

Esquema de alivio de carga por inestabilidad de voltaje mediante el índice de estabilidad de voltaje - impedancia

Load Shedding Scheme for voltage instability using voltage – impedance ratio

Fonseca Antonio^{1*}; Salazar Gabriel²

¹Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC - EP, Unidad de Negocio Transelectric, Quito, Ecuador

²Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Quito, Ecuador

*antonio.fonseca@celec.gob.ec

Resumen

En este documento se plantea la utilización del Índice de Estabilidad de Voltaje - Impedancia (IEVZ) para establecer un arranque confiable dentro de un esquema de alivio de carga ante inestabilidad de voltaje. El IEVZ se obtiene mediante el procesamiento de la relación entre Voltaje e Impedancia medida en un punto terminal de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). La metodología planteada se aplica al sistema IEEE de 14 barras.

Palabras clave: Estabilidad de voltaje, colapso de voltaje, esquema de alivio de carga, índice de estabilidad de voltaje impedancia (ievz), dispositivo electrónico inteligente (ied), sistema eléctrico de potencia (sep).

Abstract

This document proposes the use of Voltage Impedance Stability Index (IEVZ) to define a reliable start of load shedding in order to mitigate voltage instability in power system. The IEVZ is based on signal processing of the voltage and impedance ratio, both variables measured at a terminal point of a power system. The methodology proposed has been applied to 14 buses – IEEE system.

Keywords: Voltage stability, voltage collapse, load shedding scheme, voltage-impedance stability index (ievz), intelligent electronic device (ied), power system (sep).

1 Introducción

El fenómeno de Estabilidad de Voltaje, se convierte en un aspecto cada vez más trascendente en la operación de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Esto debido a que los niveles de cargabilidad de los elementos de un SEP se incrementan y los márgenes seguros de operación disminuyen, llegando inclusive, para cierto tipo de contingencias, a alcanzar puntos de inestabilidad de voltaje.

Por esta razón el monitoreo de un SEP, desde la perspectiva de estabilidad de voltaje, resulta necesario implementarlo especialmente considerando las nuevas tecnologías existentes como la medición sincrofásorial (Cepeda y col., 2014).

Sin embargo, cuando el SEP alcanza puntos de inestabilidad,

es necesario implementar mecanismos de mitigación automáticos, que generalmente consisten en aumentar la generación o reducir la carga, con la finalidad de evitar un colapso total del sistema.

Los mecanismos de mitigación deben ser confiables. Este aspecto, es una condición que ha sido considerada como el principal inconveniente en la implementación de los mismos basados únicamente en medición de voltaje, debido a que en la operación de un SEP se producen fluctuaciones de voltaje que no necesariamente son una consecuencia de fenómenos de inestabilidad de voltaje.

La presente propuesta, plantea como alternativa, utilizar el Índice de Estabilidad de Voltaje – Impedancia (IEVZ), de tal manera que permita establecer un criterio más confiable para la operación de los mecanismos de mitigación ante inestabilidad de voltaje.

2 . Conceptos básicos

2.1 Definición de Estabilidad de Voltaje

La IEEE-CIGRE mediante el documento “Definition and Classification of Power System Stability”, define a la estabilidad de voltaje como “la habilidad de un sistema de potencia para mantener voltajes estables en todas las barras del sistema después de haber sido sometido a un disturbio, desde una condición inicial dada”. (IEEE/CIGRE Joint Task Force, 2004)

Desde el punto de vista práctico, la estabilidad de voltaje se relaciona con la capacidad de mantener y/o restablecer el transporte de potencia activa y reactiva desde el SEP hacia la carga. Cuando este equilibrio se rompe, se puede producir una progresiva disminución de los niveles de voltaje en todo el SEP, y es probable que el mismo llegue a un estado de “Colapso de Voltaje”.

2.2 Capacidad de los sistemas de transmisión

Considerando el sistema de la Fig. 1, en el que por simplicidad se desprecia la resistencia del sistema, es posible establecer las ecuaciones de flujo de carga desde el generador.

$$P = -\frac{EV\text{sen}(\delta)}{X}$$

$$Q = \frac{V^2 - EV \cos(\delta)}{X}$$

(1)

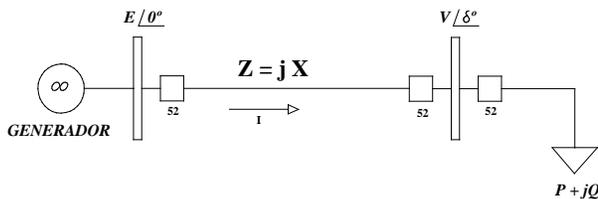


Fig. 1. Barra infinita, línea de transmisión y carga

Mediante estas ecuaciones y eliminando el ángulo se obtiene:

$$P^2 + Q^2 + \frac{2QV^2}{X} + \left(\frac{V^2}{X}\right)^2 - \left(\frac{EV}{X}\right)^2 = 0$$

(2)

Ecuación que corresponde a una de segundo orden con respecto a V², con solución:

$$V = \sqrt{\frac{-(2QX - E^2) \pm \sqrt{(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2)}}{2}}$$

(3)

En (3) existe solución real si:

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0$$

(4)

La ecuación (4), igual a cero, establece una sola solución de voltaje al flujo de potencia. Consecuentemente esta ecuación, en su igualdad a cero, representa el límite para el cual el sistema tiene convergencia en la solución de su flujo de potencia.

3 Planteamiento, simulación y análisis del ievz

3.1 Modelamiento del IEVZ

Para el siguiente análisis se considera el modelo de barra infinita - carga, indicado en la figura 2.

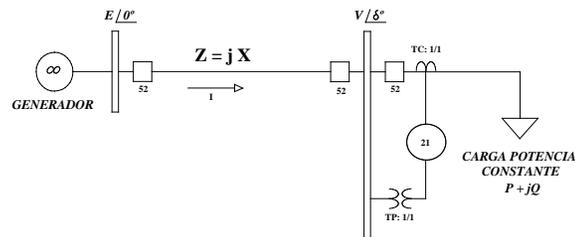


Fig. 2. Modelo de Barra Infinita - Carga

El esquema considera la carga mediante un modelo de potencia constante. Posteriormente se analizarán los diversos modelos de carga existentes.

