



Transient overvoltage fault analysis in thyristors controlled rectifiers in medium voltage and very high power applications

Armando Llamas Terres and Osvaldo Miguel Micheloud

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

June 27, 2021

Análisis de fallas por sobretensiones transitorias en circuitos rectificadores controlados por tiristores en aplicaciones de media tensión y muy alta potencia

Armando Llamas, PhD¹, and Osvaldo Micheloud, PhD¹

¹The Authors are with Tecnológico de Monterrey, campus Monterrey, Mexico, allamas@tec.mx, osvaldo.micheloud@tec.mx

I. INTRODUCCIÓN

Abstract— *El presente trabajo introduce el análisis de los fenómenos transitorios que se presentan al momento de energizar o desenergizar un transformador trifásico cuya carga del lado secundario es un rectificador trifásico controlado por tiristores que alimenta, a través de una gran inductancia, un arco eléctrico de un horno de fundición de acero. La potencia del arco se regula por medio del control de disparo de seis grandes bloques de tiristores. Para entender los fenómenos transitorios en el proceso de encendido y apagado de grandes transformadores, el estudio presenta primero algunos conceptos teóricos sobre el origen de sobrevoltajes transitorios de modo común que se presentan al energizar transformadores y que pueden ser muy destructivos cuando se usan para alimentar circuitos electrónicos. Luego se presenta una serie de circuitos que tienen por función amortiguar los cambios bruscos de tensión que podrían disparar erráticamente los tiristores por dv/dt y otros circuitos para amortiguar los picos de sobretensiones de modo común. Por último, se presenta un circuito que canaliza, de forma segura, la energía almacenada en la inductancia de filtro cuando por acciones del operador o por fallas de la red eléctrica se producen cortes o disminuciones bruscos de corriente en la carga. El presente estudio fue originado para identificar y resolver una serie de fallas erráticas y catastróficas, de alto costo en componentes electrónicos, que comenzaron a producirse al cambiar uno de los tres transformadores de potencia de un rectificador de 18 pulsos y que gracias a tener un buen entendimiento de los conceptos presentados en este documento, mayoritariamente no cubiertos en los textos clásicos de electrónica de potencia, se pudo realizar una larga campaña de medición de transitorios para capturar los momentos en que se producían dichas fallas erráticas y resolver de una manera satisfactoria el problema evitando así significativos daños materiales y pérdidas de producción.*

Keywords—*Sobretensiones en circuitos con tiristores; inductancia de dispersión; efectos nocivos de las capacidades parásitas; transitorios de voltaje y corriente.*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Los rectificadores trifásicos controlados por tiristores son ampliamente analizados en la literatura clásica de electrónica de potencia [1-2-3-4] así como las formas de onda esperadas, tanto de voltajes como de corrientes a la entrada como a la salida para diferentes tipos de cargas, resistivas, inductivas y una combinación de estas. Circuitos de protección contra dv/dt , di/dt y sobretensiones son también tratados en las referencias anteriores. Términos como rizado, distorsión armónica y calidad de la energía son definidos con mucho rigor en la literatura y las ecuaciones de diseño son deducidas del análisis de circuitos equivalentes para distintos segmentos del ciclo de corriente alterna. Otro aspecto importante en el diseño de rectificadores trifásicos es definir los circuitos de disparo de los tiristores e implementar las protecciones correspondientes para evitar disparos erráticos de los tiristores que puedan causar fallas en el funcionamiento del circuito.

El más simple de los rectificadores trifásicos controlados es el puente de seis tiristores que por generar un rizado a la salida cuya frecuencia es seis veces la frecuencia de alimentación se denomina rectificador de seis pulsos. Sin embargo, en muy grandes potencias se prefiere usar dos transformadores trifásicos, no idénticos, alimentados desde la misma fuente de corriente alterna y con seis tiristores cada uno y unir las salidas de corriente continua por medio de una o dos inductancias de filtro. Los transformadores se construyen de manera tal que en los secundarios proveen 6 fases separadas 60 grados eléctricos entre sí y de esta manera los tiristores entregan a la carga una corriente continua con un rizado cuya frecuencia es doce veces la frecuencia de alimentación y por lo tanto se denominan “rectificadores de doce pulsos”. A medida que se aumenta la potencia de corriente continua requerida se pueden realizar rectificadores de 18 o 24 pulsos con tres o cuatro transformadores conectados a la misma red de corriente alterna y con una única salida de corriente directa. La ventaja de los rectificadores de 12, 18 o 24 es que entregan una corriente continua casi perfecta a la salida y además la corriente de entrada, suministrada por la red de corriente alterna, es casi sinusoidal con muy baja distorsión armónica.

