

## Sistema de Excitación Estática de Unidades Generadoras: Corriente Negativa, Sobrecorriente entre Puentes Convertidores, Alternativas de Solución

Raimundo López Ferreira  
Itaipu Binacional

Rodinei Justino  
Itaipu Binacional

Enzo Asilvera V.  
Itaipu Binacional

Raimundo López Ferreira  
Central Hidroeléctrica – Edificio de Producción, 3ºPiso  
Tel.: 061 599 3691 – E-mail: raimundo@itaipu.gov.py

### RESUMEN

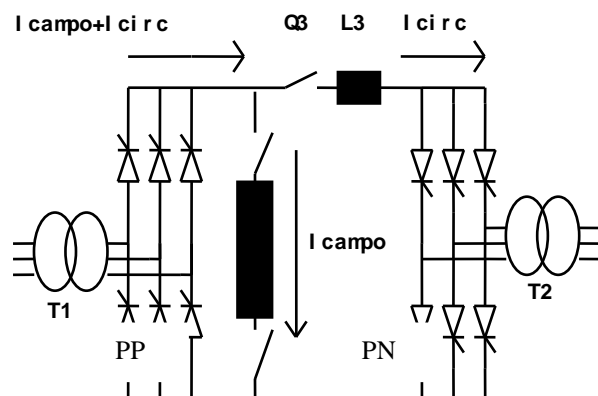
El sistema de excitación estática de las unidades generadoras de Itaipu, al contrario de lo que sucede con los demás equipamientos convencionales, puede ser controlada la corriente de excitación en la faja negativa a parte de la positiva, contando para esto de dos puentes convertoras (una positiva y otra negativa) manteniendo entre ellas una corriente de circulación ( $I_{circ.}$ ) Permanente de  $\cong 120A$ . Se presenta en este artículo un análisis y evaluación del desempeño del sistema, así como su principal problema que consiste en la sobre corriente, corriente negativa, entre puentes analizando las causas y las mejoras implementadas y alternativa de solución a ser consideradas.

**Palabras claves:** Excitación Estática - Puente de excitación negativa - sobrecorriente entre puentes - modificaciones adoptadas - análisis de solución.

### 1. INTRODUCCION

Este equipamiento cuenta con el recurso de controlar la corriente negativa en el rotor, la *corriente negativa de circulación permanente* es de  $\cong 120A$  como inversora y de 400 A como rectificadora.

El sistema de excitación estática en derivación que se describe, a seguir, en la Fig.1, exige un equipo separado para el inicio y el incremento de la excitación. Los convertidores (Puente Positivo - PP - y Puente Negativo - PN -), son alimentados a través



**Fig.01:** Configuración Puente convertidor, Positiva y Negativa.

de transformadores de excitación positiva (T1) y negativa (T2). La etapa de salida de los convertidores son interconectados entre sí en el lado correspondiente a la corriente continua por medio de un reactor ( $L3$ ) y un disyuntor ( $Q3$ ).

La mayor utilidad de la corriente negativa en la excitación es representada por la capacidad de sustentar cargas capacitivas relativamente grandes tales como bancos de capacitores que permanecen conectados ante bloqueo de la convertora HVDC (Sector 50 Hz) y desconexión de la carga en la extremidad de líneas muy largas (Sector 60 Hz). La velocidad de tensión de contra excitación es prácticamente instantánea, en cuanto que la corriente es relativamente lenta debido a la constante de tiempo del campo. En las máquinas actuales el tiempo para que la corriente de excitación llegue desde el valor de máxima

carga hasta el valor de cero es de 0,4 seg. ( Este valor no cambia estando o no el puente negativo).

La presencia de puente de corriente Negativo es útil, para utilizar al máximo al máximo la disponibilidad de potencia reactiva capacitiva del generador.

## 2. PRINCIPALES CARACTERISTICAS TECNICAS

En el { HYPERLINK "ANEXO 01 CE11.04.doc" } presentamos las principales características técnicas que se detallan en la **Tabla I**.

El regulador de tensión - sistema de excitación estática para su puesta en servicio requiere de rigurosos ensayos estáticos y dinámicos con alimentación en forma independiente (13.8 kV), así como ensayos con maquina en vacío y con carga.