Sea S_{sc} = E²/X, variable que corresponde a la potencia de cortocircuito en la barra de carga, se tiene:

$$S_{sc} = \frac{V^4 + 2QV^2 + (P^2 + Q^2)X^2}{XV^2}$$

(5)

Considerando el reemplazo de (5) en (4), se obtiene (6)

$$\frac{-4P^2 - 4S_{sc}Q + S_{sc}^2}{4S_{sc}} \geq 0$$

(6)

De la definición de la variable S_{sc}, ésta será siempre mayor a cero, por lo que:

$$-4P^2 - 4S_{sc}Q + S_{sc}^2 \geq 0$$

(7)

Reemplazando en (7) el valor de S_{sc} determinado en la

ecuación (5):

$$V^8 - 2(P^2 + Q^2)X^2V^4 + (P^2 + Q^2)^2 X^4 \geq 0 \quad (8)$$

Adicionalmente, y considerando la medición de la impedancia de carga Z, determinada por ejemplo en un IED de distancia ubicado en el punto de la carga como se indicó en la Fig. 2, la ecuación (8), puede escribirse como:

$$V^8 \left[\left(\frac{X}{Z} \right)^4 - 2 \left(\frac{X}{Z} \right)^2 + 1 \right] \geq 0 \quad (9)$$

A partir de la ecuación (9) se establece el **ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE - IMPEDANCIA "IEVZ"** (Fonseca, 2009), a través del análisis del comportamiento dinámico de la impedancia Z y del voltaje V, ambos medidos en el punto de carga.

$$IEVZ = \frac{V^8}{Z^n} \quad (10)$$

Este indicador, en el que se presenta una variable que se denominará "Exponente de Impedancia - n", será siempre mayor a cero si existe al menos una solución del flujo de potencia.

3.2 Simulación del IEVZ

El IEVZ, representa la operación matemática de dos variables: Voltaje e Impedancia. El Power Factory de DigSilent, permite el desarrollo de modelos personalizados de dispositivos electrónicos inteligentes (IED's), mediante el manejo de bloques interconectados con los cuales se desarrolla el modelo que permite analizar el IEVZ (DIGSILENT Simulation Lenguaje, 2005).

Para la simulación del comportamiento del IEVZ, se realiza un análisis preliminar de estabilidad de voltaje tomando en cuenta los siguientes aspectos generales:

- Análisis mediante flujos de continuación. Se utiliza la metodología de escalamiento de carga.
- No se considera la dinámica de restauración de la carga.
- Modelos de carga: Impedancia constante (Z), Corriente constante (I), Potencia constante (P) y Modelo mixto (ZIP).
- Exponente de Impedancia "n" igual a uno.

El análisis se lo realiza mediante el sistema de la Figura 2, modelado a 138 kV, con una potencia base de 100 MVA y considerará el abastecimiento de una carga de 1pu en todos sus escenarios.

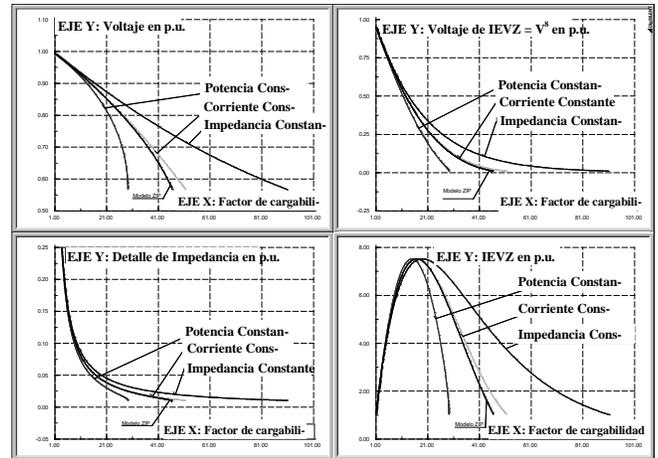


Fig. 3. Comparación de los modelos P, I, Z y ZIP

Se observa que el IEVZ presenta un valor máximo, el mismo que oscila en 7.5, para todos los modelos de carga, por otra parte este máximo ocurre en un porcentaje de la máxima cargabilidad del SEP. Sobre estas observaciones es posible establecer la actuación de un esquema de alivio de carga mediante el monitoreo de un máximo del IEVZ, lo cual indica que una vez alcanzado este máximo, el sistema se encuentra operando con un nivel de cargabilidad superior al establecido como máximo operativo para el sistema.

3.3 Análisis del IEVZ - Variación del exponente de Impedancia "n"

Considerando, la definición dada para el IEVZ, se tiene un máximo si la derivada del IEVZ con respecto al voltaje es cero. Esta ecuación puede ser integrada, y resuelta para "n", considerando límites máximos y mínimos dentro de un intervalo de integración:

$$n = 8 \cdot \left[\frac{\ln |V_{\max}| - \ln |V_{\min}|}{\ln |Z_{\max}| - \ln |Z_{\min}|} \right] \quad (11)$$

El intervalo de integración corresponde al definido por una "banda de cargabilidad" en la que se requiere se produzca el valor máximo del IEVZ. En base a esta banda, se establecen los límites de integración de voltaje e impedancia, requeridos en (11), tal como se indica en la figura 4 que corresponde a la simulación del modelo de carga ZIP con "n" igual a 1.

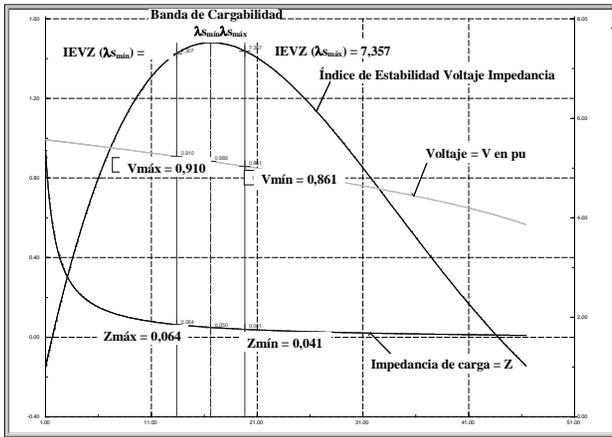


Fig. 4. Definición de la Banda de Cargabilidad

Es decir que mediante el exponente de impedancia “n”, es posible modificar el porcentaje de cargabilidad en el que ocurrirá el máximo valor del IEVZ.

4 Metodología para el esquema de alivio de carga por inestabilidad de voltaje – eaciv

La definición del algoritmo para un EACIV dependerá del sistema de potencia bajo estudio, consecuentemente, el modelamiento del SEP es de extrema importancia para un buen desempeño del EACIV. A continuación se exponen lineamientos generales para el ajuste y parametrización del EACIV, considerando la posibilidad de generar valores máximos del IEVZ en valores de cargabilidad predefinidos mediante estudios. El esquema general para establecer un EACIV se indica en la Fig. 5.