El presente trabajo se centra en el estudio de un rectificador de 18 pulsos, los transitorios que en su operación se generan y los circuitos de protección que hacen confiable su operación.

II. ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL ACOPLAMIENTO MAGNÉTICO, LA INDUCTANCIA DE DISPERSIÓN Y LAS CAPACIDADES PARÁSITAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN APLICACIONES ELECTRÓNICAS

Cuando se construye un transformador se busca el máximo acoplamiento magnético entre el devanado primario y el secundario para reducir la inductancia de dispersión (esto es, el campo magnético generado por la alimentación eléctrica que no concatena flujo con el devanado secundario) y esto se logra colocando los devanados lo más cerca posible del hierro del núcleo (núcleo de piernas largas) y esto se puede hacer gracias a la existencia de muy buenos materiales aislantes. Esto a su vez trae aparejado un incremento de la capacidad entre ambos arrollamientos pues ahora se encuentran físicamente más cerca y separados por materiales aislantes de muy alta constante dieléctrica. Esta capacidad distribuida entre devanados se denomina capacidad parásita y es responsable de transferir sobretensiones al devanado secundario al momento de conectar el transformador a la red según se puede apreciar en el esquema de la Fig. 1.

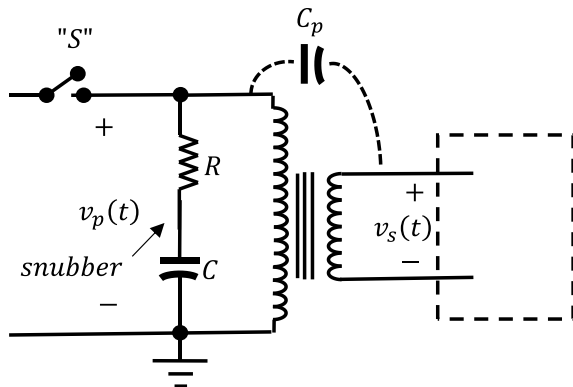


Fig. 1 Representación esquemática de una fase del transformador de potencia bajo estudio con su correspondiente circuito amortiguador RC y circuito de carga en el secundario.

III. GENERACIÓN DE TRANSITORIOS DE TENSIÓN Y CORRIENTE AL ENCENDER UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA

Al cerrar el interruptor principal "S", de Fig. 1, en cualquier instante del ciclo de la CA, aparecerá un escalón de voltaje del lado izquierdo del C_p (cuyo voltaje en ese momento es

cero por estar el circuito desenergizado) y por lo que sabemos que el voltaje en terminales de un capacitor no puede cambiar bruscamente, el C_p transfiere ese escalón de voltaje sin atenuarlo al devanado secundario. Si se trata de un transformador trifásico este voltaje se va a manifestar de igual manera en las tres ramas del secundario por estar unidas galvánicamente (estrella o delta) originando lo que se denomina una tensión de modo común. Como la corriente en un capacitor está gobernada por $i = C_p dv/dt$ rápidamente se establece un inevitable pulso de corriente por C_p que va a buscar algún camino para regresar al punto más negativo del lado primario. Esta corriente estará impulsada por un escalón (de amplitud variable según el momento de conexión a la red) seguido de un arco de senoide, por lo que la corriente tendrá un pulso inicial grande ($dv/dt = \text{infinito}$) seguido luego de una forma sinusoidal. Note que la magnitud de la corriente en C_p va a depender de dv/dt y este valor es máximo cuando el interruptor se cierra justo cuando la tensión pasa por cero. Estas sobretensiones, debidas a C_p , inevitables en el circuito secundario, son peligrosas y hay que disponer de los medios electrónicos para neutralizarlas. Una de las técnicas para neutralizar estas sobretensiones es la denominada pantalla electrostática del transformador que consiste en separar los devanados primario y secundario por una lámina de cobre aislada que encierra al devanado de alta tensión, pero sin constituir una espira en corto circuito. Esta lámina se conecta a tierra y de esa manera la C_p (que ahora tendrá dos valores mayores C_{p1} y C_{p2}) no va a afectar al circuito secundario pues C_{p1} se descargará a tierra por la pantalla y desaparecerá la sobretensión en el lado secundario, tal como se aprecia en la Fig. 2. Esta técnica de supresión de picos por apantallamiento del devanado primario ha comenzado a usarse en transformadores secos de tracción eléctrica y en drives de media tensión, pero no en el caso bajo estudio en el presente documento.

