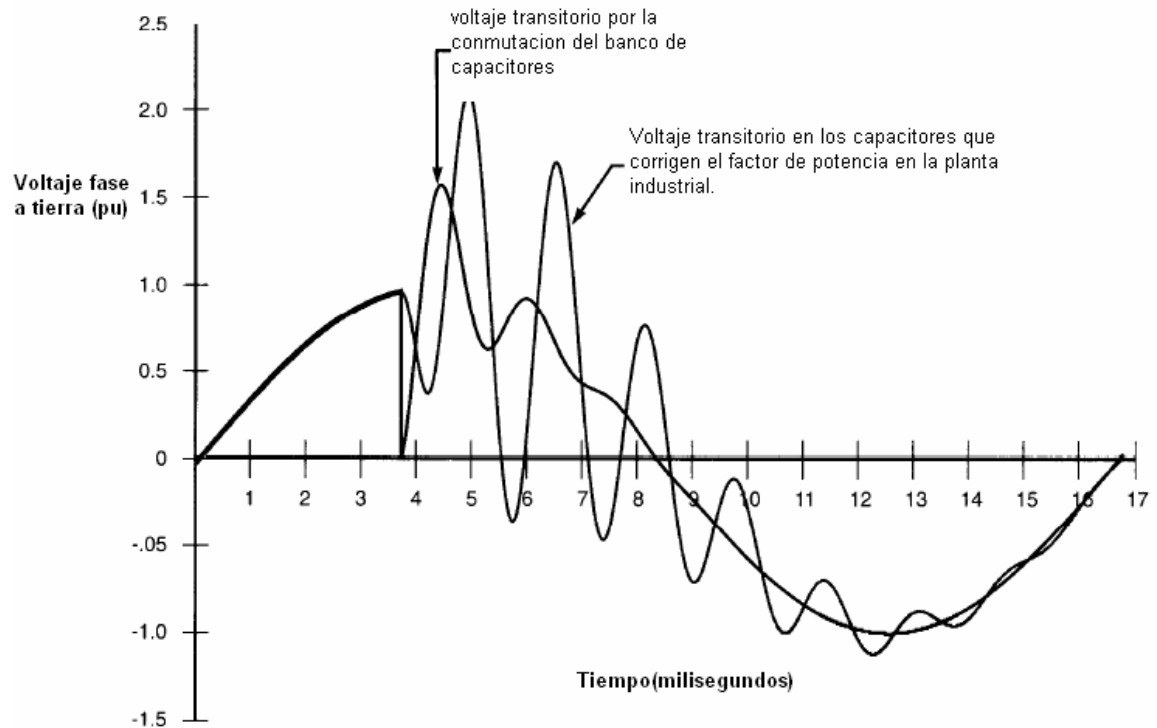


Figura2.5 Transitorio por la conmutación del capacitor y transitorio en los capacitores de la industria.

Como se explico en la sección anterior siempre hay un pequeño voltaje transitorio de por lo menos 1.2 a 1.6 pu cuando se conmutan los bancos de capacitores. El transitorio generalmente no sobrepasa los 2.0pu en el lado de alta tensión del sistema de distribución, aunque los bancos de capacitores aterrizados pueden aumentar los valores. Los capacitores colocados en el lado de baja tensión pueden magnificar este sobrevoltaje transitorio en la barra de bajo voltaje para cierto capacitor y para diferentes tamaños de transformadores reductores.

El circuito equivalente para este fenómeno se ilustra en la Figura 2.7. Los máximos sobrevoltajes se dan por la sintonización de las frecuencias naturales de los dos bancos de capacitores, que pueden alcanzar los 4.0pu en la barra de bajo voltaje. Bajo esta condición se cumple la relación que se presenta en la ecuación 1, con lo cual al energizar el banco de de capacitores, el circuito de baja tensión es alimentado durante la energización por una fuente de voltaje a su propia frecuencia de resonancia. La frecuencia natural de los bancos de capacitores se puede calcular mediante la ecuación 2 y 3.

$$f_1 \approx f_2 \quad (2.3-1)$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2.3-2)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2.3-3)$$

La magnificación del transitorio por la conmutación del capacitor de la empresa de distribución eléctrica en la barra de bajo voltaje esta ligada al tamaño de los capacitores y al transformador reductor. Sin embargo, normalmente no es una solución práctica, el que el cliente pueda cambiar el tamaño de sus capacitores y del transformador reductor. Una solución es controlar el sobrevoltaje transitorio del capacitor de la empresa de distribución eléctrica. Algunas herramientas para controlar este sobrevoltaje son: el cierre sincrónico, resistencias e inductores de preinserción.

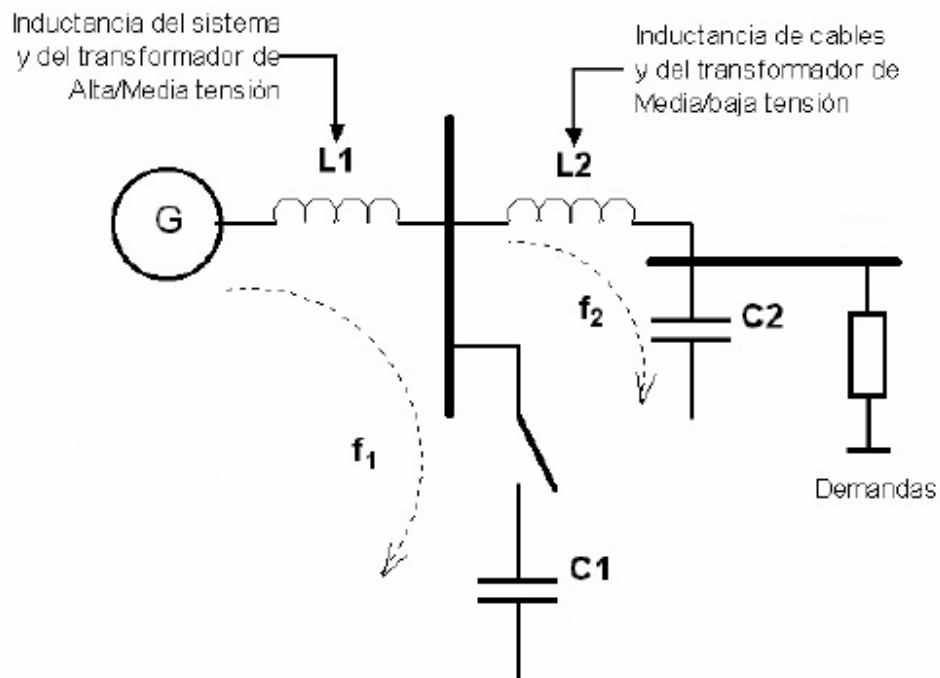


Figura2.6 Diagrama de un sistema de potencia que muestra un sistema que puede ocurrir la magnificación de tensión.

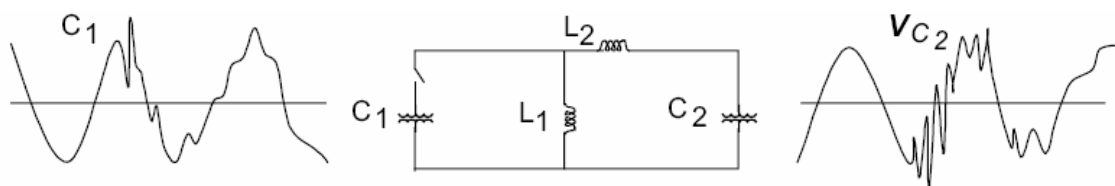


Figura2.7 Circuito equivalente de la magnificación de tensión.

A la situación del cliente, se pueden aplicar supresores de onda de alta energía para limitar la magnitud de voltaje transitorio en la barra de baja tensión del cliente. Los niveles

de energía asociados con el transitorio magnificado serán aproximadamente de 1kJ. Las nuevas tecnologías supresoras MOV para las aplicaciones de bajo voltaje pueden resistir de 2 a 4 KJ.

La figura 2.8 pone de manifiesto las energías del supresor en función de la potencia del banco de capacitores y del tamaño del banco de capacitores instalados en la industria.

Es importante notar que los supresores pueden limitar los valores de las sobretensiones, debiendo tenerse en cuenta que la limitación alcanza solo al valor de la tensión residual que puede ser de 1.8pu. Esto no puede ser suficiente para proteger el equipo electrónico sensible que podría tener sólo una capacidad de 1.75 pu. No puede ser posible mejorar las características proteccionistas del supresor substancialmente porque estas características están limitadas por los materiales físicos del óxido de metal. Por consiguiente, para la coordinación apropiada, es importante evaluar cuidadosamente las capacidades de equipo sensible usadas en aplicación dónde estos transitorios pueden ocurrir.

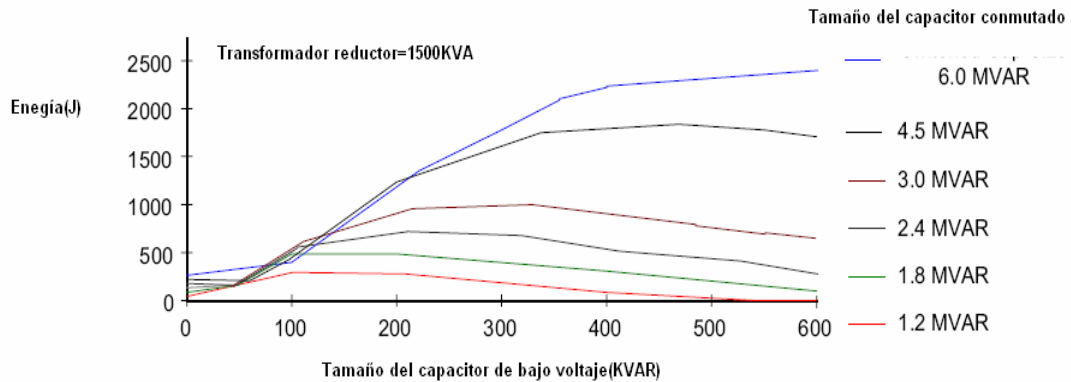


Figura2.8 Energía de descarga por magnificación de transitorios.

Otra medida para limitar la magnificación de tensión transitoria es convertir los bancos de capacitores que corrigen el factor de potencia en filtros armónicos. Una inductancia en serie con el banco de capacitores disminuirá el voltaje transitorio en la barra del cliente a niveles aceptables. Esta solución tiene múltiples beneficios incluyendo que proporciona la corrección del factor de potencia de desplazamiento, controla la distorsión armónica con facilidad, y limitan la magnificación transitoria del capacitor conmutado.

En muchos casos, hay sólo un número pequeño de dispositivos de carga, como los variadores de velocidad ajustable del motor que son adversamente afectados por el transitorio. Es frecuentemente más barato poner los reactores de la línea en serie con los variadores de velocidad para bloquear la magnificación transitoria de alta frecuencia. Un reactor de 3% es generalmente eficaz, para ofrecer una impedancia elevada a la sobretensión, presentando una oposición pequeña a la corriente de frecuencia de red. Muchos tipos de variadores de velocidad tienen esta protección inherente, o a través de un transformador de aislamiento o una reactancia en la barra DC.

2.4 Disparos no deseados en variadores de velocidad ajustable.

Los disparos se refieren a la desconexión indeseada de variadores de velocidad ajustable (u otro proceso en los dispositivos de electrónica de potencia.) debido a los sobrevoltajes transitorios sobre los dispositivos en la barra DC. Muy a menudo, estos sobrevoltajes son causados por la energización de los capacitores de transmisión y/o distribución. Considerando el hecho de que muchos bancos de distribución son controlados por un reloj de tiempo, es fácil ver como este evento puede ocurrir regularmente, causando numerosas interrupciones de proceso para la planta.

Como ya se mencionó, los disparos indeseados son debidos al sobrevoltaje en la barra DC (Modulación de pulsos PWM). Típicamente, para la protección del capacitor DC y componentes inversores, el voltaje de la barra DC es monitoreado y controla el disparo cuando excede un nivel prefijado. Es importante destacar que las molestias de disparo ocurren sin la necesidad de tener capacitores para la corrección del factor de potencia.

Un PWM ó ASD típico consiste básicamente en una entrada de AC de tres fases a un puente rectificador, un eslabón DC comprime la barra DC del capacitor y una sección del inversor que convierte el voltaje DC del eslabón a un voltaje AC variable. La magnificación del transitorio por la conmutación del capacitor puede causar en la barra DC del capacitor un cambio en el nivel de voltaje normal a uno superior. Si este nivel de voltaje iguala el sobrevoltaje de disparo de los ASD, las protecciones realizan un disparo del variador de velocidad para proteger del sobrevoltaje a los componentes sensibles en la sección del inversor.

La vulnerabilidad de un ASD a los sobrevoltajes transitorios depende del tamaño de la barra DC del capacitor, la presencia de un choke (reactor de obstrucción) en la barra DC o en la línea AC y poner una protección de sobrevoltaje. El choke de la línea AC y de la barra DC refuerza la capacidad del ASD a través de la carrera del sobrevoltaje transitorio limitando la proporción de levantamiento de las corrientes del inrush a la barra DC del capacitor. El choke de la línea trifásica AC generalmente se usa cuando los sobrevoltajes transitorios son de preocupación. Desde que los transistores de potencia se usaron en la sección del inversor de 460V ASDs es normal un rango de 1000V a 1200V, los niveles de disparo típicos por sobrevoltaje se dan en el rango de los 760V a 820V (1.17pu a 1.26pu), con 780 (1.2pu) siendo esta última muy común.

La conmutación del banco de capacitores en la subestación puede producir sobrevoltajes en el rango de 1.0pu a 2.0 pu fase a fase en la subestación si no se posee alguna técnica que controle los sobrevoltajes. Con la magnificación de tensión, la conmutación del capacitor induce sobrevoltajes en exceso en la barra de voltaje de la empresa eléctrica a valores típicos de 1.2pu fase a fase. Si el ASD no está equipado con un choke de línea AC o en la barra DC, se transferirán directamente los sobrevoltajes fase a fase de la barra del voltaje de la empresa eléctrica a la barra DC del ASD.

Actualmente no hay ninguna norma en la industria o pautas que consideren los sobrevoltajes transitorios para asegurar la calidad de potencia en los ASDs.

CAPÍTULO 3: Técnicas de mitigación de sobrevoltajes.

Los dispositivos disponibles en la actualidad para el control del sobrevoltaje transitorio, intentan minimizar los sobrevoltajes (o sobrecorriente) en el punto de aplicación local o remoto.

Estos dispositivos incluyen:

- Resistencias de Pre-inserción. (transmisión y distribución)
- Inductores de Pre-inserción (transmisión)
- Cierre sincrónico (transmisión y distribución).
- Supresores MOV (transmisión y distribución).
- Tiempos de conmutación.
- Ubicación de los capacitores.

Cada uno de estos métodos tiene varias ventajas y desventajas en términos de la reducción del sobrevoltaje transitorio, costo, requisitos de instalación, requisitos de mantenimiento y fiabilidad.

3.1 Impedancia de preinserción.

Una impedancia de pre-inserción (resistor o inductor) proporciona los medios para reducir los voltajes y corrientes transitorias asociados con la energización del banco de capacitores en paralelo. Los interruptores de los bancos de capacitores de la subestación tienen conectados una resistencia en los contactos del interruptor que operan durante la energización del capacitor amortiguando el transitorio y un tiempo después salen de

operación. La actuación de la impedancia de pre-inserción es evaluada usando la inserción de ambas y la desviación de las magnitudes transitorias, como bien como la capacidad para disipar asocia la energía con el evento, y repite el evento sobre una base regular.

Las resistencias de pre-inserción son uno de los medios más eficaces para controlar la energización transitoria del capacitor; sin embargo, los problemas de fiabilidad a menudo han causado dificultades para seleccionar otro de los medios. El valor de la resistencia óptima para controlar la energización transitoria del capacitor depende principalmente del tamaño del capacitor y la fuerza de la fuente. Debe ser aproximadamente igual a la impedancia del impulso (Z_s) formada por el banco y la fuente:

$$R_{optima} \approx \sqrt{\frac{L_s}{C}} \quad (3.1-1)$$

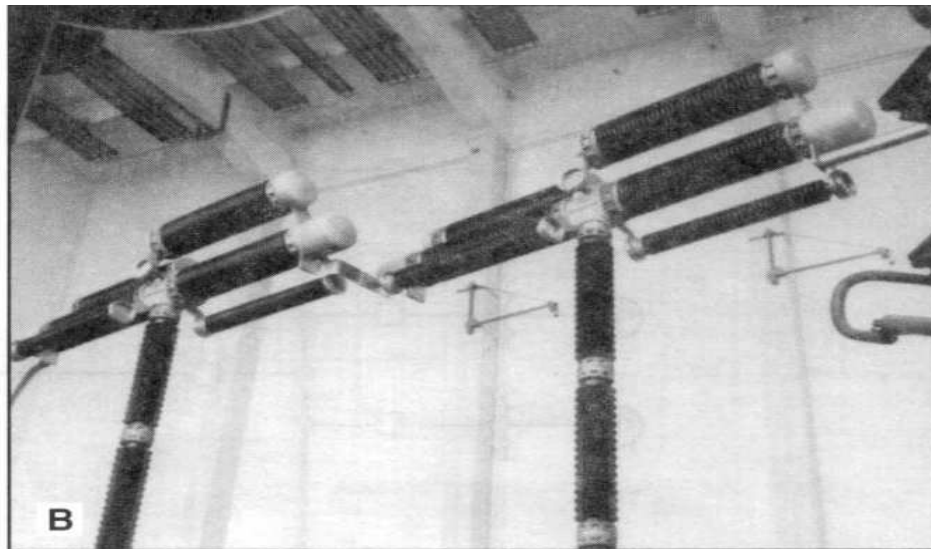


Figura 3.1. Circuito breaker SF6 con preinserción de resistores

3.2 Inductores de preinserción.

El diseño de los inductores de preinserción se ha dirigido específicamente al fenómeno de magnificación de la tensión y también a minimizar los disparos indeseados. Esas metas han sido cumplidas mejorando las características de amortiguamiento de los inductores de preinserción con una resistencia inherente más alta así como un aumento en el valor de la inductancia (figura 3.2). El aumento en la resistencia minimiza el voltaje transitorio a un nivel que previene los disparos indeseados. La efectividad del diseño de los inductores de preinserción ha producido su reconocimiento por muchas empresas eléctricas como solución de la conmutación transitoria del capacitor.

