



VII/CE-A1-07

**NUEVAS TECNOLOGIAS EN EL SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICA DE LAS
UNIDADES GENERADORAS 9A/18A DE LA ITAIPU BINACIONAL**

Raimundo López Ferreira *

Rodinei Justino

Enzo Asilvera V.

Itaipu Binacional

Paraguay

RESUMEN

La evolución constante y acelerada en el área de sistemas micro procesados, hacen que surjan nuevas generaciones de equipos de regulación y control. Considerando que la característica más importantes en los equipos de regulación, que son esenciales para el funcionamiento de una central hidroeléctrica de gran porte como la de Itaipu, es la confiabilidad y seguridad para no comprometer la generación de energía por fallas en estos equipos o sistemas.

Este trabajo representa el resultado observado en Itaipu, de este avance tecnológico, con la implantación de dos nuevas unidades generadoras con los reguladores de tensión estáticos de modelo digital microprocesado con un potencial de recurso que es netamente favorable a este tipo de tecnología.

Actualmente, se tiene dos generaciones de reguladores de tensión coexistiendo, el regulador electrónico analógico (maquinas antiguas) y los microprocesados de última generación. El objetivo final de esta nueva tecnología es maximizar la productividad y reducir costos.

Se realiza una descripción breve del regulador de tensión, un análisis de las ventajas, facilidades, dificultades. Así como los ensayos en fábrica y puesta en funcionamiento en la CHI efectuados al equipo para su colocación en servicio.

PALABRAS-CLAVES

Excitación estática, nueva tecnología, ventajas, ensayos, performance.

1. 0 - INTRODUCCIÓN

La característica más importante en equipos de control y regulación de tensión es la confiabilidad, esta característica es esencial para el funcionamiento de centrales hidroeléctricas para no comprometer la generación de energía por causa de fallas en estos equipos. A través de la redundancia en equipos, se puede obtener altos índices de disponibilidad en sistemas electrónicos y de potencia con el agregado de bajas tasas de fallas intrínsecas para no comprometer los costos del mantenimiento.

La especificación del sistema de excitación de las nuevas unidades generadoras 9A y 18A de la Itaipu Binacional, requiere que el software sea basado en tecnología numérica y el hardware con redundancia para ejecutar todas las funciones de la regulación de tensión y del control de la potencia reactiva de la unidad de generación. Además forma parte del Sistema Digital de Supervisión y Control (SDSC).

El sistema adquirido e implementado es el tipo UNITROL 5000, esta basado en microprocesadores, este sistema es la quinta generación de la familia de productos UNITROL. Posee características y dispositivos nuevos como ser la distribución de la corriente dinámica en los puentes de tiristores, mecanismos para la operación en paralelo de puentes de tiristores, arranque a partir de la tensión residual en los bornes de la maquina, así como la implementación de comunicación, diagnóstico y asistencia remota.

El paquete de funciones del software posee un dispositivo de programación de aplicaciones tanto para la modificación o creación de nuevos bloques funcionales llamado GAD (Herramienta de ingeniería), así como la herramienta de puesta en servicio y mantenimiento (CMT –Tools) basado en técnicas de ventanas con menú y que poseen las siguientes funciones: Presentación de imagen del panel de control local en el PC; La función trending que es para verificación y afinado final de los parámetros del regulador automático de tensión y de otros parámetros de regulación; Tratamiento del Registrador de fenómenos transitorios que sirve para diagnóstico y detección de fallas en el sistema de excitación; Tratamiento del registrador de perturbaciones con capacidad de almacenado de hasta 100 eventos y alarmas con impresión del tiempo real; Visualización de los Diagramas de Software en tiempo real, correspondientes a los diversos bloques funcionales tales como el control lógico, el regulador de tensión AVR, los limitadores, las protecciones y la supervisión.

2.0 – HISTORICO

Con la implantación de dos nuevas unidades generadoras (Unidad 9A y 18A), sumadas a las 18 anteriormente instaladas, la Itaipu completó el parque de 20 unidades generadoras.

