

Flujo de carga continuado considerando el control de intercambio entre áreas

Continued flow of load taking into account the exchange between areas

Hebert Ávila Carhuallanqui¹, Hugo Ávila Vargas²

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Resumen— El cálculo de los límites de intercambio es un proceso de incrementar sistemáticamente los intercambios con la finalidad de estresar al máximo el flujo de potencia hasta alcanzar determinados criterios económicos y/o de seguridad. Sin embargo, se tiene que evitar que el sistema sea llevado a una condición inestable, en donde un pequeño aumento de carga o una súbita contingencia puedan causar el colapso de la tensión. En este trabajo, se presenta los efectos de aplicar el control de intercambio entre áreas sobre la capacidad de transferencia de potencia activa. Se muestra, la necesidad de considerar las restricciones de intercambio para verificar cual es la máxima transferencia de potencia posible de realizar, sin que ocurran violaciones de los niveles de seguridad del sistema

Abstract— The calculation of the limits of exchange is a process of systematically increase exchanges in order to stress the maximum power flow until achieve certain economic criteria and / or safety. However, it has to avoid the system is brought to an unstable condition, where a small increase in load or sudden contingency can cause the collapse of the voltage. In this paper, it is presented the effects of applying the control exchange between areas about the capacity of active power transfer. It shows the need to consider the constraints of exchange to verify which is the maximum possible transfer of power to perform, without violations of system security levels occur.

Palabras Claves— Control de Intercambio de Áreas, barras slacks, flujo de potencia, estabilidad, flujo de carga continuado.

Keywords— Exchange Control Areas, slacks bars, power flow, stability, load flow continued.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el cálculo de los límites de intercambio, consiste en un proceso de aumento sistemático de los intercambios de forma de estresar al máximo el flujo de potencia en los circuitos envueltos hasta que determinados criterios económicos y/o de seguridad predefinidos para la operación sean alcanzados. No en tanto, en ciertas condiciones el flujo de potencia es restringido por problemas de inestabilidad de tensión, donde el principal objetivo es evitar que el sistema sea llevado a operar próximo a una condición donde un pequeño aumento de carga o una súbita contingencia pueda causar colapso de tensión. El flujo de carga continuado es una herramienta que es muy utilizada en las evaluaciones de estabilidad estática de tensión de un sistema de potencia, siendo empleada también para la obtención del margen de carga de un sistema eléctrico [1].

La obtención de los puntos de operación del sistema es hecha a través del método de Newton-Raphson, donde mediante la solución de las ecuaciones del flujo de potencia se calculan las magnitudes y ángulos de fases de las tensiones de las barras, las inyecciones de potencia activa y reactiva [8], el trazado de la curva P-V es obtenido a través del flujo de carga convencional para sucesivos incrementos del factor de carga del sistema, hasta que el proceso iterativo deje de convergir, este punto es representado por la singularidad de la matriz Jacobiana, en el PMC del sistema y es el límite para la región estable.

Por otro lado, el método de la continuación posibilita el trazado completo de los perfiles de tensión por medio de una parametrización adecuada,

1 Herbet Avila Cahuallanqui, e-mail: hilvert_1@hotmail.com

2 Hugo Avila Vargas, e-mail: havilav@unmsm.edu.pe

que próximo al PMC, elimina el problema originado por la singularidad de la matriz Jacobiana. En general las técnicas de parametrización son muy variadas y son realizadas mediante la incorporación de ecuaciones parametrizada [3].

En este trabajo se emplea el predictor de orden cero que considera la solución actual y un incremento fijo como estimativa, para completar el trazado completo de la curva P-V.

En [1] es propuesto el método de la continuación para el cálculo de máxima transferencia de potencia entre áreas, pero no son incluidas las ecuaciones de control de intercambio y se considera el sistema operando como un solo área. En este trabajo el método descrito en, [5] Control de intercambio entre áreas usando las barras slack, es incorporado al flujo de carga continuado, con esto, el método propuesto posibilita la obtención de la capacidad de transferencia de potencia entre las diversas áreas considerando múltiples barras slack por área, donde cada área controla su intercambio de manera deseada.

Cabe resaltar, que este método prevé el punto de máxima carga de manera más exacta y más real ya que considera el control de intercambio entre áreas en el proceso de carga del sistema, que está íntimamente relacionado al colapso de tensión mediante el margen de carga del sistema. El colapso de tensión normalmente ocurren, en sistemas de potencia extremadamente cargados con escasez de potencia reactiva y / o después de contingencias.