Los inductores de preinserción reducen el colapso en la barra de voltaje y refuerza las características de amortiguamiento del sistema, mientras reduce la magnitud del transitorio por la conmutación del capacitor. Esto es cumplido a través de la introducción de una impedancia durante la energización inicial del banco de capacitores que limita la corriente de in-rush y reduce los transitorios de voltaje. Ocurre igual a la resistencia de preinserción entra funcionamiento por un determinado tiempo, durante la energización del banco de capacitores de la subestación.

Los inductores de preinserción, se usan principalmente para controlar las sobrecorrientes en las aplicaciones “back to back” de bancos de capacitores. A menudo son aplicados a los circuitos conmutadores, los inductores son menos sensibles a las consideraciones térmicas y es más barato que las resistencias.

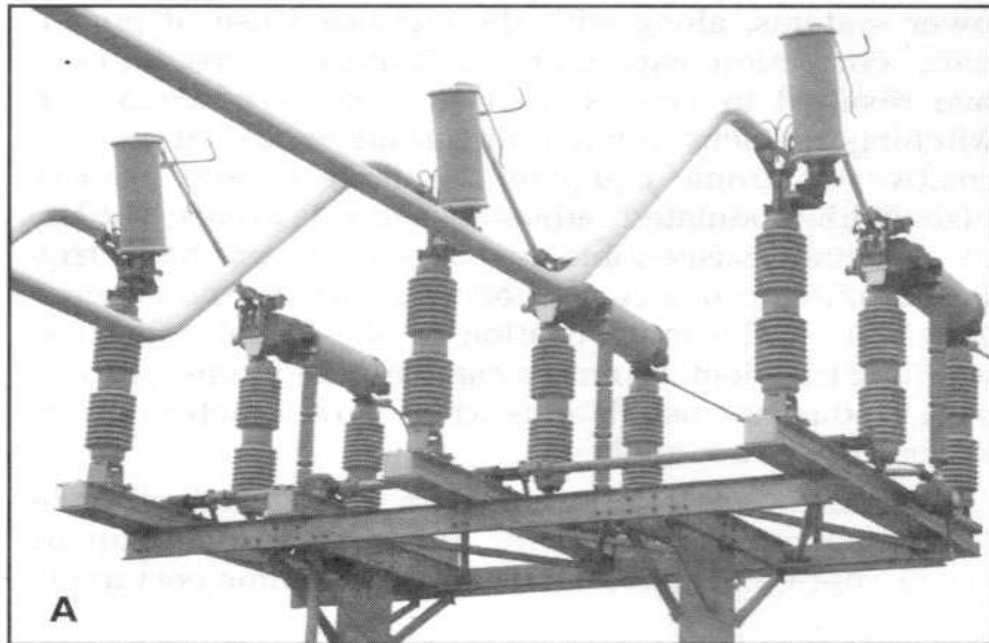


Figura 3.2 Inductores de preinserción.

3.3 Control de cierre sincrónico.

El cierre sincrónico es el cierre del contacto independiente de cada fase cerca de un cero de voltaje, como se observa en la figura 3.3 (banco aterrizado). Para lograr el cierre o estar cerca del voltaje cero (evitando los voltajes del prestrike altos), para aplicar un dispositivo conmutador es necesario mantener la suficiente fuerza dieléctrica para resistir los voltajes del sistema hasta que toquen los contactos. Aunque este nivel de precisión es difícil de lograr, este consiste en realizar un cierre en ± 0.5 milisegundos. Estudios anteriores han indicado que una consistencia del cierre de ± 1.0 milisegundos proporciona el control del sobrevoltaje comparable al tamaño de las resistencias de preinserción. El éxito de un

cierre sincrónico es a menudo determinado por la habilidad de repetir el proceso bajo varias condiciones (sistema y clima).

Los bancos no aterrizados son controlados cerrando primero dos de las fases a un cero de voltaje fase-fase y tardando la tercera fase 90grados (cero de voltaje fase-tierra).

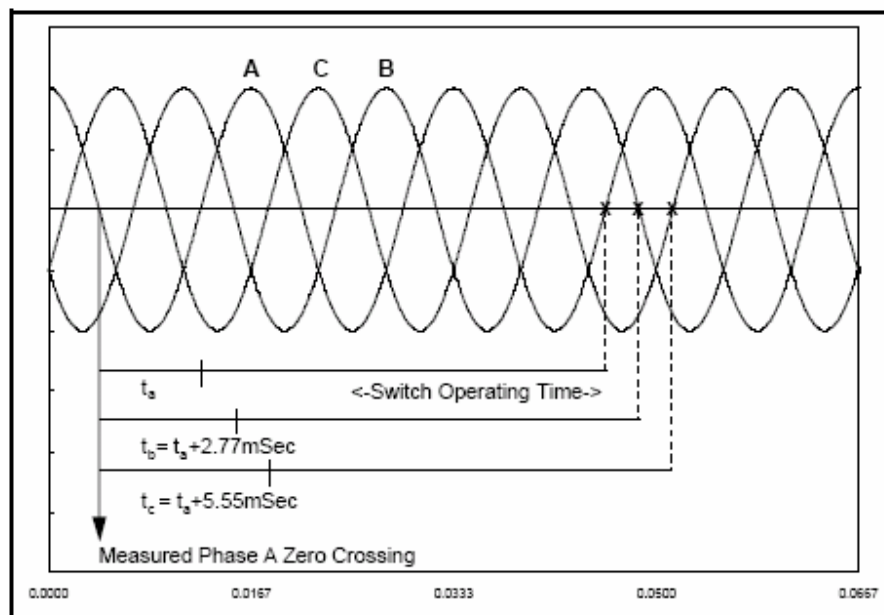


Figura 3.3. Control de cierre sincrónico.

3.4 Supresores MOV.

El varistor de óxido de metal (MOV) puede limitar los voltajes transitorios al nivel de la protección del supresor (la conmutación máxima del nivel de protección del impulso, típicamente esta entre 1.8-2.5pu) al punto de aplicación. La primera preocupación asociado con la aplicación de MOV es la carga de energía durante un evento de re-ignición del arco

eléctrico (restrike). Aunque es una ocurrencia rara, el restrike conmutado generalmente produce la carga del supresor más alta para un supresor localizado en el capacitor conmutado. Además, el supresor remoto (incluyendo las aplicaciones de los clientes en bajo voltaje) puede sujetarse a los deberes de energía severos si ocurre la magnificación de tensión. Esta condición podría ser especialmente molesta para los sistemas de distribución si los supresores SiC permanecen en servicio.

3.5 Tiempos de Conmutación.

La conmutación del capacitor es muy común y provoca una oscilación en la tensión. Sin embargo, el programar la conmutación a distintas horas puede ser desafortunado para un poco de cargas industriales sensibles. Por ejemplo, si la carga máxima es al mismo tiempo cada día, la empresa eléctrica puede decidir que la conmutación del capacitor pueda ser coincidente con ese aumento de carga. Ha habido varios casos dónde esto coincide con el principio de un turno de trabajo y los transitorios resultantes causan problemas en los variadores de velocidad ajustable poco después de iniciado el proceso. Una solución simple y barata es determinar si hay un tiempo de conmutación que podría ser más aceptable. Por ejemplo, puede ser posible conmutar el capacitor unos minutos antes que se de la carga máxima en la industria. Si bien es cierto que se producirá una sobretensión de tipo estable por unos pocos minutos, su efecto es menos perjudicial que se den las salidas de servicio durante la producción.

3.6 Ubicación del capacitor.

En el caso de los bancos de capacitores en distribución, un capacitor conmutado puede estar cerca de una carga sensible o también en una ubicación donde los sobrevoltajes transitorios tienden a ser muy altos. A menudo, puede ser posible mover el capacitor de baja tensión a otra rama del circuito y elimina el problema. La estrategia es crear un rápido amortiguamiento con más resistencia en el circuito o conseguir más impedancia entre el capacitor y la carga sensible.

El éxito de esta estrategia dependerá de varios factores. Claro, si el condensador se pone específicamente a una carga grande para compensar la potencia reactiva por esa carga, moviendo el banco no pueden ser una opción. Entonces, deben explorarse técnicas para una suave conmutación o realizar la conmutación en momentos no críticos. Además las soluciones para el lado de la empresa eléctrica, podría ser explorar las soluciones en la carga. En algunos casos, será más eficaz endurecer el equipo de carga contra la transitoria conmutación del capacitor por las aplicaciones de los reactores de obstrucción de la línea, TVSSs, etc.

3.7 La Experiencia de la Aplicación.

Cada una de las tecnologías previamente descritas han sido utilizadas en otros países con algunas variantes de éxito. Sin embargo, la reciente preocupación para los

clientes del sistema ha incitado a varias empresas eléctricas para buscar una solución al libre transitorio.

Además de los límites de diseño para sobrevoltajes, hay otros factores que han retardado la aplicación de tecnologías de mitigación. Un obstáculo obvio es el costo, sin embargo, una razón igualmente importante tiene que ser la fiabilidad.

Varios ejemplos incluyen:

- Varias empresas distribuidoras han indicado que el costo de la tecnología no ha alcanzado un punto donde la aplicación sea factible. Otro factor en el costo, es que las empresas prefieren aplicar una tecnología y que haga el trabajo en cualquier parte del sistema.
- Las fallas (térmicas) en las resistencias de preinserción, han incitado a los fabricantes a moverse a los inductores de preinserción. Varios estudios han indicado eso bajo cierto sistema condicionado(es decir la fuente débil), estos inductores pueden proporcionar el control de sobrevoltajes locales mínimos y también pueden ocasionar sobrevoltajes en lugares remotos e incluso aumentarlos.
- Varias empresas distribuidoras eléctricas han informado que la tendencia (usualmente relacionado con el clima) es el control de cierre sincrónico. Incluso un error menor podría producir suficientes transitorios en bajo voltaje para causar el disparo del variador de velocidad. El error es

corregible, sin embargo, se necesita de interruptores monopolares que controle el voltaje por cero.

- Varias empresas distribuidoras han reportado fallas en los equipos durante la conmutación del capacitor en un evento de re-ignición del arco eléctrico. Aunque el esquema de mitigación no juega un papel importante en el restrike, una falla de supresores (MOV), debido a la existencia del control, afectaría ciertamente el evento (llevando quizás al restrikes múltiple y subsecuentes fallas en el equipo).

Estos y otros factores han incitado a las empresas eléctricas a evaluar los esquemas detalladamente, y han motivado a los fabricantes a diseñar nuevas opciones.

3.8 Opciones del cliente para distintas condiciones de potencia.

Las soluciones del cliente para los problemas relacionados con la conmutación transitoria del capacitor de la empresa eléctrica incluyen reactores de obstrucción (chokes), supresores de bajo voltaje, y filtros armónicos.

1. Chokes (Reactores de obstrucción):

Un Choke (o reactor, o transformador de aislamiento) puede usarse para mantener el aislamiento en un dispositivo de electrónica de potencia, como un variador de velocidad ajustable. En general, estos dispositivos son de bajo costo y fáciles de instalar.

Varios fabricantes lo incluyen ahora como una opción a la norma, principalmente para reducir los niveles de armónicos en la corriente y resuelva los problemas de disparos indeseados. El cuidado debe ser tomado al seleccionar un tamaño adecuado para la entrada del Choke. Si el tamaño del Choke es demasiado grande, puede que el variador de velocidad no funcione adecuadamente debido a la caída de voltaje.

2. Supresores de voltaje:

En bajo voltaje (480V) pueden usarse los supresores para limitar los sobrevoltajes a niveles aceptables. Una consideración crítica es el rango de energía en los supresores. Baratos, pequeños, los MOV se encuentran típicamente en TVSS y en la electrónica de potencia teniendo rangos de energía de tan solo varios cientos de julios (o menos). Simulaciones han indicado que para el caso de la magnificación de tensión, los deberes del supresor pueden exceder varios miles de julios. Por consiguiente es necesario instalar MOV de alta energía para esta aplicación.

3. Filtros Armónicos:

Los filtros armónicos se aplican a menudo para reducir los niveles de distorsión armónica del voltaje. Son un elemento importante en los capacitores que se utilizan para la corrección del factor de potencia, y en el caso de la magnificación de tensión, vale la pena evaluar el impacto del inductor del filtro en el transitorio de voltaje.

- Agregando el inductor del filtro cambia la frecuencia de resonancia.

Típicamente esto causa que las dos frecuencias se muevan separadamente.

- Además, si la magnificación de tensión todavía ocurre será por el capacitor y no en la barra, ya que una significativa cantidad de voltaje transitorio se dejara caer por el inductor, mejorando el voltaje en la barra.

CAPÍTULO 4: Experiencias de las compañías eléctricas.

Se realizaron visitas a las principales empresas de distribución eléctrica del país como lo son el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), para conocer sobre las experiencias que hayan tenido con las industrias respecto al fenómeno conocido como magnificación de la tensión.

En la CNFL se entrevisto al Ingeniero Rafael Mora encargado de servicio al cliente, en esta compañía ya tuvieron la oportunidad de enfrentarse a este fenómeno muy recientemente en una industria. El caso de esta institución se baso en que se disparaban las protecciones de los equipos sensibles o equipos de electrónica, y se detenía el proceso industrial por el mal funcionamiento de su equipo, generando pérdidas para la industria. El problema se presentaba generalmente a las 6 de la mañana, durante la conmutación del banco de capacitores de la subestación del ICE, pero como este fenómeno no es muy conocido, no se tuvo noción del problema a enfrentar. Primero se realizaron mediciones en la industria para determinar si el problema era por que la compañía distribuidora de energía estaba entregando una deficiente calidad de potencia. Por lo general los bancos de capacitores del ICE son conmutados o energizados durante la mañana en el momento en que las industrias comienzan a trabajar para suministrar la potencia reactiva a la red (generalmente entre 6a.m a 7a.m) y que el voltaje se mantenga estable en las líneas de transmisión, durante la noche nuevamente se vuelven a apagar porque en vez de consumir reactivo, la líneas de transmisión suministra reactivo y puede elevar el voltaje afectando a las industrias.

En las mediciones efectuadas por parte del ingeniero en la industria donde ocurría el problema, se obtienen resultados de sobrevoltajes transitorios que afectan el proceso de la empresa. Como por lo general sucedía a la misma hora se concluyo que era por la energización de los bancos de capacitores de la subestación, esto respaldado por las mediciones efectuadas. Como en la subestación donde se encuentra conectada la industria no hay ningún método que controle el transitorio generado por la conmutación del capacitor, el Ingeniero encargado sugirió desconectar los capacitores que corrigen el factor de potencia en la industria para evitar que se diera la magnificación del transitorio en la industria. Como las empresas industriales conectan los capacitores principalmente para evitar penalizaciones por parte de la compañía de distribución eléctrica, y no para evitar pérdidas o calentamiento del equipo. Entonces la propuesta fue de desconectar los capacitores durante un cierto tiempo para evitar los problemas por la magnificación de tensión. En cuanto al cobro por no compensar la carga y mejorar el factor de potencia, durante el transcurso del tiempo que se estuviera con los capacitores fuera de servicio se les cobraba la tarifa de la demanda mínima durante la noche.

En nuestro país los métodos de mitigación son escasos ya que en ninguna subestación, existen modos de control del transitorio generado por la energización del capacitor. De los métodos de mitigación del transitorio por la energización del capacitor, por el personal entrevistado se mencionó que en nuestro país se son pocos las técnicas que se conocen en las subestaciones y en las industrias. Algunos otros métodos que se pueden utilizar en el país, se rechazan porque su desempeño no es el mas efectivo, ni fiable.

Otra de las razones que se pueden mencionar del porque no existen estos métodos, principalmente son: el costo, la novedad del fenómeno en nuestro país.

La segunda entrevista se realizó al Instituto Costarricense de electricidad (ICE), a la persona del ingeniero Leslie González, del área de servicio al cliente, en este caso la empresa eléctrica no ha tenido ninguna experiencia con el fenómeno de magnificación de la tensión, ya que no se han tenido mediciones en la industria que respalden la teoría planteada.

En caso de las técnicas de mitigación del fenómeno éste cito como el principal método el cierre sincrónico, ya que es uno de los más conocidos en Costa Rica, además de que es un método muy efectivo. Otra técnica de mitigación para algunas subestaciones es mantener los bancos de capacitores conectados todo el tiempo, ya que en algunos sistemas de distribución esta situación es tolerable.

CAPÍTULO 5: Simulaciones

5.1 Estudio del fenómeno.

El diagrama unificar del circuito típico para que ocurra la magnificación del transitorio por la energización del capacitor se ilustra en la figura 5.1. La magnificación ocurre porque la frecuencia natural de la oscilación transitoria del capacitor durante la energización del capacitor excita el circuito en serie LC, formado por el transformador reductor ubicado en baja tensión y los capacitores de la industria. El circuito utilizado para el estudio de la magnificación de la tensión se muestra en la figura 5.2, a este mismo circuito se le harán modificaciones de los parámetros para analizar las diferentes situaciones que pueden afectar la magnificación de tensión. El modelo y estudio del fenómeno se realizó con ayuda del programa Simulink (MATLAB 7.1). Cabe destacar que los valores utilizados para la simulación fueron tomados de una subestación real de Costa Rica, y por parte de la industria se utilizaron valores ficticios en un amplio rango, para demostrar la posibilidad de ocurrencia en el sistema eléctrico nacional y en las industrias de Costa Rica.

Las condiciones o parámetros base de la red utilizada para el análisis del fenómeno son los siguientes:

Capacidad del Transformador de la subestación = 45 MVA (Z de 8%).

