

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

ACUERDO No. 634 2 de mayo de 2013

Por el cual se establecen los requerimientos para la obtención y validación de parámetros del generador y los modelos del sistema de excitación, control de velocidad/potencia y estabilizadores de sistemas de potencia de las unidades de generación del SIN, y se definen las pautas para las pruebas y reajustes de los controles de generación

El Consejo Nacional de Operación en uso de sus facultades legales, en especial las conferidas en el Artículo 36 de la Ley 143 de 1994, el Anexo General de la Resolución CREG 025 de 1995, su Reglamento Interno, y según lo acordado en la reunión No. 389 del 2 de mayo de 2013 y,

CONSIDERANDO

1. Que en el numeral 7.6 del Código de Operación de la Resolución CREG 025 de 1995 se prevé que *"El CND en cualquier momento puede solicitar a cualquier empresa generadora que certifique los parámetros utilizados en el Planeamiento Operativo con el fin de demostrar que cumple con los declarados."*
2. Que en el numeral 3 del Anexo CO2 del Código de Operación se prevé que entre otras obligaciones los agentes generadores deben reportar al CND los modelos que representan los siguientes sistemas: Sistema de Excitación, Estabilizador de Potencia, Gobernador de Velocidad y Turbina.
3. Que de acuerdo con lo establecido en el numeral 13.1 del Código de Conexión, los generadores deben proveer control de tensión y potencia reactiva, control de frecuencia mediante regulador de velocidad, estabilización de potencia y regulación secundaria de frecuencia con AGC.
4. Que el Acuerdo 526 de 2011 define los tipos de pruebas para las plantas o unidades de generación que están autorizadas para desviarse, entre los que se encuentra: sistemas estabilizadores de potencia -PSS-, ajuste y/o verificación de regulador de velocidad de turbina y ajuste y verificación del regulador de voltaje o tensión.
5. Que los reguladores de velocidad/potencia, los sistemas de excitación y estabilizadores de sistemas de potencia, son determinantes para la estabilidad del SIN.
6. Que mediante el Acuerdo 552 de 2011 se establecieron los requerimientos para los modelos, pruebas y ajustes de los controles de excitación, velocidad/potencia y estabilizadores de sistemas de potencia de las unidades de

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

generación del SIN y se definieron las pautas para el desarrollo de un plan piloto. en algunas unidades del SIN.

7. Que el Grupo de Controles de Generación – GCG – del Subcomité de Estudios Eléctricos, tiene entre sus objetivos unificar criterios y desarrollar recomendaciones técnicas que permitan atender las necesidades que se presenten relacionadas con el tema de control de generación.

8. Que el GCG en su reunión del 19 de septiembre de 2012, teniendo en cuenta los resultados del plan piloto a que hace referencia el Acuerdo CNO 552 de 2011, consideró necesario adelantar los trabajos requeridos para la validación de los parámetros de los generadores.

9. Que el Subcomité de Estudios Eléctricos en su reunión 209 del 18 de abril de 2013 dio su concepto favorable al presente Acuerdo.

10. Que el Comité de Operación en su reunión 235 del 25 de abril de 2013 recomendó al CNO la expedición del presente Acuerdo.

ACUERDA

PRIMERO. DEFINICIONES. Para el correcto entendimiento de este Acuerdo, se define:

Parámetros validados de los generadores: son los parámetros del modelo del generador que permiten representar su respuesta real a eventos en el sistema o pruebas de campo.

Modelo validado: es el modelo matemático en el que se ha comprobado la capacidad de reproducir dentro de márgenes razonables el comportamiento del: Regulador de velocidad, Sistema de excitación y Estabilizador del Sistema de Potencia asociado, mediante la contrastación entre ensayos de campo o eventos reales y la simulación de condiciones equivalentes.

Control de generación: es uno de los siguientes controles: regulador de velocidad / potencia, sistema de excitación, y estabilizador del sistema de potencia asociado.

Estabilidad: es la característica de respuesta del sistema en la que se verifica que las señales de salida de los modelos validados son amortiguadas en el tiempo ante señales de entrada escalón, para los modos y condiciones operativas analizadas.

Modelo Estable: es el modelo en el que se verifica que las señales de salida son amortiguadas en el tiempo ante señales de entrada escalón, para todos los modos y condiciones operativas analizadas.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

Modelo tipo 6 máquina síncrona: es un modelo matemático de la máquina síncrona representado por 6 variables de estado. Los modelos de orden superior contienen más de 6 variables de estado y representan con mayor fidelidad el comportamiento dinámico del generador.

CV: Ceiling Voltage (Voltaje de Techo): es el límite que corresponde a la máxima y mínima tensión de campo que puede alcanzar el sistema de excitación.

OEL: Over Excitation Limiter (Limitador de sobre excitación).

UEL: Under Excitation Limiter (Limitador de sub excitación).

RCC : Reactive Current Compensation (Compensación de corriente reactiva).

CCC : Cross Current Compensation (Compensación de corriente cruzada).

V/Hz : Limitador de sobreflujo magnético del generador. Limita la relación V/Hz.

SCL: Stator Current Limiter (Limitador de corriente del estator).

LPQ: es el limitador de ángulo de carga del sistema de excitación.

SEGUNDO. PLAZO DE MODELAMIENTO DE LAS UNIDADES DE LA ETAPA 1.

Los agentes generadores deben suministrar al CND un informe con los parámetros validados de los generadores y los modelos validados de los controles asociados a cada una de las unidades de generación¹ de: San Carlos, Miel I, Guavio, Paraíso, La Guaca, Guatapé, Porce II, Porce III, Chivor, Alto Anchicayá, Urrá, Termotasajero, Termocentro, unidades con turbinas de combustión de Tebsa y Flores I. El plazo para la entrega de este informe será hasta el 30 de mayo de 2014.

Se recomienda que la validación de los parámetros del generador y sus controles asociados, sea realizada en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo dicha validación puede presentarse en otras herramientas de simulación dinámica.

PARÁGRAFO: A partir de la fecha de entrada en vigencia del presente Acuerdo, los agentes generadores definirán un cronograma de trabajo para la entrega de los modelos validados, al cual se le hará seguimiento en el Grupo de Controles de Generación, y deberá estar sujeto al plazo máximo establecido en el presente artículo.

TERCERO. PLAZO DE MODELAMIENTO DE LAS UNIDADES HIDRÁULICAS DE LA ETAPA 2.

Los agentes generadores de las unidades hidráulicas existentes, despachadas centralmente, no mencionadas en el Artículo Segundo del presente Acuerdo, deben suministrar al CND un informe con los parámetros validados de los generadores y los modelos validados de los controles asociados a las unidades

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

de generación¹. El plazo para la entrega de este informe será hasta el 31 de octubre de 2014.

Se recomienda que la validación de los parámetros del generador y sus controles asociados, sea realizada en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo dicha validación puede presentarse en otras herramientas de simulación dinámica.

PARÁGRAFO: A partir de la fecha de entrada en vigencia del presente Acuerdo, los agentes generadores definirán un cronograma de trabajo para la entrega de los modelos validados, al cual se le hará seguimiento en el Grupo de Controles de Generación, y deberá estar sujeto al plazo máximo establecido en el presente artículo.

CUARTO. PLAZO DE MODELAMIENTO DE LAS UNIDADES TÉRMICAS DE LA ETAPA 2. Los agentes generadores de las plantas térmicas existentes despachadas centralmente, a partir de 250 MW, plantas en ciclo combinado o plantas que cuenten con unidades térmicas a partir de 100 MW, y que no están mencionadas en el Artículo Segundo del presente Acuerdo, deben suministrar al CND un informe con los parámetros validados de los generadores y los modelos validados de los controles asociados a las unidades de generación¹. El plazo para la entrega de este informe será hasta el 31 de octubre de 2014.

Se recomienda que la validación de los parámetros del generador y sus controles asociados, sea realizada en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo dicha validación puede presentarse en otras herramientas de simulación dinámica.

PARÁGRAFO: A partir de la fecha de entrada en vigencia del presente Acuerdo, los agentes generadores definirán un cronograma de trabajo para la entrega de los modelos validados, al cual se le hará seguimiento en el Grupo de Controles de Generación, y deberá estar sujeto al plazo máximo establecido en el presente artículo.

QUINTO. PLAZO DE MODELAMIENTO DE LAS UNIDADES TÉRMICAS DE LA ETAPA 3. Los agentes generadores de las unidades térmicas existentes despachadas centralmente, no mencionadas en los Artículos Segundo y Cuarto del presente Acuerdo, deben suministrar al CND un informe con los parámetros validados de los generadores y los modelos validados de los controles asociados a las unidades de generación¹. El plazo para la entrega de este informe será hasta el 31 de enero de 2015.