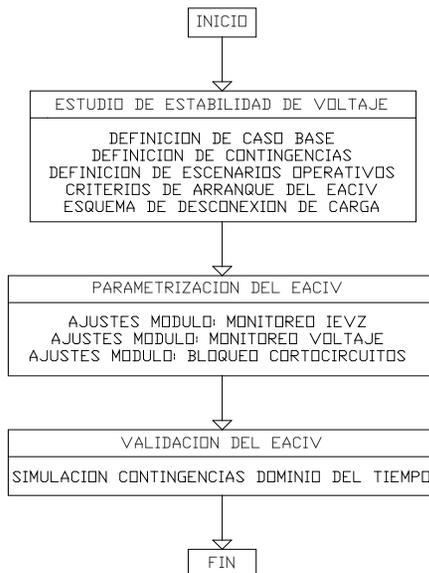


Fig. 5 Esquema general para el EACIV mediante monitoreo del IEVZ

Se detallarán únicamente los bloques “Estudio de Estabilidad de Voltaje” y “Parametrización del EACIV”; por cuanto el bloque de “Validación del EACIV” comprende explícitamente la simulación del esquema planteado.

4.1 Estudio de Estabilidad de Voltaje

El estudio de estabilidad de voltaje se enmarca en la determinación del caso base, los escenarios operativos probables y la definición de las contingencias que se produzcan en el SEP que puedan conllevar a una inestabilidad de voltaje. Adicionalmente, se plantea establecer los criterios de arranque así como el esquema de desconexión de carga del EACIV.

4.1.1 Definición del Caso Base

La definición del caso base debe llevarse a cabo considerando las condiciones topológicas previstas en el planeamiento operativo de mediano plazo. Es decir, deben considerarse escenarios macros en los que el SEP establecerá su operación y sobre los cuales se desarrollan los escenarios de corto plazo. p.ej. escenarios de alta y baja hidrología. Sobre éstos se definen los escenarios de corto plazo generalmente ligados a las condiciones de la carga: máxima, media y mínima demanda.

Adicionalmente, deben considerarse las condiciones de disponibilidad y mantenimientos de los diversos componentes del SEP.

Una vez definido el caso base, mediante la herramienta de flujos de continuación, es posible determinar la curva PV del mismo; y considerando los rangos de voltajes de operación normal, generalmente establecidos en los procedimientos de operación, es posible conocer los niveles de máxima cargabilidad a los que puede ser sometido el SEP.

4.1.2 Definición de Contingencias

La definición de las contingencias debe llevarse a cabo considerando los lineamientos operativos con los cuales se planifica la operación en tiempo real del SEP. Dentro de estos lineamientos se encuentran:

- Rangos de voltajes de operación normal y ante contingencias, generalmente establecidos en los procedimientos de operación.
- Nivel de confiabilidad considerado en la planificación operativa, generalmente ligado a la disponibilidad de elementos permitida.

Con estos lineamientos, se definen las contingencias más realistas que se producirían en el SEP y que conlleven a una inestabilidad de voltaje.

4.1.3 Definición de Escenarios Operativos y Contingencias Críticas

Los escenarios corresponden a condiciones de corto plazo y consecuentemente de mayor detalle en cuanto a la información de despacho de generación y carga. De manera general, éstos se definen mediante la determinación de la solución del flujo de potencia para un momento específico en el tiempo desde donde ocurrirán las contingencias.

En la Fig. 6 se observa que, desde un mismo caso base y dependiendo del escenario planteado, se pueden tener contingencias que generen condiciones estables e inestables.

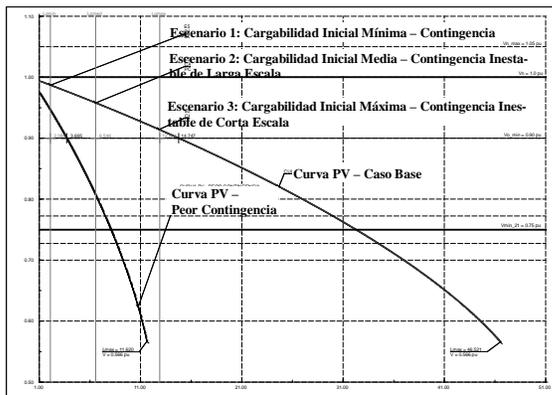


Fig. 6. Escenarios operativos y contingencias críticas

El EACIV será diseñado para cubrir las contingencias que puedan generar una inestabilidad de voltaje, mientras que para las contingencias estables el EACIV no debe operar. Para cumplir este objetivo se requiere establecer el peor escenario que, sobre las curva PV del caso base y de la peor contingencia, genere una inestabilidad de voltaje.

4.1.4 Criterios de arranque del EACIV

Una vez establecido: caso base, peor contingencia y peor escenario, es posible definir los criterios con los que arrancará el EACIV. En general, el concepto es que el SEP se encuentre operando dentro de una zona segura aún ante contingencias, si el SEP se acerca a un punto de cargabilidad preestablecido como peligroso, el EACIV actúa desconectando carga y regresando al SEP, a la zona segura de operación.

Otro elemento importante que establece el ajuste de arranque del EACIV es la banda de voltaje de operación normal y ante contingencias, generalmente definida entre $0.90V_n < V_n < 1.05V_n$ (Regulación Conelec 006, 2000), sin embargo, y dependiendo de las características del SEP esta banda puede variar.

Consecuentemente el criterio de arranque del EACIV debe definirse analizando entre un porcentaje de la cargabilidad máxima, establecida en la curva PV, y el monitoreo del voltaje.

4.1.5 Esquema de desconexión de carga

Dentro de la definición del algoritmo para el EACIV basado en el monitoreo del IEVZ, se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones relacionadas con el procedimiento a seguirse para establecer el tipo y cantidad de carga a desconectarse.

La estabilidad de voltaje es un fenómeno local, por lo que se puede establecer zonas eléctricas dentro del SEP en donde se analicen y apliquen el EACIV. Por otra parte, y en base a las características de la carga se debe definir qué elementos serán los primeros en ser desconectados dentro del EACIV.