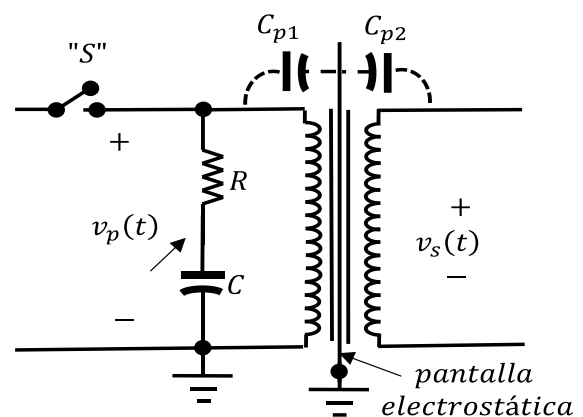


Fig. 2 Representación esquemática de una fase del transformador de potencia con su pantalla electrostática e indicación de las dos nuevas capacidades que se generan por efecto de la misma.

IV. ANÁLISIS DEL TRANSITORIO DE ENCENDIDO EN UNO DE LOS TRES TRANSFORMADORES DEL CIRCUITO RECTIFICADOR DE 18 PULSOS BAJO ESTUDIO

En nuestro caso se trata de un transformador trifásico de 52 MVA, 34.5 kV / 780 voltios, conexión estrella delta, que cuenta con tres circuitos clásicos R C amortiguadores de sobretensiones conectados en paralelo con cada fase en el lado primario. Al no contar el transformador con pantalla electrostática sabemos que al cerrar el interruptor principal aparecerán pulsos transitorios en el lado secundario cuya magnitud será función del preciso momento del ciclo de la CA en que se produce el cierre eléctrico y que pueden ser de hasta 28,169 kV. Sin duda alguna estos picos de tensión destruirían el puente de tiristores conectados en el lado secundario. Para protegerlos de este sobrevoltaje transitorio de modo común el circuito dispone de tres capacitores de muy bajo ESL (inductancia equivalente serie) conectados en estrella aterrizada en su punto central y que llamaremos capacitores supresores de picos por su función específica en esta aplicación. De esta manera los Cps, inevitables por las características constructivas del transformador, quedan en serie con estos capacitores constituyendo un divisor capacitivo cuyo valor pico se puede limitar al valor deseado seleccionando adecuadamente los valores de estos capacitores en microfaradios, a mayor valor de capacidad tendremos menor tensión de pico. Es necesario destacar que estos capacitores sólo cumplen una función si hay tensiones de modo común y eso ocurre sólo en el encendido por lo que luego no cumplen ninguna función y pueden desconectarse.

Una vez cerrado el interruptor principal, e inmediatamente después, el transformador comenzará a demandar la corriente magnetizante en un proceso complejo que depende de múltiples variables constructivas del núcleo, del instante en el que realmente se produce el cierre del circuito eléctrico, del circuito amortiguador RC y también, aunque en mucho menor medida, de la carga del transformador en el circuito secundario. Esta corriente suele ser muy grande en los primeros ciclos de conexión y va a ser fundamental en nuestro estudio de fallas erráticas [5]. La tensión diferencial en el secundario aparecerá tan pronto como comience a establecerse el flujo magnético en las columnas del transformador y será proporcional a la $d\phi/dt$ que en el transitorio de conexión dista mucho de ser sinusoidal, ver Fig. 3, sí lo es en régimen permanente. Gracias a contar con instrumentos adecuados para el análisis de transitorios con suficiente ancho de banda y capacidad de memoria fue posible observar estas raras formas de onda transitorias en el circuito secundario durante muchos ciclos de encendido.

Dado que el puente trifásico de tiristores está conectado a estas tensiones y una de las causas más comunes de falla de circuitos con tiristores es el disparo errático por dv/dt por lo que es necesario atenuar estos picos de tensión entre líneas para que no se produzcan estos disparos que suelen ser muy peligrosos. Para este fin se usó un circuito clásico de protección de sobretensiones diferenciales [9] entre fases compuesto de seis diodos rápidos y un capacitor grande capaz de absorber

esos picos diferenciales sin modificar mucho la tensión entre líneas y cuidando así el máximo valor de dv/dt .

El circuito de protección de sobretensiones diferenciales antes descrito en el párrafo anterior tiene el inconveniente que actúa como supresor sólo una vez que los diodos hayan entrado a conducir, pero esto ocurre después de transcurrido un tiempo igual al t_{on} de los diodos, por lo que es imprescindible agregar tres circuitos snubbers RC que actúan como amortiguadores de sobrepicos diferenciales antes de ese tiempo y protejan contra disparos erráticos al puente de tiristores en los primeros instantes.