Se recomienda que la validación de los parámetros del generador y sus controles asociados, sea realizada en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo dicha validación puede presentarse en otras herramientas de simulación dinámica, con base en lo establecido en el Artículo Décimo Segundo del presente Acuerdo.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

PARÁGRAFO: A partir de la fecha de entrada en vigencia del presente Acuerdo, los agentes generadores definirán un cronograma de trabajo para la entrega de los modelos validados, al cual se le hará seguimiento en el Grupo de Controles de Generación, y deberá estar sujeto al plazo máximo establecido en el presente artículo.

SEXTO. MODELAMIENTO DE UNIDADES NUEVAS Y SUS CONTROLES. Los agentes generadores de las unidades hidráulicas y térmicas despachadas centralmente que entren en operación comercial en fecha posterior a la vigencia de este Acuerdo, deberán declarar los parámetros del generador y los modelos de los controles de generación antes de su entrada en operación comercial, en concordancia con lo establecido en la reglamentación vigente. Adicionalmente en un plazo no mayor a 90 días calendario después de su entrada en operación comercial, deberán reportar al CND los parámetros validados de los generadores y los modelos validados de los controles asociados a las unidades de generación¹.

Se recomienda que la validación de los parámetros del generador y sus controles asociados, sea realizada en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo dicha validación puede presentarse en otras herramientas de simulación dinámica.

SÉPTIMO. VENCIMIENTO DE PLAZOS. En el evento de que un agente generador no pueda cumplir con los plazos de entrega de la información establecidos en los Artículos Segundo, Tercero, Cuarto, Quinto y Sexto del presente Acuerdo, deberá solicitar la aprobación de la prórroga del mismo y presentar la justificación correspondiente de tal situación ante el Subcomité de Estudios Eléctricos y el Comité de Operación, los cuales recomendarán o no al CNO la aprobación de la solicitud de prórroga. De ser aprobada, el CNO emitirá el Acuerdo correspondiente.

Para todos los casos, el informe entregado por los agentes generadores debe contener como mínimo la información solicitada en el Anexo 1 del presente Acuerdo.

OCTAVO. ACTUALIZACIÓN DE MODELOS DE CONTROLES DE GENERACIÓN. Los agentes generadores deberán actualizar los modelos de los controles de generación y enviar al CND la información de los modelos validados en los siguientes plazos y casos:

- En un plazo no mayor a 30 días calendario después de que una unidad tenga un cambio en un control de generación (estabilizador del sistema de potencia, sistema de excitación o regulador de velocidad/potencia).

¹ Los modelos validados requeridos corresponden a: Regulador de Velocidad/potencia, Sistema de Excitación, y Estabilizador del Sistema de Potencia asociado.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

- Al menos una vez cada 5 años, a partir de la recepción a satisfacción por parte del CND de la información de los modelos de controles validados, los agentes generadores deben demostrar que los modelos entregados al CND continúan siendo válidos, mediante la realización de pruebas tipo escalón de pequeña señal en las referencias del sistema de excitación y el gobernador de velocidad / potencia. Igualmente, se deben realizar pruebas para comprobar la validez de los modelos de los limitadores del sistema de excitación y el PSS, en las que se garantice la actuación de dichos dispositivos.

Los agentes generadores deben enviar los datos que permitan reconstruir las curvas simulada y real obtenidas durante las pruebas. Esta información debe ser enviada en formato de texto (.txt) con columna de tiempo e indicando el nombre de las variables y sus correspondientes unidades.

Las pruebas que deben mostrar la validez de los diferentes modelos, deben realizarse en condiciones de vacío y para tres niveles de carga de la unidad, máxima, media y mínima. Las pruebas son las siguientes:

- Escalón de pequeña señal (2%) en la tensión de referencia del AVR, con y sin PSS.
- Escalón de pequeña señal (5%) en la frecuencia de referencia del regulador de velocidad / potencia de la unidad.
- Escalones en la tensión de referencia del AVR que lleven hasta la actuación de los limitadores de sub y sobre-excitación del generador.

Las curvas y los datos para reconstruir las curvas que deben ser enviados como mínimo para ratificar la validez de los modelos, son los correspondientes a las siguientes variables:

- Tensión en terminales.
- Tensión de campo.
- Potencia Activa.
- Potencia Reactiva.

En caso de que se compruebe un comportamiento diferente entre el modelo del generador o sus controles respecto a la respuesta real, los modelos deberán ser ajustados apropiadamente, para asegurar su validez. En este caso el agente tendrá 90 días calendario para entregar un nuevo informe ajustando los modelos que presentan diferencias.

En todos los casos el CND enviará al agente una comunicación oficial que certifica la recepción a satisfacción de la información de los modelos validados, fecha a partir de la cual se cuenta el periodo de 5 años para el nuevo reporte.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

NOVENO. ACTUALIZACIONES DE LOS PARÁMETROS DEL GENERADOR. Los agentes deberán enviar al CND la información de los parámetros validados del generador, en un tiempo no mayor a 30 días calendario después de que una unidad tenga una modificación en la turbina, núcleos o bobinados del estator o del rotor, que afecten los parámetros físicos o eléctricos del conjunto turbina – generador. El modelo del generador a ser usado y los parámetros del conjunto turbina – generador sujetos a verificación son los relacionados en el Artículo Decimosegundo.

DÉCIMO. ESTABILIDAD DE LOS MODELOS VALIDADOS. Los agentes generadores deberán verificar las condiciones de estabilidad de los modelos validados de los controles de generación asociados a sus unidades, en modo normal de operación (por ejemplo, modo potencia, modo frecuencia) bajo las siguientes condiciones:

Con las unidades sincronizadas a la red: se evalúa la estabilidad de los modelos de los controles de generación en condiciones de máxima, media y mínima generación.

Operación en red aislada: Para las unidades hidráulicas debe verificarse también la estabilidad del generador en el modo de control por potencia, simulando su operación en red aislada, utilizando para ello el modelo validado del regulador de velocidad y los parámetros validados del generador. En el Anexo 2 se presenta la metodología propuesta para la realización de estas pruebas.

Se deben enviar al CND los resultados de las pruebas realizadas por el agente para verificar la estabilidad de las unidades simulando su operación en red aislada.

DÉCIMOPRIMERO. CONDICIONES PARA REAJUSTE DE REGULADORES DE VELOCIDAD DE PLANTAS HIDRÁULICAS. En caso de ser necesario reajustar el regulador de velocidad para garantizar su estabilidad, los agentes generadores deben:

- Realizar simulaciones utilizando el modelo validado, para determinar los ajustes requeridos de forma que la unidad sea estable en simulación de red aislada y cumpla con el servicio de regulación primaria.
- Los nuevos ajustes deben ser implementados en el regulador de velocidad para evaluar mediante pruebas en campo si la unidad responde adecuadamente a la prestación del servicio de regulación primaria, acorde con lo establecido en la reglamentación vigente.
- En caso de que los ajustes no resulten satisfactorios, se deben reevaluar los mismos e iniciar de nuevo el proceso mediante la verificación de la estabilidad de la unidad en modo potencia, simulando su operación en red aislada.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

- Una vez el agente generador implemente los reajustes definidos para el regulador de velocidad, se requiere realizar pruebas de AGC para las unidades que prestan dicho servicio, dado que las unidades pierden su elegibilidad cuando se realizan reajustes en los reguladores de velocidad.
- En el Anexo 2 se presenta la metodología propuesta para la realización de las pruebas en simulación de red aislada, con el objetivo de garantizar su estabilidad.

DECIMOSEGUNDO. PARÁMETROS REQUERIDOS DEL GENERADOR. Deben determinarse los parámetros del modelo del generador que mejor representen la dinámica del mismo, considerando un modelo de máquina sincrónica tipo 6² o superior.

Como mínimo se deben determinar, a través de pruebas en sitio, los siguientes parámetros:

Reactancia sincrónica de eje directo (x_d [p.u])

Reactancia transitoria de eje directo (x'_d [p.u])

Reactancia subtransitoria de eje directo (x''_d [p.u])

Reactancia sincrónica de eje de cuadratura (x_q [p.u])

Reactancia transitoria de eje de cuadratura (x'_q [p.u])

Reactancia subtransitoria de eje de cuadratura (x''_q [p.u])

Constante de tiempo transitoria de eje directo de circuito abierto (t'_{do} [s])

Constante de tiempo transitoria de eje de cuadratura de circuito abierto (t'_{qo} [s])

Constante de tiempo subtransitoria de eje de cuadratura y de circuito abierto (t''_{qo} [s])

Constante de inercia (H [s], con base en MVA y kV nominales del generador)

Curva tabulada de saturación en vacío del generador (Corriente de excitación Vs. Tensión Nominal en vacío ([p.u])

Tipo de rotor (polos salientes, liso)

Los parámetros referidos y las bases utilizadas para el cálculo en p.u. deberán ser reportados junto con los resultados y la metodología empleada para obtención de estos parámetros.