Tamaño del banco de capacitores conmutado= 12 MVAr

Carga total del alimentador = 10MW (valor en la subestación a 6am)

Capacidad del transformador del cliente=1500 KVA (Z de 8%)

Tamaño de los capacitores de la industria=300 KVar

Carga resistiva de la industria= 300 KW

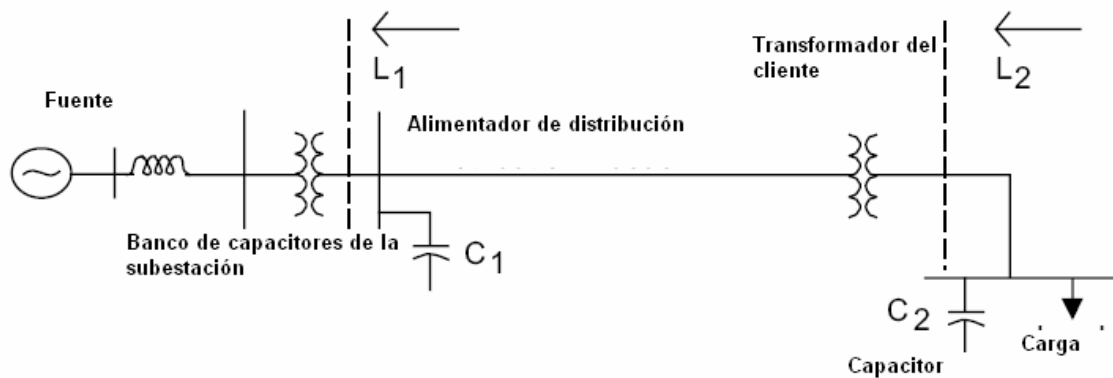


Figura 5.1 Diagrama Unificar del circuito típico de la magnificación de la tensión

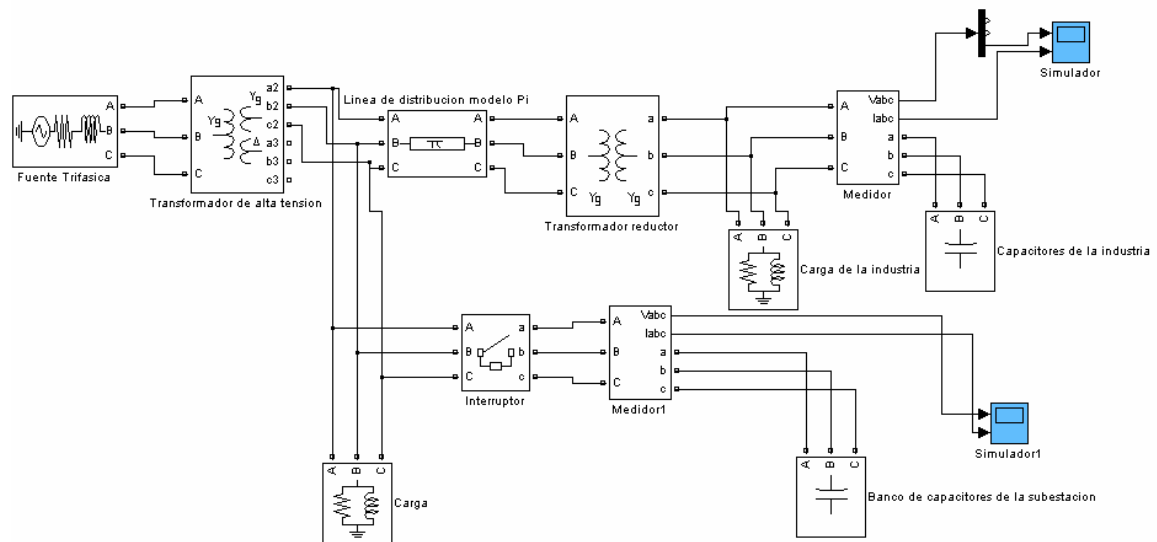


Figura 5.2 Circuito de estudio para la magnificación de tensión.

La longitud del alimentador de distribución no es considerado en el estudio paramétrico, porque la conmutación del banco de capacitores de la empresa de distribución está asociada con una baja frecuencia natural. Sin embargo, los alimentadores de distribución pueden tener un impacto sobre la magnificación transitoria en el caso que se incremente la inductancia equivalente del circuito LC de carga o secundario.

Cabe destacar que en todas las simulaciones se hará la energización del capacitor a 0.1s. a menos que se especifique lo contrario, se realiza a este tiempo porque en este momento la fase C se encuentra muy cercana al pico de voltaje y el efecto de la conmutación del capacitor seria un dato óptimo, ya que mostrara una transitorio de voltaje en su peor caso, con valores ideales para la magnificación de tensión.

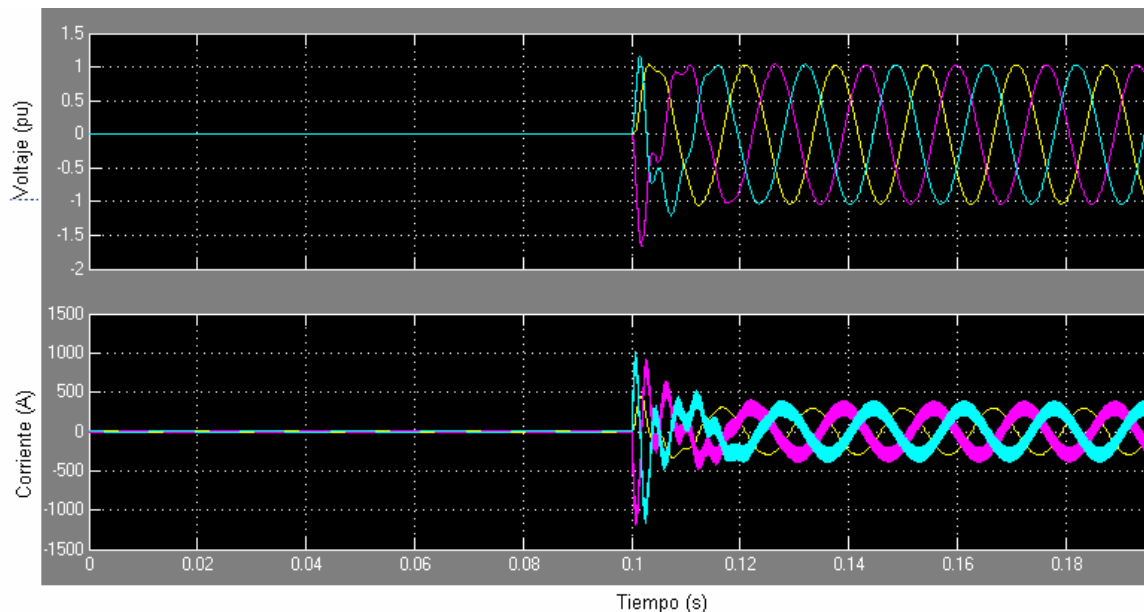


Figura 5.3. Ondas de tensión por la conmutación del capacitor en la empresa eléctrica con valores base.

La forma de onda del transitorio producido por la conmutación del capacitor de la empresa eléctrica se muestra en la figura 5.4, con las condiciones base. En ella se observa que el capacitor se encuentra desconectado y se energiza a los 0.1s, creando un transitorio y una sobretensión de 1.2pu (en el voltaje). La magnificación transitoria causada por la capacidad del capacitor de entregar una potencia reactiva de 300 KVAR en la barra de voltaje de la industria, se muestra en la figura 5.4. En la magnificación transitoria el rango de los sobrevoltajes se da de 2.0 pu a 4.0 pu, para este caso en específico se presentó un sobrevoltaje de 2.3 pu. Estos transitorios tiene una energía significativa asociada que causa las fallas de los dispositivos de protección, variadores de velocidad ajustable, equipo electrónico, capacitores u otros dispositivos.

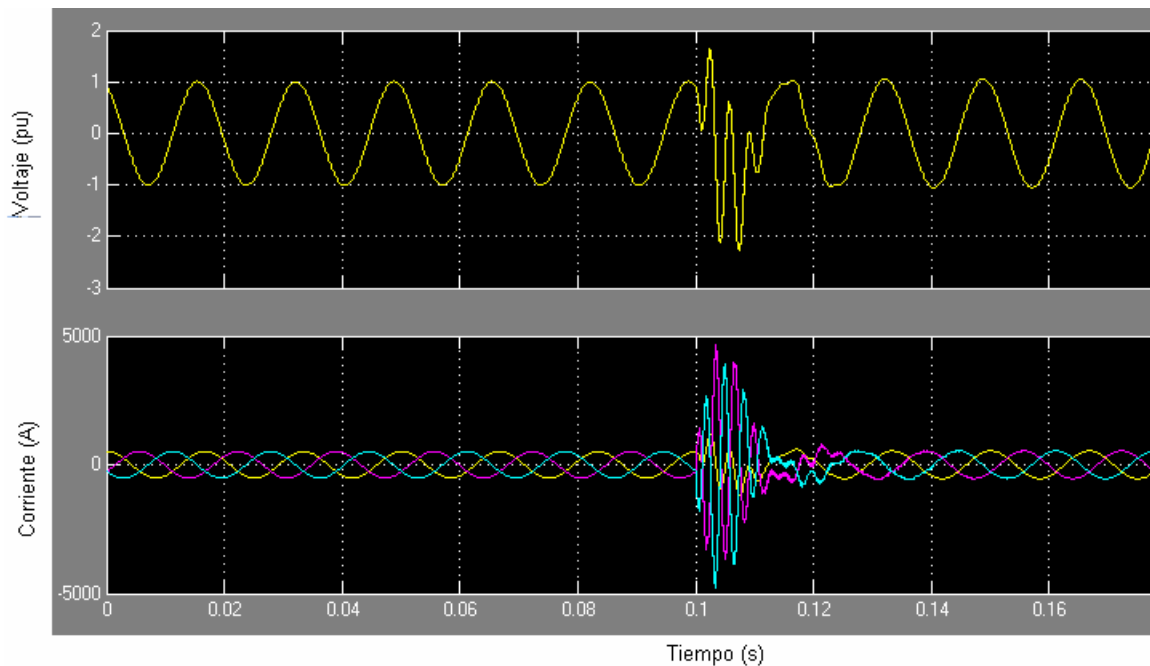


Figura 5.4. Ondas de la magnificación de tensión en la industria por la conmutación del capacitor.

Es necesario destacar que la corriente también sufre un incremento transitorio en los capacitores de la industria, que inclusive aumentó en 4 veces su forma de onda (amplitud).

La medición de la onda de voltaje en el momento de la conmutación del capacitor de la subestación, se da en los bornes del capacitor de la industria, al igual que la medición que se realiza en la empresa eléctrica.

Para evaluar el efecto de los diferentes parámetros que pueden afectar la magnificación de tensión, se realizaron simulaciones que mostraron la forma de onda del fenómeno para distintos valores de la capacidad de potencia reactiva del capacitor de la industria, la potencia nominal del transformador reductor, la impedancia del transformador reductor y a distintos tiempos de conmutación para el peor de los casos. Los valores seleccionados en las variaciones son posibles de obtener en los equipos nacionales.

La magnificación de tensión se relaciona con dos circuitos LC diferentes (el circuito LC formado capacitor conmutado y el circuito LC formado por capacitor de bajo voltaje y la inductancia entre los dos bancos de capacitores), lo que hace importante considerar las relaciones entre los diferentes parámetros.

Las simulaciones en todos los casos se dan con la fase C, se utiliza una sola fase para ilustrar de manera clara la magnificación del transitorio en la industria, esta fase esta ligada al tiempo de conmutación del capacitor, que anteriormente se dijo que seria a 0.1s, porque en este momento la fase C se encuentra muy cerca del pico de voltaje. Otro de los motivos del porque se escogió 0.1s, es que el tiempo de la simulación en el programa simulink se fijo en 0.2s, entonces 0.1s muestra el transitorio en el centro de la grafica.

De la figura 5.5 a la figura 5.8 se muestran los resultados de las simulaciones de la magnificación de tensión, variando el tamaño del capacitor de la industria.

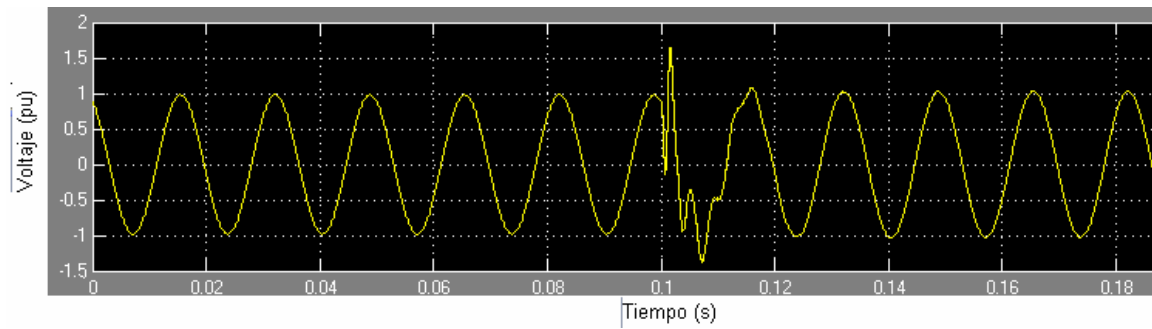


Figura 5.5. Magnificación de tensión con una capacidad de potencia reactiva del capacitor de 75 KVar.

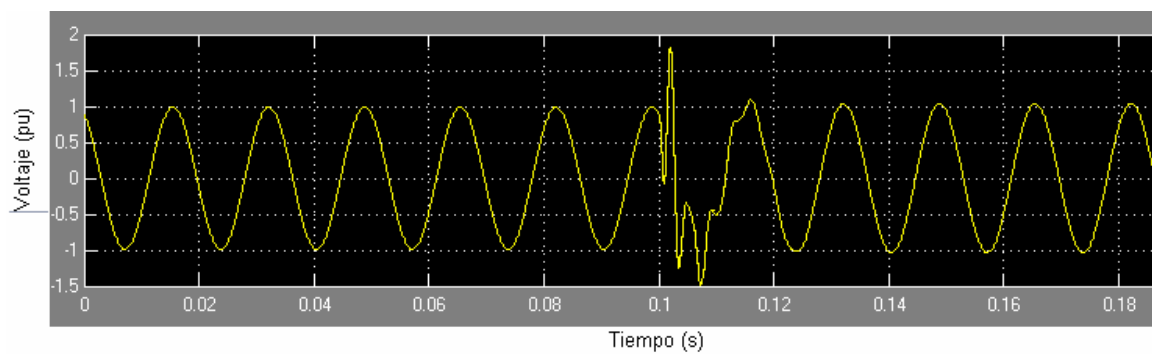


Figura 5.6. Magnificación de tensión con una capacidad de potencia reactiva del capacitor de 150 KVar.

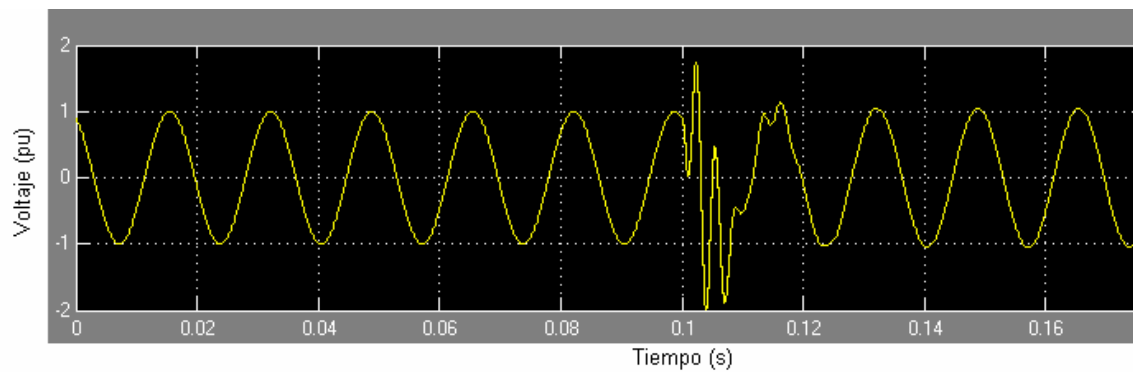


Figura 5.7. Magnificación de tensión con una capacidad de potencia reactiva del capacitor de 250 KVAR.

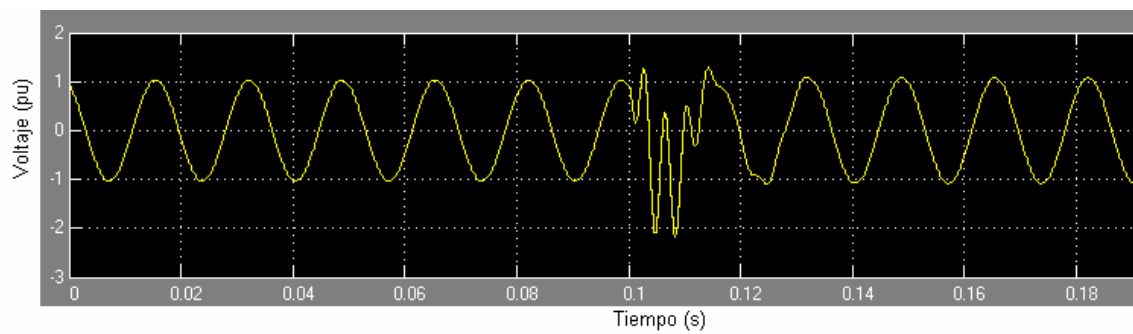


Figura 5.8. Magnificación de tensión con una capacidad de potencia reactiva del capacitor de 500 KVAR.

Tabla 5.1 Resultado del voltaje pico máximo y frecuencia transitoria en los bornes del capacitor de la planta (para distintos valores) al conectar el banco de capacitores de la subestación.

