



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería Eléctrica



"ANALISIS DEL SISTEMA DE CONTROL DE
COMPENSACION DE FACTOR DE POTENCIA
PARA UN SISTEMA DE HORNO DE ARCO"

INFORME TECNICO

Previo a la obtención del Título de:
INGENIERO EN ELECTRICIDAD

Especialización: **ELECTRONICA**

Presentado por:
José Luis Amaya Morán

Guayaquil - Ecuador
1989

AGRADECIMIENTO

El autor agradece al Ing. ALBERTO LARCO, Profesor Supervisor, por su valiosa contribución en la orientación de este Informe.

JOSE AMAYA MORAN

DEDICATORIA

Dedico esta obra a la memoria de mi padre Don José Alejandro Amaya Molina, y a mi madre Doña Rosa Morán Casal vda. de Amaya, quienes han sido mi guía moral y espiritual.

DECLARACION EXPRESA

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expresadas en este Informe Técnico, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL).

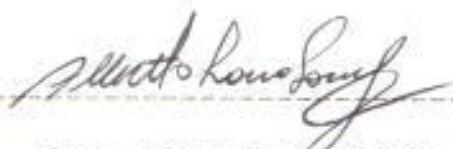


JOSE AMAYA MORAN



Ing. Hernán GUTIERREZ V.

PRESIDENTE



Ing. Alberto LARCO G.

PROFESOR SUPERVISOR



Ing. Norman CHOOTONG Ch.

MIEMBRO

RESUMEN

El presente Informe Técnico resume una experiencia profesional del suscrito en el campo de la electricidad y electrónica industrial. En su aspecto medular, este documento suministra la información técnica sobre la instalación de un sistema de control estático de compensación del factor de potencia aplicado en una industria siderúrgica. El sistema instalado es bastante complejo, mas esta exposición cubre solamente los aspectos relevantes. La industria (FUNASA) utiliza un sistema de horno de arco eléctrico para fundir material férreo que es empleado posteriormente en la construcción. Los electrodos del horno utilizan en su parte final un transformador de 3.5 MVA, con secundario de 260 V, 7600 A; 220 V, 8200 A, trifásico, alimentado de un primario de 27 KV.

Cabe destacar que la instalación del equipo mencionado, ocurrida durante un periodo de tres meses, era en

aquella ocasión el primer equipo de esa naturaleza compensativa instalado en Sudamérica. La instalación tuvo lugar en 1978, y su cronograma estuvo ocupado desde la recepción del equipo hasta las pruebas finales de todas sus partes.

Dada la oportunidad que se da para relatar esta experiencia profesional, podemos resaltar la importancia de un equipo de esta naturaleza en la industria del hierro. Los conocimientos recibidos por concepto de la misma práctica durante la instalación, habiendo sido el suscrito el Jefe de la División Electromecánica de las fábricas ANDEC y FUNASA, hacen valer claramente el carácter fecundo de la intervención del profesional ecuatoriano, en especial del ingeniero en electricidad preparado dentro del país.

PAG.

2.5. Los Circuitos Auxiliares	
de Control	37
2.6. El Sistema de Ventilación	37
- CAPITULO 3.-	
SUGERENCIAS TECNICAS	39
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
- BIBLIOGRAFIA	48

INTRODUCCION

FUNASA es la única planta de acero instalada en el Ecuador, con capacidad para suministrar un proceso siderúrgico de utilidad, estratégico y de autoabastecimiento (actualmente cubre un 20% de la demanda de material siderúrgico del país). Este compromiso impulsó a sus directivos e ingenieros de ejecución, durante la década pasada, a afrontar la situación con relación a los problemas que se derivan de la falta de compensación del sistema de horno de arco eléctrico.

La regulación de los electrodos de un horno de arco eléctrico tiene como objetivo el controlamiento de la potencia absorbida por el horno en sí, por medio de la intensidad y voltaje de los arcos, manteniendo constante la variación de los electrodos. En otras palabras, y dicho de manera básica y general, la acción consiste en regular automáticamente la longitud del arco y con ello

compensar todas las variaciones del electrodo respecto al material a fundir, las cuales se acentúan cuando el material se va fundiendo y derivando por los costados del electrodo. Este tipo de control tradicionalmente se lo hace a través de un mecanismo hidráulico o por motores eléctrico a través de aparejos.

La tecnología moderna trajo como consecuencia la introducción del control electrónico como parte muy importante del mecanismo de regulación y compensación. Se busca generalmente con este tipo de control, mantener la potencia activa más constante y por término medio más elevada (lo cual permite reducir el tiempo de fusión y el consumo específico de energía). A la larga, también se logra un desgaste simétrico del material refractario del compartimiento de horno, es decir, mayor duración de las paredes.