Para definir la validez del modelo del generador y sus parámetros correspondientes, la reproducción de las diferentes pruebas realizadas por el

² El modelo tipo 6 de la máquina sincrónica representado por 6 variables de estado corresponde al usado por la herramienta de simulación utilizada por el CND según [1]. La descripción detallada de este modelo, y modelos de orden superior se encuentra en [1], [2] y [3].

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

agente se hará en la herramienta de simulación dinámica del CND. Los resultados de las simulaciones serán comparados con los resultados de las pruebas en campo y se aplicarán los índices de evaluación del Anexo 3 del presente Acuerdo con el fin de verificar la validez de los modelos.

DECIMOTERCERO. ENTREGA DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE LOS CONTROLES DE GENERACIÓN Y PARÁMETROS DEL GENERADOR. El agente generador mediante comunicación oficial debe enviar al CND en medio magnético la siguiente información:

- Informe de resultados al CND, donde se describan la metodología utilizada, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en el proceso de validación de los modelos de control y los parámetros del generador.
- Datos necesarios para reproducir los registros de pruebas y las simulaciones en formato de texto (.txt).
- Se recomienda entregar los modelos del generador y sus controles asociados en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo estos pueden ser entregados en otras herramientas de simulación dinámica.

DECIMOCUARTO. REVISIÓN DEL INFORME DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE LOS CONTROLES DE GENERACIÓN Y PARÁMETROS DEL GENERADOR. El informe entregado por el agente debe contener como mínimo la información solicitada en el Anexo 1 del presente Acuerdo. En caso de que el agente no presente la información allí requerida, el CND le informará al agente dicha situación, para que este en un plazo de 30 días calendario contados a partir de recibida la comunicación, envíe al CND el informe incluyendo los datos faltantes. Si para la segunda entrega del informe, persiste la omisión de envío de información, esta situación será reportada al CNO.

Asimismo, para evaluar la calidad de los modelos entregados por el agente, el CND verificará que exista correspondencia entre las curvas comparativas reales del sistema y las obtenidas con el modelo validado, teniendo en cuenta los índices de evaluación que se definen para estas curvas en el Anexo 3 del presente Acuerdo.

Para cumplir con los requerimientos de los modelos validados, el agente generador debe realizar pruebas de validación en las que se pueda contrastar la respuesta del sistema real con la simulada con el modelo obtenido. En el Anexo 4 del presente Acuerdo, se presenta una guía de pruebas recomendadas que pueden ser realizadas para verificar la validez de los modelos de los controles de generación. Lo anterior sin perjuicio de que puedan usarse pruebas diferentes a las presentadas.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

Para las unidades hidráulicas, el modelo de turbina y conducciones debe considerar el efecto del acoplamiento hidráulico entre unidades de una misma planta.

Independientemente de las pruebas que se realicen sobre la unidad, las mismas deben desarrollarse en condiciones de vacío y a potencias correspondientes al mínimo técnico, un valor intermedio y su valor máximo, y deben considerarse perturbaciones en las que se exciten las dinámicas lineales y no lineales de los equipos modelados. Adicionalmente, el agente generador debe verificar que existe coherencia al comparar las curvas correspondientes del sistema real con las del sistema simulado, utilizando los modelos obtenidos. Una vez el CNO reciba oficialmente el informe de resultados por parte del agente, el CNO debe verificar dicha coherencia con base en los índices de comparación de curvas establecidos en el Anexo 3 del presente Acuerdo. Esta verificación debe hacerse sobre al menos las siguientes variables:

- **Sistema de Excitación:** voltaje en terminales del generador y el voltaje de campo del generador (voltaje de campo de la excitatriz y la corriente de campo para las unidades sin escobillas) y potencia reactiva.
- **Funciones de limitación y compensación del sistema de excitación:** voltaje en terminales del generador, potencia reactiva, y en caso de ser posible se deben presentar las señales a la salida física de los limitadores (OEL, UEL, V/Hz, LPQ) y a la salida física de las funciones de compensación (RCC, CCC, SCL). Adicionalmente se deben realizar pruebas para alcanzar la tensión de techo (CV). El modelo debe ser capaz de reproducir la dinámica de los limitadores, las funciones de compensación y las tensiones de techo máxima y mínima del sistema de excitación.
- **Regulador de Velocidad/Potencia:** potencia activa del generador, apertura de agujas o de distribuidor y en caso de ser posible, presión en la tubería (unidades hidráulicas) y apertura de válvulas (unidades térmicas).
- **Estabilizador del Sistema de Potencia:** voltaje en terminales del generador, potencia activa y reactiva del generador, y en caso de ser posible la señal de salida física del estabilizador del sistema de potencia.

Para las pruebas realizadas sobre el Regulador de Velocidad/Potencia se deben tomar mínimo 10 muestras por segundo hasta que se logre la estabilización de la señal. Para las pruebas sobre el Sistema de Excitación y Estabilizador del Sistema de Potencia, se requiere un mínimo de 100 muestras por segundo hasta que se logre la estabilización de la señal.

Adicionalmente, con el fin de evaluar el desempeño de los controles de generación¹ ante modos de oscilación y determinar su dinámica interna, se deben realizar barridos de frecuencia para cada uno de ellos, mínimo desde 0.01 Hz hasta 2 Hz, con una magnitud tal que no se exciten las dinámicas no lineales del generador y sus controles. Para el AVR se recomienda inyectar esta frecuencia

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

oscilatoria en la señal de referencia de tensión, y para el Regulador de Velocidad, se recomienda hacerlo sobre la señal de referencia de velocidad.

DECIMOQUINTO. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MODELOS VALIDADOS. Una vez el CND reciba el informe completo, revisará los modelos validados de los controles de generación a los que hace referencia el presente Acuerdo. Esta revisión realizada en una herramienta de simulación dinámica incluirá la verificación de la estabilidad de los modelos. En caso de presentarse diferencias entre la respuesta del modelo suministrado y el comportamiento real, teniendo en cuenta los requerimientos considerados en el Anexo 3 del presente Acuerdo, el CND informará tal situación al agente, para que se dé inicio a la revisión conjunta del modelo y si es necesario, realizar las respectivas correcciones.

En caso de que el agente deba realizar correcciones al modelo, tendrá un plazo de 60 días calendario contados a partir de la comunicación del CND, para presentar nuevamente el modelo validado y estable. Si este último reporte no cumple con los criterios establecidos y no existe una justificación técnica adecuada, el CND informará tal situación al CNO.

En caso de que el CND deba realizar correcciones al modelo implementado, tendrá un plazo de 15 días calendario, para realizar nuevamente las verificaciones del modelo.

El CND podrá solicitar nuevamente pruebas de reajuste y validación, cuando se presenten condiciones dinámicas del sistema que requieran reajuste de los parámetros de los controles de generación. Estos reajustes serán realizados en coordinación con el agente de conformidad con el Artículo Octavo del presente Acuerdo.

DECIMOSEXTO. RESUMEN DE PLAZOS PARA EL CND Y LOS AGENTES.

En la siguiente Tabla se resumen los plazos establecidos asociados al cumplimiento del presente Acuerdo respecto a la entrega de informes con los modelos validados para los agentes generadores.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

Numeral	Entrega de informes de resultados de las pruebas de validación de los modelos de los controles de generación y de los parámetros del generador para verificación del CND	Plazos para realizar correcciones del informe	Plazos para realizar correcciones de los modelos y entregar informe definitivo
SEGUNDO: Unidades de la etapa 1	30 de mayo de 2014	30 días calendario	60 días calendario después de la notificación del CND
TERCERO y CUARTO: Unidades de la etapa 2	31 de octubre de 2014	30 días calendario	60 días calendario después de la notificación del CND
QUINTO: Unidades de la etapa 3	31 de enero de 2015	30 días calendario	60 días calendario después de la notificación del CND
SEXTO: Unidades nuevas	90 días calendario después de su fecha de entrada en operación comercial	30 días calendario	60 días calendario después de la notificación del CND
OCTAVO: Actualización de modelos	30 días después de modificación del control ó cada 5 años.	30 días calendario	60 días calendario después de la notificación del CND

En la siguiente Tabla se resumen los plazos establecidos para el CND asociados al cumplimiento del presente Acuerdo, contados a partir de la fecha de entrega del informe de las pruebas por parte de los agentes generadores.