Qc (VAr)	V (pu)	F (Hz)
75K	1,7	250
150K	1,9	325
250K	2	333
300K	2,3	334
500K	2,3	340

Nota: Para estas simulaciones el X_t fue de 8%, capacidad de potencia reactiva del capacitor de 300KVAR, $S = 1500$ (KVA).

En la tabla 5.1, se colocaron las mediciones de la frecuencia transitoria para distintos valores de la capacidad de potencia reactiva del banco de capacitores de la industria, estas mediciones se realizaron de manera manual, midiendo con una regla entre dos de los picos de la onda de voltaje en el momento que ocurre el transitorio, con esto se obtiene un dato en el tiempo, invirtiendo este dato se encuentra la frecuencia. Por este motivo el margen de error podría ser muy alto.

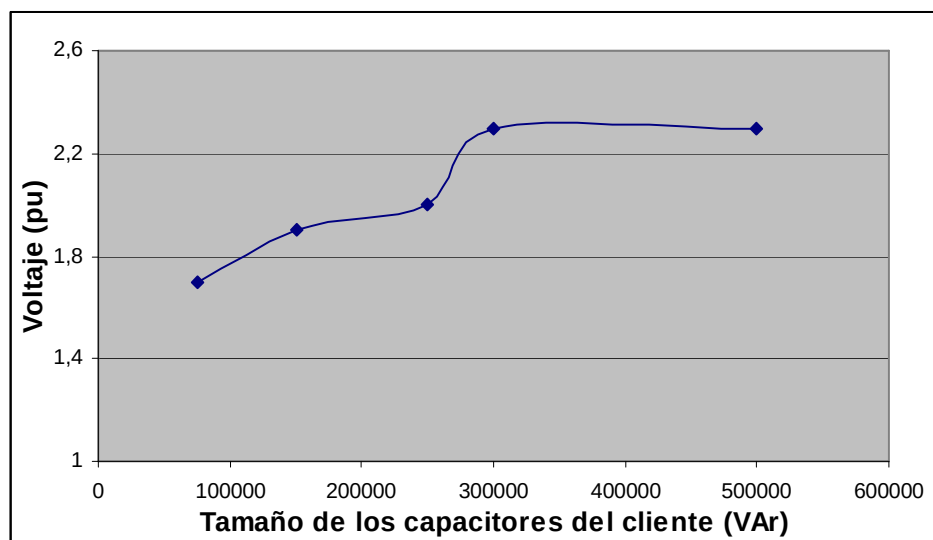


Figura 5.9. Resultados del voltaje pico máximo transitorio al variar el capacitor de la industria.

En la figura 5.9 se observa la gráfica de los máximos voltajes de la barra del cliente en función del tamaño de los capacitores que corrigen el factor de potencia. Estas curvas

ilustran como los capacitores del cliente influyen en la magnificación de tensión, ya que entre mayor sea el banco de capacitores mayor será la tensión en la industria. Esto se debe a que entre más grandes sean los capacitores, aumentará la frecuencia natural del circuito LC de la carga. (Como se observa en la Tabla 5.1).

De la figura 5.10 a la figura 5.13 se muestran las simulaciones de la magnificación de tensión, variando la potencia del transformador reductor.

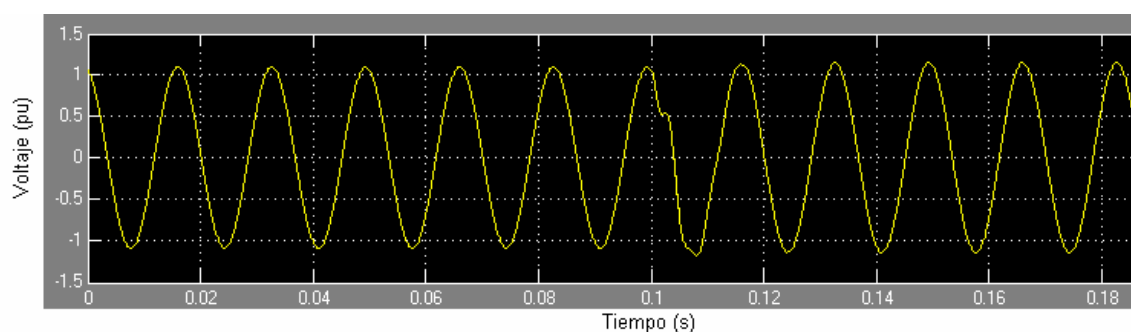


Figura 5.10. Magnificación de tensión con transformador reductor con capacidad de 250 kVA.

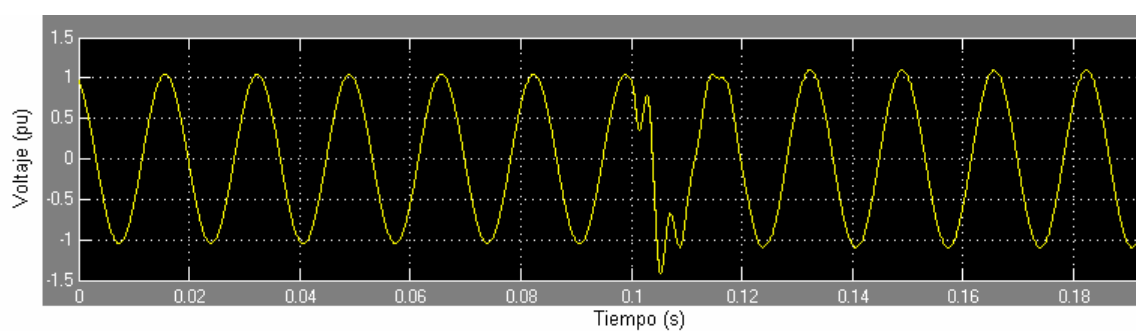


Figura 5.11. Magnificación de tensión con transformador reductor con capacidad de 500 kVA.

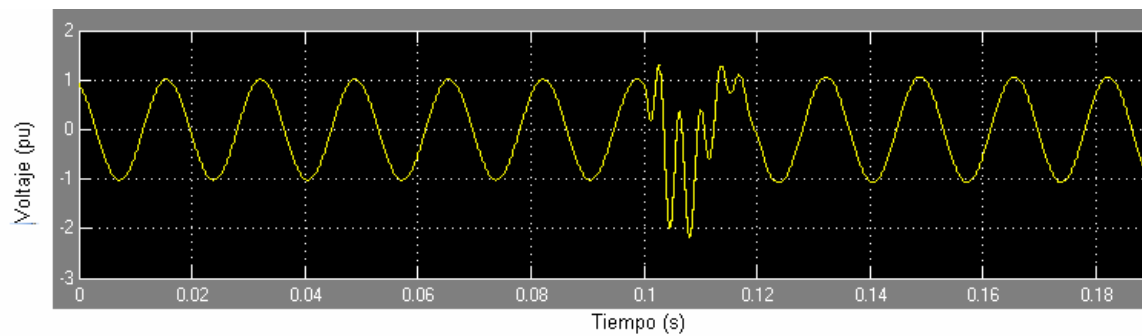


Figura 5.12. Magnificación de tensión con transformador reductor con capacidad de 1000 kVA.

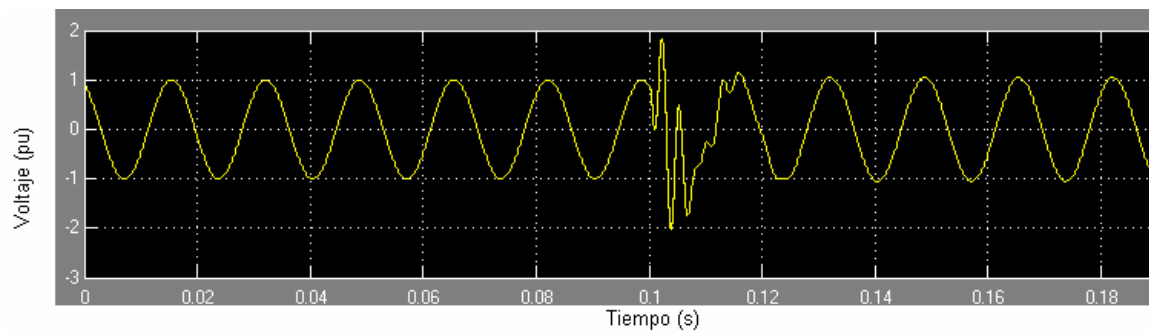


Figura 5.13. Magnificación de tensión con transformador reductor con capacidad de 2000 kVA.

Tabla 5.2 Resultado del voltaje pico máximo y frecuencia transitoria en los bornes del capacitor de la planta al variar la potencia nominal del transformador reductor.

S	V	F
(KVA)	(pu)	(Hz)
250	1,3	180
500	1,5	204
1000	2	325
1500	2,3	334
2000	2,1	392

Nota: El banco capacitores de la planta se mantuvo en 300 KVAR, el $X_t = 8\%$.

En la tabla 5.2, se colocaron las mediciones de la frecuencia transitoria para distintos valores de la capacidad de potencia nominal del transformador reductor, estas mediciones se realizaron de manera manual, midiendo con una regla entre dos de los picos de la onda de voltaje en el momento que ocurre el transitorio, con esto se obtiene un dato en el tiempo, invirtiendo este dato se encuentra la frecuencia. Por este motivo el margen de error podría ser muy alto.

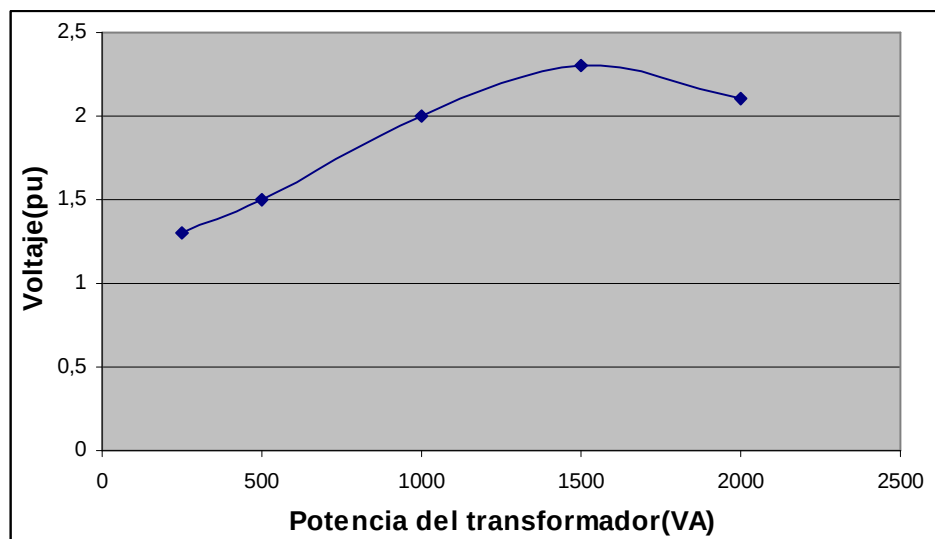


Figura 5.14. Resultados del voltaje pico máximo transitorio al variar la potencia nominal del transformador reductor de la industria.

En la figura 5.14, se observa la gráfica de los máximos voltajes transitorios en la barra del cliente en función de la potencia del transformador del lado de baja tensión. La inductancia del transformador reductor domina sobre la inductancia de la línea de

distribución entre los dos bancos de capacitores, por eso la magnificación depende de la potencia del transformador como se observa en las curvas de la figura 5.14, ya que el transformador determina la frecuencia resonante para el circuito LC de la carga. Como se observa en la tabla 5.2 que entre mayor sea la potencia del transformador mayor es la frecuencia resonante.

De la figura 5.15 a la figura 5.20 se muestran las simulaciones de la magnificación de tensión, variando la impedancia del transformador reductor.

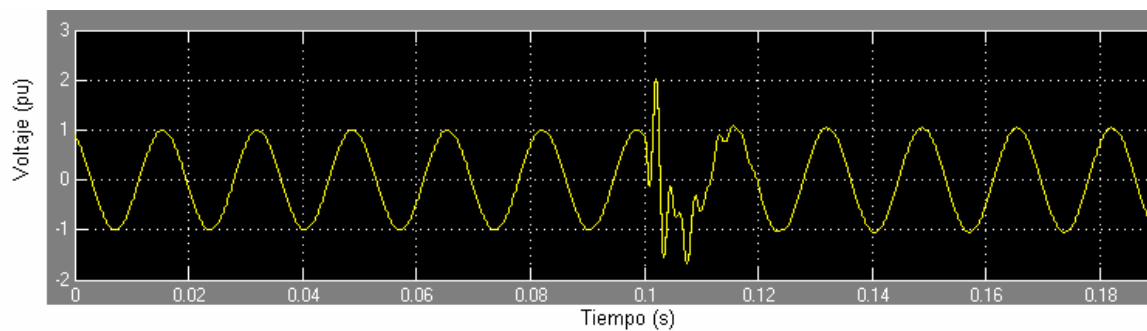


Figura 5.15. Magnificación de tensión con impedancia del transformador de 4%.

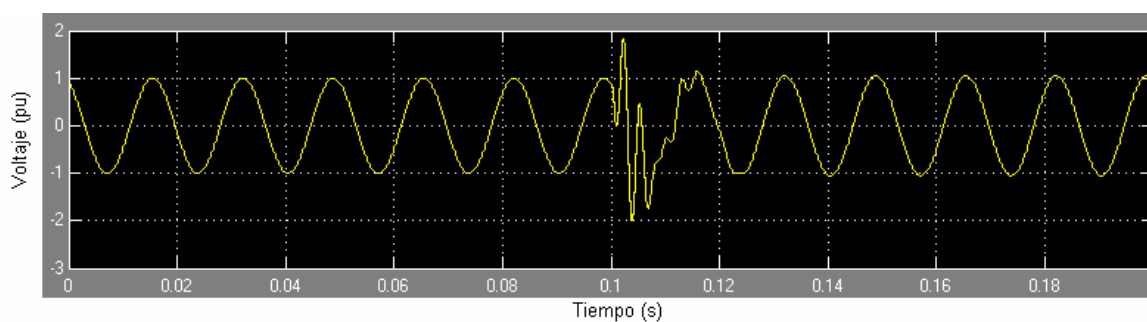


Figura 5.16. Magnificación de tensión con impedancia del transformador de 6%.

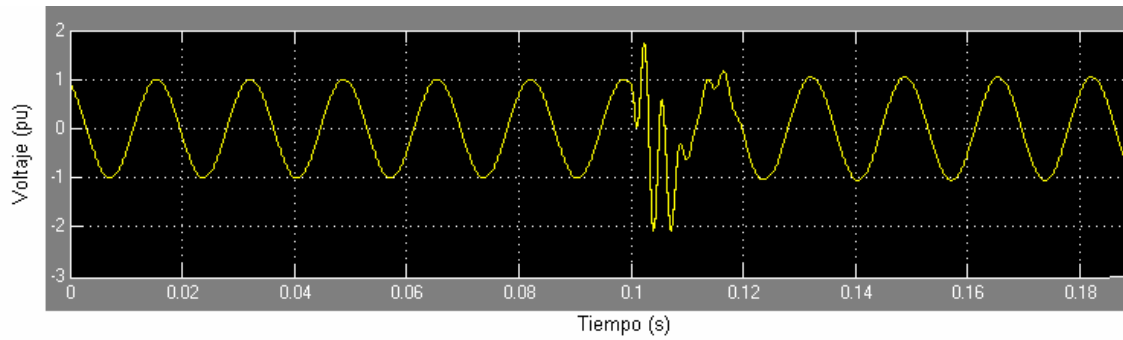


Figura 5.17. Magnificación de tensión con impedancia del transformador de 7%.

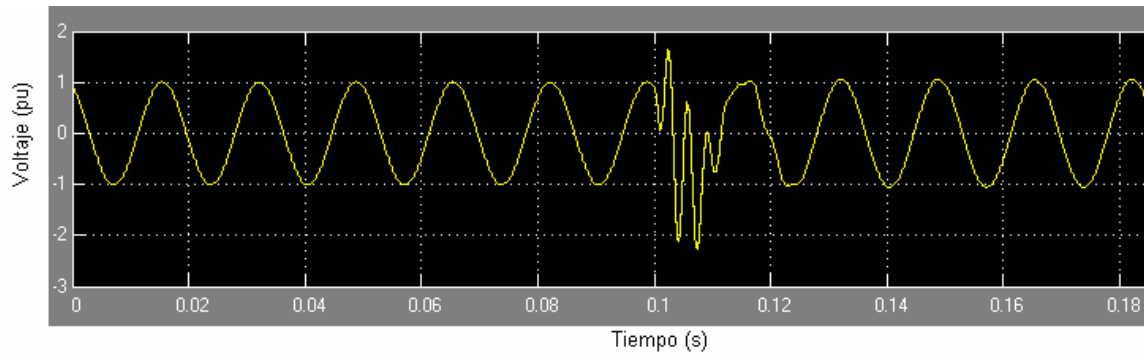


Figura 5.18. Magnificación de tensión con impedancia del transformador de 8%.

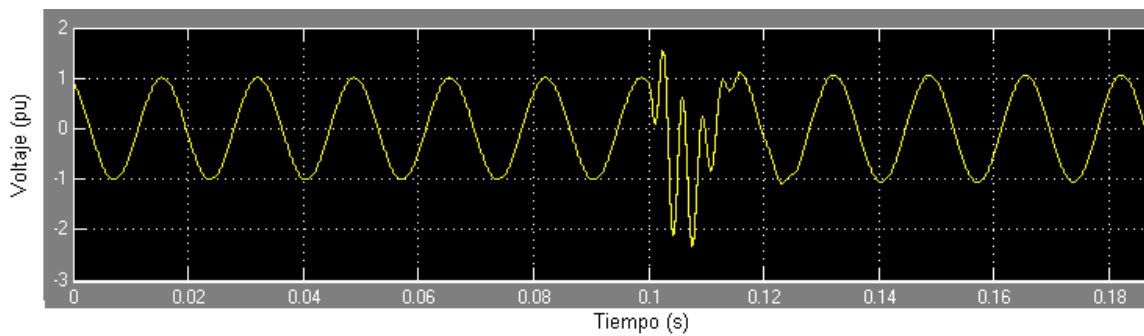


Figura 5.19. Magnificación de tensión con impedancia del transformador de 9%.