Con relación a la cantidad de carga a desconectarse, ésta debe ser lo suficiente para regresar al SEP a los niveles de voltaje establecidos como de operación normal. Al respecto se han desarrollado esquemas y algoritmos para establecer el monto de carga a desconectarse basados en el monitoreo e integración de la señal de voltaje con respecto al tiempo (Van Cutsem y col., 2004).

4.2 Parametrización del EACIV

Este bloque establece la parametrización para generar un máximo IEVZ en los valores de cargabilidad establecidos en los estudios de estabilidad de voltaje, así como el esquema de bloqueo para condiciones ante fallas que puedan generar falsas operaciones del EACIV.

4.2.1 Ajustes Módulo: MONITOREO IEVZ

En la Fig. 7, se expone el diagrama de flujo planteado para la parametrización del módulo MONITOREO IEVZ. Para la determinación del exponente de impedancia “n” se requiere definir una banda de cargabilidad alrededor de un valor de cargabilidad específico “ λ_s ”, este rango porcentual, requerido para el cálculo puede ser considerado del 2 al 5%.

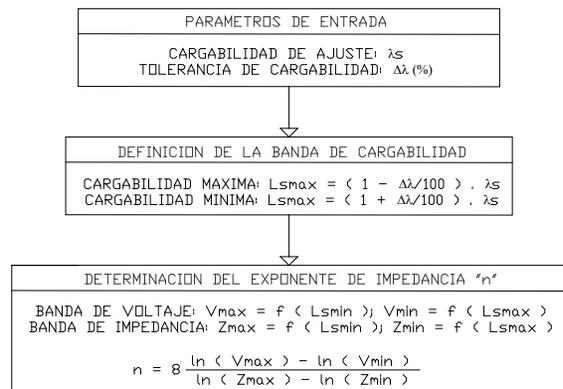


Fig. 7. Bloque Monitoreo IEVZ

4.2.2 Ajustes Módulo: MONITOREO VOLTAJE

En la Fig. 8, se expone el diagrama de flujo planteado para el módulo MONITOREO VOLTAJE.

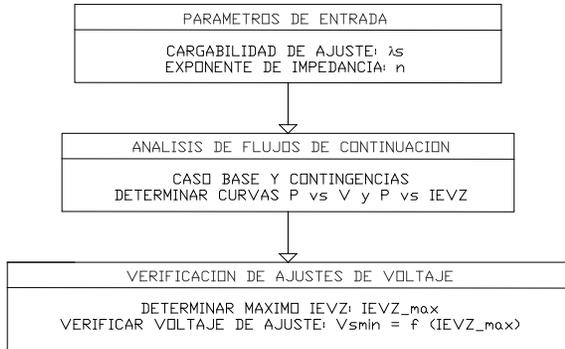


Fig. 8. Bloque Monitoreo Voltaje

4.2.3 Ajustes Módulo: BLOQUEO CORTOCIRCUITOS

En la Fig. 9 se expone el diagrama de flujo planteado para la parametrización del módulo BLOQUEO CORTOCIRCUITOS.

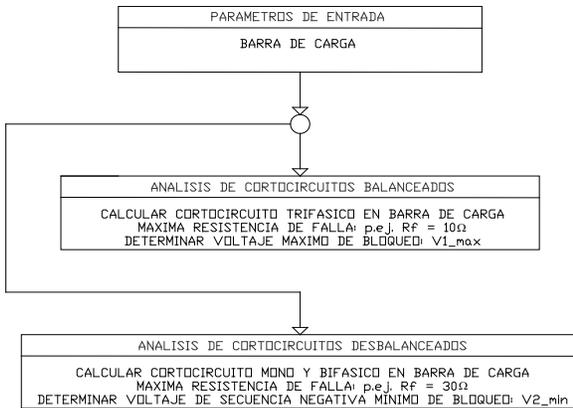


Fig. 9. Bloque Bloqueo Cortocircuitos

En base a los parámetros determinados en el punto 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3, se establece el esquema general de operación del Esquema de Alivio de carga por Inestabilidad de Voltaje – EACIV, que se indica en la Fig. 10.

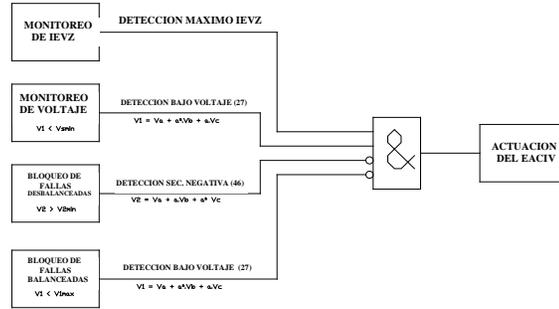


Fig. 10 Esquema general de operación del EACIV

5 Aplicación a la red ieee de 14 barras

5.1 Estudio de Estabilidad de Voltaje

5.1.1 Definición del Caso Base

En la Fig. 11 se indica el diagrama unifilar del sistema bajo estudio. Se debe señalar que el modelo de carga utilizado corresponde al más desfavorable desde el punto de vista de estabilidad de voltaje, es decir, se considera una carga de potencia constante.

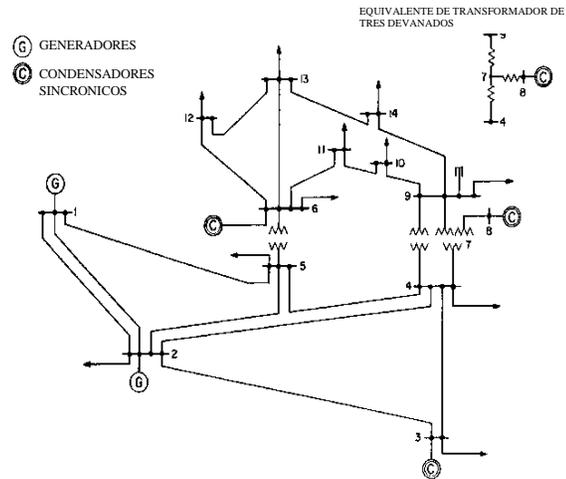


Fig. 11. Diagrama unifilar del sistema IEEE 14 barras

Utilizando los flujos de continuación es posible determinar la curva PV del caso base, tal como se indica en la Fig. 12.