Numeral	Revisión del Informe de resultados y notificación al agente generador	Validación de los modelos y notificación	Verificación final
SEGUNDO: Unidades de la etapa 1	30 días calendario	60 días calendario	15 días calendario
TERCERO y CUARTO: Unidades de la etapa 2	30 días calendario	60 días calendario	15 días calendario
QUINTO: Unidades de la etapa 3	30 días calendario	60 días calendario	15 días calendario
SEXTO: Unidades nuevas	30 días calendario	60 días calendario	15 días calendario

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

OCTAVO: Actualizaciones	30 días calendario	60 días calendario	15 días calendario
-------------------------	--------------------	--------------------	--------------------

DECIMOSÉPTIMO. IMPLEMENTACIÓN DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTENCIA PARA PLANTAS NUEVAS. Las plantas hidráulicas y térmicas que se encuentran en proceso de especificaciones técnicas, que entren en operación comercial en fecha posterior a la vigencia del presente Acuerdo, con capacidad superior o igual a 100 MW, deberán implementar estabilizadores de sistemas de potencia³ de acuerdo con lo recomendado por el CND. El CND deberá presentar ante el Subcomité de Estudios Eléctricos la justificación técnica de esta solicitud y enviar al agente las especificaciones del equipo teniendo en cuenta los requerimientos sistémicos.

DECIMO OCTAVO. MODERNIZACIÓN DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTENCIA PARA PLANTAS EXISTENTES. El CND definirá cuales plantas del SIN existentes con capacidad superior o igual a 100 MW requieren la implementación o cambio de estabilizadores de sistemas de potencia para garantizar la seguridad del SIN, utilizando los modelos validados de los controles de generación de cada planta.

El CND en conjunto con el agente generador y el fabricante si se requiere, definirá si es posible técnicamente la implementación o cambio de estabilizadores de sistemas de potencia. En caso de que se determine la viabilidad técnica de la implementación o cambio de estabilizadores de sistemas de potencia, el CND establecerá las especificaciones técnicas del equipo, teniendo en cuenta los requerimientos sistémicos y el agente generador enviará un cronograma en el que se detalle el proceso de puesta en servicio del equipo, que no debe superar un año. Lo anterior, salvo casos en los que existan factores externos que dificulten la implementación de la recomendación, o el cumplimiento del plazo y que no sean gestionables por el agente generador.

El CND evaluará el impacto en la estabilidad del SIN, de los estabilizadores de sistemas de potencia implementados, mediante el análisis de la respuesta dinámica del sistema.

PARÁGRAFO: De presentarse diferencias técnicas entre el CND y el agente generador sobre la necesidad de implementación de estabilizadores de sistemas de potencia, las partes deberán presentar la justificación técnica ante el Subcomité de Estudios Eléctricos, el cual emitirá su concepto técnico, que será presentado posteriormente al Comité de Operación para su recomendación. De persistir las diferencias técnicas sobre la necesidad de implementación de

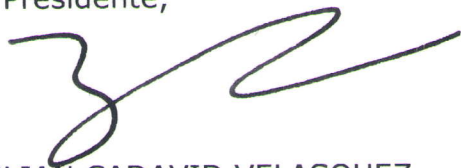
³ Las estructuras asociadas a los estabilizadores del sistema de potencia deben estar reportadas en la Norma IEEE 421-(5) o aquella(s) que la(s) modifique(n) o sustituyan

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

estabilizadores de sistemas de potencia entre el CND y el agente generador, el tema será presentado al CNO para su definición.

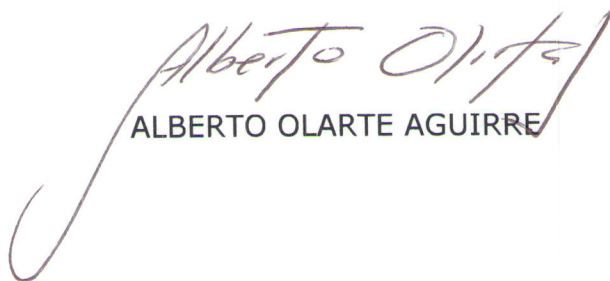
DECIMONOVENO: El presente Acuerdo rige a partir de la fecha de su expedición y sustituye el Acuerdo 552 de 2011.

El Presidente,



JULIAN CADAVID VELASQUEZ

El Secretario Técnico,



ALBERTO OLARTE AGUIRRE

10

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

REFERENCIAS

- [1] Prabha Kundur, Power System Stability and Control. Estados Unidos.: McGraw Hill, 1994.
- [2] Krause, P.C Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, McGraw Hill Book Company, 1986.
- [3] Machowski, J Power System Dynamics Stability and Control, Second Edition, Ed. John Wiley & Sons, 2008.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

ANEXO 1

Objetivo

Este anexo define el formato para el reporte de los modelos validados del generador y de los controles asociados.

Información requerida

Los informes de resultados de validación, deberán presentarse electrónicamente en formato Adobe Portable Document Format (PDF). Cada informe debe incluir:

- Tabla de contenido
- Generalidades de las pruebas
- Descripción del generador y los parámetros asociados
- Descripción de los sistemas de control del generador: regulador de velocidad/potencia, turbina, sistema de excitación y estabilizador de sistema de potencia (PSS) y cualquier otro sistema de control asociado al generador, como por ejemplo los limitadores del sistema de excitación.
- Descripción de los detalles de las pruebas de validación realizadas
- Modelos validados de cada sistema de control con parámetros y diagrama de bloques. Se recomienda que esta implementación sea realizada en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo pueden entregarse en otras herramientas de simulación dinámica.
- Curvas comparativas del sistema real vs las obtenidas a través de simulación de los modelos validados.
- Anexos con archivo de datos que contenga los resultados de las pruebas de validación para todos los sistemas de control (datos de prueba y de simulación) en formato de texto (.txt) con encabezados que identifiquen el nombre de la variable y las unidades de medición correspondientes.

Los detalles de estos requerimientos se presentan a continuación:

Tabla de contenido

El informe debe contener una tabla de contenidos similar a la que se muestra en la figura siguiente:

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

Tabla de contenido

1. GENERALIDADES	
2. GENERADOR.....	x
2.1 Descripción	x
2.2 Pruebas de validación	x
2.3 Verificación de la validez de los parámetros del generador	x
2.4 Parámetros	x
3. SISTEMA DE EXCITACIÓN.....	x
3.1 Descripción	x
3.2 Pruebas de validación.....	x
3.3 Verificación de la validez del modelo del sistema de excitación	x
3.4 Diagrama de bloques.....	x
3.5 Parámetros	x
4. ESTABILIZADOR DEL SISTEMA DE POTENCIA.....	x
3.1 Descripción	x
3.2 Pruebas de validación.....	x
3.3 Verificación de la validez del modelo del estabilizador del sistema de potencia.....	x
3.4 Diagrama de bloques.....	x
3.5 Parámetros	x
5. REGULADOR DE VELOCIDAD/POTENCIA	x
3.1 Descripción	x
3.2 Detalles de las pruebas de validación de los parámetros.....	x
3.3 Verificación de la validez del modelo del Regulador de velocidad/Potencia	
3.4 Diagrama de bloques.....	x
3.5 Parámetros	x
3.6 Verificación de estabilidad en red aislada	x
6. ANEXOS	x

Generalidades

En este ítem se debe incluir los siguientes detalles:

- Nombre de la planta bajo pruebas de validación
- Nombre de la persona responsable de las pruebas de validación
- Fecha y hora en la que se realizaron las pruebas



CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

GENERADOR

Descripción

Se debe incluir el nombre de la unidad, el tipo de generador (polos salientes, rotor liso), fabricante, valores nominales (Potencia aparente nominal S (MVA), Voltaje en terminales V_t (kV), Factor de potencia nominal fp , Tensión de campo nominal V_f (V), Corriente de campo nominal I_f (A))

Pruebas de validación

Se debe realizar una descripción de las pruebas que permitan reproducirlas, definiendo:

- Fecha y hora de las pruebas
- Tipo de prueba: con unidad sincronizada a la red o en vacío.
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, senoidal, rampa, rechazo de carga, etc.), magnitud, punto de inyección.
- Condiciones iniciales del generador en la prueba: P , Q , V_t , V_f .
- Estado de controles auxiliares (Con o sin: PSS)

Verificación de la validez de los parámetros del generador

Se deben presentar las curvas comparativas que demuestren la validez de los parámetros del generador en las instancias de tiempo transitoria, subtransitoria y de estado estacionario. Las variables que deben ser comparadas deben ser al menos: corriente de campo y tensión en terminales.