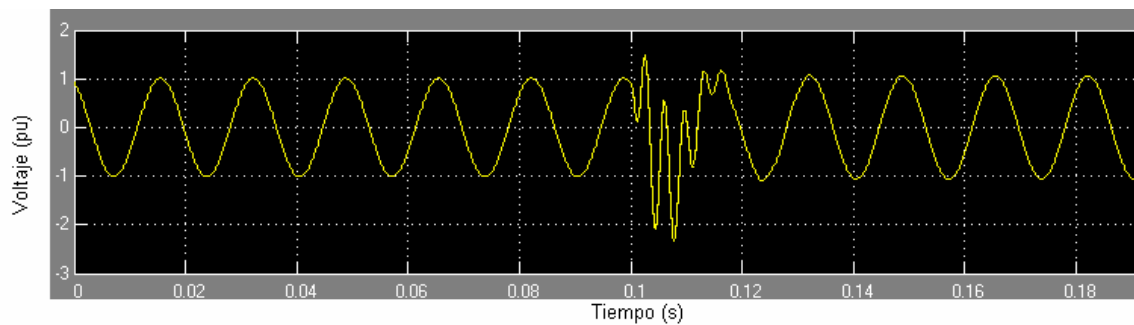


Figura 5.20. Magnificación con impedancia del transformador de 10%.

Tabla 5.3 Resultado del voltaje pico máximo y frecuencia transitoria en los bornes del capacitor de la planta al variar la impedancia porcentual del transformador reductor.

Xt	V	F
(%)	(pu)	(Hz)
4	2	392
6	2	377
7	2,1	343
8	2,3	334
9	2,4	326
10	2,4	314

Nota: El valor de la capacidad de potencia reactiva del capacitor es de 300 KVAR, con una potencia nominal del transformador reductor de 1500VA y un tiempo de 0.1s

En la tabla 5.3, se colocaron las mediciones de la frecuencia transitoria para distintos valores de la impedancia porcentual del transformador reductor, estas mediciones se realizaron de manera manual, midiendo con una regla entre dos de los picos de la onda de voltaje en el momento que ocurre el transitorio, con esto se obtiene un dato en el tiempo, invirtiendo este dato se encuentra la frecuencia. Por este motivo el margen de error podría ser muy alto.

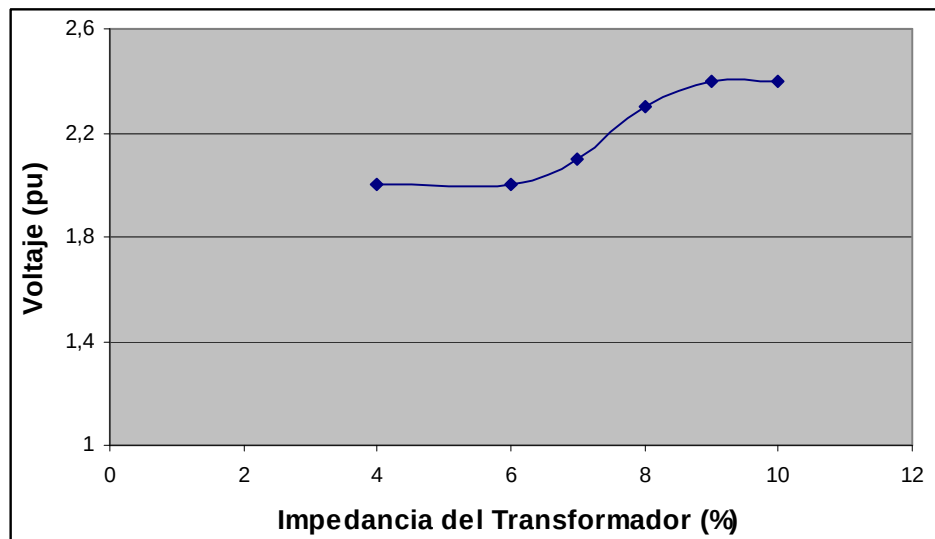


Figura 5.21. Resultados del voltaje pico máximo transitorio al variar la impedancia porcentual del transformador.

En la figura 5.21 se observa la gráfica de los máximos voltajes en la barra del cliente en función de la impedancia del transformador del lado de baja tensión. Como se mencionó anteriormente la inductancia del transformador domina la inductancia de la línea, por eso la impedancia del transformador de baja tensión influirá en la tensión, debido a que entre más impedancia mayor también será la capacidad de corto circuito y disminuirá la frecuencia natural del circuito LC. En el momento que ocurre la conmutación del capacitor o una perturbación en la red eléctrica, el aumentarle la reactancia equivalente del transformador producirá mayor inestabilidad en el sistema, disminuirán las pérdidas y aumentara la caída de tensión.

La disminución de la frecuencia natural del circuito LC de carga, es por motivo de que al aumentar la reactancia equivalente del transformador amortigua la oscilación transitoria, que circula por el transformador en el momento que ocurre la energización del capacitor.

Con las variaciones de los parámetros de una red eléctrica típica para que ocurra la magnificación de la tensión, se puede observar que en Costa Rica la posibilidad de que ocurra el fenómeno es muy alta, ya que todas las subestaciones del anillo central poseen bancos de capacitores que son energizados dos veces al día.

De la figura 5.22 a la figura 5.25 se muestran las simulaciones de la magnificación de tensión, variando el tiempo de conmutación para el peor de los casos, que ocurre en la mayor porcentaje de reactancia del transformador ($X_t=10\%$).

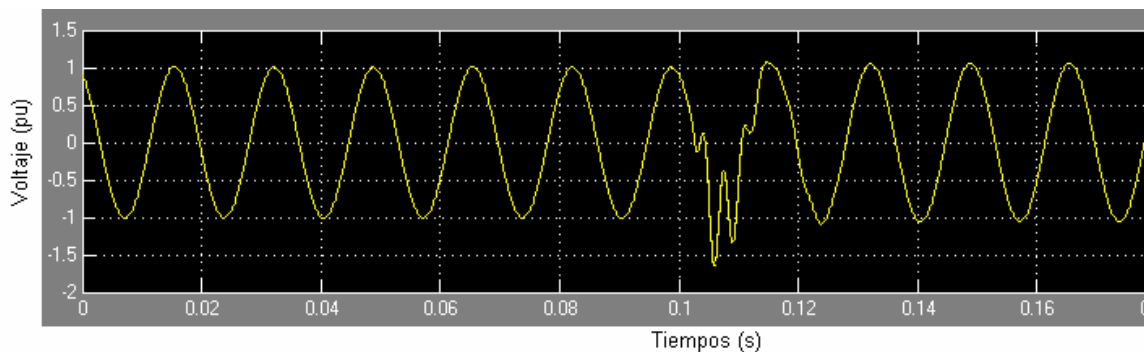


Figura 5.22. Magnificación de tensión con tiempo de conmutación de $T=0.102$.

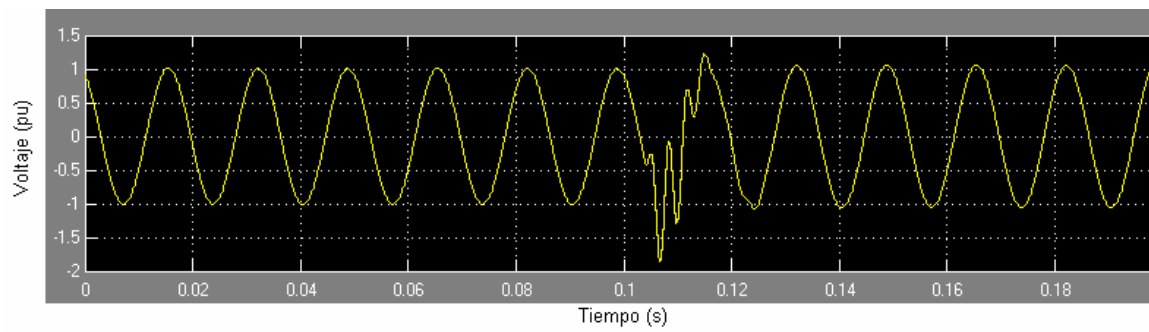


Figura 5.23. Magnificación de tensión con tiempo de conmutación de $T=0.104$.

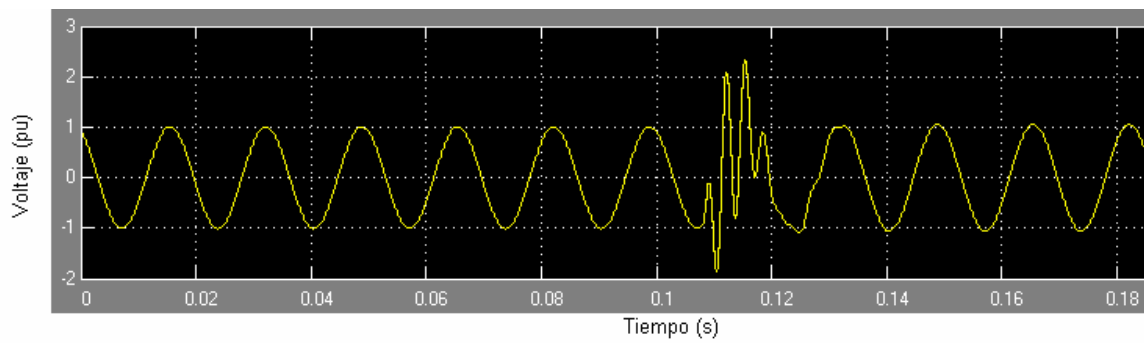


Figura 5.24. Magnificación de tensión con tiempo de conmutación de $T=0.108$.

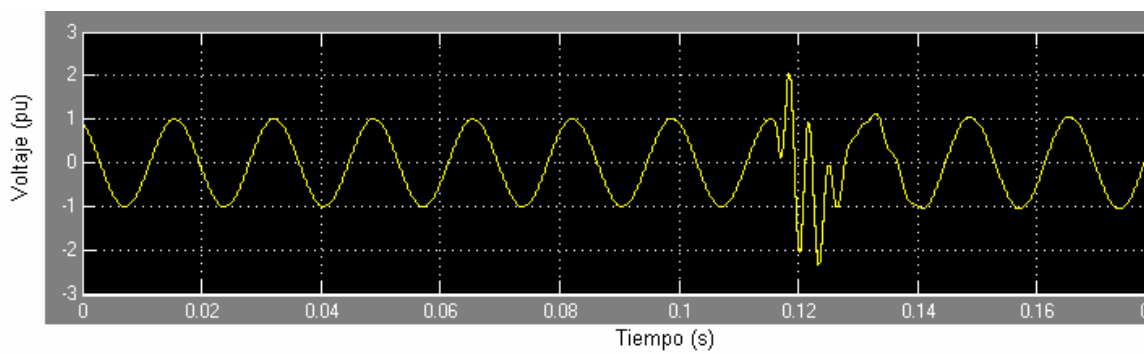


Figura 5.25. Magnificación de tensión con tiempo de conmutación de $T=0.116$.

Tabla 5.4 Resultado del voltaje pico máximo y frecuencia transitoria en los bornes del capacitor de la planta al variar el tiempo de conmutación de los capacitores.

T	V	F
(s)	(pu)	(Hz)
0,1	2,3	334
0,102	1,6	270
0,104	1,8	322
0,108	2,4	337
0,116	2,5	345

Nota: El valor de la capacidad de potencia reactiva del capacitor de la industria es de 300KVAR, la potencia nominal del transformador reductor es de 1500 KVA y con una impedancia de 8%.

En la tabla 5.4, se colocaron las mediciones de la frecuencia transitoria para distintos tiempos de la conmutación de los capacitores, estas mediciones se realizaron de manera manual, midiendo con una regla entre dos de los picos de la onda de voltaje en el momento que ocurre el transitorio, con esto se obtiene un dato en el tiempo, invirtiendo este dato se encuentra la frecuencia. Por este motivo el margen de error podría ser muy alto.

Es necesario mencionar que para las diferentes simulaciones realizadas cambiando los parámetros y los valores del sistema de potencia del cliente, se realizaron en los bornes de los bancos de capacitares tanto de la empresa eléctrica como de la industria.

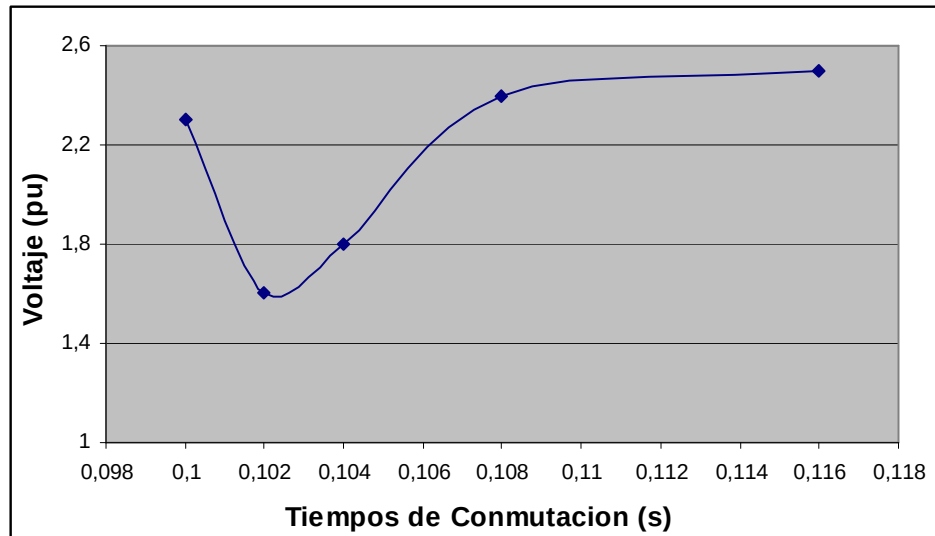


Figura 5.26. Resultados del voltaje pico máximo transitorio al variar los tiempos de conmutación de la empresa eléctrica.

En la figura 5.26, se muestra la gráfica de los máximos voltajes en función de diferentes tiempos de conmutación del capacitor. En esta gráfica la variación del máximo voltaje se debe exactamente al momento de energización de los capacitores, ya que cuando la oscilación de la onda de voltaje de la fase C (es la que se está estudiando), pasa o está muy cerca de cero los sobrevoltajes van a ser pequeños ya que la perturbación de la onda va a ser proporcional con el nivel de voltaje en ese momento. Por eso uno de los métodos de mitigación más eficientes es el control por cierre sincrónico.

La figura 5.26, muestra la situación de los tiempos de conmutación, estos tiempos se dan cuando se energiza el banco de capacitores de la subestación, ya que los voltajes no tienen una uniformidad creciente o decreciente con respecto a los tiempos de conmutación, ya que dependen de la onda de voltaje en cada instante.

En la figura 5.27, se muestra la simulación de la magnificación de la tensión en el peor de los casos, con las tres fases.

Por este motivo se utilizó la fase C, ya que como se observa en la figura 5.27 la fase A en la conmutación a 0.1seg., que es el tiempo en el que se realizaron todas las simulaciones es cero o casi cero, y el fenómeno no se va a ver correctamente porque es como si estuviera utilizando la medida de mitigación de cierre sincrónico.

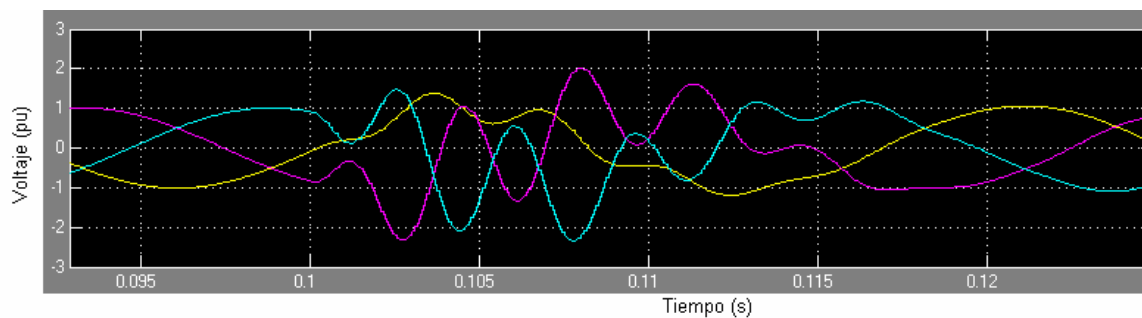


Figura 5.27. Tres fases de la magnificación de tensión.

5.2 Simulaciones con Técnicas de mitigación.

La técnicas de mitigación que pueden implementarse en simulación con el programa MATLAB 7.1 son las de filtros armónicos, desconexión de los capacitores que corrigen el factor de potencia en la industria en el momento de la energización de los capacitores de alta tensión, control de cierre sincrónico y dividir la potencia reactiva que debe entregar el banco de capacitores de la empresa eléctrica, en dos bancos de capacitores y conmutarlos a diferente tiempo.

En la figura 5.28, se observa el circuito desconectando el banco de capacitores de la industria en el momento de la energización de los bancos de capacitores de la empresa eléctrica.