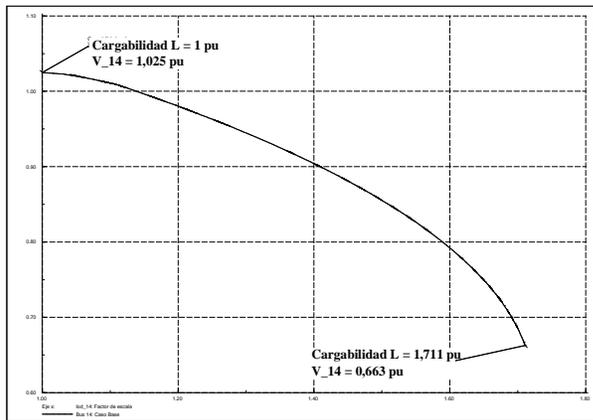


Fig. 12. Curva PV para el caso base

5.1.2 Definición de Contingencias

Partiendo del caso base, y considerando las contingencias descritas en (Granda 2006, Mena y col., 2003), se determinan las curvas PV mediante flujos de continuación considerando el escalamiento de todas las cargas del SEP.

Las contingencias consideradas se plantean analizando el voltaje en la barra 14 del sistema IEEE, la cual corresponde a la barra más débil del sistema (Granda 2006). Con relación a las contingencias se consideran la peor contingencia (salida de línea 2-3) y una contingencia media (salida de línea 2-4).

En la Fig. 13 se indican las curvas PV establecidas para el caso base, salida de la línea 2-4, y salida de la línea 2-3.

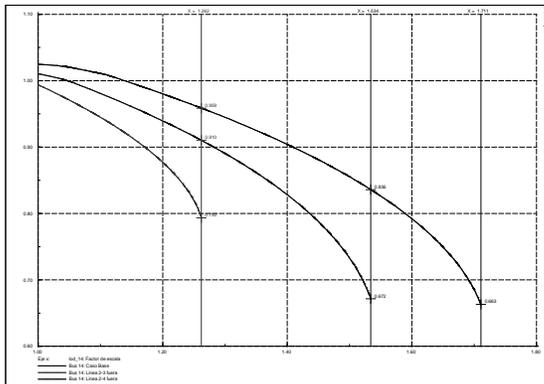


Fig. 13 Curvas PV de los casos analizados

Considerando la respuesta dinámica de generadores y carga, el valor de cargabilidad máxima determinado mediante flujos de continuación, resulta ser diferente que el definido mediante simulación dinámica, debido principalmente al modelamiento de los reguladores de voltaje de los generadores, los cuales recuperan los niveles de voltaje del SEP durante el desarrollo de la contingencia permitiendo ampliar la máxima cargabilidad del SEP.

En la Fig. 14 se indican las curvas PV dinámicas establecidas para los tres casos antes indicados. Se observa que los niveles de cargabilidad difieren, así como la presencia de oscilaciones las cuales disminuyen también el límite de cargabilidad.

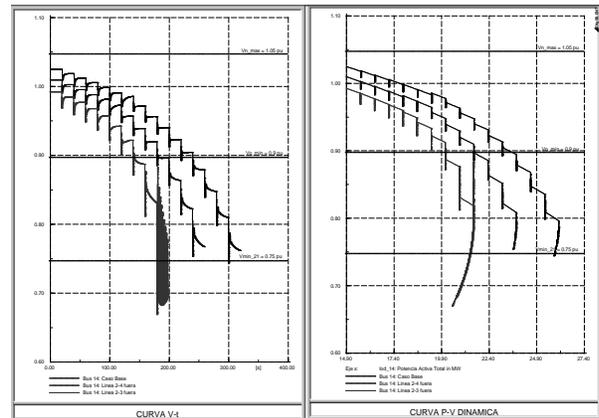


Fig. 14. Curvas PV dinámicas

Considerando como límite la última oscilación amortiguada es posible definir los máximos niveles de cargabilidad para el caso base y para las contingencias consideradas, los mismos que se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Máximos niveles de cargabilidad

Caso analizado	$\lambda_{M\acute{a}x}$	V_{min} (pu)
Caso Base	1.74	0.763
Línea 2-4 fuera	1.60	0.769
Línea 2-3 fuera	1.45	0.820

5.1.4 Criterios de arranque del EACIV

Es posible definir los criterios básicos de arranque del EACIV considerando condiciones normales de operación, por ejemplo, banda de voltaje de $0.90V_n < V_n < 1.05V_n$. Considerando los límites dinámicos de la tabla 1, se observa que para los tres casos el sistema alcanza su límite por bajo 0.83 pu, por lo que se define el arranque del EACIV con un nivel de voltaje algo superior, por ejemplo $V_{s_min} = 0.89$ pu, que en función de cada caso analizado corresponde a los valores de cargabilidad indicados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de cargabilidad a voltaje 0.89 pu

Caso analizado	λ_{max}	$V_s = 0.89$ (pu)	
		λ_s	% λ_{max}
Caso Base	1.74	1.60	91.8
Línea 2-4 fuera	1.60	1.48	93.1
Línea 2-3 fuera	1.45	1.35	93.1

Consecuentemente es posible plantear el criterio de arranque del EACIV considerando que el máximo IEVZ se produzca entre el 85% o 90% de la máxima cargabilidad

(λ_{max}). En resumen, con un ajuste del arranque del EACIV en $\lambda_S = 0.90 \lambda_{max}$ y $V_{s_min} = 0.90$ pu se permitiría abarcar todos los casos de una manera adecuada.

5.1.3 Definición de Escenarios Operativos y Contingencias Críticas

Para el presente estudio, se consideran los siguientes escenarios planteados, partiendo de un punto estable de operación del SEP sumado a diversas contingencias indicadas en la tabla 3.

Tabla 3. Contingencias consideradas

N°	Escenarios Planteados	λ_0
1	Contingencia Estable: Caso base + salida de Línea 2-4	1,40
2	Contingencia Inestable de corta escala: Caso base + salida de Línea 2-3	1,45
3	Contingencia Inestable de larga escala 1: Caso base + incremento progresivo de carga (5%)	1,40
4	Contingencia Inestable de larga escala 1: Caso base + salida de línea 2-4 + incremento progresivo de carga (5%)	1,40

5.1.5 Esquema de desconexión de carga

Para la definición del esquema de desconexión de carga se desarrollan simulaciones dinámicas de cada uno de los escenarios planteados en la tabla 3. En la figura 15 se indican los resultados de la simulación dinámica de los escenarios planteados.