Parámetros del generador

Se deben reportar al menos los siguientes parámetros del generador, resaltando cuáles parámetros difieren con lo reportado por el fabricante o son modificados respecto a lo que se encuentra reportado al CND.

- Reactancia sincrónica de eje directo (x_d [p.u])
- Reactancia transitoria de eje directo (x'_d [p.u])
- Reactancia subtransitoria de eje directo (x''_d [p.u])
- Reactancia sincrónica de eje de cuadratura (x_q [p.u])
- Reactancia transitoria de eje de cuadratura (x'_q [p.u])
- Reactancia subtransitoria de eje de cuadratura (x''_q [p.u])
- Constante de tiempo transitoria de eje directo de circuito abierto (t'_{do} [s]) Constante de tiempo subtransitoria de eje directo de circuito abierto (t''_{do} [s]), Constante de tiempo transitoria de eje de cuadratura de circuito abierto (t'_{qo} [s]),
- Constante de tiempo subtransitoria de eje de cuadratura y de circuito abierto (t''_{qo} [s])
- Constante de inercia (H [s], con base en MVA y kV nominales del generador)
- Curva tabulada de saturación del generador en vacío (Corriente de excitación vs. Voltaje nominal ([p.u])

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

Asimismo, se deben reportar las bases utilizadas para el cálculo de los parámetros del generador.

En los anexos se debe incluir los datos utilizados para construir las curvas reales y las simuladas en formato de texto (.txt) considerando la misma estampa de tiempo para ambas curvas y reportando el nombre de la variable y las unidades correspondientes.

SISTEMA DE EXCITACIÓN

Descripción

En este campo se debe incluir: fabricante, modelo del equipo, modos de operación disponibles (automático (tensión), manual (corriente de campo), control de potencia reactiva, factor de potencia, Otro: especificar), modo de operación normal: (automático (tensión), manual (corriente de campo), control de potencia reactiva, factor de potencia, Otro: especificar)

Pruebas de validación

Se debe realizar una descripción de las pruebas que permitan reproducirlas, definiendo:

- Fecha y hora de las pruebas
- Tipo de prueba: con unidad sincronizada a la red o en vacío
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, senoidal, rampa, etc), magnitud, punto de inyección.
- Condiciones iniciales del generador en la prueba: P, Q, Vt, Vf
- Estado de controles auxiliares (Con o sin: PSS).
- Modo de control del sistema de excitación (manual, automático, factor de potencia, etc.)

Verificación de la validez del modelo del sistema de excitación

Se deben presentar las curvas comparativas que demuestren la validez del modelo del sistema de excitación. Las curvas deben corresponder al menos a las siguientes variables:

Voltaje en terminales del generador y el voltaje de campo del generador (voltaje de campo de la excitatriz y la corriente de campo para las unidades sin escobillas).

Asimismo, en caso de ser posible, se deben presentar las señales a la salida física de los limitadores (OEL, UEL, V/Hz) y a la salida física de las funciones de compensación (RCC, CCC, SCL(Limitador de corriente de estator). Si esto no es posible se deben presentar registros que muestren la operación de los limitadores y compensadores existentes.

Todas las curvas incluidas deben tener las siguientes características:

- Etiquetas para los ejes y las correspondientes unidades de medida
- Títulos para cada gráfica indicando la prueba que fue desarrollada
- Escala apropiada para ambos ejes

En los anexos se debe incluir los datos utilizados para construir las curvas reales y las simuladas en formato de texto (.txt) considerando la misma estampa de tiempo para ambas curvas y reportando el nombre de la variable y las unidades correspondientes.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

En caso de identificarse una inestabilidad de este control cuando la unidad está interconectada en las pruebas realizadas, se debe proponer un reajuste para el control correspondiente, mostrando a través de simulación y ante perturbaciones tipo escalón en el voltaje de referencia el impacto de este reajuste.

Diagrama de bloques

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace (s) del sistema de excitación incluyendo el Regulador de Tensión, Limitadores del Sistema de Excitación (V/Hz, UEL, OEL, otros), Funciones de compensación (RCC, CCC, otros). Asimismo, se debe adjuntar dicho modelo en formato digital. Se recomienda que el modelo correspondiente sea implementado en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo este puede entregarse en otra herramienta de simulación dinámica.

Parámetros

Se debe reportar una tabla con los parámetros validados incluidos en el diagrama de bloques y las bases usadas para la obtención de los mismos en p.u.

ESTABILIZADOR DEL SISTEMA DE POTENCIA

Descripción

En este campo se debe incluir: Fabricante, Modelo, Tipo (Dual, Potencia, Frecuencia, Velocidad, Multibanda, otro), Fecha de la(s) prueba(s)

Pruebas de validación

Se debe realizar una descripción de las pruebas que permitan reproducirlas, definiendo:

- Fecha de las pruebas
- Tipo de prueba: con unidad sincronizada a la red o en vacío
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, senoidal, rampa, etc), magnitud, punto de inyección
- Condiciones iniciales del generador en la prueba y de los otros generadores que se encuentren acoplados hidráulicamente a la unidad bajo prueba: P, Q, V_t , V_f

Verificación de la validez del modelo del estabilizador del sistema de potencia

Se deben presentar las curvas comparativas que demuestren la validez del modelo del estabilizador del sistema de potencia. Las variables a ser comparadas deben ser al menos:

Potencia reactiva del generador, voltaje en terminales del generador, y en caso de ser posible la señal de salida física del estabilizador del sistema de potencia. Todas las curvas incluidas deben tener las siguientes características:

- Etiquetas para los ejes y las correspondientes unidades de medida
- Títulos claros para cada gráfica indicando la prueba que fue desarrollada
- Escala apropiada para ambos ejes

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

En los anexos se debe incluir los datos utilizados para construir las curvas reales y las simuladas en formato de texto (.txt) considerando la misma estampa de tiempo para ambas señales y reportando el nombre de la variable y las unidades correspondientes.

En caso de identificarse una inestabilidad de este control cuando la unidad está interconectada en las pruebas realizadas, se debe informar en el informe para coordinar con el CND el reajuste del control correspondiente.

Diagrama de bloques

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace (s) del estabilizador del sistema de potencia, incluyendo los parámetros requeridos en (p.u). Si aplica, se deben incluir las lógicas de desconexión del PSS. Se debe adjuntar en formato digital el modelo validado correspondiente. Se recomienda que este sea implementado en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo puede entregarse en otras herramientas de simulación dinámica.

REGULADOR DE VELOCIDAD/POTENCIA

Descripción

En este campo se debe incluir fabricante, modelo, tipo (Hidráulico, Electrohidráulico, Electrónico, Digital), tipo de Turbina (Pelton, Francis, Kaplan, turbovapor, turbogas, otra), para unidades térmicas indicar tipo de ciclo (Rankine, Brayton, otro), fecha de la(s) prueba(s)

Pruebas de validación

Se debe realizar una descripción de las pruebas que permitan reproducirlas, definiendo:

- Fecha de las pruebas
- Tipo de prueba: con unidad sincronizada a la red o en vacío
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, senoidal, rampa, etc), magnitud, punto de inyección
- Condiciones iniciales del generador en la prueba y de los otros generadores que se encuentren acoplados hidráulicamente a la unidad bajo prueba: P, Q, V_t , V_f .
- Modo de operación del regulador de Velocidad (Potencia, Velocidad, Caudal, Posición, Presión, Temperatura, Carga Base, otro)

Verificación de la validez del modelo del regulador de velocidad/potencia

Se deben presentar las curvas comparativas que demuestren la validez de los Transductores, Controlador (modo de operación con unidad sincronizada), Actuadores, Turbina, Conducciones e interacción entre unidades (para plantas hidráulicas). Las variables a ser comparadas deben ser al menos:

La potencia activa del generador, apertura de agujas o de distribuidor y en caso de ser posible, presión en la tubería (unidades hidráulicas) y apertura de válvulas (unidades térmicas).

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

Todas las curvas incluidas en deben tener las siguientes características:

- Etiquetas para los ejes y las correspondientes unidades de medida
- Títulos claros para cada gráfica indicando la prueba que fue desarrollada
- Escala apropiada para ambos ejes

En los anexos se debe incluir los datos utilizados para construir las curvas reales y las simuladas en formato de texto (.txt) considerando la misma estampa de tiempo para ambas curvas y reportando el nombre de la variable y las unidades correspondientes.