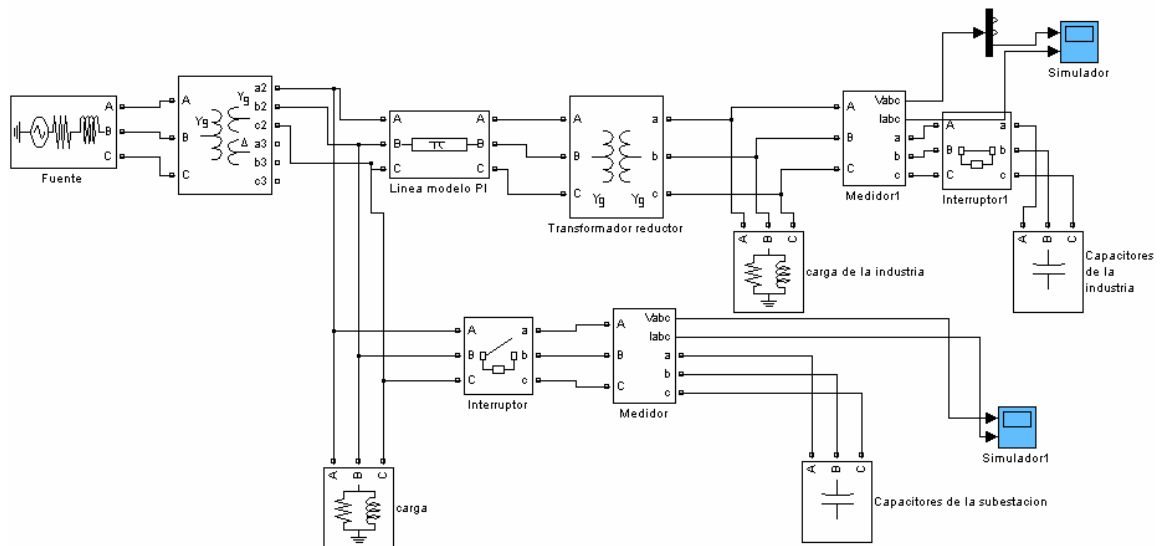


Figura 5.28. Circuito con desconexión de los capacitores de la industria.

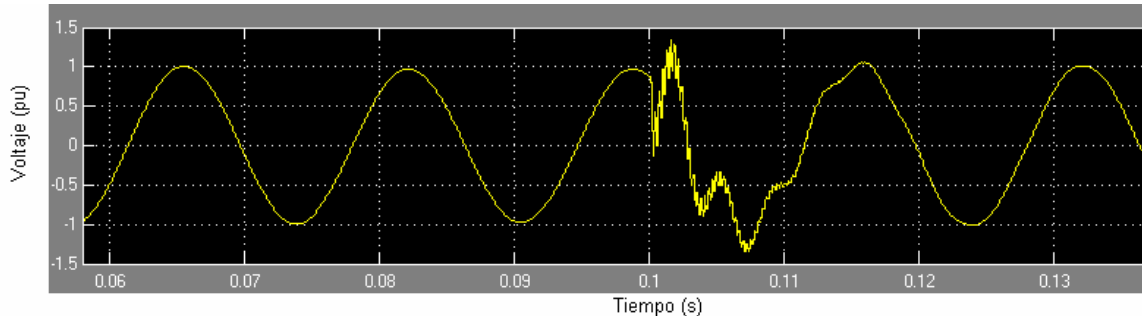


Figura 5.29. Magnificación de tensión con la desconexión del banco de capacitores de la industria.

En la figura 5.29, se observa como la desconexión del banco de capacitores de la industria, genera una disminución en los sobrevoltajes transitorios a 1.4 pu en el momento de la energización de los capacitores de alta tensión. Esto se debe a que el circuito LC de la carga ya no estaría funcionando, porque los capacitores no estarían generando reactivo para corregir el factor de potencia. La frecuencia natural ya no se excitaría con este circuito y no se daría el fenómeno de magnificación de la tensión.

En la figura 5.29, también se muestra como a los 0.02s que se desconectan los capacitores la corriente se hace cero.

En la figura 5.30, se observa el circuito con un filtro armónico colocado en serie con el banco de capacitores de la industria. Esta es una medida de mitigación que puede ser implementada en la industria, con un filtro armónico que podría ser un reactor equivalente al banco de capacitores que corrigen el factor de potencia. En este caso se utiliza una inductancia de 0.0922198mH, para un capacitor de 300 KVAR. Lo anterior corresponde a un filtro sintonizado a casi la quinta armónica.

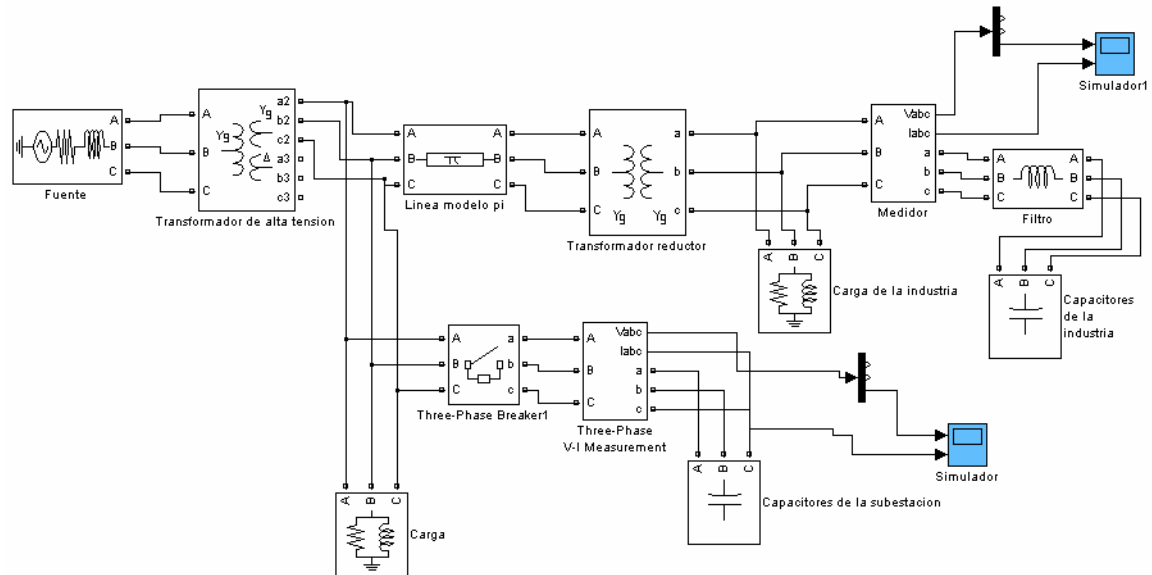


Figura 5.30. Circuito con filtro armónico.

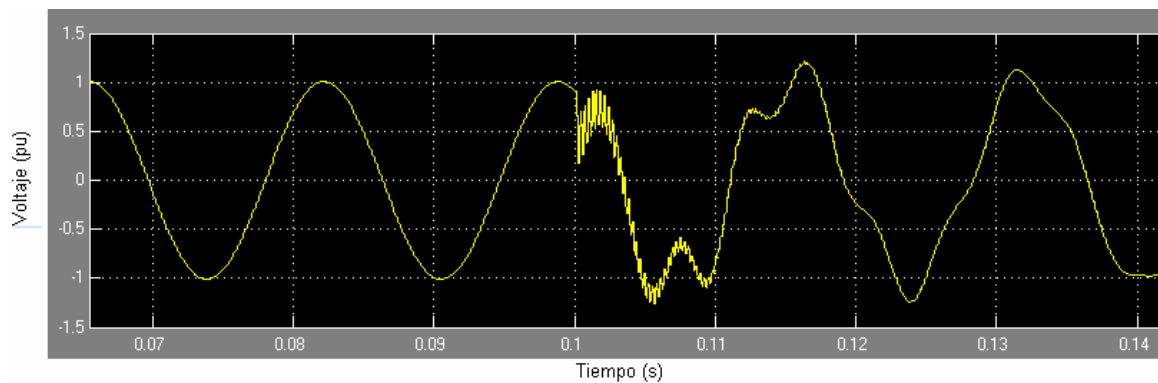


Figura 5.31. Magnificación de tensión con filtro armónico.

En la figura 5.31, se observa como los sobrevoltajes disminuyen a 1.2pu en la industria, mitigando casi por completo las sobretensiones por conmutación del banco de capacitores. Esto se debe porque al colocar la inductancia en serie con los capacitores esta

se convierte en un filtro pasivo, que puede mejorar las distorsiones armónicas y a la vez modifica la frecuencia natural del sistema. Al colocar la inductancia en serie esta funciona como amortiguamiento de la oscilación transitoria.

En la figura 5.32, se observa un circuito con disyuntor monopolar colocados a cada fase del banco de capacitores de la empresa eléctrica, esta es una técnica de mitigación conocida como cierre sincrónico y que puede ser implementada por parte de la empresa eléctrica.

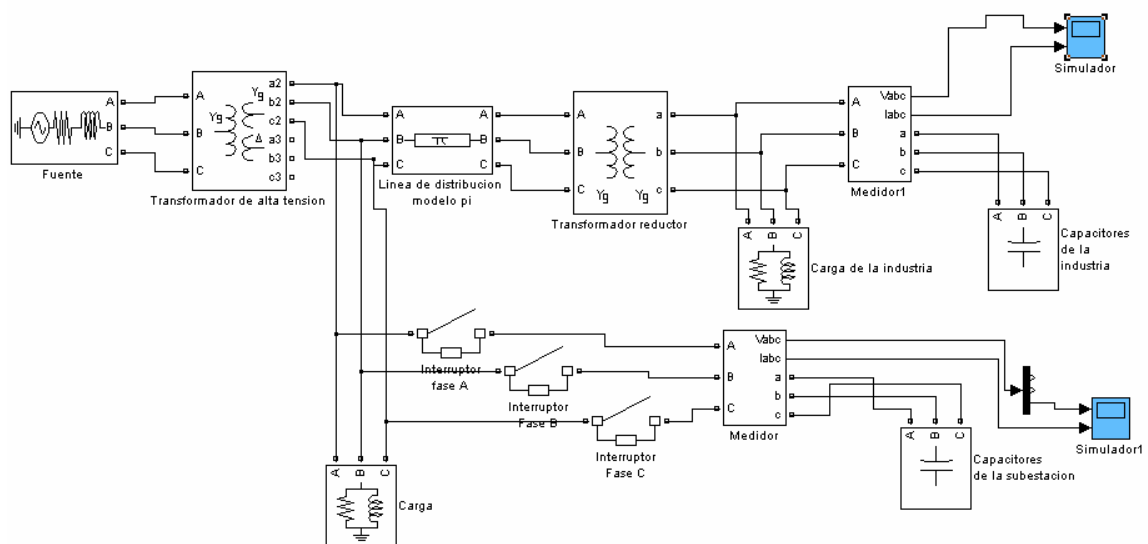


Figura 5.32. Circuito con control de cierre sincrónico.

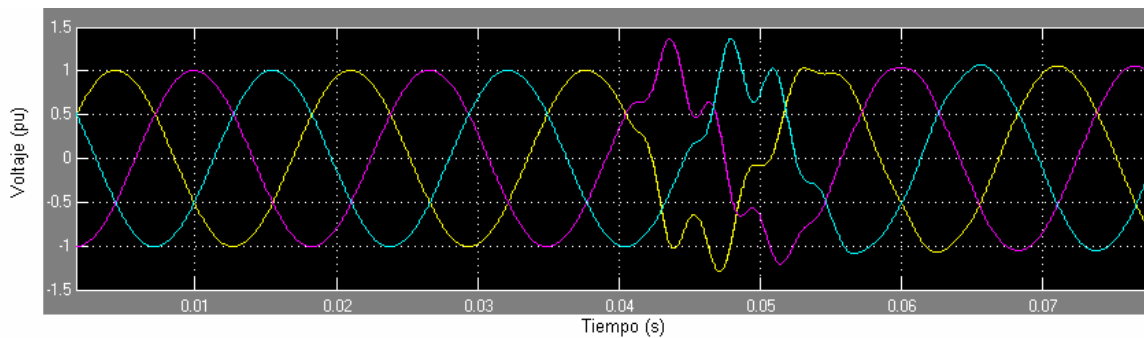


Figura 5.33. Magnificación de tensión con control de cierre sincrónico.

En la figura 5.33, se observa como el cierre de las fases A y B ocurre a los 0.0404 seg. momento en el cual estas fases están relativamente cerca de cero. Ambas ondas disminuyen la oscilación transitoria por la conmutación del capacitor, ya que la energización no tiene el mismo impacto a un valor de voltaje bajo, el voltaje disminuye a 1.3pu para la fase A y 1.4pu para la fase B. Igualmente se realizó para la fase C, solo que en este caso se cerró la fase C a 0.0445s., disminuyendo el voltaje transitorio a 1.4pu.

En la figura 5.34, se observa el circuito con dos bancos de capacitores colocados en la subestación para energizarlos a diferentes tiempos y poder suministrar la potencia reactiva a la red eléctrica, sin tener sobretensiones transitorias que puedan afectar los equipos electrónicos de la industria.

En la figura 5.35, se observa como el dividir la capacidad del banco de capacitores a dos valores, es una técnica recomendada para la empresa de distribución desde el punto de vista de efectividad y fiabilidad, ya que el impacto de la conmutación no es el mismo porque se hace a diferentes tiempos, disminuyendo las sobretensiones a 1.4pu en 0.1s. y a

1.6pu en 0.3s. No es lo mismo desde el punto de vista económico, ya que en vez de comprar un solo capacitor que suministre 12 MVar al sistema, se deberán comprar dos capacitores de 6 MVar cada uno.

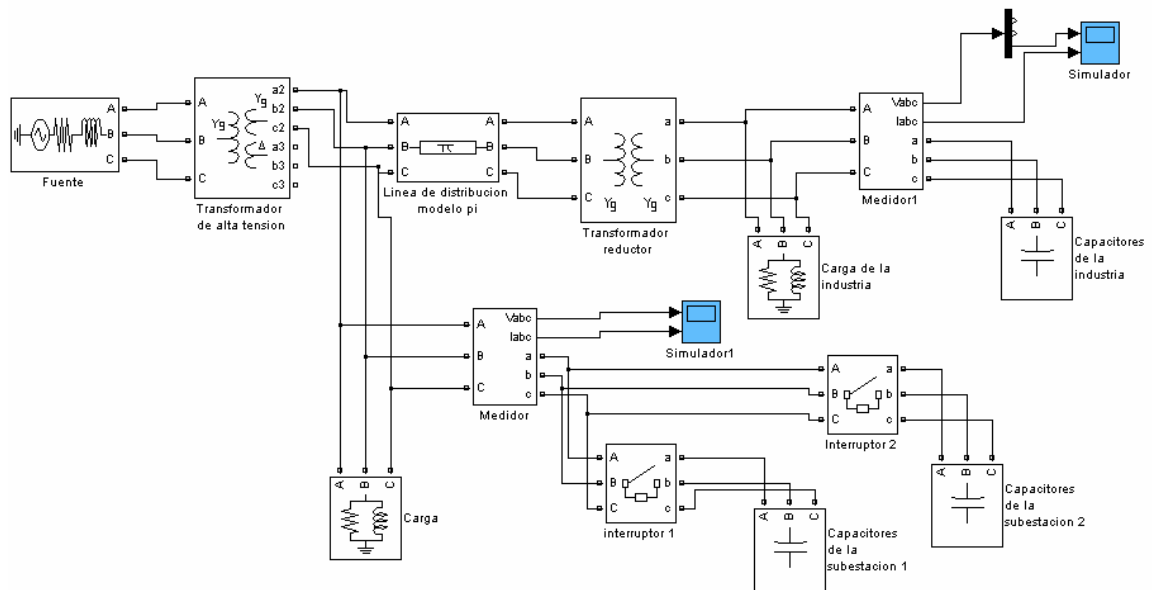


Figura 5.34. Circuito con la conmutación del capacitor a diferentes tiempos.

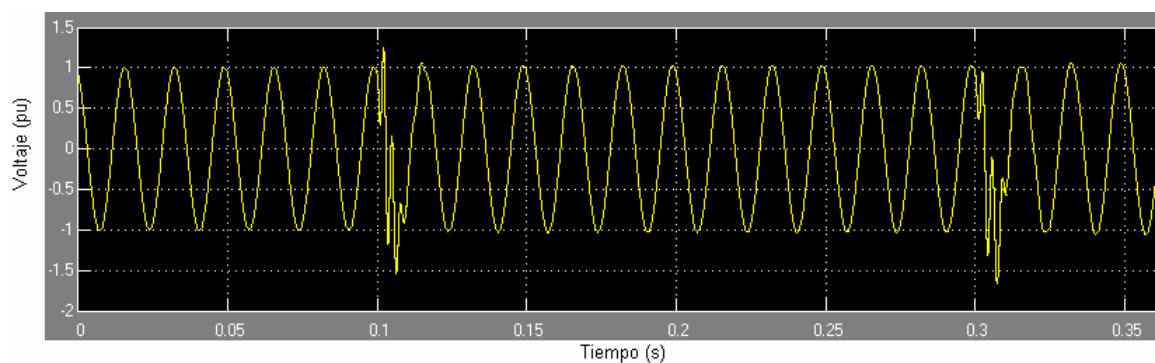


Figura 5.35. Magnificación de tensión con capacitor dividido.

5.3 Efecto de una falla en la industria con capacitores que corrigen el factor de potencia.

En esta sección se intentó hacer una comparación de una falla eléctrica a diferentes distancias de la subestación y su efecto en la industria que tengan instalados bancos de capacitores que corrigen el factor de potencia, con la magnificación de tensión por energización de los bancos de capacitores de la empresa eléctrica.

En la figura 5.35, se muestra el circuito con una falla eléctrica en una línea de distribución, con este circuito se harán las simulaciones (MATLAB 7.1), de una falla eléctrica a diferentes distancias de la subestación y su efecto en la industria.