Los reguladores de tensión de las 18 unidades generadoras antiguas de Itaipu (La primera unidad generadora entró en servicio en Diciembre de 1983), son de generación de reguladores electrónicos analógicos tipo UNITROL M, esta tecnología fue consolidada en los años 70.

Este regulador de tensión con excitación de campo positivo y negativo, es de tipo derivación o shunt, esta disposición exige equipo separado (baterías o fuente auxiliar de CA) para el inicio y el incremento de la excitación, debido a que la tensión residual del generador es pequeña. Dispone el regulador de un Canal Automático y un canal Manual que están conformados por módulos electrónicos, compuesto de 106 módulos electrónicos analógicos, separados por funciones como ser: AVR, Limitadores de corriente de excitación positiva, negativa, ángulo de rotor, sub-excitación, PSS, Canal Manual; Follow up y los módulos de control de disparo. Cada unas de las funciones citadas arriba es implementada por módulos electrónicos discretos, con componentes de uso industrial.

Considerando que el sistema de excitación es uno de los componentes críticos de la central, esto implica que en caso de falla puede provocar daños en el generador, además de la indisponibilidad y alto costo de reparación.

Haciendo un análisis breve de la vida útil [1]del sistema de excitación, considerando que el fin de esta etapa esta determinado por el aumento de la probabilidad de falla, basándonos en la teoría de confiabilidad que define la curva de probabilidad de falla en función de la edad como se muestra en la figura 1 y de acuerdo a la experiencia recogida a través del análisis en operación realizada por la EDF en 1.300 unidades generadoras hidroeléctricas [2], donde

concluye que la vida útil más probable de unidades producidas ante de los años 60's, esta comprendida entre 30 y 35 años y para unidades fabricadas posteriormente se espera una duración de 40 a 45 años. A todo esto debemos agregar que el mantenimiento realizado, así como el modo de operación juega un papel fundamental para tener un envejecimiento normal para la edad.

Los reguladores de tensión de las antiguas unidades están en plena etapa de su vida útil con tasas de fallas consideradas estabilizadas.

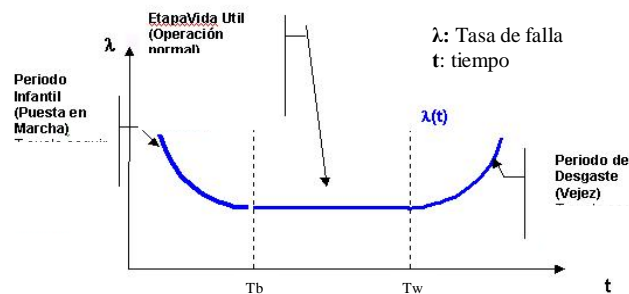


Figura 1: Curva de Probabilidad de Falla

3.0 – CARACTERÍSTICA PRINCIPALES DEL REGULADOR UNITROL 5000

La configuración general del sistema de excitación de la maquina 9A y 18A, UNITROL 5000 de doble canal es presentada en la figura 2.

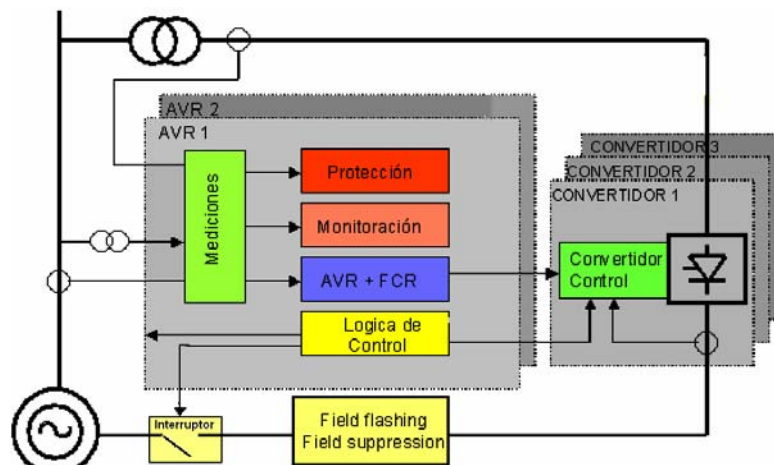


Figura 2: Esquema general del regulador de tensión

Donde:

AVR = Automatic Voltage Regulator (Regulador Automatico de Tensión)

FCR = Field Current Regulator (Regulador de corriente de Campo)

BFCR = Backup Field Regulator (Retaguardia del regulador de corriente de campo)

La configuración del sistema es con doble canal totalmente redundante, es suministrada en una unidad doble montada en una caja metálica que se encuentran separados mecánicamente. Control de reserva, regulador de corriente de campo y redundancia de los convertidores en N-1 (en Itaipu es N-50%). Cada canal esta complementado por sub-unidades destinados a ejecutar una gran cantidad de funciones.

El sistema de excitación se puede dividir principalmente en 4 grupos funcionales como:

- Transformador de Excitación
- Módulos de excitación con electrónica de control (AVR1/AVR2)

- Convertidor a tiristores
- Field Flashing (cebado del campo)
- Equipo de supresión de campo.

La confiabilidad [3] del sistema puede estimarse a partir de la confiabilidad de las piezas individuales conformado en paralelo, tenemos así para un sistema de dos elementos en paralelo:

$$P_{so} = P_{avr1} * P_{avr2} \quad (1)$$

La confiabilidad del sistema es dada por:

$$R_{so} = 1 - P_{so} \quad (2)$$

Donde: P_{avr1} y P_{avr2} , confiabilidad individual del AVR1 y AVR2

La secuencia de transferencia de canales en caso de falla de software o Hardware es como se presenta en la figura 3, a seguir

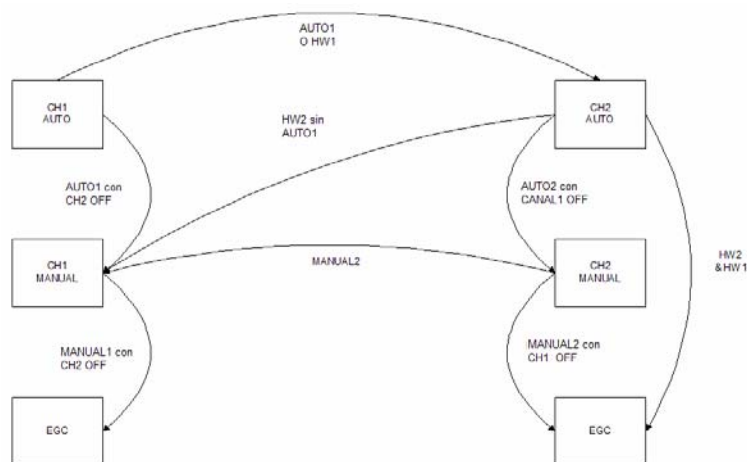


Figura 3: Redundancia, secuencia de transferencia

3.1 – Unidades de Control Principal

La electrónica de control [4] esta conformada por lo siguiente:

- **Unidad de procesamiento COB:** En esta única unidad procesador que opera con 32 Mhz, están implementadas las funciones de regulación automática de la tensión, limitadores, supervisión, protección y control. Un circuito ASIC (Application Specific Integrated Circuit) asegura el intercambio y almacenado de los datos, generación de los impulsos de mando, conversiones A/D y D/A y también la interfaz con otros dispositivos (acoplamiento del bus de campo ARCnet), soportando la comunicación con el Panel de Servicio Local y herramientas CMT. Además, este circuito procura las vías de entrada seriales y ejecuta una función de autodiagnóstico (watchdog).
- **Unidad de Medida MUB:** La unidad de medida es un procesador de señales digitales DSP, este dispositivo implementa las funciones de filtrado y digitalización, calculo de las corrientes y tensiones y la función PSS (Power System Stabilizer) realiza un proceso rápido de medición de valores reales actuales y establece la separación galvánica.
- **Control de Puerta Extendido EGC:** Este es utilizado como un regulador de corriente de campo, es un control de reserva y emergencia. Los componentes están separados mecánicamente y en ellas están implementadas las siguientes funciones. Regulador de corriente de campo; Control de seguimiento para conmutación suave; Relé instantáneo y de tiempo inverso de sobrecorriente; Vigilancia de conducción de los tiristores; Fuente de alimentación

- **Interfaz de Señal PSI:** la señal de interfaz de potencia se usa para realizar la separación galvánica y ecualización de señales de medidas antes de introducir en el MUB.
- **Alimentación de la electrónica de Control:** es realizada vía dos bloques alimentadores totalmente redundante una en DC/DC y otra en AC/DC en 24VDC.