## 3. PROBLEMAS PRESENTADOS EN OPERACIÓN

Desde la operación de las primeras Unidades Generadoras con el sistema de corriente continua HVDC - Furnas, sistema de corriente alterna de 50 Hz (Ande) y de 60 Hz (Furnas), este sistema de excitación presentó problemas de sobre corriente entre puentes provocando la desconexión de la unidad, antes perturbaciones externas y en ciertas condiciones sin causa aparente.

La Tabla II, describe las principales ocurrencias del sistema de excitación – sobrecorriente puente negativo durante la operación del mismo.

MAQUINAS	Nº DE FALLAS	TIPOS DE FALLAS
U# 01	02	Falla en la conmutación en el HVDC
U# 02	01	ídem
U#03	02	bloqueo de polo en HVDC
U#05	03	bloqueo de polo en HVDC
U#08	05	flash over en la GIS
U#14	01	flash over en la GIS
U#15	02	ídem
6 Unidades	01	Perturbación en las LT's de 60Hz
8 Unidades	01	Perturbación en las LT's de 60Hz

**TABLA II:** principales fallas del Puente Negativo

Estas fallas, de origen externo a las unidades generadoras, se deben a varios factores y a diferentes causas con el mismo efecto que es la sobrecorriente entre puentes de tiristores.

## 4. ANALISIS Y TENTATIVAS DE SOLUCION

Como una primera alternativa de solución, se procedió a implementar los siguientes:

➤ Modificación del reactor **L3** (10mHy), con capacidad de saturación mayor y aumento del pick-up del relé de sobre corriente del puente negativo, con el fin de permitir sobre corriente transitorio, manteniéndolo a valores seguros.

➤ Modificación del proyecto como puede ser observada en la Fig.02. Esta modificación parte de la siguiente premisa:

**I.** Ambos puentes (positivo y negativo) deberán conducir durante el disturbio, Deformación de la forma de onda.

**II.** Con el fin de limitar la corriente de circulación ( $I_{circ.}$ ) Las salidas de tensiones sobre los puentes deberán permanecer  $\cong 0V$ .

Esta solución llamado **Free-run**, consiste en un bloqueo de los pulsos en las fases R y S de ambos puentes y disparo continuo en la fase T.

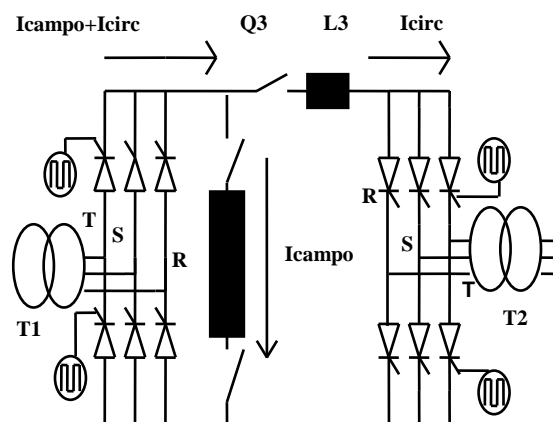
La operación se inicia una vez que la corriente de circulación excede  $I_{circ.} = 650 A - 1 ms$ , ésta corriente es detectada por la protección y a continuación realiza:

- Bloqueo de todos los pulsos en la etapa intermedia de amplificación.

- Disparo o inicio de operación de un generador de pulso (stand by ) que habilita los pulsos para las fases T(+) y T(-) del puente positivo y negativo. La operación Free-run es establecida dentro del tiempo máximo de 7 ms.

- Bloqueo de la unidad de control de pulso positivo. Operación como inversora de la unidad de control de pulso negativo.

La operación Free-run es desactivada una vez que la corriente de circulación ( $I_{circ.}$ ) entre puentes sea  $\leq 300 A$ . Sí permanece el Free-run por más de 5 seg. en operación, ocurrirá la desconexión de la unidad generadora



**Fig. 02:** puente convertora en la operación Free-run

Este sistema fue sometido a test durante 3 meses y durante ese tiempo fue analizada su influencia en la estabilidad y la sustentación de la tensión durante disturbio.



El problema de éste tipo de solución consiste, en que durante la operación del mismo la regulación de tensión permanece “paralizada” durante la perturbación externa, perjudicando de esta manera la estabilidad y las sobretensiones que alcanzan límites no admisibles.

Simulaciones efectuadas con dos unidades generadoras alimentando, a través de dos líneas de transmisión al sistema HVDC (Furnas) y con la siguiente perturbación: Bloqueo de la convertidora y una unidad generadora en Itaipu, con una unidad en operación Free-run además con permanencia de los filtros (698 MVar). En este tipo de falla se produce sobretensiones superiores a 1.4 pu.