Las pérdidas térmicas dependientes de la construcción y del revestimiento refractario de las paredes del horno, pueden ser reducidos en la práctica si se disminuyen los tiempos de fusión y de trabajo. Por dicha razón los hornos modernos se construyen con altas potencias específicas en rangos que dependen de los requeri-

mientos y del fabricante. Es pues importante conseguir en esta nueva generación de hornos un funcionamiento óptimo, al objeto de reducir la merma del revestimiento refractario. Es decir que el horno y el transformador de alimentación del mismo deben ser dimensionados de tal manera que la carga térmica del revestimiento refractario permanezca dentro de ciertos límites. La reactancia asociada, especialmente en los hornos de mucha mayor potencia, deberá tener un valor mínimo posible y el margen de voltajes a potencia constante deberá ser grande, si se quiere lograr la mencionada meta.

Tal como hemos mencionado, otro medio para aumentar la potencia de fusión y para reducir las pérdidas dependientes del tiempo de fusión, consiste en aumentar la potencia activa media, manteniendo al mismo tiempo constante la potencia reactiva. Es entonces importante un sistema electrónico de regulación y medición de los electrodos, como instrumento eficiente y confiable de aumentar la potencia media activa.

El equipo electrónico influye en una mejora substancial de la calidad de la regulación de los electrodos lo cual a su vez influye en el desgaste del revestimien-

to refractario, el consumo de los electrodos, las repercusiones sobre la red de alimentación, la duración de la carga y por lo tanto el consumo específico de energía eléctrica. Todo esta perspectiva nos lleva a una sola conclusión válida siempre como el porqué de la ingeniería aplicada al manejo de procesos industriales: el mejoramiento de la rentabilidad de la explotación de los recursos del proceso industrial.

Este Informe se encarga de describir las partes más relevantes de la instalación de un equipo compensador electrónico de horno de arco. Para lo cual, en el capítulo I se coloca a disposición del lector los principales parámetros que conforman un sistema de horno de arco eléctrico, sus propósitos y los criterios de operación. El capítulo II hace una descripción de las partes que componen el sistema (el transformador-reactor, el convertidor estático, los filtros, completándose con la medición de los parámetros, los circuitos auxiliares y el sistema de ventilación). El capítulo III se ha reservado para proporcionar las sugerencias técnicas que resaltaron como producto de la experiencia profesional relatada.

CAPITULO I

GENERALIDADES DEL SISTEMA

Los hornos de arco eléctrico pueden producir reacciones indeseables dentro de la red de suministro eléctrico de una fábrica siderúrgica. En el caso particular de redes eléctricas de baja potencia, dichas fluctuaciones de carga reactiva producen a su vez variaciones de voltaje bastante inaceptables para el sistema; y por consiguiente, es necesario usar un sistema de compensación que permita balancear estos disturbios. El presente informe se refiere a las características técnicas de dicha compensación.

El trabajo de supervisión aplicado a la recepción, instalación y prueba del sistema de compensación a que se refiere este informe, implica un conocimiento general de lo que es un sistema de horno de arco eléctrico, así

como la explicación del propósito de su uso y su forma de operación. Este capítulo está dedicado a describir brevemente estos conceptos.

La experiencia profesional mencionada en este informe se refiere al trabajo de supervisión del proceso de instalación de todo el equipo compensador en todas sus partes. El cronograma del montaje global del sistema se aprecia en la figura 1.1, el cual tomó un tiempo total de 3 meses para ejecutarse. El cronograma empezó con la recepción de los equipos, instrumentos, partes y accesorios. A continuación fue necesario incorporar la revisión de las obras civiles en concordancia con la configuración y ubicación de las partes del sistema eléctrico, electromecánico y electrónico. Fue importante también aquí efectuar una revisión prolija de los elementos de interconexión entre módulos.

La parte más importante del cronograma de ejecución del trabajo estribó en la instalación en sí de los componentes del sistema: los reactores inductivos y capacitivos, y transformadores del sistema; los paneles de protección y control; la instalación del sistema de ventilación; los pararrayos; los transformadores de con-

trol y el "recloser" de SF6; el cableado; las pruebas individuales de tarjetas del sistema electrónico por simulación; el cambio comprobado de ciertos elementos para frecuencia de trabajo de 50Hz a 60 Hz; las pruebas de control de fuerza; las pruebas finales en vacío; y la puesta en marcha final.

1.1. EL SISTEMA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO

Cuando se planifica la instalación de un horno eléctrico es necesario conocer, en primer lugar, las características del lugar seleccionado, en cuanto a la disponibilidad de energía eléctrica para el funcionamiento del horno o de los hornos que se intenta instalar. Concretamente, habrá que saber la dimensión de los hornos a instalar, de tal manera que no se produzcan perturbaciones en el sistema eléctrico de distribución y que haya la capacidad de admitir fluctuaciones de voltaje de red, las que deberán ser toleradas de acuerdo a las especificaciones de las normas eléctricas.