Diagrama de bloques

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace (s), con el modelo validado del regulador de velocidad/potencia incluyendo Transductores, Controlador (modo de operación con unidad sincronizada), Actuadores, Turbina, Conducciones e interacción entre unidades (para plantas hidráulicas). Se debe adjuntar en formato digital el modelo validado correspondiente. Se recomienda que este modelo sea implementado en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo puede entregarse en otras herramientas de simulación dinámica.

Parámetros

Se debe reportar una tabla con los parámetros validados incluidos en el diagrama de bloques y las bases usadas para la obtención de los mismos en p.u.

Verificación de estabilidad en red aislada

Para el caso de las unidades hidráulicas, se debe presentar el detalle y los resultados de las pruebas realizadas para verificar la estabilidad en red aislada de la unidad. En este campo se debe incluir como mínimo la siguiente información:

- Reportar si la prueba fue realizada a través de simulación o en campo. En caso de que se realice en campo, reportar la fecha y hora de la prueba.
- Describir condiciones de la prueba: Estado de PSSs (Activos o no), condiciones iniciales del generador bajo prueba (P, Q, V_t , f) y estado de las otras unidades de la planta en caso de que la prueba se realice en campo.
- Curvas de potencia o frecuencia del generador obtenidas para esta prueba.

Asimismo se debe entregar en medio digital, el sistema de prueba utilizado para realizar la verificación de estabilidad en red aislada. Se recomienda que este sistema de prueba sea implementado en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo puede entregarse en otras herramientas de simulación dinámica.

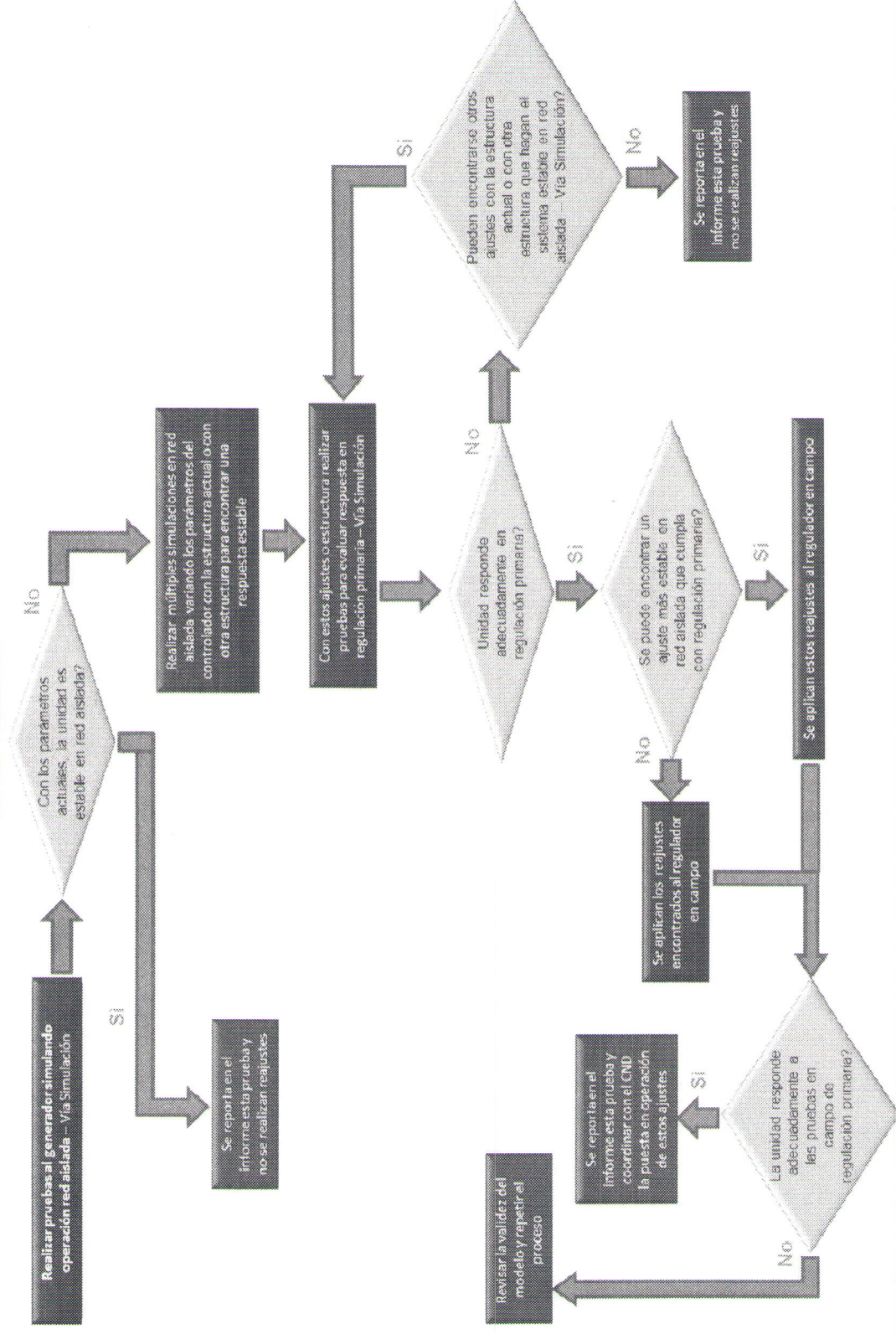
En caso de identificarse una inestabilidad de este control con la unidad en simulación de red aislada, se debe proponer un reajuste para el control correspondiente, mostrando a través de simulación el impacto de este reajuste desde el punto de vista de estabilidad y de regulación primaria y la propuesta de trabajo para su implementación que incluya pruebas de regulación primaria.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

ANEXO 2.

Procedimiento propuesto para la realización de las prueba en simulación de red aislada para unidades hidráulicas

En la siguiente figura se presenta el diagrama de flujo con el procedimiento propuesto para la realización de las simulaciones en red aislada de las unidades



hidráulicas:

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

Con base en el diagrama de flujo presentado en la anterior figura, a continuación se detallan las condiciones de las simulaciones requeridas para determinar la estabilidad de una unidad en simulación de red aislada

1. Obtener el modelo validado del regulador de velocidad, considerando las conducciones hidráulicas.
2. Obtener los parámetros validados del modelo del generador.
3. Con estos modelos, se simula el generador bajo prueba alimentando una carga de potencia constante y una sola unidad de la planta en servicio, lo cual corresponde a la condición más exigente desde el punto de vista de estabilidad. (Ver figura 2).
4. Se debe tener en operación el modelo del regulador de velocidad y conducciones hidráulicas previamente validado.
5. No se debe tener en cuenta el PSS, y se recomienda deshabilitar el AVR.
6. Las condiciones iniciales de la prueba son las siguientes (Ver figura 2):
 - Potencia de la carga: 75% de la potencia nominal de la unidad (Pnom).
 - Tensión en bornes: 1 p.u.
7. Perturbación (Ver figura 2):
 - Escalón del -5% de la potencia nominal de la unidad, en la carga
8. Realizar la simulación considerando la perturbación descrita, durante al menos 300 segundos, registrando el comportamiento de la frecuencia del sistema generador - carga.

En la siguiente figura se presenta un ejemplo del sistema de prueba equivalente para una máquina de potencia nominal $P_{nom}=240MW$, alimentando una carga de potencia constante. Se describe el evento a simular y se presentan los resultados obtenidos en la frecuencia del sistema, evidenciándose la inestabilidad de la unidad con los ajustes actuales.

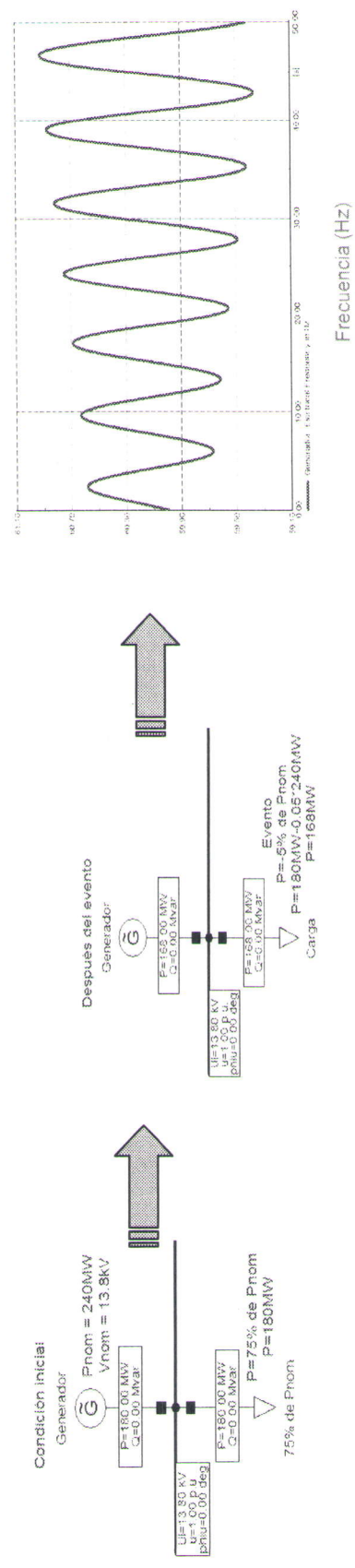


Figura 1 Ejemplo de sistema de prueba y definición del evento para simulación de respuesta en red aislada

Índices de evaluación para verificar la validez de los modelos

El principio esencial de la validación de la respuesta dinámica de un modelo es que éste, al ser integrado en el programa de simulación utilizado por el CND para el planeamiento del SIN, permita reproducir dentro de niveles aceptables de precisión, la respuesta real de los elementos modelados ante pruebas o perturbaciones en diferentes condiciones operativas.