3.2. Comunicación con el interior del sistema de excitación

La comunicación se realiza en forma serial vía bus de campo ARCnet. Se utiliza por ejemplo, para el intercambio de la señal de control y estado, desde y hasta el convertidor a tiristores y medición de valores y alarmas del panel de control local LCP y comandos de la misma.

3.3 Interfaz Hombre – Maquina (IHM)

Se tiene disponible dos:

3.3.1 Panel de servicio SPA: Para ejecución de la tarea de mantenimiento y servicio para la operación local del sistema.

3.3.2 Panel de Control Local LCP: Ofrece las siguientes posibilidades

- Visualización de las señales de medidas y procesamiento en 8 líneas. Pueden ser exhibidas 8 señales analógicas. Se puede pre-definir hasta 32 señales.
- Señalización de alarmas. Se exhibe hasta 8 mensajes simultáneos
- Impresión de señales y mensajes de alarma
- Control Local, para realizar la operación local del sistema con 16 teclas pulsadores.

3.4 Herramienta de Puesta en Servicio y Mantenimiento

La herramienta *CMT-Tool* son instrumentos basados en MS-Windows que es destinado a facilitar los ensayos, puesta en servicio y mantenimiento, instalada en un PC portátil vía fibra óptica, ejecutan las siguientes funciones:

En la pantalla del PC puede presentarse una *imagen del Panel de Control Local* (figura 4), por medio de la interfaz visual.

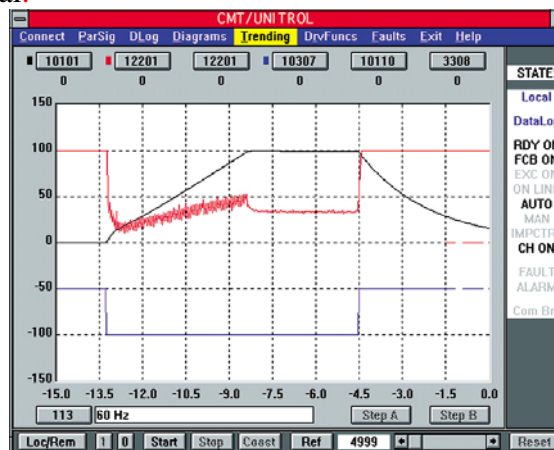


Figura 4: CMT Tools

En el display puede ser observado *trending de señal*, parámetros y status de la señal. Además del ajuste y programación de parámetros y programas aplicativo.

De hecho, esta función sustituye a un equipo de ensayo convencional y a otros equipos de ensayos auxiliares.

Tratamiento del *Registrador de fenómenos transitorios*, destinado a la visualización de los datos registrados. Este aparato, conjuntamente con el registrador de perturbaciones, sirve para diagnóstico y detección de fallas en el sistema de excitación.

Tratamiento del *Registrador de Perturbaciones*, con capacidad de almacenamiento de hasta 100 eventos y alarmas con impresión en tiempo real.

Visualización de los *Diagramas de Software en tiempo real*, esto se refiere a los bloques funcionales correspondientes a las diversas funciones tales como el control lógico, el regulador de tensión AVR, los limitadores, las protecciones y la vigilancia.

Esta función posee los instrumentos para medir de señales de entrada y salida de los bloques funcionales particulares en tiempo real y para la modificación de los parámetros del Sistema (como los parámetros del AVR).