En muchos casos sucede que la red de alimentación no tiene la suficiente capacidad (potencia) para

poder absorber tales fluctuaciones, teniendo como límites superiores de 0.25% para redes hasta de 132 KV y caídas de voltaje por cortocircuito de 2% para el mismo nivel de KV. Estos valores pueden ser calculados a partir de los siguientes parámetros:

- Potencia de cortocircuito del horno (P_{cch}).
- Potencia nominal del horno (P_{nh}).
- Potencia de cortocircuito de la red en el punto de acoplamiento (P_{ccr}).
- Factor de severidad ($K=0.12$).
- Caída de voltaje por cortocircuito, en % (V_{cc}).
- Fluctuación de voltaje, expresado en % del valor efectivo de la fuente de voltaje (V_f).

Por lo cual, para conocer V_{cc} y V_f empleamos

$$V_{cc} = (P_{cch}/P_{ccr}) * 100\% \quad [\text{ec. 1}]$$

$$V_f = K * V_{cc} \quad [\text{ec. 2}]$$

Recordando que V_{cc} no debe ser mayor que 2%, y que V_f no debe resultar mayor que 0.25%. Por lo tanto, cuando estas condiciones no se cumplen será necesario recurrir a un sistema corrector el cual deberá encargarse de absorber las fluctuaciones y caídas de voltajes y mantenerlos en los límites mencionados.

En general, tres son los aspectos técnicos más importantes que deben considerarse para la instalación de un horno de arco eléctrico:

- (1) Mantenimiento de un buen factor de potencia, preferentemente hasta 0.95.
- (2) Minimización de las fluctuaciones de voltaje.
- (3) Eliminación de armónicos producidos por el arco del horno.

Por lo antedicho, podemos ahora sintetizar cuáles deben ser los componentes principales de la instalación eléctrica del sistema del horno:

- (a) Un interruptor principal.
- (b) Un transformador.
- (c) Un tablero de control.
- (d) Un banco de capacitores. Y;
- (e) El equipo corrector de fluctuaciones de voltaje.

La figura 1.2 muestra la configuración general del sistema, en donde se ilustra la composición unifilar desde la entrada de 69 KV de la E.E.E. hasta la misma alimentación a los electrodos del horno, a través del transformador 27KV / 260V - 220V, de 3.5 MVA. Cabe anotar que el sistema tiene un transformador para bajar de 69 KV a 27 KV que es el voltaje de alimentación a los transformadores de horno y elementos compensadores.

Al enumerar los accesorios del sistema será menester clasificarlos en dos partes: el equipo de potencia y el equipo de control (o unidad electrónica). En lo que corresponde a la parte de potencia, podemos decir que el interruptor deberá ser seleccionado de acuerdo al voltaje, la capacidad de

conducción y de cortocircuito, tipo de servicio (interiores y exteriores), clase de operación y, lo más importante, la capacidad de interrupción (expresada en Voltio-Amperios). Con este cumplimiento, se obtiene la garantía de que el equipo no sufra daño alguno al interrumpirse la corriente a un voltaje determinado.

El transformador es, por lo general, de construcción especial, de acuerdo a los voltajes de entrada y salida, con sus dispositivos de seguridad incorporados, tales como termómetro para el aceite, para los devanados; adicionalmente puede tener ventilación forzada y recirculación de aceite. El transformador deberá estar diseñado para soportar cortocircuitos y absorber así toda sobrecarga momentánea sin perjuicio de su vida útil. En cuanto al tipo de transformador, éste puede ser fabricada de acuerdo al tipo de horno: tipo UHP (de potencia ultra alta), tipo HP (de potencia alta) y tipo RP (de potencia regular o media).

En lo que respecta a la parte de control, ésta consta de los tableros de mando y de regulación

electrónica. El tablero de mando -la parte interfacial de comunicación entre el hombre y el equipo del horno-, comprende los selectores de mando, los que ejecutan diferentes operaciones en el horno conforme al procedimiento siderúrgico. Desde este tablero se puede realizar diferentes operaciones, tales como

- Ajuste y liberación de los electrodos del arco.
- Elevación y giro de la tapa del horno.
- Elevación y descenso de los electrodos del arco.
- Accionamiento de la puerta de descorificación.
- Basculamiento del horno.
- Enclavamiento del proceso de basculamiento.
- Accionamiento del disyuntor de maniobra.
- Selección de servicios manual y automática.