El Free-run ∴ no es aceptable como solución fundamentalmente por dos razones:

La excitación no puede permanecer inhibida cuando hay cortos circuitos externos al generador ó disturbio, mismo que sea por 100 ms.

No es aceptable la reducción de la tensión de “ceiling” (tensión máxima) del campo después de la actuación del Free-run.

Esta fue la razón por la cuál éste tipo de solución fue rechazada.

Después varias pesquisa se presentó una segunda alternativa de solución al problema, para eso se procedió a realizar un ensayo de corto circuito monofásico (fase S a tierra) en el lado de alta tensión del transformador (500 kV), con el fin de producir fuertes asimetrías en la tensión de alimentación del sistema de excitación.

Este ensayo demuestra con claridad, que el sistema de excitación en la situación actual del proyecto no responde antes fallas externas consideradas normales, por otro lado mediante monitoreo efectuado por registradores digitales de perturbación se constata que las fallas se deben a:

- Que ambos puentes operan durante el disturbio en el modo rectificador, consecuentemente esto provoca una elevada tensión sobre el reactor (L3), haciendo circular inmediatamente una elevada corriente entre puentes hasta la actuación de la protección, con la consiguiente desconexión de la unidad generadora.
- La causa de que ambos puentes actúen en el modo rectificador se debe a la asimetría producida en la tensión de sincronismo, esta tensión es utilizada para la generación de pulso de disparo. Esta señal de sincronismo es retirada de un filtro RC pasivo, que durante disturbio genera una componente de continua de tal forma que provoca pulsos erróneos en los puentes.

En función, de la detección de la causa del problema de sobre corriente, se procedió a la modificación del proyecto.

## 5. ENSAYOS REALIZADOS

Después del ensayo de Corto Circuito realizado, fueron implementadas varias modificaciones:

- ✓ Retirar la tensión de los mismos TP’s donde se toma la información de la tensión actual del AVR.
- ✓ Sustitución del generador de pulso analógico por otra digital.
- ✓ Introducción del modulo Detector de Asimetría que reducirá el ángulo de disparo máximo del puente positivo de 20° para 47°, limitando la tensión de “ceiling” en 72% ( $\cos 47^\circ / \cos 20^\circ$ ) de la tensión no limitada.
- ✓ Modificación del Limitador dv/dt, por la cuál fue necesario implementar un “circuito acelerador” para la señal de control del puente negativo de tal forma a tornar más rápida su actuación, evitando “overshoot”, cuando la señal de control (Uc-) pasa de posición rectificadora a inversora ( cruce por cero) .

En la Tabla III, se observa los valores de ángulo de disparo finalmente ajustado en el campo sin asimetría y con asimetría simulando corto circuito en los bornes del generador y verificado posteriormente con ensayo.

PUENTE POSITIVO		PUENTE NEGATIVO	
s/ asimetría	c/ asimetría	s/ asimetría	c/ asimetría
$\alpha_{\min}=21^\circ$	$\alpha_{\min}=43^\circ$	$\alpha_{\min}=30^\circ$	$\alpha_{\min}=53^\circ$
$\alpha_{\max}=140^\circ$	$\alpha_{\max}=122^\circ$	$\alpha_{\max}=148^\circ$	$\alpha_{\max}=136^\circ$
*	*	*	*

(\*): Ajustado con corriente de campo nominal (Ifn).

**TABLA III:** Ajuste de ángulo de disparo con y sin asimetría.

Fueron constatados por ensayo ( cortocircuito fase / tierra en el lado de 500 kV) que:

La operación crítica del puente se presenta al incursionar la señal en el puente negativo desde la operación rectificadora a inversora la cual es solucionada con el “ circuito acelerador ”.

El “ detector de asimetría “ resuelve el problema de la posibilidad de falla en la conmutación durante un disturbio, que por otro lado afecta a la performance del equipo al reducir la tensión de “ceiling “.

La corriente de circulación queda limitada en 672 A.

Estas medidas tuvieron resultados satisfactorios con fallas próximas a las unidades generadoras, como ser corto circuito o falla en la GIS – SF6.

No fue posible evaluar el Regulador de Tensión en condiciones de sobretensiones en el sistema eléctrico



asociado a fuertes  
{ EMBED Word.Picture.8 } distorsiones en la onda de  
tensión (módulo y fase) .