Con el fin de contar con modelos útiles para el análisis y planeamiento del SIN, los agentes generadores deben garantizar que la respuesta real y la simulada, utilizando los modelos validados, sean coherentes en los siguientes aspectos:

- Forma general de las curvas para las distintas pruebas de validación que se desarrollen, incluyendo la magnitud y velocidad de la respuesta
- Tiempo de subida, sobreimpulso
- Bandas muertas y tiempos de retardo
- Valores iniciales y finales

Con el fin de verificar que las curvas sean coherentes de acuerdo a los parámetros y características señaladas, se determinará los índices de evaluación que se presentan a continuación:

Error absoluto del sobreimpulso (ES)

Es la diferencia absoluta entre los sobreimpulsos en porcentaje.

$$ES = |SI_R - SI_S|$$

Con:

$$SI = \frac{v_{\max} - v_f}{v_f - v_i} \times 100$$

Donde:

SI_R : Sobreimpulso de la señal real tomada durante la prueba

SI_S : Sobreimpulso de la señal simulada tomada del modelo

$v_{\max}$: Valor máximo de la curva

v_f : Valor final de la curva

v_i : Valor inicial de la curva

Error relativo en el tiempo de retardo (ETR)

Este error está basado en el tiempo de retardo, el cual se define como el tiempo necesario para que la señal alcance un 50% del valor final. El error relativo en el tiempo de retardo, será la diferencia absoluta relativa entre los tiempos de retardo real y simulado.

$$ETR = \left| \frac{TR_R - TR_S}{TR_R} \right| \times 100$$

Donde:

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

TR_R : Tiempo de retardo de la señal real tomado durante la prueba

TR_S : Tiempo de retardo de la señal simulada tomado con base en el modelo

Error relativo del valor final (EVF)

Este error se define como la diferencia entre los valores finales alcanzados por las señales real y simulada, con base en la señal real.

$$EF = \frac{vf_R - vf_S}{vf_R} \times 100$$

vf_R : Valor final real de la señal obtenida con base en la prueba.

vf_S : Valor final de la señal simulada obtenida con base en el modelo.

Factor de error compuesto de magnitud y fase (FEC)

Este error pretende medir las diferencias entre las señales real y simulada en términos de fase y magnitud, y combinar estas en un indicador compuesto.

Este factor se calcula a partir de los siguientes cálculos:

$$v_{RR} = (t_f - t_i)^{-1} \int_{t_i}^{t_f} R^2(t) dt$$

$$v_{SS} = (t_f - t_i)^{-1} \int_{t_i}^{t_f} S^2(t) dt$$

$$v_{RS} = (t_f - t_i)^{-1} \int_{t_i}^{t_f} R(t)S(t) dt$$

Donde:

$t_i < t < t_f$: es el intervalo de tiempo en el que se comparan las curvas

$R(t)$: Es la señal real proveniente de la prueba en el tiempo

$S(t)$: Es la señal simulada proveniente del modelo

Con estos datos se calcula el error de magnitud:

$$E_M = \sqrt{v_{SS}/v_{RR}} - 1$$

Luego el error de fase:

$$E_F = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{v_{RM}}{\sqrt{v_{RR} v_{SS}}} \right)$$

Finalmente, el factor de error compuesto de magnitud y fase se calcula como:

$$FEC = \sqrt{E_M^2 + E_F^2}$$

Suma normalizada de errores cuadráticos (normalized sum of squared errors) (NSSE)

Este error corresponde al cuadrado de la suma de las diferencias punto a punto entre las señales real y simulada con base en la sumatoria de los cuadrados de la señal real.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

$$NSSE = \frac{\sum_{i=1}^n [R_i - S_i]^2}{\sum_{i=1}^n [R_i]^2}$$

Donde:

R_i : Es el i -esimo valor de la señal real en el tiempo proveniente de la prueba

S_i : Es el i -esimo valor de la señal simulada en el tiempo proveniente del modelo

Los valores de referencia para los índices de coherencia, las pruebas y las señales sobre las que estos se aplican, son definidos en las siguientes tablas, para el sistema de excitación, el PSS y el regulador de velocidad / potencia:

Tabla A3. 1 Índices de coherencia para el modelo del AVR

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
1. Escalón en la tensión de referencia en vacío. 2. Escalón en la tensión de referencia en carga sin PSS.	V_T	ES	10%
		EVF	10%
		ETR	10%
		NSSE	5%
	V_F	NSSE	15%
	Q	ES	15%
		EVF	15%
		NSSE	10%

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

Tabla A3. 2 Índices de coherencia para el modelo del PSS

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
1. Escalón en la tensión de referencia en carga con PSS.	V_T	ES	10%
		EVF	10%
		ETR	10%
		NSSE	5%
	Q	ES	15%
		EVF	15%
		NSSE	10%
	P	NSSE	10%
		FEC	5%
	U_{PSS}^4	NSSE	10%

Tabla A3. 3 Índices de coherencia para los modelos de los limitadores del sistema de excitación (CV, OEL, UEL, V/Hz, LPQ, SCL)

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
1. Escalón de gran señal en la tensión de referencia del AVR para provocar la actuación del limitador.	V_T	EVF	15%
		NSSE	5%
	Q	EVF	15%
		NSSE	5%
	U_{LIM}^5	NSSE	5%

⁴ Solo se calcularía este índice para la señal de salida del PSS (U_{pss}), en caso de que esta pueda ser medida en campo.

⁵ Solo se calcularía este índice para la señal de salida del limitador correspondiente (U_{LIM}), en caso de que esta pueda ser medida en campo.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

Tabla A3. 4 Índices de coherencia para el modelo del regulador de velocidad / potencia

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
3. Escalón en la potencia o la velocidad de referencia en carga.	P	NSSE	10%
		FEC	5%
		EVF	15%
		ES	20%
		ETR	15%
	Y_A ⁶	NSSE	10%

Dado que cada prueba implica la realización de diferentes ensayos en campo para tres niveles de generación (máxima, media y mínima carga), los índices de coherencia correspondientes a cada prueba se calcularán como el promedio de los índices obtenidos para cada uno de los ensayos.

Se considera que un modelo pasa exitosamente la etapa de validación, si los índices de coherencia promedio, calculados para cada prueba son menores o iguales a los valores de referencia indicados en las tablas A3.1 a A3.4. De lo contrario, el CND informará al agente sobre los índices incumplidos para que este realice los ajustes necesarios en el modelo.

⁶

Los índices para la señal de posición o apertura (Y_A) no serán evaluados para unidades térmicas.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

ANEXO 4.

Guía de pruebas recomendadas para realizar la validación de los modelos de control para los generadores.

A continuación se presenta una guía con pruebas que pueden ser realizadas para verificar la validez de los modelos de los controles de generación.