En lo que respecta a la regulación electrónica, en ésta se encuentran los dispositivos sensores para medición de corriente, voltaje, factor de potencia

y megavatímetro, protección de sobrecorriente y cortocircuito, reguladores y amplificadores de salida, que tienen la función de regular los electrodos para mantener automáticamente y con la mayor precisión posible un punto de trabajo constante (es decir, mantener una determinada longitud de arco eléctrico entre los electrodos), fijando la potencia activa y el factor de potencia apropiado. La figura 1.3 ilustra un extracto del esquema de la regulación electrónica adoptada en el sistema. Observemos que el mecanismo final empleado para subir o bajar el electrodo del horno consiste en un sistema de amplidina, controlado por el amplificador de salida del equipo de regulación electrónica. La precisión de regulación depende de la detección de los valores eléctricos a medir, los cuales no deberán tener perturbaciones en sus señales. Por dicho motivo, será necesario emplear filtrar las señales. Este filtrado debe ser de precisión y por ende complejo, ya que se requiere eliminar las variaciones de reactancias procedentes de corrientes fuertemente oscilantes y las caídas de voltajes inductivas y resistivas en los conductores de corrientes altas.

1.2. PROPOSITOS DEL SISTEMA DE CONTROL

La operación de los hornos de arco eléctrico conlleva problemas que afectan directamente la capacidad de transmisión de la red eléctrica así como el flujo eléctrico de los consumidores. La absorción de potencia activa y reactiva en los arcos está sujeta a fluctuaciones tanto periódicas como aleatorias. Por tal razón, un sistema de control, es decir de compensación estática, tiene como propósito reducir aquellos efectos resultantes por intermedio del control de cuatro propósitos perfectamente definidos, los cuales son:

- 1.- Mejoramiento del factor de potencia;
- 2.- Reducción de las fluctuaciones de voltaje (comúnmente denominadas según el anglicismo de "flicker");
- 3.- Reducción de armónicas; y,
- 4.- Balanceo de cargas desbalanceadas.

Mejoramiento del Factor de Potencia: Si el factor de potencia de la carga es pobre, la red debe también suministrar la potencia reactiva. Dado este requerimiento adicional el sistema de transmisión debe ser sobredimensionado. Pero desde el punto de vista de la empresa suministradora de energía eléctrica, es conveniente que la potencia reactiva de la carga sea compensada justamente en el punto de origen del problema. Por tal razón, es justificado el uso del equipo compensador del horno de arco.

Reducción de la Fluctuación de Voltaje: El valor de la corriente de los hornos de arco cambia abruptamente de magnitud particularmente durante el proceso siderúrgico. Esta fluctuación causa modificaciones excesivas en la potencia reactiva, lo cual -al igual que las variaciones en la carga activa, particularmente por variaciones desbalanceadas-, resulta en fluctuaciones indeseables de otros artefactos eléctricos (por ejemplo, en lámparas incandescentes). Adicionalmente, si el voltaje de barras disminuye también lo hará la potencia de

fundición del material siderúrgico, la cual -como se sabe- cambia con el cuadrado del voltaje. Este problema justifica el uso de un sistema compensador en lo que atañe a lo que físicamente es posible hacer hoy por hoy.

La Reducción de Armónicas: Los arcos producen una gran cantidad de corrientes armónicas especialmente durante el proceso de fundición, dando como resultado una perturbación evidente en la red eléctrica. Las corrientes armónicas impresas en la red causan distorsión del voltaje y pérdidas en la impedancia. La distorsión del voltaje de red puede llevar a disturbios en la sensibilidad de equipos electrónicos u otros equipos de consumo. Inclusive, si la red de alto voltaje está sujeta a armónicas, el ruido puede transmitirse inductivamente a líneas de comunicaciones. Por lo tanto, via filtros, será necesario limitar la cantidad de armónicas producidas por los equipos de horno de arco eléctrico.

Balanceo de Cargas Desbalanceadas: El desbalanceo de cargas puede ser causado por los arcos. Por ejemplo, en cierto caso extremo, la interrupción

del arco en una de las fases o con dos fases en cortocircuito; la componente de secuencia negativa llega a unos 40 a 70 % de la componente de secuencia positiva. Durante el proceso de fundición, las componentes de secuencia negativa llega a casi el 20% de la componente positiva, en promedio. De modo que ya que las cargas desbalanceadas en cargas activas generan fluctuaciones de voltaje en el punto de acoplamiento común, existe una obvia necesidad de compensar este desbalance. En conclusión, considerando dicho efecto, y tomando en cuenta también el grado de desbalance y su consecuente afectación en máquinas eléctricas rotativas, se justifica plenamente la limitación de la componente de secuencia negativa en la red.