En los párrafos anteriores se describieron los fenómenos transitorios de encendido y los circuitos especiales para amortiguar el dv/dt de los picos de tensión en el lado secundario del transformador.

V. ANÁLISIS DEL TRANSITORIO DE APAGADO EN UNO DE LOS TRES TRANSFORMADORES DEL CIRCUITO RECTIFICADOR DE 18 PULSOS BAJO ESTUDIO

Corresponde ahora estudiar qué pasa cuando el horno está trabajando a potencia normal y se necesita disminuir la potencia o quizás llevar la misma a cero. Esto ocurre al menos una vez cada 60 minutos al final del proceso de fusión de 120 toneladas de acero. La presencia de una inductancia de filtro, que en nuestro caso es de 150 microhenrios, conectada en serie con una carga resistiva y por la que puede circular corrientes de decenas de miles de amperes, almacena una cantidad de energía enorme ($1/2 L i^2$) que debe ser correctamente canalizada cada vez que se necesita reducir la corriente de carga. En el caso bajo estudio se usó un circuito rectificador monofásico que permite transferir esta energía a un capacitor, con una resistencia de potencia paralelo, suficientemente grande para recibir la energía almacenada en la inductancia de filtro sin alcanzar valores de tensión en sus terminales que puedan destruir al capacitor y a los componentes electrónicos. Ver Figura 4. Dado que las corrientes de carga en nuestro caso son de decenas de miles de amperes este capacitor resultaría de un gran tamaño si se quisiese diseñar para cortar bruscamente la corriente nominal por lo que el sistema de control del horno regula, por software, la máxima velocidad de reducción de la corriente de carga de manera de poder seleccionar un capacitor comercial de 1500 voltios. Nuevamente debemos atender el fenómeno transitorio que ocurre en los primeros nanosegundos justo antes de que los diodos entren a conducir y para ello se usa un snubber RC clásico.

VI. CIRCUITO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO BAJO ESTUDIO Y FALLAS ERRÁTICAS PRESENTADAS POR EL MISMO SIN UNA APARENTE CAUSA RAÍZ

La Figura 4 muestra un diagrama esquemático del circuito completo de protección contra sobretensiones y disparos erráticos de tiristores (propiedad de la firma ABB Suiza). En este

diagrama se muestran los distintos circuitos que se describieron en los incisos anteriores de una forma integral y se usará esta nomenclatura en las mediciones y registros gráficos de transitorios que se realizaron durante la etapa de búsqueda de una causa raíz que permitiera explicar los daños periódicos reportados por los expertos en mantenimiento del horno. Nótese que a los circuitos de protección previamente analizados se les agregaron algunos fusibles rápidos para protección de anomalías funcionales. Para los diodos rápidos de ambos cir-

cuitos rectificadores (de 5600 voltios, 811 amperes nominales y 10500 amperes de pico no repetitivo) se usan cinco fusibles rápidos, tres en el puente trifásico y dos en el monofásico.

Un detalle a tener en cuenta en el análisis de este circuito es que combina en un solo capacitor de gran capacidad, 300 μF , a los capacitores que se usaron para el circuito de protección de picos de tensiones diferenciales y el de almacenamiento de energía cuando se produce una reducción brusca de la corriente de carga.