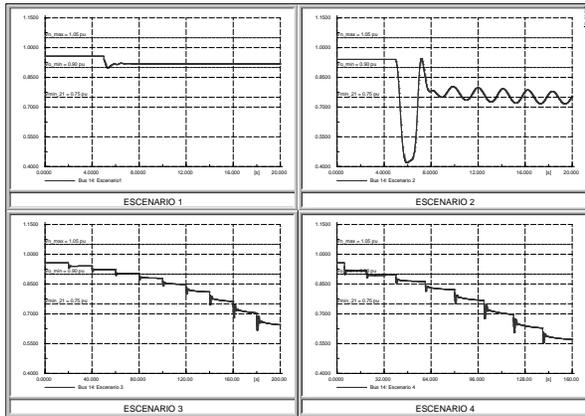


Fig. 15. Simulación de escenarios planteados

Escenario 1.- Para este tipo de escenarios el EACIV no debe actuar. Para garantizar esta condición el módulo de Monitoreo de Voltaje incluye una temporización al arranque del EACIV, permitiendo operar únicamente ante condiciones inestables.

Escenario 2.- Para este tipo de escenarios el EACIV puede actuar si se cumplieran las condiciones: voltaje menor a V_{s_min} y decaimiento del índice IEVZ. La actuación del EACIV permitiría en lo posible mantener la estabilidad del sistema. Se debe mencionar que este escenario es, desde el

punto de vista del planeamiento operativo, inseguro en su totalidad, por lo que el sistema no debería ser sometido a una condición como ésta.

Escenario 3.- Para este tipo de escenarios el EACIV debe actuar, evitando llegar a condiciones inestables o condiciones oscilatorias, como se observa de la simulación. El ajuste de voltaje resulta adecuado, y el porcentaje de desconexión de carga se plantea en un 5% de la carga nominal inicial. En caso de que el incremento de carga sea superior, se plantean una segunda etapa de ajuste en un voltaje de 0.87 con un porcentaje de desconexión de carga del 10%.

Escenario 4.- Este escenario es similar al anterior y los ajustes planteados resultan también adecuados para evitar inestabilidades y condiciones oscilatorias.

En resumen se plantean dos etapas de operación del EACIV, definidas en la tabla 4.

Tabla 4. EACIV planteado para el sistema IEEE 14 barras

$\lambda_s = \% \lambda_{max}$	$t_{retardo}$ y bloqueo (s)	Paso	V_s (pu)	Carga desconectada (%)
90	2	1	0.90	5
		2	0.88	10

5.2 Parametrización del EACIV

5.2.1 Ajustes Módulo: MONITOREO IEVZ

Considerando los niveles de voltaje establecidos para los pasos de desconexión de carga en 5.1.5, se procede con la parametrización del módulo de monitoreo del IEVZ, se recuerda que para la determinación del exponente de impedancia "n" se requiere definir una banda de cargabilidad alrededor del valor de ajuste planteado $\lambda_S = 0.9\lambda_{max}$. Se consideran valores, en dos intervalos estables dentro de la simulación dinámica, que permitan observar las variables necesarias. Los resultados se indican en la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo del exponente de impedancia "n"

Paso	Casos	Banda de Cargabilidad				$n = \frac{[2n V_{máx} - 2n V_{mín}]}{[2n Z_{máx} - 2n Z_{mín}]}$
		$\lambda_{Smin} = 0.89$		$\lambda_{Smax} = 0.95$		
		$\lambda_{máx}$	$V_{máx}$	$Z_{máx}$	$V_{mín}$	
1	Caso Base: $\lambda_{máx} = 1.74$	0.914	3.428	0.868	2.909	2.516

5.2.2 Ajustes Módulo: MONITOREO VOLTAJE

Aplicando la metodología para el ajuste del módulo "MONITOREO VOLTAJE", y considerando el ajuste del exponente de carga $n = 2.516$, se determinan las curvas P e IEVZ vs V, para los tres casos planteados, los resultados se indican en las figuras 16, 17 y 18.

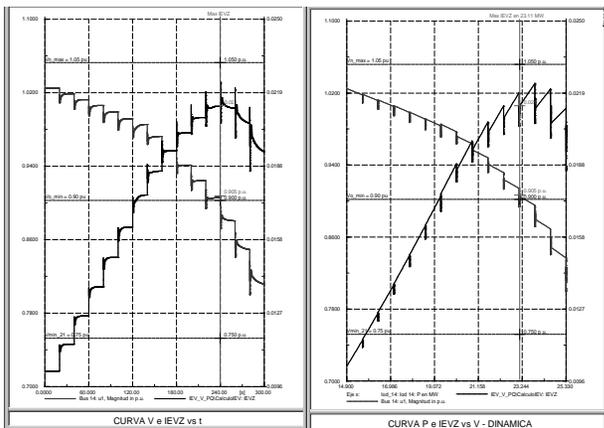


Fig. 16. Curva P e IEVZ vs V – Caso Base

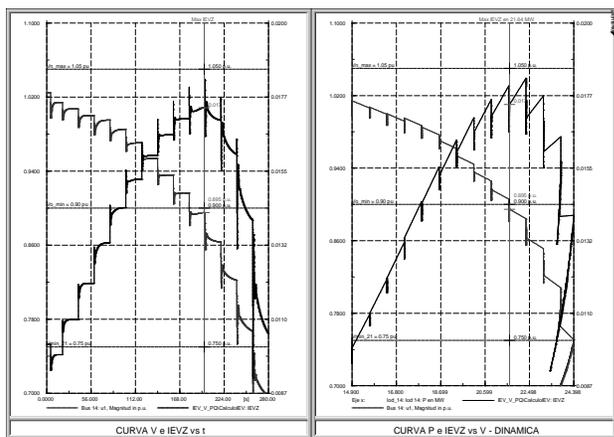


Fig. 17. Curva P e IEVZ vs V – Caso Salida de Línea 2-4

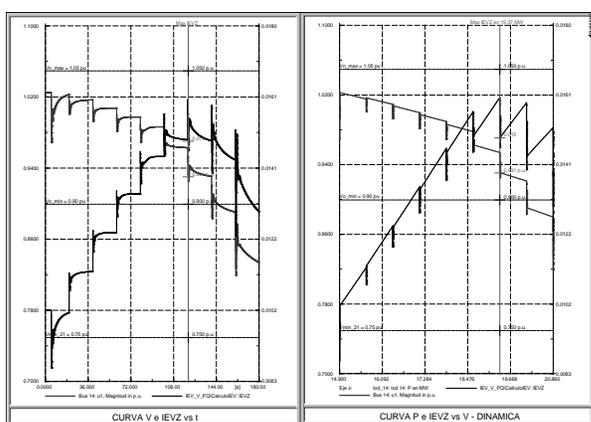


Fig. 18. Curva P e IEVZ vs V – Caso Salida de Línea 2-3

De estas figuras se observa que los máximos del IEVZ

se presentan en los valores indicados en la tabla 6.