1.3. OPERACION DEL SISTEMA DE CONTROL.

El funcionamiento del sistema global de control del horno gravita fundamentalmente sobre el nivel de costos de operación, ya que si tenemos un sistema casi perfectamente regulado, tendremos beneficios en dos aspectos importantes. El primero se relaciona con el desgaste de las paredes del horno y

con el desgaste de los electrodos. El segundo beneficio está relacionado con la obtención de una mayor concentración térmica sobre el material a fundirse y evitar así las pérdidas por conducción en los interiores del compartimiento.

Con una buena operación del sistema de control, se podrá evitar los picos de demanda demasiado elevados, los cuales inciden en los costos de facturación. También se logrará obtener un mejor aprovechamiento de energía eléctrica, minimizando el consumo de ella.

En definitiva, con una buena regulación se llega a conseguir las siguientes ventajas:

- (a) Ahorro de corriente y tiempo.
- (b) Mejor conservación del revestimiento refractario.
- (c) Mayor productividad del proceso.

Evidentemente, el mayor problema del control es llegar a optimizar la transferencia de calor, para obtener como respuesta las antedichas ventajas.

Para la operación correcta del control de la regulación del sistema, se debe considerar los siguientes parámetros:

- (1) Control de potencia de circuito.
- (2) Control por potencia de arco.
- (3) Control de corriente de horno.
- (4) Medición del voltaje de secundario del transformador.
- (5) Medición del factor de potencia.

Control de Potencia del Circuito: En donde se supervisarse la operación en lo referente a la curva de potencia (MW) versus corriente (A). La figura 1.4 muestra la ubicación del punto de operación óptima.

Control de Potencia del Arco: La potencia del arco

depende de la potencia total del transformador P_{tx} (incluyendo las pérdidas), la resistencia R (que es una variable, debido al consumo de la carga de fundición), y de la corriente óptima I . Las figuras 1.5.a y 1.5.b muestran el esquema correspondiente. Esta relación viene dada por

$$P_{arc} = P_{tx} - 3I^2 R \quad [\text{ec. 3}]$$

Hay que acotar que las variaciones de potencia en los puntos cercanos a la corriente óptima son muy ligeras y a la vez despreciables para efectos de control, tal como se observa en la misma figura 1.4, la cual es válida para un horno de fundición de 37 MVA en el "tap" 1.

Control de Corriente de Horno: Esta corriente es de fácil medición y se hace por medio de un transformador en donde la corriente de secundario es proporcional a (y en fase con) la corriente de primario, tal como se ilustra en la figura 1.6. Estos devanados están colocados en el interior del transformador del horno del lado secundario, y por lo tanto son de construcción especial. La relación de

transformación es de KA-A, de acuerdo a las necesidades del control, y existen valores estandarizados para su relación secundaria de corriente (1,2 y 5 amperios).

Medición del Voltaje del Secundario del Transformador: El voltaje del secundario del transformador del horno, es otro de los parámetros utilizados en la regulación. Su medición se efectúa independientemente en cada fase de salida del transformador con respecto a tierra. La figura 1.7 muestra el esquema para la realización de esta medición.

Medición del Factor de Potencia: Para medir este parámetro es conveniente hacerlo en el lado primario del transformador del horno. Para obtener buenos resultados en la medición de este factor, es necesario que las señales de voltaje y corriente no contengan en su forma de onda distorsiones ni armónicas. Por lo tanto, es necesario eliminar estas perturbaciones lo cual se consigue a través de filtros de entrada en cada medidor.

C A P I T U L O I I

DESCRIPCION DE LAS PARTES DEL CONTROL

Dentro del trabajo de supervisión de la instalación, fue necesario tener presente la interrelación de todos los parámetros y especificaciones técnicas de los sistemas. Esto motiva a que en este Informe Técnico sea necesario referirnos específicamente a las partes que componen el sistema, tales como los elementos reactores-transformadores, convertidor, filtros, ventilación, etc. Este capítulo está dedicado a la descripción suscita de dichos componentes, ya que en el capítulo anterior ya se explicó lo que era el sistema de horno de arco, cuáles eran sus propósitos y cómo era su forma de operación.

2.1. EL REACTOR-TRANSFORMADOR. -

Dadas las condiciones de operación del sistema,

ilustradas en la figura 1.2 del capítulo anterior, el transformador de alimentación al convertidor, el reactor trifásico y el convertidor estático, están acoplados a la red a través del interruptor principal. Aquí nos referiremos sólo al conjunto reactor-transformador; en la próxima sección tocaremos el tema del convertidor.

En el papel del sistema transformador-reactor, es necesario destacar la composición de los enclavamientos de arranque ("Starting Interlocks"), los disparadores ("Trips") y las alarmas. Estas componentes son útiles también en los otros elementos del control.