Validación del modelo del sistema de excitación

La validación del modelo del sistema de excitación debe hacerse para tres niveles de carga del generador (máxima, media y mínima), y se puede realizar considerando como mínimo las siguientes pruebas:

- Determinar la respuesta al escalón con la unidad en vacío con el regulador de voltaje en modo de control automático. La prueba debe realizarse tanto en condiciones en las que se exciten todas las dinámicas no lineales del modelo (OEL, UEL, RCC, LCC, SCL, etc.) como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades. Se deben verificar los siguientes requerimientos:
 - El escalón en la referencia del voltaje en terminales debe ser al menos un 2% del voltaje nominal del generador.
 - Se deben almacenar los registros de al menos el voltaje en terminales del generador y el voltaje de campo del generador (voltaje de campo de la excitatriz y la corriente para las unidades sin escobillas), los cuales serán utilizados como variables de comparación para realizar la validación del modelo.
 - Se deben tomar mínimo 100 muestras por segundo durante al menos 10 segundos después de estabilizadas las señales registradas en la prueba.
 - Se deben comparar los registros almacenados del sistema real con la respuesta del modelo. Se debe verificar una coherencia entre la forma de la curva, el valor inicial, el tiempo de subida, el sobreimpulso, tiempo de establecimiento y el valor final.
- Determinar la respuesta al escalón con la unidad sincronizada con el regulador de voltaje en modo de control automático. La prueba debe realizarse tanto en condiciones en las que se exciten todas las dinámicas no lineales del modelo (OEL, UEL, RCC, LCC, SCL, etc.) como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades. Se deben verificar los siguientes requerimientos:
 - El escalón en la referencia del voltaje en terminales debe ser al menos un 2% del voltaje nominal del generador.
 - Se deben almacenar los registros de al menos el voltaje en terminales del generador y el voltaje de campo del generador (voltaje de campo de la excitatriz y la corriente para las unidades sin escobillas) y potencia reactiva, los cuales serán utilizados como variables de comparación para realizar la validación del modelo.
 - Se deben tomar mínimo 100 muestras por segundo durante al menos 10 segundos después de estabilizadas las señales registradas en la prueba.
 - Se deben comparar los registros almacenados del sistema real con la respuesta del modelo. Se debe verificar una coherencia entre la forma de la curva, el valor

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

inicial, el tiempo de subida, el sobreimpulso, tiempo de establecimiento y el valor final.

- De ser posible, se debe almacenar la respuesta de la unidad a una perturbación del sistema que verifique los siguientes criterios:
 - La perturbación debe originar un cambio repentino en el voltaje del sistema de al menos el 2% del voltaje nominal en barras o un cambio de al menos el 10% de la potencia reactiva respecto a los MVA nominales.
 - Se deben tomar mínimo 100 muestras por segundo durante al menos 10 segundos después de estabilizadas las señales registradas en la prueba.
 - Las variables almacenadas incluyen potencia reactiva del generador, voltaje en terminales del generador y voltaje del sistema, señal de salida y señal(es) de entrada al estabilizador del sistema de potencia.
 - El regulador del voltaje debe estar en modo de control automático y se deben realizar pruebas con y sin estabilizador del sistema de potencia en servicio.
 - Los datos almacenados se comparan con los del modelo considerando una perturbación modelada del voltaje del sistema. Debe haber coherencia entre la potencia activa y reactiva generada y el voltaje en terminales del generador en términos de: forma de las curvas, valores iniciales, tiempos de subida, sobreimpulsos, tiempos de establecimiento y valores finales.
- Determinar la respuesta del sistema de excitación a un barrido en frecuencia de 0.02 Hz a 3 Hz inyectado en la tensión de referencia del AVR, con la unidad sincronizada a media carga. La prueba no debe excitar las no lineales del modelo (OEL, UEL, RCC, LCC, SCL, etc.). Se deben verificar los siguientes requerimientos:
 - La amplitud de la señal senoidal a inyectar no debe causar la actuación de algún limitador ni saturaciones al interior de la lógica del sistema de excitación.
 - Se debe registrar el tiempo necesario para almacenar al menos 5 ciclos de cada frecuencia inyectada.
 - Las variables almacenadas incluyen potencia reactiva del generador, voltaje en terminales del generador y voltaje del sistema, señal de salida y señal(es) de entrada al estabilizador del sistema de potencia.
 - El regulador del voltaje debe estar en modo de control automático y se deben realizar pruebas con y sin estabilizador del sistema de potencia en servicio.
 - Los datos almacenados se comparan con los del modelo considerando la misma señal oscilatoria inyectada en la referencia de tensión del AVR. Debe haber coherencia entre la potencia activa y reactiva generada y el voltaje en terminales del generador en términos de: forma de las curvas, fase, frecuencia y amplitud de las oscilaciones.

Validación del modelo del estabilizador del sistema de potencia

Esta verificación se debe realizar desarrollando una prueba de respuesta en frecuencia con el regulador de voltaje en modo control automático y el estabilizador del sistema de potencia en servicio. De ser posible, lo ideal es inyectar señales senoidales de frecuencias entre 0.02 Hz y 3 Hz en cada una de las entradas del PSS (para los PSSs tipo IEEE PSS

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

2A serían las entradas de Potencia y Frecuencia). La prueba debe verificar los siguientes requerimientos:

- La amplitud y frecuencias máximas o mínimas de las señales a inyectar deben ser seleccionadas de tal forma que no se activen no linealidades en la lógica del PSS o sistema de excitación.
- Se debe almacenar al menos la(s) señal(es) de entrada y salida del estabilizador del sistema de potencia, el voltaje en terminales del generador, la potencia activa y reactiva.
- Los datos almacenados son comparados con los resultados de la respuesta al barrido de frecuencia. Debe haber coherencia en términos de forma de las curvas, fase, frecuencia y amplitud de las oscilaciones.

Consideraciones adicionales de las pruebas:

- Todos los elementos de protección deben estar en servicio durante cualquier prueba en línea o fuera de línea.

Validación y modelamiento del regulador de velocidad/potencia, turbina, actuadores y conducciones hidráulicas⁷.

Esta validación debe realizarse con la unidad generando el mínimo técnico, un valor intermedio y su valor máximo. La validación puede realizarse considerando al menos uno de los siguientes métodos:

- Desarrollar una prueba ante un escalón en la velocidad de referencia. Se deben:
 - Tomar mínimo 10 muestras por segundo durante al menos 10 segundos después de estabilizadas las señales registradas en la prueba.
 - Almacenar los registros de la señal de referencia de velocidad, frecuencia, potencia, apertura de agujas, distribuidor o válvulas y potencia activa del generador.
 - Comparar los registros almacenados con los obtenidos con el modelo del regulador de velocidad. Se debe verificar la coherencia entre la forma de la curva, el valor inicial, el tiempo de subida, el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento y el valor final.
- Desarrollar una prueba de rechazo de carga. La prueba debe verificar los siguientes requerimientos:
 - El rechazo de carga no debe superar el 20% de la potencia nominal de la unidad de generación.
 - Se deben tomar mínimo 10 muestras por segundo durante al menos 10 segundos después de estabilizadas las señales registradas en la prueba.
 - Almacenar al menos los registros de potencia activa del generador, apertura y velocidad de la unidad de generación.
 - Comparar los registros almacenados con los obtenidos con el modelo del regulador de velocidad. Se debe verificar la coherencia entre la forma de la curva, el valor

⁷ La validación del modelo en el que se considere los actuadores hidráulicos y conducciones hidráulicas sólo aplica para los generadores hidráulicos

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

inicial, el tiempo de subida, el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento y el valor final.

- Almacenar los registros de una unidad ante un cambio repentino en la frecuencia que cumpla con los siguientes requerimientos:
 - La perturbación debe estar acompañada de un cambio en la frecuencia de al menos 0.05 Hz dentro de un periodo de un segundo.
 - Los registros deben contar con al menos 10 muestras por segundo.
 - Los registros y la simulación deben cubrir al menos 30 segundos.
 - Se deben almacenar los registros de frecuencia, apertura y potencia activa del generador.
 - Comparar los registros almacenados con los obtenidos con el modelo del regulador de velocidad. Se debe verificar la coherencia entre la forma de la curva, el valor inicial, el tiempo de subida, el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento y el valor final.
- Determinar la respuesta del gobernador de velocidad y los actuadores hidráulicos a un barrido en frecuencia de 0.02 Hz a 1 Hz inyectado en la referencia de velocidad del regulador de velocidad / potencia, con la unidad sincronizada a media carga. La prueba no debe excitar las no lineales del sistema de control. Se deben verificar los siguientes requerimientos:
 - La amplitud de la señal senoidal a inyectar no debe causar la actuación de algún limitador ni saturaciones al interior de la lógica del sistema de control de velocidad o sistema de actuadores electrohidráulico.
 - Se debe registrar el tiempo necesario para almacenar al menos 5 ciclos de cada frecuencia inyectada.
 - Las variables almacenadas incluyen potencia activa del generador, apertura, velocidad, frecuencia, voltaje en terminales del generador.
 - Los datos almacenados se comparan con los del modelo, considerando la misma señal oscilatoria inyectada en la referencia de velocidad del regulador de velocidad / potencia. Debe haber coherencia entre las señales de potencia activa, velocidad y apertura en términos de: forma de las curvas, fase, frecuencia y amplitud de las oscilaciones.