Tabla 6 Parámetros en el punto de máximo IEVZ

Caso analizado	λ_{max}	Valores en el punto de máximo IEVZ			
		IEVZ _{máx}	$\lambda_{IEVZ-max}$	% λ_{max}	VIE VZ- _{máx} (pu)
Caso Base	1.74	0.021	1.55	89.13	0.905
Línea 2-4 fuera	1.60	0.017	1.45	90.77	0.895
Línea 2-3 fuera	1.45	0.015	1.30	89.66	0.931

Se observa que para los tres casos el EACIV efectivamente arrancará cuando se cumplan las dos condiciones del esquema inicialmente planteado, por lo que los ajustes propuestos resultan adecuados para este sistema.

5.2.3 Ajustes Módulo: BLOQUEO CORTOCIRCUITOS

Aplicando la metodología para el ajuste del módulo “BLOQUEO CORTOCIRCUITOS”, se determinan los respectivos cortocircuitos: trifásicos, bifásicos y monofásicos, los resultados se indican en la tabla 7. Con estos valores se establecen los siguientes valores de ajuste: $V_{1max} = 0.75$ pu y $V_{2min} = 0.05$ pu.

Tabla 7. Resultados de Cortocircuitos

Cortocircuito	Resistencia de falla (Ω)	Voltaje (pu)		
		V1	V2	V0
Trifásico	10	0.704	0	0
Bifásico	30	0.946	0.205	0
Monofásico	30	1.057	0.079	0.059

5.3 Validación del EACIV

En las Fig. 19, 20 y 21 se indican las simulaciones dinámicas para los tres casos indicados en la tabla 1. Las simulaciones realizadas considerando el monitoreo del IEVZ y de una señal denominada “Disparo” la cual se genera una vez que se produzca un máximo IEVZ. Esta señal es producida mediante programación en DigSilent (DIGSILENT Programming Language DPL, 2005) y procesa el EACIV desconectando los porcentajes de carga planteados.

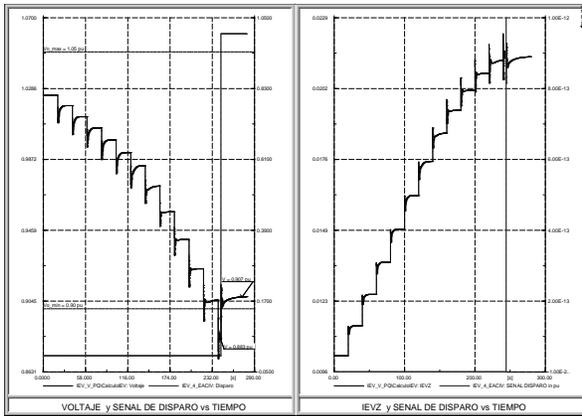


Fig. 19. Actuación del 1º paso del EACIV - Caso Base

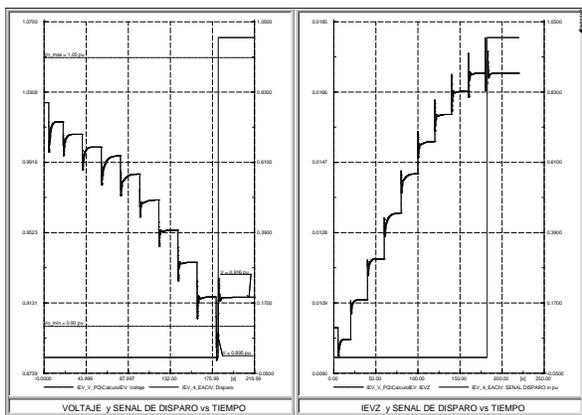


Fig. 20. Actuación del 1º paso del EACIV - Caso Salida de Línea 2 – 4

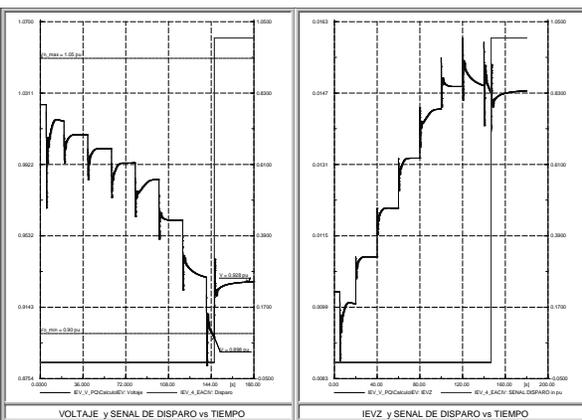


Fig. 21. Actuación del 1º paso del EACIV - Caso Salida de Línea 2 – 3

Para estos casos se simula incrementos progresivos de carga hasta producir la operación de la primera etapa del EACIV con una desconexión de carga del orden del 5%. En los casos “Línea 2-4 fuera” y “Línea 2-3 fuera” se simulan las aperturas de estas líneas al tiempo $t = 5$ segundos. En todos los casos es observa que la respuesta del sistema es adecuada.

Adicionalmente, en las figuras 22 y 23, se desarrollan simulaciones considerando los escenarios indicados en la tabla 3. Se debe señalar que, de los cuatro escenarios, únicamente se indican las simulaciones de los escenarios 1 y 2 por cuanto los escenarios 3 y 4 se encuentran incluidos dentro de los casos 1 y 2 expuestos en las Fig. 19 y 20.

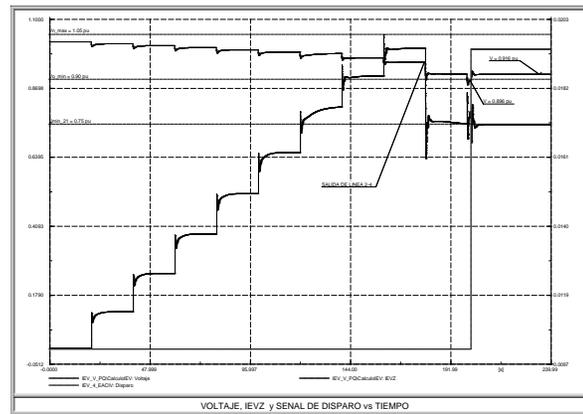


Fig. 22. Contingencia estable: Salida de Línea 2 – 4 y 1º paso del EACIV

Se observa que ante una contingencia estable, figura 22, el EACIV no opera por cuanto el sistema encuentra un nuevo punto de operación estable el cual se encuentra dentro de la banda de voltaje de operación normal. Como se observa el EACIV operará cuando efectivamente se presente un máximo del IEVZ y un nivel de voltaje menor a 0.90 pu.