Los Enclavamientos de Arranque funcionan en base a la operación de las siguientes partes:

- Los relevadores Buchholz;
- 1 relevador de sobrecorriente;
- 1 relevador diferencial;
- 2 relevadores de supervisión de temperatura de aceite;

- 2 dispositivos térmicos: de $t/(I) < 110^{\circ}\text{C}$ y de 100°C .

Los disparadores se refieren a las medidas protectoras que causan el salto inmediato del interruptor, y son las que provienen de:

- El relevador Buchholz;
- Los relevadores de supervisión de temperatura de aceite, $T > 90^{\circ}$;
- el relevador de sobrecorriente;
- el relevador diferencial; y,
- el dispositivo térmico ($t/(I) > 110^{\circ}\text{C}$).

Por otro lado, las alarmas son las protecciones que no necesariamente hacen saltar al interruptor. Proviene de:

- El relevador Buchholz;
- Los relevadores; y,
- el dispositivo térmico ($t/(I) > 100^{\circ}\text{C}$).

2.2. EL CONVERTIDOR ESTÁTICO

Para propósitos del enclavamiento de arranque, el Convertidor Estático emplea los registros provenientes de los relevadores de:

- sobrecorriente de recortador AC;
- monitoreo de tiristor;
- ventilación; y,
- monitoreo de 27 kilovoltios.

Por otra parte, los disparadores que causan el disparo inmediato del interruptor, se refieren al mismo tipo de componentes del caso anterior.

2.3. LOS FILTROS

Se refiere a los filtros de tercera, quinta y séptima armónicas (ver figura 1.2), los cuales están acoplados a la red de suministro por medio del interruptor, una vez que todos los enclavamientos de arranque hayan sido prendidos.

El funcionamiento de los filtros está supeditado a la operación de las siguientes partes:

Para los enclavamientos de arranque se usa:

- Un relevador de sobrecorriente; y,
- la protección del banco de capacitores.

Los disparadores obran sobre el relevador de sobrecorriente.

Finalmente, las alarmas provienen del elemento que protege al banco de capacitores.

2.4. LA MEDICION DE PARAMETROS

Las figuras 1.3, 1.6 y 1.7 han servido para ilustrar la forma de medición de los parámetros involucrados en el proceso de control del sistema. La figura 2.1 muestra la relación entre las señales de control y las condiciones de operación del correspondiente elemento del sistema. La figura se refiere a las interfaces del interruptor principal, control de impulso máximo, control del regulador.

monitoreo del suministro de voltajes, arranque del compensador, limitación de amplitud de señal de salida del regulador, y demás elementos. Todas estas señales, salidas del sistema de control, determinan las condiciones de operación al inicio del proceso de compensación por intermedio de la circuitería de la unidad electrónica.

La operación de las señales toma en cuenta:

- (a) La limitación del horno de arco: De tal manera que si la potencia del arco es menor que 0.5 MVA por más de 5 min., la potencia del convertidor será limitada a 3.5 MVA; y si este periodo excede los 30 min., el compensador se disparará. Dentro de un periodo de 5 minutos después del disparo del compensador, será imposible arrancar la instalación, lo cual permitirá la descarga completa de los capacitores hasta un nivel menor a los 50 VDC.

- (b) El monitoreo de sincronización: Para prevenir al convertidor de sobrecargarse por descontrol de los pulsos de control. La pérdida de sin-

ronismo causa la supresión de los pulsos del convertidor por aproximadamente 3.5 segundos. Si el sincronismo fuera imposible, como resultado de alguna falla dentro del circuito, el mismo procedimiento se repetirá tres veces antes que la instalación se dispare definitivamente.

- (c) El monitoreo de la corriente del convertidor: Por intermedio de la detección de la corriente de cada fase. Dicha corriente es rectificadora por medio de un puente Wien y el valor mayor se compara, de tal manera que si es necesario se inhiben los pulsos de control, y el compensador automáticamente se disparará.
- (d) El monitoreo de los 27 KV: El voltaje trifásico es rectificado y comparado; y en caso necesario el compensador se disparará.
- (e) El monitoreo de los voltajes DC: Esto se logra por medio de protección térmica y magnética por sobrecorriente, para todas las fuentes de poder de la unidad electrónica. Si alguno

de estos voltajes (que son de 15 V, 24 V y 42 V) falla por debajo del 75% de su valor nominal, entonces el compensador se disparará.

- (f) La limitación de potencia del dispositivo térmico del transformador: Mediante la cual, la temperatura combinada del aceite y del devanado del transformador permite la carga óptima de éste, debido a la limitación progresiva de potencia.