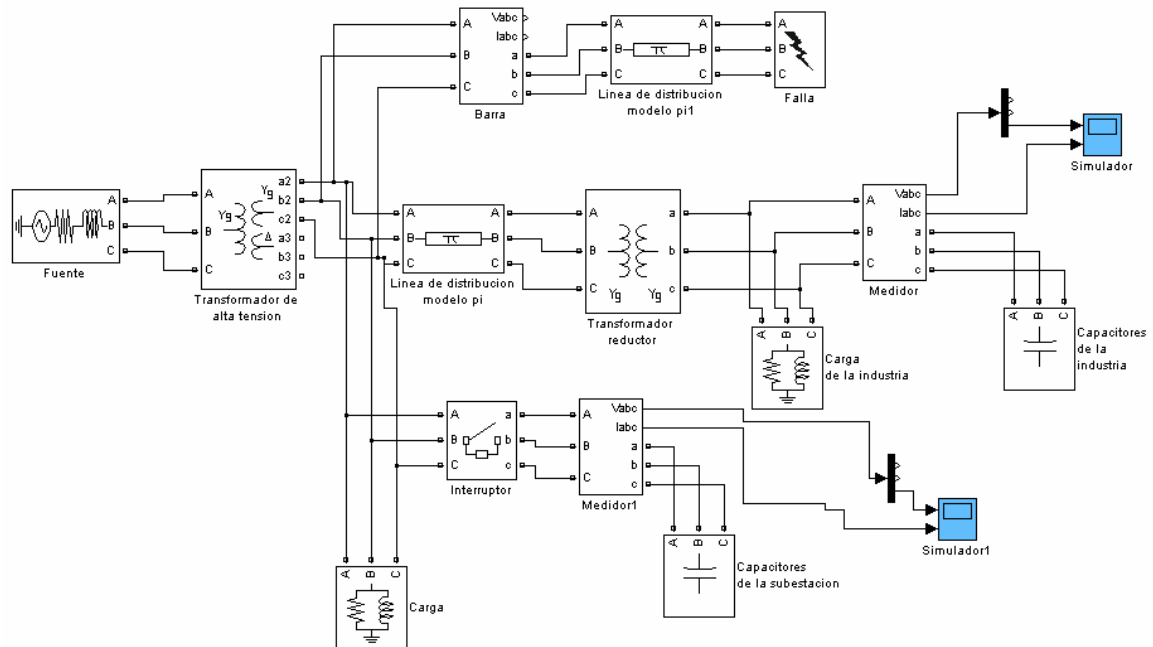


Figura 5.36. Circuito con falla en una línea en vacío.

De la figura 5.37 a la figura 5.44 se muestran las simulaciones de las fallas eléctricas a diferentes distancias de la subestación, y su efecto en la industria y en la empresa de distribución eléctrica.

Falla a 3Km de la subestación.

Efecto en la industria.

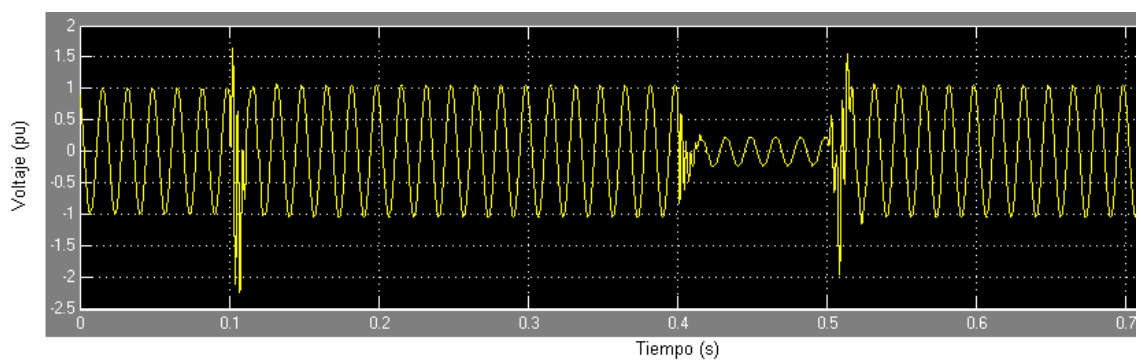


Figura 5.37. Efecto en la industria de la falla a 3Km.

Efecto en la empresa eléctrica.

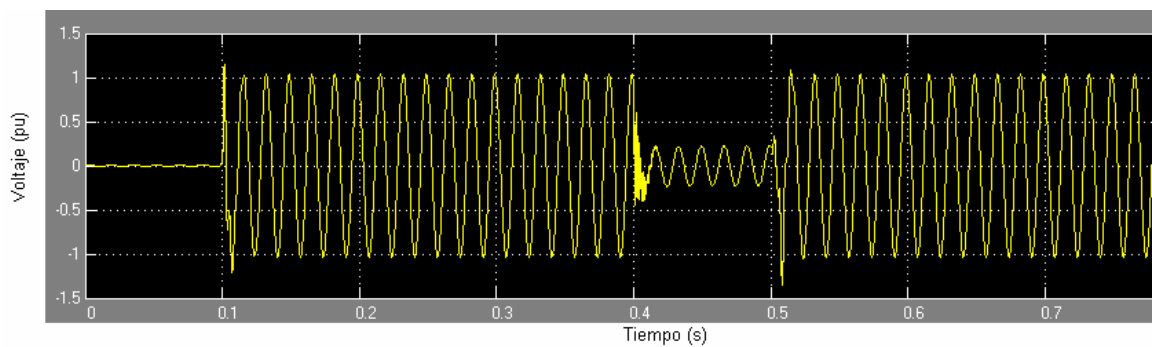


Figura 5.38. Efecto en la empresa eléctrica de la falla a 3Km.

Falla a 6 Km.de la subestación

Efecto en la industria.

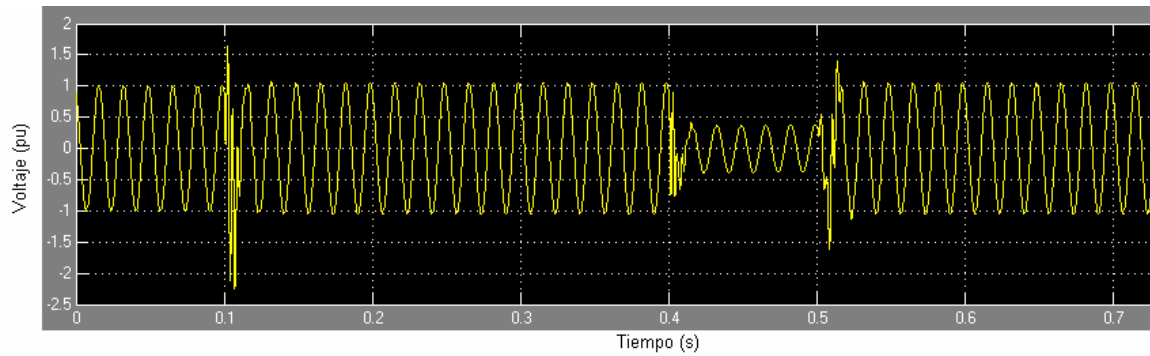


Figura 5.39. Efecto en la industria de la falla a 6Km.

Efecto en la empresa eléctrica.

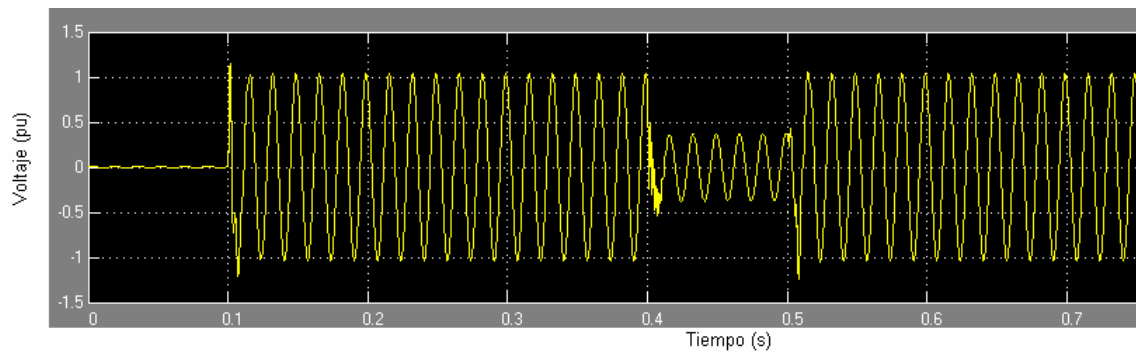


Figura 5.40. Efecto en la empresa eléctrica de la falla a 6Km.

Es necesario mencionar que las mediciones para el efecto en la tensión por una falla o perturbación en la línea, se realizaron en los bornes de los bancos de capacitores tanto de la empresa eléctrica, como de la industria. También es necesario mencionar que esa falla es a una distancia variable vista desde el banco de capacitores de la subestación.

Falla a 9Km de la subestación.

Efecto en la empresa eléctrica

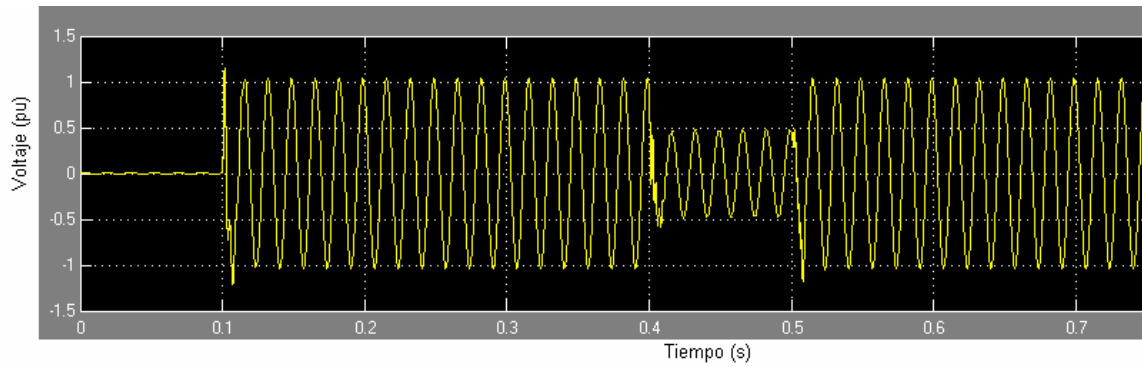


Figura 5.41. Efecto en la empresa eléctrica de la falla a 9Km.

Efecto en la industria.

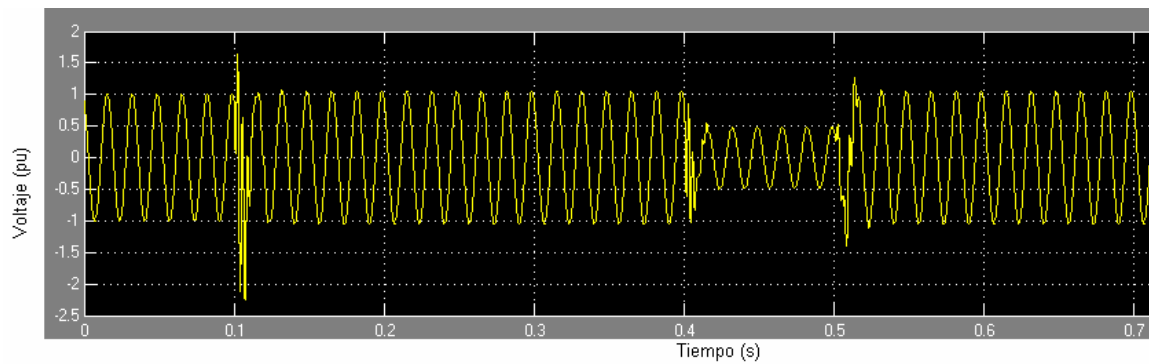


Figura 5.42. Efecto en la industria de la falla a 9Km.

Falla a 12Km de la subestación.

Efecto en la empresa eléctrica.

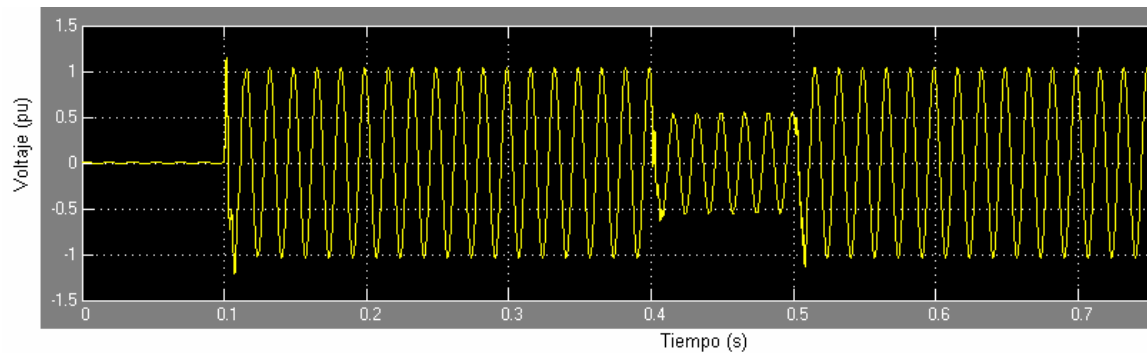


Figura 5.43. Efecto de la falla en la empresa eléctrica, a 12Km de la subestación.

Efecto en la industria.

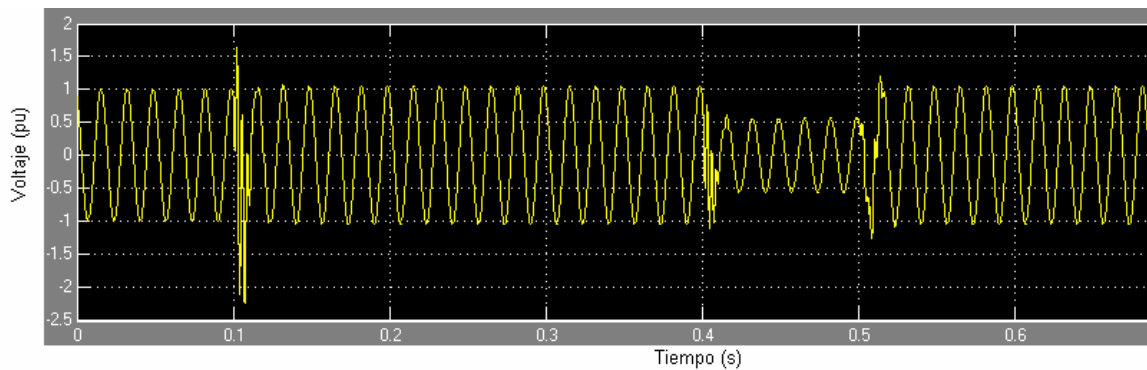


Figura 5.44. Efecto de la falla en la industria, a 12Km de la subestación.

Falla en la subestación.

Efecto en la empresa eléctrica.

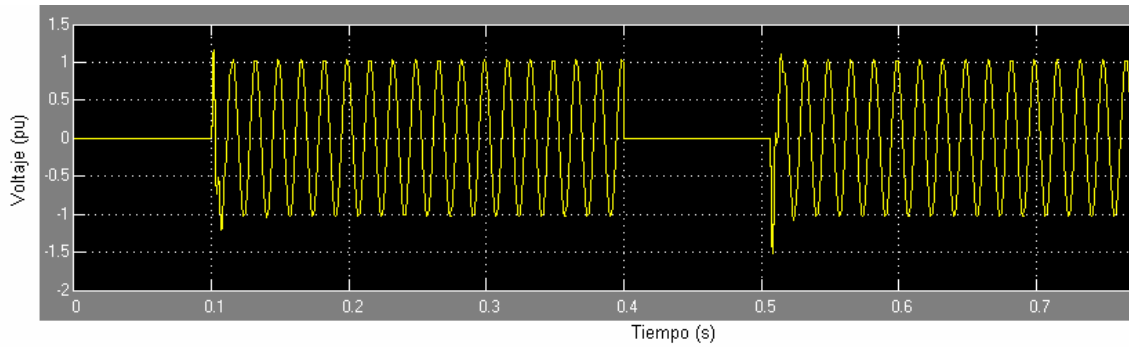


Figura 5.45. Efecto en la empresa eléctrica de la falla en la subestación.

En la figura 5.45, se observa el efecto de una falla eléctrica en la subestación para la empresa eléctrica. En la grafica de voltaje se observa como en 0.4s ocurre la falla y el voltaje se cae a 0pu, en el momento que se restaura la línea que ocurre a 0.5s. Se crea un transitorio de voltaje similar al de la magnificación de tensión de 1.5pu, se puede comparar estos dos voltajes ya que a 0.1s. se conmuta el capacitor y se crea un sobrevoltaje de 1.2pu.

Efecto en la industria

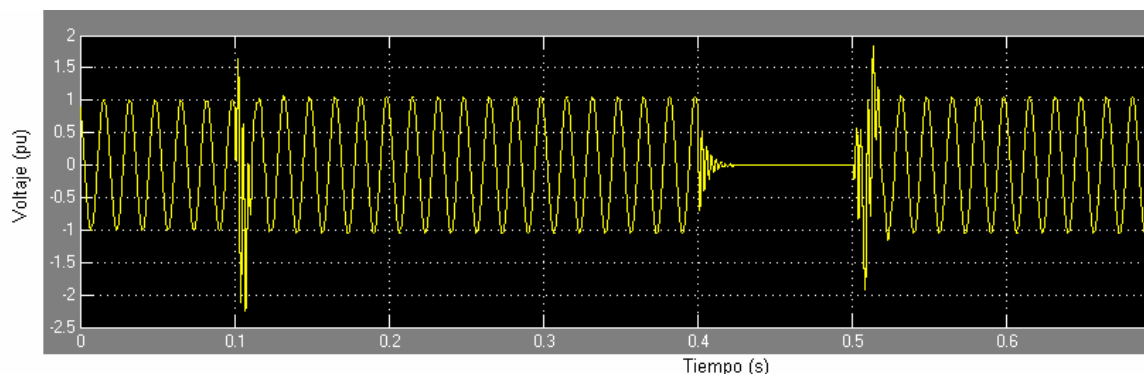


Figura 5.46. Efecto en la industria de la falla en la subestación.

En la figura 5.46, se observa como la gráfica de voltaje en el momento que ocurre la falla en la subestación el voltaje cae a 0pu, y en el momento en que se reestablece la línea se crea una oscilación transitoria que incrementa el voltaje a 1.9 pu, por motivo que la frecuencia natural se excita por el circuito LC de la carga.

En la figura 5.46, también se observa como la corriente se incrementa en el momento de la falla, pero con un menor efecto que cuando sucede en la subestación. Comparando los dos fenómenos en el momento de restablecer la línea y en el momento de conmutar los capacitores, se observa en el mismo efecto en la corriente en el lado de la industria.