## 6. ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES

FIG.03 :Sistema de 750 kV 60 Hz de Furnas

En el sistema de 750 kV de Furnas<sup>1</sup>, el 26/05/98 debido a fuerte temporal con innumerables descarga eléctrica en el sistema de 750 kV, Fig.03, ocurrieron fallas monofásica envolviendo la fase B de la línea IVAIPORA (IV)– ITABERA (IA) circuito 1 y la fase C circuito 2, que provocaron la apertura de los 2 circuitos en ambas terminales por actuación de sus protecciones. Inmediatamente después de la desconexión de los circuitos 1 y 2, una nueva descarga provocó un corto circuito entre las fases A, B y tierra en la línea ITABERA – TIJUCO PRETO (TP), circuito 1 y luego a Seguir una falla monofásica (C) en la barra de la SE ITABERA, provocando la apertura de la línea de 750 kV Itaberá – Tijuco Preto 1 y 2.

Esta perturbación en el sistema de 750 kV, provocó fuertes distorsiones de la forma de onda de tensión en Itaipu 60 Hz a seguir desconectaron 6 unidades generadoras por actuación de las protecciones de sobrecorriente de puentes negativas. Estas unidades fueron desconectadas cerca de 20 a 30 seg. , después de la eliminación de la falla en las dos líneas de 750 kV, por lo tanto antes de la actuación de la lógica 8.

Por causa de la falla en el puente negativo, hubo riesgo de auto - excitación debido a que en Itaipu 60 Hz permaneció sincronizada un número de maquina inferior al mínimo esperado ( 3).

Posterior a esta falla en Agosto del mismo año, ocurrió una descarga disruptiva ( Flashover en la GIS – SF6 60 Hz) en la fase B del seccionador, produciéndose una falla monofásica, eliminada en aproximadamente 3 ciclos por las protecciones de barra. Después de 20 ms ocurrió un cortocircuito en la fase C y tierra en la SE – ITABERÁ<sup>2</sup> provocado por descarga atmosférica en el vano común a las LT's 750 kV Ivaipora – Itaberá II e Itaberá – Tijuco Preto II, evolucionando hasta convertirse en un corto circuito Trifásico.

La falla provoca la desconexión de 8 unidades generadoras en 60 Hz, que estaban en operación por la actuación del puente negativo. Hubo varias actuaciones en la línea que provocó la apertura total del sistema de 750 kV.

En estas dos ocurrencias, hubo sobrecorriente en el puente negativo antes fallas externas a las unidades generadoras.

## 7. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Sobre la base de un *estudio preliminar*, es analizadas las posibles causas de las fallas ocurridas ante esta nueva

situación arriba mencionada y basándose en estudios del comportamiento del regulador de tensión utilizando registros de otras perturbaciones, y a través de simulaciones digitales en consecuencia se recomienda soluciones generales y viables a ser adoptadas.

Las *constataciones* presentadas, como resultado del análisis del estudio arriba mencionado, con respecto a las unidades de 60 Hz son:

- ✓ La *tasa de variación* de la corriente de circulación entre puente es aproximadamente dos veces más rápido que la de 50 Hz.
- ✓ Como consecuencia de la anterior, variación de la corriente de circulación de 0 a 1200A en menos de 4ms, *el regulador de corriente de circulación* no consigue accionar antes, produciéndose la sobrecorriente de circulación con el consecuente disparo de la unidad.

Antes esta situación se *propone* las siguientes alternativas<sup>3</sup>:

### 7.1 Alternativa A

Modificación del sistema del regulador de tensión que consiste en:

- Eliminación de la corriente de circulación, en operación normal solo el puente positivo actuaría, con *puente negativo bloqueado*.
- El puente negativo entraría en acción cuando la *corriente positiva fuera cero* y cuando las condiciones del sistema así lo exigen debido a una prolongada sobretensión.
- El control del puente sería realizado por un tipo de lógica llamado de *detección cero de corriente*.

Esta modificación no es viable, por el gran impacto que representa para el tipo de regulador de tensión que tiene Itaipu, con *tecnología analógica*. Si se optara por este tipo de solución se debería realizar un estudio más global que incluya la modernización del Sistema de Excitación de las Unidades generadoras.

Esta primera alternativa de solución, debería ser tenido en cuenta en el proyecto del sistema de excitación de las nuevas Unidades Generadoras 9A y 18A.