Los sistemas de control y medición, y unidades afines, están también operados por el enclavamiento de arranque, la protección y las alarmas.

La figura 2.2 muestra un esquema general de medición de las variables, observándose la matemática funcional de las partes que conforman el sistema de medición. Adicionalmente, la figura 2.3 ilustra las partes relativas al principio de regulación del sistema y el esquema de medición. Como se observa, consta del regulador en sí, el formador de función, el mando manual del valor prescrito, la lógica de prioridad, el amplificador de salida, la

lógica de cortocircuito, la seguridad por rotura de electrodo y la conexión al sistema de amplitudina que sirve como mecanismo para subir o bajar el electrodo del horno.

2.5. LOS CIRCUITOS AUXILIARES DE CONTROL

Para este efecto, vale decir que todos los suministros de voltaje de 220 VAC están protegidos por medio de interruptores térmicos y magnéticos; y el estado de todos los elementos de acoplamiento, aisladores e interruptores se muestra por medio de lamparas indicadoras. Todas estas lamparas indicadoras pueden probarse desde el tablero.

Los enclavamientos de arranque se los hace por medio de los elementos para monitoreo de voltaje de señalización (220 V), del monitoreo de voltaje de control (220 V), y de interrupción de arranque de la unidad electrónica.

2.6. EL SISTEMA DE VENTILACION

Este sistema se basa en la detección de la tempera-

tura ambiente, la cual se chequea por medio de dos termostatos, de tal forma que cualquier sobrecalentamiento deberá producir el disparo de la compensación.

El ventilador del convertidor estático se arranca por intermedio de condiciones similares a las de enclavamiento de arranque y disparadores del convertidor (ver sección 2.2).

Para el sistema general de compensación, los enclavamientos de arranque son gobernados por las señales de los relevadores de protección térmica y de disparo de temperatura ambiente menor a 55°C .

CAPITULO III

SUGERENCIAS TECNICAS

En este Informe Técnico se ha reportado sobre una experiencia profesional de supervisión y dirección técnica de una obra de instalación de un equipo de gran dimensionamiento en cuanto a problemas y componentes. Esta experiencia arroja ciertas consecuencias, las que han servido para elaborar ciertas sugerencias técnicas las cuales se manifiestan a continuación.

a) Mecanismo de Regulación del Electrodo:

El mecanismo que se instaló con el propósito de variar controladamente la posición del electrodo dentro del horno, consistió en un sistema de amplidina. Pero éste es un sistema de control que puede ser reemplazado por

otros mecanismos modernos y eficientes. Desde este punto de vista surge esta primera sugerencia técnica.

La respuesta de reacción de la amplidina a cualquier cambio brusco de corriente es relativamente lenta. Por ejemplo, un sistema tioristorizado daría mayor agilidad al mecanismo y por lo tanto la regulación del electrodo resultaría más eficiente. La regulación hidráulica también constituye una alternativa interesante.

Estos criterios quedaron como sugerencias internas en FUNASA, originadas por el suscrito, y podrán ser tomadas en cuenta en futuras ampliaciones del sistema. El sistema de control y unidades electrónicas no cambiarían; con excepción de la interfaz con la amplidina.

b) Compartimiento de Paneles y Tableros:

Después de la instalación del sistema, fue notoria la observación de que el cuarto de

residencia de los paneles y tableros de mandos manual y automático, tenía una temperatura elevada. En cierta forma, las dimensiones y geometría del compartimiento impedían una ventilación adecuada. Esta fue otra de las sugerencias anotadas como producto de la experiencia en la instalación y operación posterior del sistema: la modificación de dicho compartimiento. Tal sugerencia tuvo acogida en la fábrica.

Para lograr una optimización de esta operación fue necesario climatizar el compartimiento (en temperatura y humedad) a una temperatura máxima de 25 grados centígrados. En tales condiciones se minimizó la probabilidad de falla por temperaturas ambientales elevadas en paneles y tableros.

c) **Costos de Operación:**

El costo de adquisición e instalación del sistema completo de compensación, a que hace referencia este Informe Técnico, ascendió a una

cifra cercana a los dos millones de dólares aproximadamente (a costo de 1979). Esta modificación produjo un ahorro operativo de 0.55 a 0.95 en factor de potencia, que se tradujo económicamente en un ahorro de 73% aproximadamente en costos de energía eléctrica mensual.

Esto demuestra el orden de magnitud del beneficio económico representado por la instalación de la obra en la fábrica, desde 1979 para acá, a pesar del monto de la inversión.

d) **Aplicaciones en Otras Fábricas:**

En conocimiento de la experiencia en el montaje del sistema, y dados los beneficios reales que se lograron posteriormente, se concluye que otras fábricas de similares características pueden acoger tal sistema de compensación. Es decir, cuando las redes de distribución no son capaces de soportar tipos de cargas similares, o cuando el factor de potencia de la fábrica es bastante bajo.