Tabla 5.5. Efecto de una falla en la tensión de la industria, con banco de capacitores que corrigen el factor de potencia.

Qc	Xt	S	t	V	Distancia
(VAr)	(%)	(kVA)	(S)	(pu)	(Km.)
300K	8	1500	0,1	2	0
300K	8	1500	0,1	2	3
300K	8	1500	0,1	1,7	6
300K	8	1500	0,1	1,4	9
300K	8	1500	0,1	1,3	12

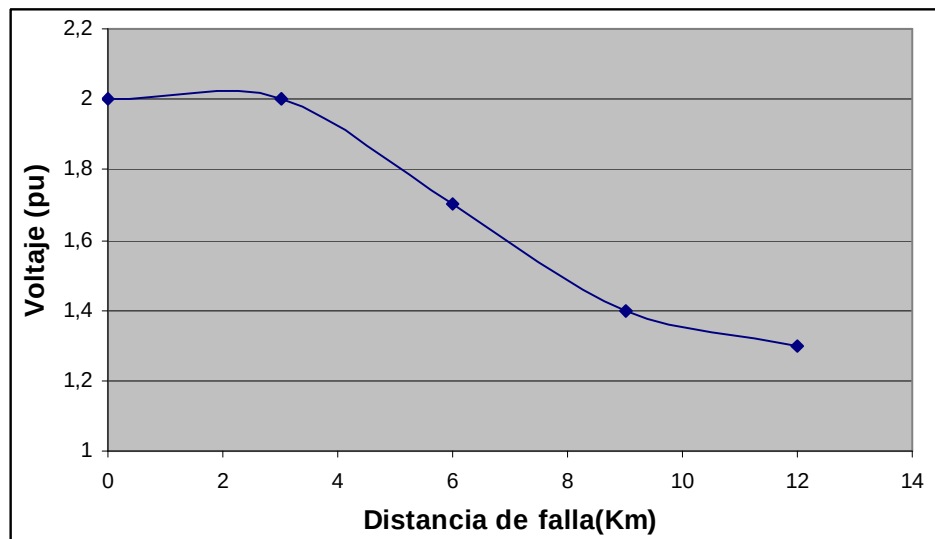
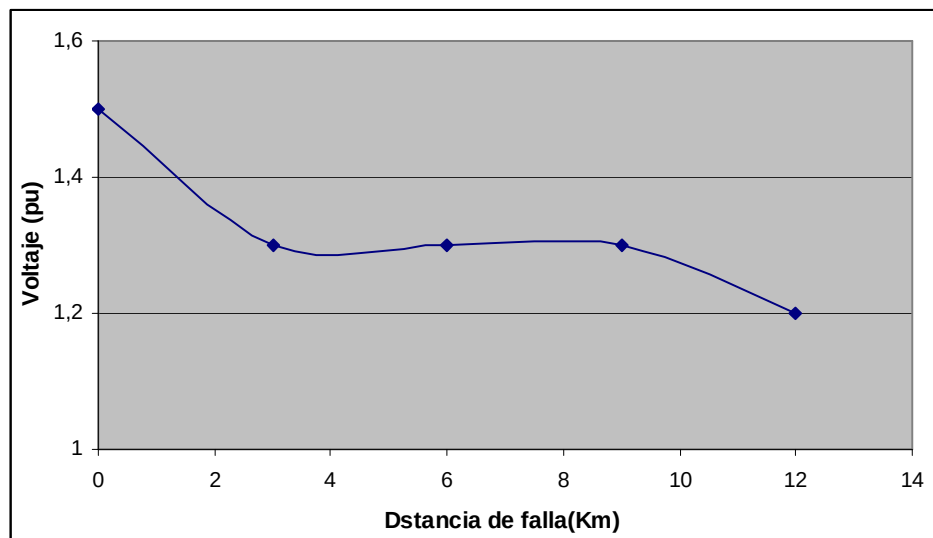


Figura 5.47. Efecto de la falla en la industria a diferentes distancias.

En la figura 5.47, se observa la gráfica de los máximos voltajes en la industria en el momento de la falla en función de las distancias en que ocurre la falla. Los resultados obtenidos de las simulaciones, muestran que conforme aumenta la distancia entre la subestación y en el lugar en el que ocurre la falla, el efecto en los sobrevoltajes de la industria van a ser menores. Esto se debe a que en el momento en que ocurre una perturbación en la línea, hace que la frecuencia natural en el sistema aumente generando una excitación con el circuito LC de carga y creando sobrevoltajes en la industria. El motivo por el cual los sobrevoltajes disminuyen conforme la distancia de la falla y la subestación es más grande, se debe a que la perturbación no causara mayor efecto en la subestación que es la que controla la frecuencia del sistema y por ende los sobrevoltajes van a ser más bajos.

Tabla 5.6. Efecto de una falla en la tensión de la empresa eléctrica.

Qc (VAr)	Xt (%)	S (KVA)	t (s)	V (pu)	Distancia (Km.)
300K	8	1500	0,1	1,5	0
300K	8	1500	0,1	1,3	3
300K	8	1500	0,1	1,3	6
300K	8	1500	0,1	1,3	9
300K	8	1500	0,1	1,2	12

**Figura 5.48. Resultados del voltaje pico máximo transitorio en la empresa eléctrica al ocurrir una falla a diferentes distancias.**

En la figura 5.48, se observa la gráfica de los máximos voltajes en la empresa eléctrica por motivo de una falla en función de distintas distancias que ocurre la falla. En este caso no ocurre mayor diferencia en los voltajes, variando las distancias en que ocurre la falla.

CAPÍTULO 6: Regulación de la Magnificación de Tensión según el ARESEP.

La autoridad reguladora de servicios públicos, es el ente encargado de regular la calidad de voltaje que suministra las empresas eléctricas en Costa Rica. En una de sus normas referidas a este tema como lo es "Calidad del voltaje de suministro"(AR-NTCVS), abarca el tema de las variaciones de voltaje de corta duración o también conocidos como transitorios. Muchas veces los voltajes transitorios son inevitables por parte de la empresa distribuidora, pues obedecen a la influencia de descargas eléctricas de origen atmosférico (rayo) y a la influencia de los cambios en la operación del sistema de potencia, como en el caso de nuestro estudio, que el voltaje transitorio se debe a la energización del banco de capacitores de la empresa eléctrica.

A pesar de que el fenómeno conocido como magnificación de la tensión, provoca un transitorio de voltaje lo suficientemente grande como para causar molestias en los variadores de velocidad ajustable y equipo electrónico, no es sancionable por parte del ARESEP según la entrevista realizada al Ing. Edgar Cubero (ANEXOS), trabajador de dicha institución.

Otros tipos de variaciones de voltaje de corta duración si son sancionables, como lo son los huecos de tensión, picos de tensión e impulsos. En la tabla 6.1, se muestran las características de los transitorios mencionados anteriormente, sus magnitudes y duraciones

típicas, así como los límites de magnitud y duración permisibles por parte del ente regulador.

Tabla 5.7. Variaciones de voltaje de corta duración

Categoría	Duración Típica	Magnitud Típica	Valores no permisibles
Impulso	5 μ seg. – 1 mseg.	0-800 %	Impulsos con magnitud mayor al 200 % de V_n .
Hueco de tensión	8.33 mseg –1 minuto	10-90 %	Huecos entre un 0 % y un 87 % de V_n con duración mayor a 8.33 mseg.
Pico de tensión	8.33 mseg a 1 minuto	110-180 %	Picos mayores a 115% de V_n de cualquier duración.

Tomando en cuenta las magnitudes típicas y tiempos permisibles por parte del ARESEP para los transitorios, nos damos cuenta que la magnificación de la tensión es un evento que perfectamente podría ser regulable, ya que sus valores típicos en la subestación por la conmutación del capacitor pueden llegar hasta los 200% y en la industria hasta los 400%. Además que los tiempos típicos son también aproximadamente en el rango de los milisegundos y causan el mal funcionamiento del equipo electrónico de la industria, que es lo mas importante para la autoridad reguladora y obviamente para el cliente.

Existen medidas de mitigación por parte de la empresa eléctrica y también en la industria (como se menciona en el capítulo 3), que pueden disminuir la duración, amplitud frecuencia del transitorio. Esto es un motivo más por lo cual el fenómeno debe ser sancionable.

CAPÍTULO 7: Conclusiones y recomendaciones.

7.1 Conclusiones.

- La instalación de bancos de capacitores en la industria para corregir el factor de potencia, pueden traer problemas a la industria por el mal funcionamiento de sus equipos electrónicos si no se toman en cuenta las medidas de protección necesarias, que puedan mitigar las sobretensiones por energización de bancos de capacitores.
- En Costa Rica la magnificación de la tensión es un fenómeno que es propenso debido al incremento de equipo electrónico en las industrias que se ve afectado por las sobretensiones, además que en la mayoría de sus subestaciones de distribución se cuenta con las condiciones necesarias para que ocurra el fenómeno, dado la energización de los bancos de capacitores que se encuentran ubicados en todas las subestaciones del anillo central.
- Las simulaciones realizadas con una falla cerca de la subestación, se puede notar que la magnificación de tensión puede ser dada por una perturbación en la línea, ya que en ambos casos aumenta significativamente la frecuencia y por ende el voltaje, esto se puede considerar así siempre y cuando se cuente con un circuito LC en la carga, que se excite con el aumento de la frecuencia por la perturbación.

- Para que el fenómeno de magnificación de tensión, genere sobretensiones por maniobras de bancos de capacitores se deben contar además de la conmutación del capacitor, con una serie de parámetros en el sistema para que los voltajes sobrepasen los 2.0pu en la industria, tal como la sintonización de los valores L y C de la red eléctrica.
- El mejor método para mitigar la magnificación de tensión simulado es la inductancia para crear un filtro armónico con el capacitor de la industria, disminuyo las sobretensiones en un 90%.
- El peor de los casos se dio cuando la impedancia del transformador reductor es máxima 10% y superó los 2.3 pu en la empresa.

7.2 Recomendaciones.

- Las soluciones para mitigar la magnificación de la tensión en Costa Rica, debe ir de la mano de una buena relación y comunicación entre la industria y empresa de distribución eléctrica, ya que en nuestro país el presupuesto y las medidas de mitigación son escasas.
- Para realizar un análisis de un fenómeno transitorio, es necesario poder realizar las simulaciones repetidas veces para determinados valores de tiempo, ya que su efecto puede cambiar en los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos de revistas:

1. Olivier, G. Mougharbel, I. Dobson-Mack, G. “Minimal Transient Switching of Capacitor”, IEEE Transactions on Power Delivery, Canada, Vol [8] N° [4], 1993.
2. Girgis, A. Fallon, C. Rubino, J. Catoe, R. “Harmonics and Transient Overvoltages Due to Capacitor Switching ”, IEEE Transactions on Industry Applications, United States of America, Vol [29] N° [6], 1993.
3. Alexander, R. “Synchronous Closing Control for Shunt Capacitors”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, United States of America, Vol [Pas-104] N° [9], 1985.
4. Bellei, T. O'Leary, R. Camm, E. “Evaluating Capacitor-Switching Devices for Preventing Nuisance Tripping of Adjustable-Speed Drives Due to Voltage Magnification”, IEEE Transactions on Power Delivery, United States of America, Vol [11] N° [3], 1996.
5. McGranaghan, M. Zavadil, R. “Impact of Utility Switched Capacitors on Customer Systems-Magnification at Low Voltage Capacitors”, IEEE Transactions on Power Delivery, United States of America, Vol [7] N° [2], 1992.
6. Dunsmore, D. Taylor, E. Wirtz, B. “Magnification of Transient Voltajes in Multi-Voltage-Level, Shunt-Capacitor-Compensated, Circuits”, IEEE Transactions on Power Delivery, United States of America, Vol [7] N° [2], 1992.

7. Fantozzi, G. "Selecting a Capacitor-Switching Overvoltage Control Method Effective in Preventing Nuisance Tripping of Adjustable-Speed Drives", **Presented at the EEI ES&E Committee Meeting**, United States of America, 1995.
8. Adams, R. Middlekauff, S. "Solving Customer Power Quality problems Due to Voltage Magnification", **IEEE transaction Power Delivery**, United States of America, 1997.
9. Grebe, T. "Capacitor Switching and its Impact on Power Quality", **Presentado en CIGRE 36.05/CIREN 2**, 2002.

Libros:

10. Dugan, R. McGranaghan, M. Beaty, H. Santoso, S. **"Electrical Power Systems Quality"**, [2] edición, McGraw-Hill, United States of America, 1996.
11. Greenwood, A. **"Electrical Transients in Power Systems"**, John Wiley&Sons Inc., United States of America, 1991.

Páginas Web:

12. **"Magnificación de la tensión: un estudio paramétrico con el ATP"**,
www.iitree-unlp.org.ar/caue/PapersRevista/2002-N3-MagTen.
13. **"Article Reprint 711-R87"**, www.sandc.com/edocs_pdfs/EDOC_001822.pdf

APÉNDICES

Desarrollo teórico del modelo matemático. [6]

Un sistema de dos lazos para el estudio del fenómeno se define en el circuito de la figura 1

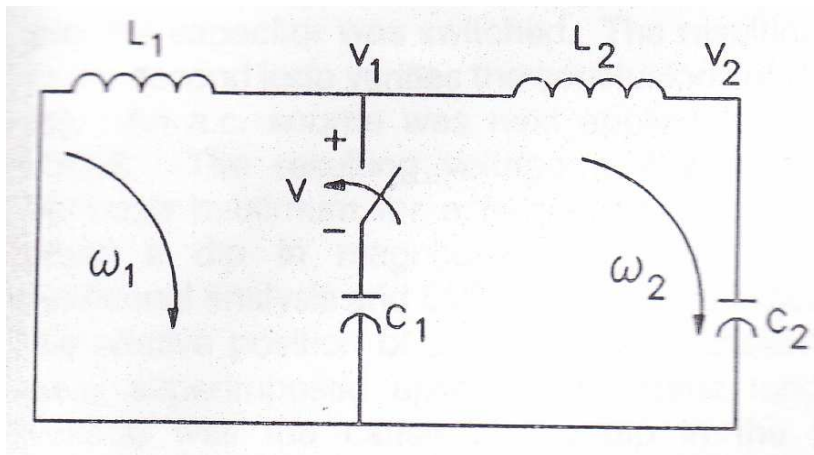


Figura 1. Sistema de dos lazos.

Las ecuaciones siguientes fueron desarrolladas, mientras se asume el paso de voltaje a la situación de la conmutación del capacitor como se muestra en la figura1, la resistencia no es incluida. Para la figura 1, se resolvieron las frecuencias utilizando las soluciones cuadráticas primero para el circuito de dos lazos. Las ecuaciones resultantes, son el voltaje de salida en por unidad en función del voltaje de paso, son como sigue:

Circuito de dos lazos (referido a la figura 1).

$$\frac{e_{out}(t)}{V} = \frac{\cos w_A * t - \cos w_B * t}{\left[\left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 + \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) \right] * \sqrt{1 - K}} \quad (1)$$

Donde:

$$K = 4 * \frac{\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2}{\left[\left(\frac{w_1}{w_2}\right) + \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)\right]^2} \quad (2)$$

$$w_A^2 = \frac{w_2^2}{2} * \left[\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 + \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)\right] * [1 - \sqrt{1 - K}] \quad (3)$$

$$w_B^2 = \frac{w_2^2}{2} * \left[\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 + \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)\right] * [1 + \sqrt{1 - K}] \quad (4)$$

Donde w_1 es la frecuencia del lazo primario o sea la frecuencia de conmutación (radianes por segundo):

$$w_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 * C_1}} \quad (5)$$

Y w_2 es la frecuencia del circuito de carga o sea la frecuencia natural del circuito resonante del cliente (radianes por segundo):

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 * C_2}} \quad (6)$$

ANEXOS

Entrevista realizada a la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP), a la persona de Edgar Cubero.

¿Es conocido el fenómeno de Magnificación de la Tensión?

Hasta el momento este tipo de fenómeno no es conocido por parte de la autoridad reguladora de servicios públicos, incluso para esta institución es una novedad escuchar sobre el tema.

¿Algún abonado se ha quejado?

Ninguna empresa industrial y pública ha realizado queja alguna referente al tema en estudio, debido a que la oficina de protección al usuario no ha reportado disgustos a la institución ARESEP de ninguna de las dos partes.

¿En caso de ser regulado, quien seria multado la empresa de suministro eléctrico que crea el transitorio o la industria que produce la magnificación?

Habría que realizar un estudio sobre el fenómeno comenzando con buscar capacitaciones e información para la empresa reguladora para estar al corriente sobre el tema y poder tomar decisiones correctas. Además en principio se debería buscar quien tiene la mayor responsabilidad del evento ya que la empresa de distribución eléctrica le exige a las industrias mantener el factor de potencia en un cierto rango, sabiendo que para realizar esta acción el método mas común es la instalación de capacitores que son los que crean la magnificación. Se debería llegar a una conclusión ya que por un lado la empresa le exige corregir el factor de potencia y por otro lado esto le provoca a la industria complicaciones en sus instalaciones.

¿Qué requisitos o consecuencias debe tener un fenómeno como este para ser regulado?

Este tipo de fenómenos casi no se regulan, ya que más que todo se regulan fenómenos en modo estable, y no así transitorio. Hablando de la norma como regulación, ya que existen otros tipos de norma como la ANSI que si se refiere a este fenómeno.

Entre los requisitos se tendría que estudiar a fondo el problema, y llevar a audiencia pública para que los abonados y las empresas distribuidoras se informen de las regulaciones establecidas y tratadas. Además tendría que tener un gran impacto en la industria así como en las empresas de distribución eléctrica.

¿Tiene semejanza con algún otro fenómeno sancionable?

Lo mas similar a este fenómeno seria las regulaciones sobre transitorios que ocurren en muy corto tiempo y casi no son regulables. Estas se rigen por medio de la curva CBEMA.