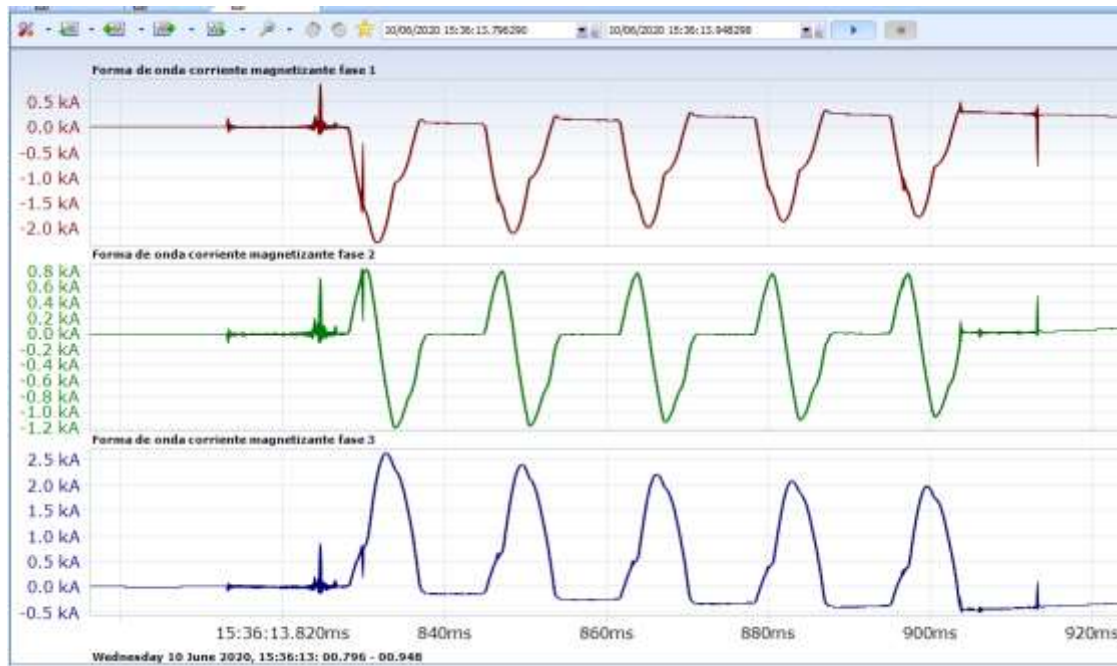


Fig. 3 Corrientes de magnetización registradas durante el periodo de mediciones.

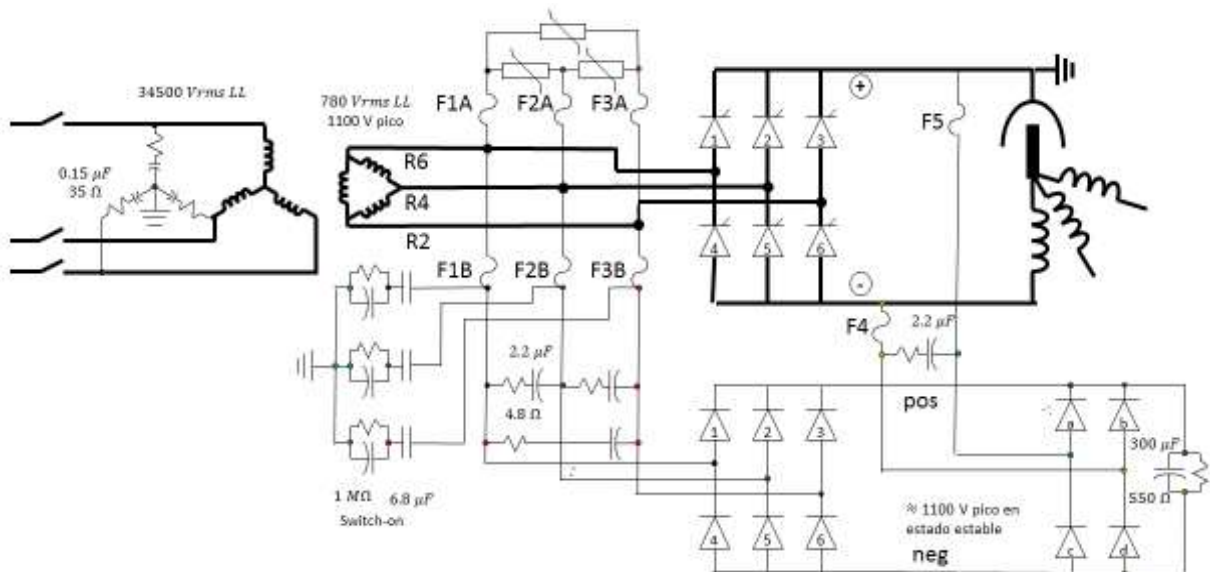


Fig. 4 Diagrama completo del circuito de protección contra sobretensiones en el caso bajo estudio. Note que hay 3 inductancias de filtros, cada una corresponde a un transformador de potencia del sistema.

Al iniciar el estudio se disponía de un registro de fallas y componentes dañados en cada evento y de su análisis no se pudo identificar una causa raíz que pudiese originar las mismas. Esto obligo a diseñar una campaña de medición en un horno que normalmente trabaja las 24 horas del día y los siete días de la semana. Más, la electrónica bajo estudio está en un sector de alto riesgo y de imposible acceso cuando el horno está en funcionamiento.

