

Adquisición de Datos e Implementación de una Interfaz Gráfica para la Evaluación del Estado de Operación de la Central Illuchi 2 a través de Estándar de Perturbación COMTRADE

Juan Calvopiña¹

Santiago Maita¹

Gonzalo Constante¹

Franklin Quilumba¹

¹*Departamento de Energía Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador*

E-mails: juan.calvopina@epn.edu.ec

santiago.maitas@epn.edu.ec

gonzalo.constantef@epn.edu.ec

franklin.quilumba@epn.edu.ec

Abstract- Este artículo presenta la obtención y manejo de datos de los relés de protección de las unidades generadoras de la Central Illuchi 2 de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi ELEPCO S.A.; además del análisis de las características y vida útil de los equipos existentes necesarios para garantizar la operación correcta de la central. Se describe el desarrollo matemático de las ecuaciones necesarias que determinan los límites de operación de un generador sincrónico de polos salientes. En base a estas ecuaciones se dibujan las curvas de capacidad y se ubica el punto de operación en las mismas. Finalmente, se describe un algoritmo capaz de permitir la evaluación del estado de operación de las unidades de generación durante una perturbación almacenada en archivos en estándar COMTRADE, en la parte final se detalla la implementación en campo del sistema descrito.

I. INTRODUCTION

La mayor parte de la generación eléctrica en el Ecuador es de tipo hidroeléctrica debido a su ubicación geográfica y sus recursos hídricos, así pues en el país existen centrales hidroeléctricas de baja, mediana y alta potencia. Las centrales de baja potencia representan ventajas sobre las demás centrales, ya que el impacto ambiental y sus costos de operación son bajos además existen numerosos sitios en los cuales pueden ser construidas. En sistemas de generación periódicamente se realizan operaciones de supervisión y mantenimiento que garantizan el funcionamiento óptimo de una central de generación, sin embargo una de las mayores preocupaciones es el análisis y evaluación del estado de operación de los generadores que operan en la central. Por ello es necesario contar con un sistema que permita una estimación del estado de operación de las máquinas generadoras mediante la proyección de eventos de colapso de voltaje y planificación de acciones preventivas y correctivas.

II. DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL ILLUCHI 2

La central Illuchi 2 es la segunda central de una configuración en cascada que inicia con la central Illuchi 1 aguas arriba. La central Illuchi 2 está clasificada como una

central de paso y de baja presión ya que el caudal que la alimenta es relativamente pequeño. La obra civil que conforma la central presenta un estado físico muy bueno y consta de un canal de conducción, tanque y tuberías de presión, casa de máquinas, subestación de elevación de voltaje, vivienda de operadores y oficina de dirección. Los equipos existentes de la central presentan un estado de operación bueno gracias a los mantenimientos realizados a través de los años, entre los equipos que conforman la Central Illuchi 2 se pueden citar dos grupos generadores compuestos por turbinas, máquinas generadoras, reguladores de velocidad, excitatrices, además de un ordenador y equipos de comunicación, un transformador de servicios auxiliares, banco de baterías y un transformador de elevación de voltaje.

III. SISTEMA DE OBTENCIÓN DE DATOS, COMUNICACIÓN Y EVALUACIÓN

Desde su instalación la central Illuchi 2 cuenta con equipos de protección y control de tipo electromecánico de fábrica, con el paso del tiempo y el desarrollo de la tecnología se modernizó dicho sistema a uno más actual, el mismo que involucra dos relés de protección MiCOM P343 de Schneider Electric, uno para cada unidad de generación; si bien los dispositivos son relativamente nuevos, no poseen protocolos de comunicación inalámbrica como los modelos de última tecnología lo cual dificulta desarrollar aplicaciones que permitan visualizar los parámetros que pueden ser obtenidos por el relé.

A. Relés MiCOMP343 de la Central Illuchi 2

El relé MiCOM P343 es uno de los más utilizados para proteger sistemas de generación en el Ecuador, si bien el relé cumple perfectamente con las tareas de protección al generador, demanda de unidades de comunicación como RTUs para satisfacer los requerimientos y necesidades de conectividad que un sistema SCADA exige para su correcto funcionamiento.

Cada relé viene de fábrica con un software llamado MiCOM S1 STUDIO V 5.0 que permite realizar funciones

como visualización de configuración del dispositivo, extracción de parámetros de medición y adquisición de archivos de perturbación en estándar COMTRADE. El software mencionado permite realizar una conexión rápida entre el relé de protección y el ordenador a través de un cable trenzado DB9 por el puerto serial RS-232.