### 7.2 Alternativa B

Modificación del sistema actual de tal forma de bloquear el puente negativo (al alcanzar la corriente de circulación el valor de  $\cong 900$  A) y no disparar el disyuntor de campo **Q2** en caso de sobrecorriente de circulación (**Icirc.**).



COMITÉ NACIONAL PARAGUAYO

Además el puente positivo operaría en el modo inversor durante aproximadamente **20 milisegundos**, tiempo estimado para que la corriente en el inductor **L3** del puente negativo llegue al valor de 0 A.

Esta propuesta se adecua al regulador de tensión de versión analógica que se tiene en Itaipu y el impacto de las modificaciones es relativamente bajo.

### 7.3 Alternativa C

Esta alternativa, es un complemento de la **B**, que consiste en aumentar el reactor L3 de tal forma de aumentar la impedancia durante transitorio con el fin de frenar el aumento de la corriente de circulación entre puente (**Icirc**).

Esta es una solución mas conservadora, pero con mayor dificultad para su implementación física.

## 8. CONCLUSIÓN

☞ Existen **problemas de sobrecorriente del puente negativo** del Sistema de Excitación - Regulador de Tensión, como consecuencia el puente negativo se encuentra actualmente desconectado hasta la implementación de la solución.

☞ La desconexión del puente negativo implica restricciones adicionales a la operación del sistema a fin de minimizar los riesgos de autoexcitación<sup>4</sup> de las unidades generadoras. Considerando esta situación, más la entrada del 3<sup>er</sup> circuito de 750 kV hasta Ivaipora, y con los criterios de seguridad utilizados en Itaipu, se adoptaron medidas que limita la acción de la *lógica 8 (Esquemas de Control de Emergencias, ejecutadas por Controladores Lógicos Programables)*.

☞ El camino crítico dentro del proceso de control constituye el *regulador de corriente de circulación*, el cual esta en relación directa con la dinámica de los tiempos del convertidor. Dependiendo de la velocidad de respuesta de este circuito para evitar la sobrecorriente.

☞ Concluir los estudios con *Simulaciones digitales*, considerando las *peores condiciones* con el sistema interconectado, que *no fueron* considerados en el análisis preliminar cuyo objetivo es verificar y optimizar los circuitos a ser modificados.

☞ *Estudio Detallado* de las modificaciones de la electrónica de regulación y *verificación funcional* del conjunto.

☞ Basándose en los resultados del estudio, **implementar** la mejor alternativa de solución para todas las condiciones de

operación de la unidad generadora con el sistema interconectado, en la *situación actual y futura*.

## 9.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Reactive power control in electric systems T.J.MILLER. "Symposium of static excitation and automatic voltage regulation of synchronous generators" Recife, may 1981.
- Dr. N.S. GEHLOT, intensive course of "Electric controls for hidro power generation".
- Raimundo López F., Relatorio Técnico DMA.T/DEEL.T/008/89. Itaipu Binacional
- Renato Taborda R., Rodinei Justino. Relatorio Técnico N° 6210.50.19755-P-R0 "*Ensayo de corto circuito de la unidad 15 para evaluación del desempeño del sistema de excitación*". Itaipu Binacional
- Raimundo Lopez F., Relatorio Técnico N° 9308.69.19508.E.R0. "*Sistema de Excitación - puente negativo : Ensayos - Análisis - conclusión*". Itaipu Binacional.
- Raimundo López Ferreira, Relatorio Técnico N° 6212-50-19.505-E-R0 "*Análisis, consideraciones y alternativas para la solución del problema de sobrecorriente del puente negativo*". SM.DT / SMI.DT / SMIN.DT Itaipu Binacional, 10/09/00.

<sup>1</sup> : Comisión Mixta de Operación **Informe N° CMO/GE – 03/IAP/065**, aprobado por el GE – 03 el 12/11/98.

<sup>2</sup> : Comisión Mixta de Operación **Informe N° CMO/GE – 03/IAP/066**.

<sup>3</sup> : Raimundo López Ferreira, Relatorio Técnico N° 6212-50-19.505-E-R0 "*Análisis, consideraciones y alternativas para la solución del problema de sobrecorriente del puente negativo*". SM.DT / SMI.DT / SMIN.DT Itaipu Binacional, 10/09/00.

<sup>4</sup> : En el {HYPERLINK "ANEXO 02 CE11.04.doc"}, valores de corriente negativa con energización de la Línea de 60 Hz.