3.5 Interfaz con el sistema de Control de la Estación de Potencia

Interfaz del control Convencional: Las ordenes de mando digitales, analógicas y las señales de estado están acopladas vía cartón de entrada /salida rápida (Fast I/O). Cada cartón contiene 16 entradas digitales con opto-acoplador, 18 salidas con relé para indicación de estado y alarma, 8 entradas analógicas de $\pm 10V$ o $\pm 20mA$ y 4 a 20 mA, 3 entradas para PTC o PT100.

Comunicación serial: para comunicación con un sistema de control de jerarquía más elevada con diversos protocolos.

3.6 Electrónica de Potencia

Cada convertidor consiste en un modulo puente de tiristores de onda completa equipado con 6 tiristores refrigerados en ambos lados. Conforman el puente los siguientes elementos: fusibles ultra rápidos, protección de sobre tensión RC, transmisores de impulso (Gate Drive Interface –GDI) cumple la función de separación galvánica y ventilación forzada para refrigeración de los tiristores.

La repartición uniforme de corriente entre los convertidores, es asegurada por el mecanismo de distribución dinámica de las corrientes, esta función está integrada en la interfaz del convertidor CIN, para este propósito son empleados sensores Hall, que también son utilizados para vigilancia de la conducción.

La configuración N-1, se caracteriza que si hay falla del 50% del convertidor, funciona en la condición de carga nominal. El CIN supervisa las fallas de tiristores y gerencia que puente permanece en servicio y cual es retirado.

4.0 ENSAYOS DE ACEPTACIÓN

De acuerdo a la especificación, el equipo de excitación está sujeto a inspección y pruebas en la fábrica de acuerdo al Plano de Inspección y Test, según la norma ANSI, IEEE, IEC, VDI/VDE. Los ensayos fueron distribuidos de la siguiente forma:

4.1 **Sistema de Excitación Completa:** fueron realizados los ensayos de “High Voltage Test” con tensión aplicada de 8 kV por 1 minuto; Fuentes de alimentación; Ensayos funcionales de los dispositivos de protección; Ensayos de supervisión y control; Tiempo de respuesta del AVR; Fuente DC para protección y control; Ensayo de pérdida total del sistema de excitación.

4.2 **Circuito de Potencia:** fueron realizados ensayos (Heat Run Test) de pérdida en la condición sin carga con la condición de tensión plena y corriente de campo reducida; Pérdida en la condición con carga, realizada con tensión reducida y corriente de campo 20% encima de la nominal y con solamente 50% del convertidor; Pérdida en los componentes; Pérdida en el convertidor.

4.3 **AVR (regulador de tensión Automático)**: Fue realizada la carga del firmware el Downloading del COB y programa de aplicación; ensayo de determinación de la función de transferencia del regulador; medición de la corriente de pulso de los tiristores, sistema de protección; sistema de comunicación; registrador de perturbaciones Indactic.

Una vez aprobados los ensayos en fábrica, los equipos fueron remitidos a Itaipu donde fueron realizados los ensayos de puesta en funcionamiento. Estos ensayos fueron satisfactorios y actualmente la Unidad 9A esta en la etapa de operación.

5.0 COMPARACIÓN ENTRE SISTEMA DE EXCITACIÓN DIGITAL MICROPROCESADO Y ANALÓGICO/DIGITAL

Se presenta un análisis comparativo entre el regulador de tensión de modelo analógico y componentes electrónicos discretos de las 18 unidades antiguas y los nuevos instalados en las unidades generadoras U9A y 18A que son de modelo digital microprocesado. En forma general podemos decir:

- *Flexibilidad*: En sistemas analógicos son difíciles de reconfigurar ya que hay que cambiar el hardware. En cambio en el microprocesado se reconfigura en el software.
- *Ruido, interferencias, et*: En sistemas analógicos. son difíciles de eliminar. Si la señal es amplificada los efectos no deseados se incrementan. En cambio en el microprocesado se eliminan casi por completo, no se ven aumentados al amplificar la señal
- *Los costos*: Depende de la aplicación, pero generalmente mucho menor en el modo microprocesado.
- *La seguridad*: En sistemas analógicos es difícil de implementar. En caso de que se quiera cambiar se necesita el cambio del hardware. En el microprocesador es fácil de implementar y muy fácil de mejorar. Si se descubre alguna falta de seguridad se cambia el software.