A. Estándar COMTRADE

El estándar COMTRADE define un formato común para archivos de datos y un medio de intercambio necesario para el análisis de varios tipos de fallas, pruebas o datos de simulación. El estándar fue presentado por primera vez en el año de 1991 para dar respuesta a las necesidades antes descritas, teniendo desde su aparición un éxito rotundo, haciendo innecesaria una revisión sino hasta el año 1999 en la cual se incluyeron y eliminaron características que se detallan en los numerales siguientes. Además se han realizado revisiones en los años 2001, 2005 y 2013 [1], [2].

El estándar COMTRADE se compone de tres archivos necesarios para el almacenamiento de perturbaciones y un opcional para información, los archivos se describen a continuación:

1) *Archivo “.HDR” o de encabezamiento:* El archivo de encabezamiento se origina por el generador del dato de falla utilizando un programa procesador de texto. En el archivo de encabezamiento se incluye información en cualquier formato ASCII deseado de cualquier longitud. [1], [2].

2) *Archivo “.CFG” o de configuración:* La creación del archivo de configuración tiene como motivo proporcionar información necesaria para ser reconocida por un programa computacional, el mismo que interpreta y lee los valores de datos en los archivos de datos asociados. Contenido del archivo de configuración

1. Nombre de la estación e identificación
2. Número y tipos de canales
3. Nombres de canales, unidades y factores de conversión
4. Fecha y hora del primer dato
5. Fecha y hora del punto de disparo
6. Tipo de archivo

3) *Archivo “.DAT” o de datos:* El archivo de datos contiene los valores de cada muestra en cada uno de los canales de entrada. El número almacenado de cada muestra es usualmente el número producido por el dispositivo que realiza un barrido de la onda de entrada.

Se decidió realizar la comunicación mediante el protocolo RS-232 a través de un cable par trenzado DB9, debido a las ventajas que presenta como confiabilidad en la comunicación, baja complejidad de conexión y configuración; y realizar el acceso a los datos almacenados en el relé por medio de la lectura de archivos en estándar COMTRADE por ser variables configuradas de fábrica y que no intervienen con el conflicto del mapa de configuraciones.

IV. FUNDAMENTOS PARA LA MODELACIÓN DE CURVAS DE CAPACIDAD DE GENERADORES SINCRÓNICOS DE POLOS SALIENTES

La generación eléctrica de energía hidráulica conlleva el uso y aplicación de máquinas generadoras de polos salientes impulsados por turbinas de agua. Dichos generadores funcionan óptimamente en zonas establecidas que se detallan y se pueden visualizar de mejor manera en las curvas de capacidad del generador, las cuales son proporcionadas por el fabricante o pueden ser calculadas conociendo los parámetros eléctricos y operativos del generador; y sirven como referencia para una operación segura y confiable. Las curvas de capacidad están diseñadas en función de los criterios constructivos propios de cada máquina sincrónica de polos salientes.

El desarrollo de la modelación matemática de las curvas de capacidad del generador es muy importante especialmente en sistemas de generación que ya tienen un tiempo considerable de aprovechamiento, como es el caso de los generadores de la central Illuchi 2, en el presente proyecto se describe el estudio e implementación de un sistema que permita la fácil visualización, identificación y evaluación el estado de operación de los generadores durante una perturbación o con valores de operación actuales.

A. Análisis del diagrama fasorial

La construcción de las curvas de capacidad del generador toma como base un diagrama de fasores, el cual se detalla en la Fig. 1. Los diagramas fasoriales se refieren a la representación de los fasores de voltajes y corrientes originados en una máquina sincrónica, en este caso un generador sincrónico con rotor de polos salientes. “En el caso de la máquina con rotor de polos salientes, existe una dirección preferente de magnetización, determinada por las saliencias polares, ya que la reluctancia del entrehierro es apreciablemente menor en el sentido longitudinal de los polos, es decir del eje polar (eje d); que en el del eje del espacio entre los polos, eje transversal o eje en cuadratura (eje q)” [3].

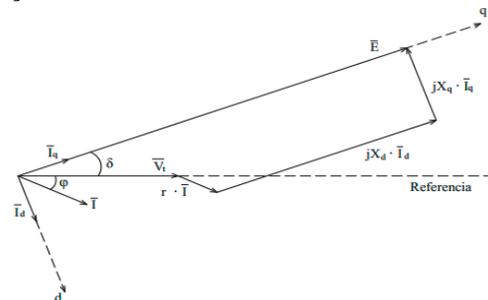


Fig.1 Diagrama fasorial considerando la resistencia estática

B. Potencia activa y reactiva

Para iniciar el análisis de las ecuaciones que rigen los límites operativos del generador sincrónico, se parte de las expresiones para potencia activa y reactiva que provee el generador sincrónico de polos salientes conectado a un

sistema eléctrico de potencia, las cuales empiezan con base de la ecuación vectorial de la potencia aparente [4], [5], [6].