Un caso específico sucede en ciertas plantas de laminación en el país, las cuales no poseen en la actualidad un equipo de compensación. La presencia de grandes rectificadores controlados que alimentan los motores de corriente continua de equipos laminadores, pueden degradar notablemente la calidad del voltaje de distribución del sistema. Particularmente cuando la red de alimentación tiene una potencia de cortocircuito de bajo nivel, la onda se deforma por las corrientes armónicas que proceden de los rectificadores y su amplitud varía constantemente con la potencia reactiva solicitada por el sistema. Por otra parte, en este tipo de instalaciones, el factor de potencia media tiene un valor bajo.

El compensador estático como el aquí indicado, permite resolver al mismo tiempo los tres aspectos del problema: el factor de potencia llegaría a elevarse hasta el valor adecuado (incluso hasta la unidad); las corrientes armónicas son filtradas; y, el compensador está

en capacidad de proporcionar en todo momento la potencia reactiva variable necesaria para la carga del sistema de una planta laminadora.

Normalmente, en las fábricas del país la compensación se la hace por medio de un simple banco de condensadores. Es lógico que para decidir por un sistema complejo de compensación (como el descrito en este Informe) será necesario, para cada caso en particular, estudiar a fondo todas las alternativas y ventajas técnicas y económicas que representan para los intereses particulares de una fábrica. Hay que recalcar que un estudio previo de este tipo es obligatorio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un trabajo profesional en ingeniería eléctrica siempre debe estar sujeto al análisis no sólo de lo que sucede durante la obra sino de las cosas que podrían advenir después. Desde ese punto de vista, la experiencia relatada da lugar a reflexiones a manera de conclusiones y recomendaciones, que se resumen en las siguientes:

- (a) En este trabajo, o en cualquier otro, es muy importante el grado de oportunidad que se brinde a los profesionales ecuatorianos. En ciertos casos, como éste, la presencia de profesionales extranjeros es importante también -dada la envergadura de la obra y el tipo de tecnología que conlleva-; sin embargo, la combinación de esfuerzos con profesionales nacionales es saludable y beneficiosa a largo y corto plazo para el desarrollo del país.

Hay que manifestar que en este caso, si hubo una combinación exitosa con los técnicos de afuera, dando lugar a una interesante y valiosa experiencia que vale la pena nombrarla hoy.

Como conclusión y recomendación a la vez, el apoyo al profesional nacional, en general y en cualquier tipo de obra, debe ser permanente, insoslayable y productiva.

- (b) En términos técnicos específicos, cabe indicar que la función de la regulación de los electrodos tiene una importancia central por el hecho de que influye de manera notable en el servicio y los costos relacionados con el proceso productivo. Esta influencia fue constatada después de culminada la instalación de la obra. Es decir que fue posible -al cabo de poco tiempo- comprobar las ventajas y ahorros que representaba el funcionamiento del sistema de control y compensación instalado

- (c) El sistema instalado es complejo y utiliza muchas variables, módulos y dispositivos. Vale la pena entonces dirigir la atención a la investigación

aplicada en el tema del control de arcos. La ESPOL es una institución que tiene la capacidad de desarrollar proyectos aplicados -sean analíticos o experimentales- en esta temática. Esto podría llevar a una evolución de propia tecnología, aunque sea parcialmente, de equipos de control y compensación de sistemas de horno de arco eléctrico. Específicamente, un tema de investigación aplicada en este aspecto puede ser el estudio de las perturbaciones generadas en este tipo de operación. Además, el desarrollo de programas computacionales servirían fecundamente para optimizar el proceso de planta.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- W.E. Schwabe, "Electronic Furnace Problems: Design and Operating Requirements for UHP Arc Furnaces Melting Prereduced Charge Materials", Union Internationale d'Electrothermie (UIE), 8th. Congress, Liege, 1976.
- 2.- Brown Boveri (BBC), Regulación Electrónica para Hornos de Arco, Pub. CH-IW 512250 S, CH-5401 Baden, Suiza, 1978.
- 3.- D.M. Schroder, Operating Results of a Compensating Equipment, 2nd. IFAC - Symp., Dusseldorf, 1977. Pub. BBC- D-IA-71180-E.
- 4.- A. Driller, "Situación y Desarrollo de las Regulaciones de Electrodos en los Hornos de Acero", Revista AEG Ibérica al Día, 1965.
- 5.- Brown Boveri (BBC)/ Symstab, Powerfactor and Flicker Compensation for Electric Steelplants, Pub. D-IA-60739-E, 1978.