Por otro lado las fallas erráticas son las más difíciles de encontrar en cualquier equipo, pero lo son más aún en equipos electrónicos. Esta complejidad se incrementa exponencialmente cuando el sistema presenta fallas erráticas y las mismas se deben a más de un origen como fue el caso bajo estudio. La imposibilidad de poder conectar instrumentos de laboratorio modernos como osciloscopios multicanales de gran ancho de banda para estudiar los transitorios en un enorme equipo industrial con acceso y permanencia prohibidos al sector donde se encuentra la electrónica, planteó desde el inicio todo un desafío para realizar la campaña de medición ya que el horno debía seguir funcionando y su producto, acero líquido, alimenta una planta donde trabajan miles de personas. Cualquier error de contacto con puntas de medición podía literalmente destruir el horno y afectar a una enorme cantidad de trabajadores. La baja frecuencia de la ocurrencia de estas fallas en el mes hacía que se dispongan de pocas capturas de fallas por lo que hubo que esperar muchos meses para comenzar a tener un número suficiente de registros para analizar y determinar algunas hipótesis de causa raíz.

Los transitorios que pueden destruir componentes electrónicos costosos son de muy corta duración y su detección se volvió un punto muy importante a la hora de diseñar la campaña de mediciones. Se dispuso usar dos registradores de eventos transitorios marca Elspec G4500 [6] capaces de registrar tres tensiones y tres corrientes cada uno y almacenar los datos por largos tiempos. Recordemos que el historial de fallas indicaba que las mismas se producían a veces después de varias semanas de trabajo y varias veces se tenía más de una falla en el mismo día. Para la medición de tensiones primero se usaron transformadores de voltaje y luego, debido al reducido ancho de banda de los citados transformadores de medición, se usaron divisores resistivos. Lo mismo ocurrió con las mediciones de corriente que se hicieron primeramente con bobinas Rogowski y finalmente con puntas de medición de corriente efecto Hall [7].

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La observación y análisis de estos registros comenzó a indicar que se podría estar en presencia de más de una causa raíz y había que tratar de identificarlas en base a los registros obtenidos durante las citadas fallas. Ver Figura 5. Primero se agruparon todas las fallas que ocurrían en los primeros ciclos de la corriente alterna al encender el equipo y luego los que ocurrían luego de un largo tiempo de funcionamiento. Con esta

división se pudo identificar que si el operador del horno quería bajar la potencia instantánea en forma rápida la energía almacenada en la inductancia de filtro superaba la capacidad de absorción de energía del circuito protector y la respuesta del circuito era una falla catastrófica que destruía al menos dos diodos y dos fusibles. Su solución fue simple, reprogramar una máxima velocidad de reducción de corriente de carga acorde con la capacidad de absorber energía del circuito de protección y que había cambiado al cambiar el transformador.

Las fallas originadas al inicio de operación del horno fueron más complejas para identificar su causa raíz ya que todas ocurrían cuando los valores de tensión y corrientes registrados por el instrumental estaban dentro de los valores aceptables para el circuito de protección usado y eran idénticos a aquellos que se presentaban en los encendidos normales del horno. La única constante era que la falla se producía mientras la corriente magnetizante del transformador aún era asimétrica y su valor en amperes era muy superior al valor nominal. Esto hizo pensar que un corte de la energía primaria en estas condiciones de la corriente magnetizante podía superar la capacidad de absorción de energía del circuito de encendido (condición que si era detectada por los instrumentos pero luego de haberse producido la orden de desconexión) y había que investigar si existía alguna causa para que al interruptor principal de media tensión le llegase una orden de desconexión apenas unos ciclos después de la orden de encendido. La buena sorpresa fue verificar que esto si ocurría y la solución del problema fue inhibir esa señal errónea (generada por el sistema de control general del horno y producida por “uno lógico” de origen mecánico) durante los primeros ciclos de la corriente alterna después del encendido del interruptor principal de alimentación del transformador de potencia lográndose así una total solución del problema.