$$S = \bar{V} \cdot \bar{I}^* \quad (1)$$

$$\bar{I} = \bar{I}_d + \bar{I}_q \quad (2)$$

$$\bar{E} = \bar{V}_t + jX_d \cdot \bar{I}_d + jX_q \cdot \bar{I}_q \quad (3)$$

Debido a que el generador sincrónico gira a velocidad constante, la única forma de realizar una variación en la potencia activa es mediante el control del torque que gobierna en el rotor por la acción de fuente mecánica de energía en este caso la velocidad de la turbina [4], [5].

$$P = \frac{V_t \cdot E}{X_d} \text{sen}(\delta) + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \text{sen}(2\delta) \quad (4)$$

El primer término de la ecuación de potencia activa se refiere al torque electromagnético generado en la maquina sincrónica en función de $\text{sen}(\delta)$, mientras que el segundo término se refiere a la potencia de reluctancia en función de $\text{sen}(2\delta)$, el cual resalta el efecto de los polos salientes y es independiente de la excitación del campo [4], [5].

Cuando un generador se conecta a un sistema eléctrico de potencia su velocidad que está en función de la frecuencia del sistema y el voltaje terminal permanecen fijos. Debido a esto las variables que se tiene para el control son la corriente de campo y el torque mecánico del rotor. La variación en la corriente de campo que se aplica al generador permite suministrar o absorber una cantidad variable de potencia reactiva.

$$Q = \frac{V_t \cdot E}{X_d} \cdot \cos(\delta) + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos(2\delta) - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \quad (5)$$

C. Curvas de capacidad del generador

La curva de capacidad del generador está dada por el fabricante de la máquina o pueden ser calculadas conociendo los parámetros eléctricos y operativos del generador; y es usada principalmente para planificación de operaciones en la central de generación. Se han realizado estudios basados en estas curvas orientados a técnicas de optimización para generación óptima de potencia en diferentes escenarios de operación del generador. Los estudios realizados se enfocan a encontrar un equilibrio ideal entre el aprovechamiento del recurso que alimenta la central, en el caso de la central Illuchi 2 recurso hídrico y el cumplimiento de la calidad del servicio. Generalmente, este tipo de curvas se grafican en función de los parámetros de diseño, sin embargo contemplan los parámetros de operación de la central [7], [8], [9].

Las curvas de capacidad de la máquina generadora representan los límites mecánicos y eléctricos en los planos P y Q a partir de los parámetros de construcción del misma, los

límites que conforman las curvas de capacidad no dependen del funcionamiento del generador, con excepción del límite por servicios auxiliares pero para el caso de la central Illuchi 2 no se considera debido a que la carga por servicios auxiliares no es representativa, el transformador de servicios auxiliares es de baja capacidad (100 kVA) representando alrededor del 1,9% en relación a la potencia nominal producida por central (5,2 MVA) y por ende estos límites no cumplen la función de delimitar la operación óptima de los generadores en estudio.

En la Tabla I se detallan los equipos del grupo generador – turbina 1 y 2 de la Central Illuchi 2 con sus respectivas magnitudes y unidades que serán utilizadas para los cálculos de las curvas de capacidad de los mismos [4], [5], [6].

TABLA I
DATOS DE LOS EQUIPOS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI 2

Equipo	Magnitud	Unidad	Parámetro
Generadores 1 y 2	3250	kVA	Potencia aparente
	0,8	-	Factor de potencia
	60	Hz	Frecuencia
	720	rpm	Velocidad
	10	-	Polos
	2400 ± 5%	V	Voltaje
	781,8	A	Corriente
Generador 1	1,51*	p.u.	Impedancia (X_d)
	1,057*	p.u.	Impedancia (X_q)
Generador 2	1,69*	p.u.	Impedancia (X_d)
	1,183*	p.u.	Impedancia (X_q)
Turbina 1 y 2	2675	kW	Potencia activa
	950	l/s	Caudal
	720/1320	rpm	Velocidad
Transformador Principal	6500	kVA	Potencia aparente
	2400/13800	V	Voltaje
	8,43	%	Impedancia
	± 2 de 2,5%	%	Taps en Alto Voltaje

* Los datos en p.u. de las impedancias están dados sobre una $Z_{base} = 1,772 \Omega$

▪ Límites Mecánicos

1. Potencia mecánica máxima

La potencia activa máxima viene definida por la potencia máxima disponible del grupo generador turbina y la potencia que este a su vez pueda entregar a sus terminales. Esta capacidad viene limitada por el diseño propio de la turbina y el esfuerzo máximo mecánico que esta puede soportar,

aunque también depende de la disponibilidad de la fuente primaria de energía en este caso el agua y su circulación [6].