Las ventajas de la tecnología digital microprocesado del regulador actual consisten en:

- Redundancia total, duplicidad de funciones (AVR, Limitadores, PSS, Canal Manual).
- Circuitos de medición digitales utilizando filtros digitales insensibles a variaciones de temperatura y envejecimiento de componentes.
- Convertidores N - 50%
- Sistema adaptativo de estabilización de potencia.
- Circuito de regulación totalmente digitales (estabilidad, no necesita de calibraciones), todos los ajustes son numéricos, no existen potenciómetros.
- Circuito de Control Lógico (PLC) redundante (1 por canal) integrado en la electrónica de regulación.
- Modificaciones y mejorías se pueden hacer por intermedio de software sin necesidad de introducir relés auxiliares.
- A pesar del aumento de la complejidad y funcionalidad el cableado es bastante reducido debido al uso de field bus y cables de sistema agrupados.
- Linealidad perfecta de los circuitos de control del puente de rectificadores.
- Ecuilibración activa de corriente entre puentes, esto permite una división de corriente, entre puentes, mucho más precisa.
- Auto diagnóstico y mensajes de error permiten la localización de fallas de modo más rápido.
- Registrador de fallas y el momento de la ocurrencia, registrada en la memoria.
- Permite comunicación serial con el SDSC y con PC's remotos.
- Oscilógrafo incorporado y herramientas avanzadas para puesta en servicio (data Logger).

- Herramientas para puesta en servicio y mantenimiento (CMT, AVR View, etc.)
- Varias funciones de protección digital integradas al sistema de excitación.
- Asistencia Remota

5.0 - CONCLUSION

Se constata de los hechos, que los beneficios de la nueva tecnología con los recursos adicionales son enormes. Con el software cada vez más sofisticado y con el hardware que necesita ser más rápido, para mantener el nivel de confiabilidad constante. Todo esto lleva al aumento del número de funciones y recursos disponibles.

En la tecnología digital microprocesado la tasa de falla normalmente no esta asociada a ninguna causa especifica, durante su periodo de vida útil, siendo las fallas puramente aleatorias. Esto lleva a replantear la necesidad de hacer mantenimiento periódico.

El cambio de tecnología en la Itaipu, lleva consigo en forma obligada un cambio conceptual de la gerencia del mantenimiento. La periodicidad del mantenimiento preventivo, calibración, ajuste, ensayos, etc., debe ser re-evaluados con la utilización de nuevas tecnologías.

El sistema de excitación sería el equipo donde la disponibilidad de la unidad generadora es afectada directamente y el impacto de como debería ser el mantenimiento correctivo de un equipo de esta tecnología, que tiempo consumiría para llevarlo a la condición operativa, una vez que envuelve el software, como realizar la investigación si la falla fue por software o por hardware, se debe tener suficiente material de reserva etc . Todo esto va a exigir una capacitación y entrenamiento continuo.

Los años siguientes el personal técnico va a convivir con dos tipos de tecnologías hasta la migración total hacia la tecnología de punta con la modernización de las unidades antiguas que es un proceso irreversible.

6.0 – BIBLIOGRAFIA

- [1] VIII ENCUENTRO REGIONAL LATINOAMERICANO DE LA CIGRE, “Conceptos sobre modernización de centrales Hidroeléctricas”, Grupo CE11- Mayo 1999.
- [2] EDF’s experience in the repair and maintenance of hydro generators – J.M. Maujean – Water Power & Dam Construction – October 1989.
- [3] H. Paul Barringer, de Barringer & Associates, Inc., “Disponibilidad, Confiabilidad, Mantenibilidad y Capacidad”.
- [4] Excitation Systems Unit 9A -50 Hz and 18A - 60 Hz, « Instruction manual », Nro. Contractor 3BHS121005E81 ABB – Febrero 2003.