VIII. CONCLUSIONES

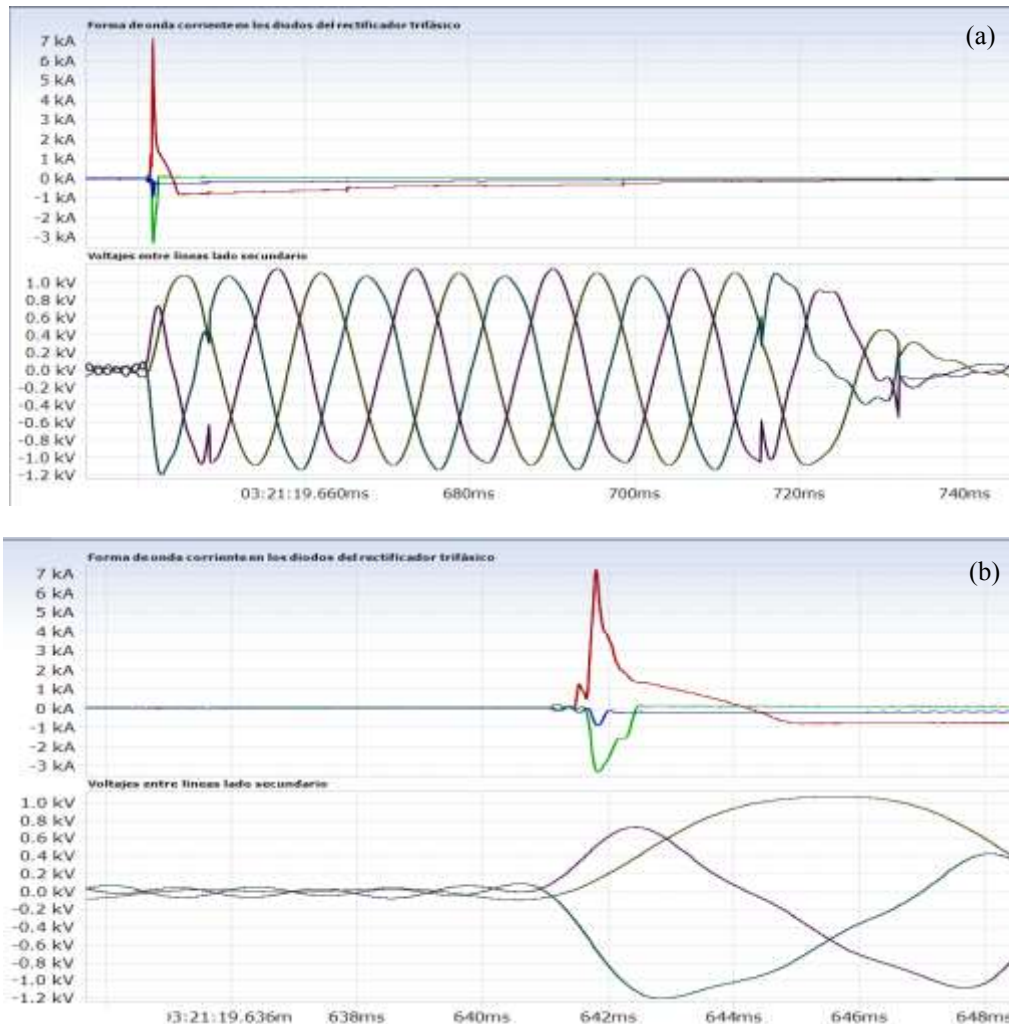
Detectar fallas erráticas en sistemas electrónicos requiere de disponer de la capacidad de registrar de forma permanente, y con muy buena resolución temporal, valores de tensión y corrientes en los puntos críticos del equipo bajo estudio y capturar los fenómenos transitorios de muy corta duración que suelen ser los que destruyen a los componentes electrónicos. Gracias a disponer de dos equipos Elspec, con sus puntas de medición adecuadas, y un profundo conocimiento de los principios básicos de funcionamiento de los circuitos bajo estudio, se pudieron identificar los puntos donde se debían conectar los registradores para detectar los cambios en tensiones y corrientes que ocurrían instantes antes de producirse la falla.

Fueron muchísimas las posibles causas de fallas que a veces explicaban una falla, pero no podían hacerlo con la falla siguiente por lo que se decidió no incluirlas en el presente reporte. Se había detectado que había fallas que se producían en dos momentos distintos del ciclo de trabajo y esto indujo a buscar al menos dos causas distintas, una al inicio del ciclo y

otra una vez iniciado el proceso. El reagrupar los casos de fallas con este criterio permitió llegar rápidamente a las dos causas de fallas: primero reprogramar el sistema de control para impedir disminuciones bruscas de corriente en la carga y permitir así la evacuación gradual de la energía almacenada en la inductancia de filtro y segundo inhibir durante los primeros segundos de operación del sistema la acción de un “uno lógico” generado erráticamente por el controlador y que era interpretado por el interruptor de potencia como una orden de desconexión. Afortunadamente ambos pudieron ser resueltos, como se describió en los incisos anteriores, e inmediatamente probarlos en condiciones de operación normal del horno. Ac-

tualmente ya son varios los meses de buen funcionamiento sin fallas del equipo bajo estudio.