2. Potencia mecánica mínima

La potencia activa mínima del grupo generador turbina viene definida por la capacidad de regulación de la potencia mecánica de la turbina enmarcado en un valor de eficiencia que sea aceptable y además de los esfuerzos o pérdidas de los componentes asociados al generador como son las pérdidas en el cobre de los bobinados, pérdidas en el hierro tanto del estator como del rotor y las pérdidas rotacionales por nombrar los de mayor magnitud [6], [10].

▪ Límites Eléctricos

1. Límite por corriente de armadura

Este límite se refiere al calentamiento del cobre en los bobinados del estator del generador sincrónico que obedece a la fórmula $I^2 \cdot R$. Para determinar este límite se toma en cuenta la corriente máxima del estator (corriente nominal) que multiplicada por el voltaje a los terminales da como resultado la potencia aparente (S).

La forma de obtener la gráfica de este límite es dando valores a la potencia reactiva (Q) que van desde el factor de potencia igual a 0 en adelante hasta un factor de potencia 0 en atraso, luego de esto se debe aplicar la fórmula (6) para calcular los distintos valores de salidas de potencia activa (P) con una potencia aparente (S) constante.

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad (6)$$

2. Límite por corriente mínima de campo

El límite se obtiene a partir de un voltaje interno mínimo (E_{min}) que generalmente se lo toma del 5 al 20 % del voltaje interno nominal (E_{nom}), dicho rango de valores es recomendado por el fabricante [11].

Para determinar este límite se debe seguir el siguiente procedimiento: [4]

Se obtiene el ángulo nominal de desfase (δ_{nom}) entre V_t y E_{nom} , además de la magnitud de E_{nom} de (7).

$$E_{nom} = \frac{\left(P_1 - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \text{sen}(2\delta_{nom}) \right) \cdot X_d}{V_t \cdot \text{sen}(\delta_{nom})} \quad (7)$$

$$\frac{P_1}{\tan(\delta_{nom})} - \left[V_t^2 \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \text{sen}^2(\delta_{nom}) \right] = 0 \quad (8)$$

A continuación, se calcula el ángulo de desfase máximo entre V_t y E_{min} (δ_{max}) realizando la operación de derivación de la expresión (4) respecto a δ así:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{E_{min} \cdot V_t}{X_d} \cdot \cos(\delta_{max}) + V_t^2 \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos(2\delta_{max}) = 0 \quad (9)$$

Para obtener la gráfica de este límite se procede a calcular distintos valores de P y Q asignando valores a δ que van desde 0 hasta un valor igual al δ_{max} en las fórmulas (4) y (5).

3. Límite por corriente máxima de campo

Para calcular este límite se debe tomar en cuenta que hay un valor máximo en la corriente de excitación debido al sobrecalentamiento del cobre en los bobinados del rotor.

Se obtiene este límite realizando el cálculo del voltaje interno máximo (E_{max}) del generador que generalmente es el voltaje interno nominal (E_{nom}) calculado en el numeral anterior. Una vez calculado el E_{nom} se procede a obtener el δ_{max} para cada generador.

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{E_{nom} \cdot V_t}{X_d} \cdot \cos(\delta_{max}) + V_t^2 \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos(2\delta_{max}) = 0 \quad (10)$$

Finalmente, para obtener la gráfica de este límite se procede de la misma forma en la cual se obtuvo el límite por corriente mínima de campo, solamente variando para este caso el valor del δ_{max} .

4. Límite por margen de estabilidad en estado estable

Este límite representa de manera práctica a una provisión de potencia que tienen este tipo de generadores sincrónicos de polos salientes mientras entregan su máxima capacidad en potencia activa, al aparecer una variación en la carga a la cual está conectado el sistema el generador podría encontrarse en una zona de inestabilidad (el concepto de inestabilidad para un generador de este tipo se refiere a perder el sincronismo con el sistema eléctrico de potencia al cual se encuentra conectado) [4], [5], [6].

Con el fin de evitar la inestabilidad se considera un margen de estabilidad en estado estable comúnmente del 10% de la potencia activa nominal (P_{max}).