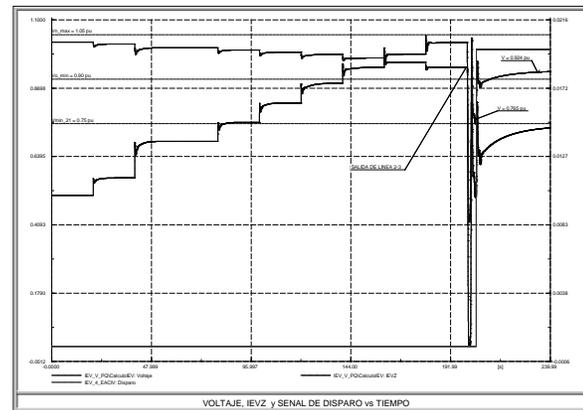


Fig. 23. Contingencia inestable: Salida de Línea 2 – 3

Se observa que ante una contingencia inestable, figura 23, el EACIV opera por cuanto se han cumplido las condiciones necesarias: máximo IEVZ y voltaje menor a 0.90 pu. Esta operación del EACIV resulta adecuada ya que el sistema encuentra un nuevo punto de operación estable, que en caso de no desconectar carga se producirían oscilaciones no amortiguadas que llevarían a un colapso del sistema. Es de-

cir, si bien el EACIV por definición no contempla mitigar este tipo de contingencias, en este caso particular resulta adecuado y beneficioso para el sistema.

Con la finalidad de verificar el siguiente paso del EACIV, que corresponden a un disparo del 10% de la carga se realizan simulaciones con incrementos progresivos del 5% de las cargas del sistema, hasta producir la operación de cada uno de los pasos de desconexión de carga previstos. Los resultados se indican en las Fig. 24.

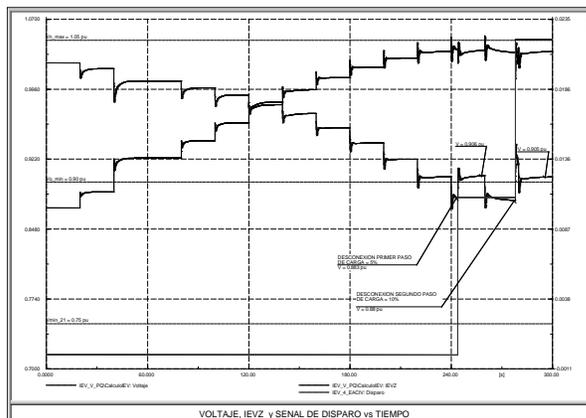


Fig. 24. Actuación del 1º y 2º pasos del EACIV

Se observa que el primer paso de desconexión de carga permite recuperar el nivel de voltaje desde 0.883 pu a 0.906 pu y el segundo paso de desconexión permite recuperar el voltaje desde 0.880 pu hasta 0.905 pu.

6 Conclusiones

El manejo de un esquema de alivio de carga ante problemas de voltaje, sobre la base de un monitoreo del IEVZ, permite dar un mayor nivel de confiabilidad al mismo por cuanto su operación resulta efectiva siempre que ocurran dos condiciones: presencia de un máximo IEVZ y voltaje inferior a un umbral ajustado.

Mediante la variación del exponente de impedancia “n”, es posible modificar el porcentaje de cargabilidad en el que ocurrirá el IEVZ máximo, con lo cual se mejora el criterio de establecimiento de un escenario cercano a la inestabilidad.

Mediante el desarrollo del IEVZ es posible plantear indicadores de inestabilidad de voltaje, los mismos que no necesariamente generen desconexión de carga, sino también alarmas a los centros de control, permitiendo alertar al operador del sistema sobre los niveles de cargabilidad del SEP y su cercanía a un escenario de inestabilidad.

Referencias

Bernard S, Van Cutsem T, 2004, Undervoltage Load Shed-

ding Scheme for the Hydro-Québec system”. Hydro-Quebec and University of Liège. Montreal – Canada.

Cepeda J, Verdugo P, Arguello G, 2014, Monitoreo de la Estabilidad de Voltaje de Corredores de Transmisión en Tiempo Real a partir de Mediciones Sincrofasoriales. Revista Politécnica, Vol.33, No. 3, Enero 2014, Artículo 32.

CONELC, 2000, “Regulación 006 – Procedimientos de Despacho y operación. Versión 2.0”.

DIGSILENT Technical Documentation, 2005, “Manual DIGSILENT Simulation Language (DSL) – Version 13.1”. DIGSILENT GmbH, Germany.

DIGSILENT Technical Documentation, 2005, “Manual DIGSILENT Programming Language (DPL) – Version 13.1”. DIGSILENT GmbH, Germany.

Fonseca A, 2009, Análisis de Estabilidad de Voltaje mediante monitoreo conjunto de Voltaje – Impedancia, M.Sc. Tesis, Esc. Post. Ingeniería y Ciencias, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Granda N, 2006, Análisis de Estabilidad de Voltaje del Sistema Nacional Interconectado. EPN

IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, 2004, “Definition and Classification of Power System Stability”. IEE Transactions on Power Systems, Vol 19, N°2, Mayo

Mena K, Cañizares C, 2003, Modeling and Simulation of IEEE 14 bus system with FACTS controllers, Technical Report.

Fonseca, Antonio: Ingeniero Eléctrico - 2003 y Master en Ingeniería Eléctrica MSc - 2009, “Escuela Politécnica Nacional” (EPN), Quito-Ecuador. Trabaja en el Departamento de Mantenimiento de Subestaciones por CELEC EP – Transelectric. Profesor invitado para cursos de pregrado y postgrado de la facultad de Ingeniería Eléctrica de la EPN.

Salazar Yépez, Gabriel: Ingeniero Eléctrico. Doctor en Ingeniería, Instituto de Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Coordinador de Investigación y Desarrollo del Centro Nacional de Control de Energía, Ecuador, Director de Tarifas de CONELC, Director de Regulación de CONELC, Ecuador. Jefe del Departamento de Energía Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Correo electrónico: gabriel.salazar@epn.edu.ec

Recibido: 14 de noviembre de 2014

Aceptado: 17 de mayo de 2015