Ciertamente se trató de un trabajo con un enorme interés académico y de investigación que tuvo impacto en la productividad de la empresa. Fue realizado por un equipo de investigadores del Tecnológico de Monterrey cuyo objetivo prioritario es focalizar la investigación en la solución de problemas industriales que aportan valor al desarrollo regional [8]. Además, la metodología de investigación usada en este estudio, es una buena referencia para los ingenieros de mantenimiento que deben identificar causas de fallas erráticas en equipos electrónicos.



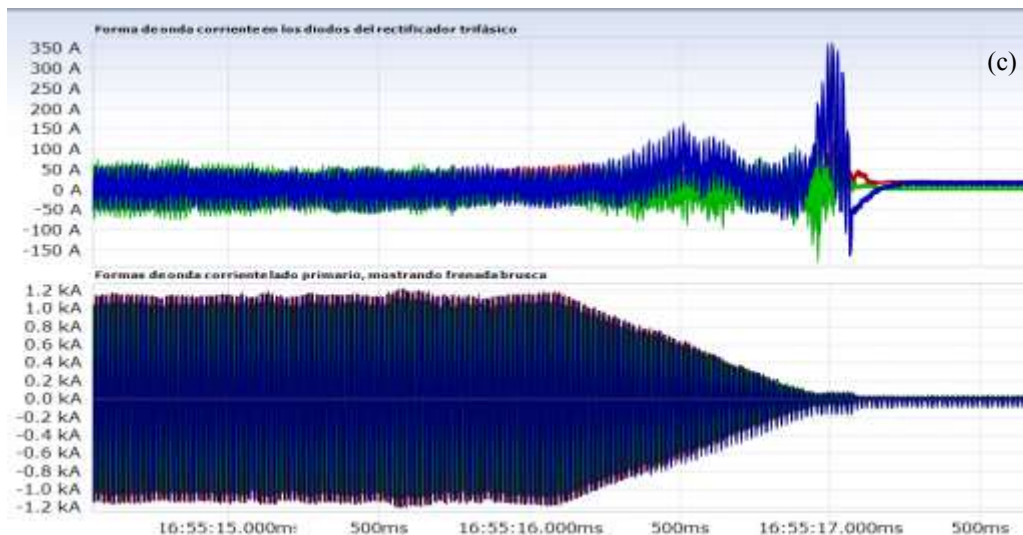


Fig. 5 Ejemplos de algunos registros de los analizados en el estudio: a) Picos de corrientes en los diodos del circuito protector de sobretensiones diferenciales b) Tensiones de fase y posterior corte total de corrientes apenas unos milisegundos después del encendido c) Muestra de corrientes en diodos en respuesta a una orden de disminución programada de energía a la carga.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen la confianza y el valioso apoyo de Ternium México para realizar esta investigación durante el periodo de pandemia Covid 19 del año 2020 y al Tecnológico de Monterrey por el apoyo a la investigación aplicada y publicación de resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Rashid, "Electrónica de Potencia, circuitos dispositivos y aplicaciones" 4a. Ed., Pearson, 2015, ISBN 9786073233286
- [2] Mohan, Underland y Robbins "Power Electronics: Converters, Applications, and Design" Wiley, Tercera Edición 2003, ISBN 978-0-471-22693-2.
- [3] Andrzej M. Trzynadlowski "Introduction to Modern Power Electronics" Second Edition 2010, Editorial Wiley.
- [4] Bin Wu, Nehdi Narimani, "High Power Converters and AC Drives", published by John Wiley and Sons, 2017, ISBN 978-1-119-15603-1.
- [5] Claes Carrander, "Magnetizing Currents in Power Transformers: Measurements, Simulations and Diagnostics Methods". Doctoral Thesis, KTH Electrical Engineering, Stockholm, Sweden 2017, ISBN 978-91-7729-417-7.
- [6] ELSPEC G4500 Power Quality Analyzer <https://www.elspec-ltd.com/metering-protection/power-quality-analyzers/g4500-power-quality-analyzer-portable/>
- [7] ELSPEC AC/DC current clamp for G4500 <https://www.elspec-ltd.com/elspec-shop/power-quality-analyzer/portable-power-quality-analyzer/g4500-accessories/dc-current-clamp-for-g4500/>
- [8] O. Micheloud, f. Viramontes, A. Llamas, et al. "Synergistic use of Private and Governmental Resources in Science Technology and Innovation to Leverage Industrial Development: a Proven Model of Success with Ten Years of Excellent Learning Experiences" LACCEI 2020, FP # 353, Virtual Edition, Julio 27-31, 2020.
- [9] A. Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", Wiley 2nd Edition, 2017, ISBN 978-0471620587.