El margen de estabilidad en estado estable se hace apreciable cuando el generador está en condición de subexcitación debido a que en esta condición las variaciones causadas por los aumentos o disminución de cargas en el sistema son mucho más sensibles que en la región de sobreexcitación [4], [5], [6].

$$P_{i1} = P_{max1} - MEEE \cdot P_{max1} \quad (11)$$

Esta potencia P_{i1} se constituye en el primer punto del par ordenado (Q_i, P_i) que forma la gráfica del límite por margen de estabilidad en estado estable. Para conocer el lugar geométrico total de este límite es necesario realizar el cálculo siguiendo el proceso que se detalla a continuación:

- Plantear un sistema no lineal de dos ecuaciones, para mediante su resolución obtener el valor de E_{max1} .

$$P_{max1} = \frac{V_t \cdot E_{max1}}{X_d} \cdot \text{sen}(\delta_{max}) + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \text{sen}(2\delta_{max}) \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_o}{\partial \delta_o} = \frac{E_{max1} \cdot V_t}{X_d} \cdot \cos(\delta_{max}) + V_t^2 \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos(2\delta_{max}) = 0 \quad (13)$$

- Con este valor obtener δ_{maxME1} .

$$P_i = \frac{V_t \cdot E_{max1}}{X_d} \cdot \text{sen}(\delta_{maxME1}) + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \text{sen}(2\delta_{maxME1}) \quad (14)$$

- Con el E_{max1} y el δ_{maxME1} calculados obtener los valores para Q_i los cuales al ser graficados conjuntamente con los valores de P_i da como resultado el primer punto del límite que representa el margen de estabilidad en estado estable.
- Finalmente para encontrar los puntos restantes para formar la curva del límite por margen de estabilidad en estado estable se van variando los valores de P_{i1} a P_{i2} y se realiza el mismo proceso detallado anteriormente empezando en (11).

D. Análisis de las zonas de operación del generador

Para el análisis de las zonas de operación se ha dividido a las curvas de capacidad del generador sincrónico de polos salientes en 2 zonas identificadas.

1. Zona segura

Se refiere a la región enmarcada por las curvas de capacidad de la unidad generador turbina e indica que está operando dentro de los límites establecidos y en forma segura. Los fabricantes de las máquinas recomiendan siempre la operación de sus equipos en esta zona ya que dentro de la misma el generador no corre el riesgo de daños por temperatura en los devanados y la planificación de operaciones futuras se realiza en función de los límites de esta región. En la Fig. 1 se puede apreciar esta zona en color verde con franjas de color blanco.

2. Zona no segura

Cuando el generador opera en esta zona puede causar sobrecalentamiento de los devanados tanto del rotor como del estator y de ser así, el generador entraría en una zona de operación no segura, teniendo como posible consecuencia la salida de sincronismo del generador respecto al sistema al que se encuentra conectado. Como resultado de ello, los

devanados tanto del estator como del rotor sufrirían graves daños por exceso de temperatura. En la Fig. 2 se puede apreciar esta zona en color rojo [3], [12].

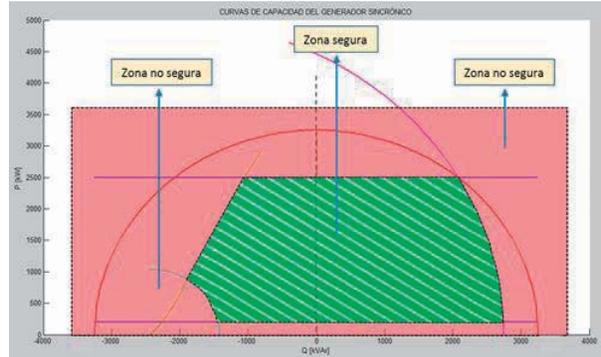


Fig. 2 Zonas de operación del generador

V. DESARROLLO DEL SOFTWARE

A. Interfaz gráfica de la Central Illuchi 2 (IGCI).

La interfaz gráfica de la Central Illuchi 2 tiene como finalidad relacionar al operador con el sistema de evaluación de estado de funcionamiento de las unidades generadoras, haciendo posible la visualización del punto de operación de la central en la curva de capacidad del generador de la unidad seleccionada gracias a la adquisición de variables tales como voltajes y corrientes de línea.

Finalmente, para la realización de este proyecto se ha decidido:

- Obtener los registros de perturbación de los dispositivos de protección de las unidades generadoras en estándar COMTRADE
- Utilizar el puerto frontal RS-232 mediante cable multipar no cruzado
- Realizar la obtención del estándar COMTRADE por medio del software MiCOM S1 Studio

Utilizar la plataforma MATLAB para:

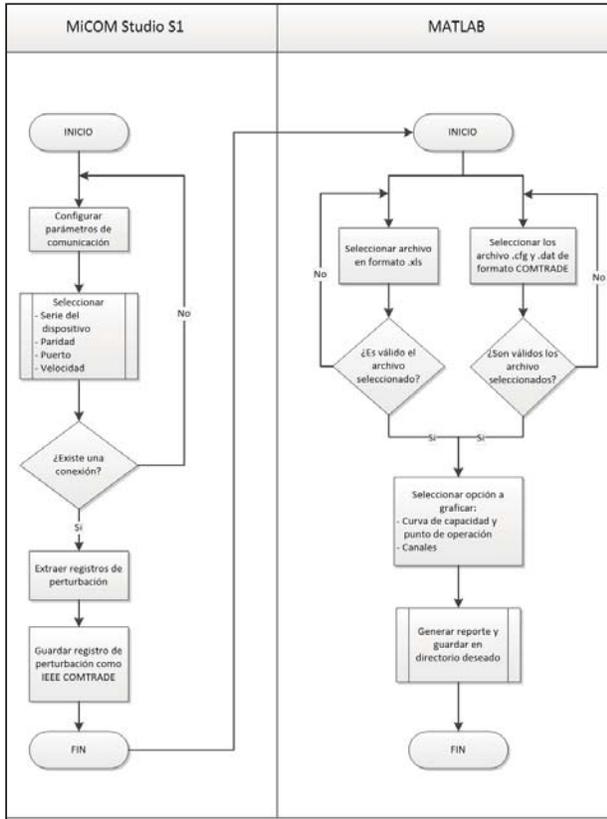
- Crear el código de programación para graficar la curva de capacidad del generador
- Crear un algoritmo de tratamiento de archivos .dat y .cfg COMTRADE para encontrar el punto de operación y ubicarlo en la curva de capacidad del generador
- Crear una interfaz gráfica de interacción hombre-máquina HMI en GUIDE, que permita visualizar los gráficos generados en el numeral 4 y 5, además de la posibilidad de exportar un reporte de resultados en Microsoft Excel (*.xls).

El tratamiento que realiza el software IGCI consiste en calcular parámetros necesarios como: potencia activa, reactiva y aparente además del factor de potencia, corrientes y voltajes máximos y mínimos; por medio de la identificación

de puntos referenciales en el tiempo y posteriormente realizar operaciones de manera iterativa en lazos de repetición.

durante una perturbación, en tanto que el círculo representa el punto de operación actual en ese momento. Los indicadores de operación se muestran en color verde para operación en zona segura y en rojo para operación en zona no segura.

B. Diagrama de flujo del funcionamiento de la herramienta IGCI 2015



C. Análisis de resultados

Al haber ejecutado el software IGCI con un archivo COMTRADE obtenido, se tiene como resultado final una gráfica que indica el estado de operación de un generador durante una perturbación, para poder realizar un análisis se debe evaluar los casos de registros de perturbación obtenidos en horas de demanda máxima, media y mínima. En la Fig. 3 se detalla la leyenda de los indicadores de operación con los nombres de los límites, puntos de operación y perturbación.

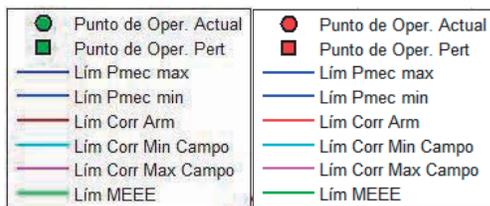


Fig. 3 Leyenda de los diferentes indicadores de operación

El cuadrado representa el punto de operación del generador

1. Demanda máxima

En valores de potencias de operación en demanda máxima se espera una entrega de potencia activa mayor, una potencia reactiva menor y un factor de potencia alto como muestran los indicadores de operación. El cuadrado de color rojo representa el punto de operación durante la perturbación dando como valores de potencia activa 3102,8 kW y 0 kVAR para potencia reactiva. El punto de color verde representa la operación actual en ese momento a una potencia activa de 2100 kW y 800 kVAR de potencia reactiva dentro de la zona segura de operación como se observa en la Fig. 4.

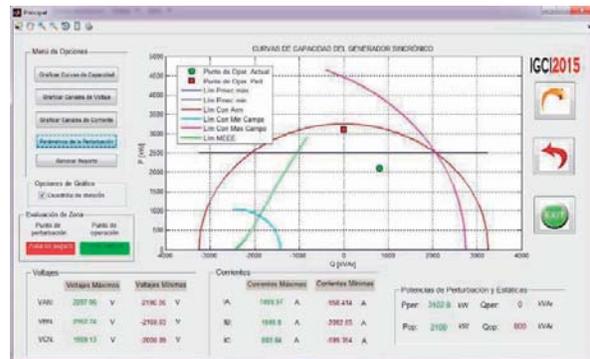


Fig. 4 Evaluación del estado de operación en demanda máxima

2. Demanda media

Para el escenario de operación en demanda media los valores de potencia activa son menores en tanto que la potencia reactiva incrementa su valor en referencia a la demanda máxima como lo indican los puntos de operación. La operación actual en ese momento es representada por el punto de color verde dando valores de operación para potencia activa de 1500 kW y 1200 kVAR para potencia reactiva, la operación durante la perturbación se representa por el cuadrado de color verde con una potencia activa de 1908,99 kW y 511,94 kVAR para potencia reactiva. La operación del generador está dentro de la zona segura de las curvas de capacidad como se observa en la Fig. 5.

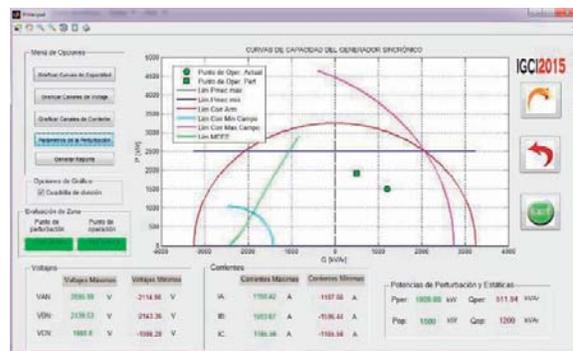


Fig. 5 Evaluación del estado de operación en demanda media

3. Demanda mínima

Como se puede observar a través del punto en color verde que representa la operación actual en ese momento, el valor de potencia activa es 500 kW y el de reactiva es 800 kVAr los mismos que están dentro de la zona segura de operación. De la misma manera, el punto de operación durante la perturbación, que se indica con el cuadrado de color verde, representa una operación segura con 65,355 kW y 65,2898 kVAr para potencia activa y reactiva respectivamente, como se puede apreciar en la Fig. 6.



Fig. 6 Evaluación del estado de operación en demanda mínima

D. Relación curvas de capacidad – perturbación

La relación que existe entre parámetros como la duración y el tipo de perturbación se representa en la posición del punto que indica el estado del generador durante la perturbación en las curvas de capacidad representadas en el software IGCI 2015. La duración de la perturbación se puede verificar en la sección diseñada para visualizar los canales de voltaje y corriente en un intervalo de 1,6 segundos; al realizar una comparativa entre dichos canales se puede determinar el tiempo de duración de la perturbación, junto con un estudio posterior así como una implementación de un sistema SCADA a este proyecto, se podría determinar el tipo de perturbación y de esta manera, contar con un sistema integral de evaluación, análisis y control de la Central Hidroeléctrica Illuchi 2.

E. Aplicaciones del análisis de las zonas de operación del generador

- Calibración de relés de protección de los generadores para operación en estado estable
- Estudios de colapso de voltaje
- Utilidades productivas del software

Dos de las principales aplicaciones que ofrece este software son la calibración de relés de protección de sistemas de generación, al permitir visualizar valores medidos durante el funcionamiento y compararlos con valores referenciados preestablecidos en los sistemas de protección que protegen el generador; los estudios de colapso de voltaje, los cuales son muy importantes para conocer la potencia remanente que el

generador puede entregar y de esta manera poder realizar los estudios pertinentes sobre el crecimiento de la carga y consecuentemente la inestabilidad en la que el sistema eléctrico podría caer; finalmente entre las utilidades productivas que ofrece el software se halla la posibilidad de verificar si la calibración de protecciones que consideran el porcentaje de sobrecarga del generador se encuentran en los parámetros adecuados, ya que el software desarrollado solo permite la verificación y evaluación de todo el sistema de generación a través de archivos de perturbación en estándar COMTRADE los mismos que se generan en cada evento de perturbación y mas no en tiempo real.

VI. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se realizó el análisis de la situación actual de la Central Hidroeléctrica Illuchi 2 enfocado hacia la implementación de un sistema que permita evaluar el estado de operación de los generadores de la central. Se detallan los parámetros de comunicación con los que se asegura la adquisición de datos requeridos para determinar el punto de operación de los generadores. Se desarrolla un programa llamado IGCI en la plataforma MATLAB con el fin de realizar una interfaz gráfica amigable con el usuario, el software utiliza algoritmos de programación avanzada que la plataforma ofrece.

El estándar COMTRADE es una herramienta fundamental para realizar actividades de calibración de protecciones en sistemas de generación eléctrica, y también una buena alternativa para cubrir necesidades de evaluación de sistemas de generación relativamente antiguos que no cuentan con equipos que manejan protocolos de comunicaciones de alto nivel como son RTUs, TCP/IP, o sistemas SCADA.

Los datos obtenidos en estándar COMTRADE si bien son limitados en comparación a paquetes de información que equipos de mayor tecnología pueden brindar, son suficientes para realizar la evaluación técnica de los parámetros de operación de cualquier central de generación. Para el caso particular de la Central Hidroeléctrica Illuchi 2 los resultados obtenidos son satisfactorios tanto en funcionamiento del software creado, hardware implementado en campo y evaluación del estado de operación de los generadores.

Los generadores de la Central Hidroeléctrica Illuchi 2 operan dentro de los límites recomendados en las curvas de capacidad obtenidas. Al realizar el estudio y evaluación de la operación de los generadores en casos de perturbación en demanda máxima, media y mínima se obtienen valores que cumplen los parámetros de funcionamiento establecidos por los centros de control y también valores dentro de la zona no segura de operación durante periodos de tiempo muy cortos.

El software desarrollado en este proyecto permite la evaluación del punto de operación y curvas de capacidad de cualquier tipo de generador sincrónico de polos salientes de proyectos de generación de alta, mediana o baja potencia, dejando abierta la posibilidad de que en el futuro el siguiente paso a seguir sea enlazar la herramienta IGCI a un sistema de adquisición de datos en tiempo real como lo es el sistema SCADA, así como también la creación de una interfaz que permita visualizar el desplazamiento del punto de operación desde un estado estable hacia un estado en el cual se produjo una perturbación.

REFERENCIAS

- [1] B. Ryan and Shank, C, "IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems," *IEEE Std C37111-1999*, pp. 1–55, Oct. 1999.
- [2] S. Böhler, "Development of a wavelet-based algorithm to detect and determine certain disturbances in power networks." Oct-2003.
- [3] J. Játiva, "Incorporación de Límites por Restricciones de Servicios Auxiliares en las Curvas de Capacidad de Generadores de Centrales Eléctricas." *Revista Politécnica*, Jul-2013.
- [4] O. Ramírez, "Análisis de Colapso de Voltaje por el Método de Continuación de Flujos de Potencia Considerando Zonas Seguras de Operación de Generadores Síncronos." Sep-2008.
- [5] M. Rodríguez, "Máquinas Síncronas: Potencias activa y reactiva. Estabilidad estática."
- [6] M. M. Adibi and D. P. Milanicz, "Reactive capability limitation of synchronous machines," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 29–40, Feb. 1994.
- [7] A. Capasso and E. Mariani, "Influence of Generator Capability Curves Representation on System Voltage and Reactive Power Control Studies," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-97, no. 4, pp. 1036–1041, Jul. 1978.
- [8] P. E. Sutherland, "Safe Operating Limits," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 17, no. 5, pp. 14–19, Sep. 2011.
- [9] I. Calero, "Protección de generadores eléctricos mediante relés microprocesados multifuncionales." Jul-2008.
- [10] D. Esmaeil Moghadam, A. Shiri, S. Sadr, and D. A. Khaburi, "A practical method for calculation of over-excited region in the synchronous generator capability curves," in *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2014, pp. 727–732.
- [11] G. Cabrera, "Estudio de colapso de voltaje del Sistema Nacional Interconectado para el año 2014 mediante una aplicación desarrollada en Matlab." 17-Sep-2015.
- [12] C. Tobar, "Diagramas P-Q para generadores síncronos." Mar-1981.



Juan C. Calvopiña nació en Ambato, Ecuador en 1991. Sus estudios secundarios los realizó en el Instituto Superior "Bolívar" de la ciudad de Ambato, realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, se desempeñó como ayudante de cátedra del laboratorio de alto voltaje y obtuvo su título de Ingeniero Eléctrico en Enero de 2016. Sus áreas de interés son operación de centrales eléctricas e instalaciones eléctricas.



Santiago J. Maita nació en Ambato, el 3 de enero de 1992. Sus estudios secundarios los realizó en el Instituto Superior Tecnológico Docente Guayaquil de la ciudad de Ambato. Actualmente está culminando su proyecto de titulación para recibirse de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional y se destaca como ayudante de los distintos laboratorios del Departamento de Energía Eléctrica de la EPN.



Gonzalo E. Constante (M'15) obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2014. Desde el mismo año se desempeña como Técnico Docente del Departamento de Energía Eléctrica en la misma universidad. Sus principales áreas de interés incluyen el análisis, simulación y optimización de sistemas eléctricos, redes eléctricas inteligentes y microrredes.



Franklin L. Quilumba (S'10-M'14) obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en Quito, Ecuador, en el 2008. Realizó sus estudios de posgrado en la Universidad de Texas Arlington, en Arlington, Estados Unidos de América, donde obtuvo el grado de Master of Science in Electrical Engineering y el título de Doctor of Philosophy Ph.D. en el 2014.

Desde el 2014, el Dr. Quilumba es parte del cuerpo docente de la Escuela Politécnica Nacional, donde es Profesor Agregado. Sus áreas de interés son análisis, operación, estabilidad y control de sistemas eléctricos de potencia, modelación de carga, planeación de generación y transmisión; respuesta de la demanda; y predicción de carga.