Existen varias alteraciones del sistema que pueden contribuir al colapso de tensión, entre las que se citan:

- Aumento de la demanda de reactivos de las cargas.
- Sistema de potencia fuertemente sobrecargado.
- Generadores distantes a los centros de cargas.
- Limitaciones en la producción de potencia reactiva que involucran límites de reactivos en generadores y SVCs.
- Salida de líneas o generadores.

Los niveles de tensión, son gran parte determinados por el equilibrio generación de energía y el consumo de reactivos. Por otra parte, las limitaciones de los generadores que pueden suministrar potencia reactiva tienen una fuerte influencia sobre los niveles de tensión y también sobre un colapso de tensión. Los dispositivos y criterios para controlar los niveles de tensión son:

- Bancos de capacitores.
- Controladores estáticos de reactivos.
- Transformadores con control automático de taps bajo carga.
- Control de tensión en las barras de alta de las centrales.
- Buena coordinación entre equipos de protección y requerimientos del sistema Rechazo de carga por mínima tensión.
- Seccionamiento de carga por voltaje, por el que se desconecta carga para ayudar a que la tensión se recupere y el problema de bajo tensión no empeore o se extienda a una zona mayor.

II. METODOLOGÍA

A. Método Propuesto para el Cálculo de los Límites de Intercambio entre Áreas

1) Flujo de Carga Continuado considerando el Control de Intercambio Entre Áreas.

El conjunto de ecuaciones del problema de flujo de carga continuado considerándose el control de intercambio entre áreas puede ser escrito de la siguiente forma general:

$$G(\theta, V, P_G, \lambda) = 0 \quad (1)$$

Y puede ser reescrita como:

$$\Delta P(\theta, V, \lambda) = P^{esp}(\lambda) - P(\theta, V) = 0 \quad (2)$$

$$\Delta Q(\theta, V) = Q^{esp} - Q(\theta, V) = 0 \quad (3)$$

$$\Delta PI(\theta, V, \lambda) = PI^{esp}(\lambda) - PI(\theta, V) = 0 \quad (4)$$

$$\Delta g(P_G) = g^{esp} - g(P_G) = 0 \quad (5)$$

donde λ es el factor de carga del sistema y es sobrescrito esp que significa especificado; $P(\theta, V)$ es la inyección de potencia activa; $Q(\theta, V)$ es la inyección de potencia reactiva, $PI(\theta, V)$ es el intercambio, $g(P_G)$ es la relación de las barras slack.

Se observa que la forma de cargar el sistema para el cálculo de los límites de intercambio entre dos áreas es efectuado definiéndose una área exportadora y otra área importadora. En la área

exportadora se escoge un conjunto de barras de generación (tipo PV) que tendrán un incremento de generación, con el objetivo de exportar energía para otra área importadora. En esta última se escoge un conjunto de barras de tipo PQ que tendrán un incremento de carga. Para cada incremento del factor de carga del sistema, se tiene un punto de operación del sistema con valores que atenderán las fajas de seguridad preestablecidas, en función del escenario energético que se desea explorar. $P^{esp}(\lambda)$ representa los incrementos de potencia en las barras de carga (PQ) y de generación (PV). A potencia activa de la barra i perteneciente a las barras PQ que tendrán un incremento de carga es dada por:

$$P_{PQi}(\lambda) = P_{Li0} + \lambda K_{Li} S_{bi0} \cos \psi_i \quad (6)$$

donde P_{Li0} es la potencia activa de la barra i en el caso base, K_{Li} es la constante de carga de la barra i , S_{bi0} es la potencia aparente de la barra i en el caso base, y ψ_i es el ángulo del factor de potencia de la barra de carga i .

La sumatoria total de la potencia activa de las barras de carga puede ser representada por:

$$\sum_{i=1}^n P_{PQi}(\lambda) = \sum_{i=1}^n (P_{Li0} + \lambda K_{Li} S_{bi0} \cos \psi_i) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{PQi}(\lambda) = \sum_{i=1}^n P_{Li0} + \lambda Ptr_0 \quad (8)$$

siendo $Ptr_0 = \sum_{i=1}^n (K_{Li} S_{bi0} \cos \psi_i)$ a potencia de transferencia deseada en el caso base. El incremento de potencia de las barras de carga PQ debe ser atendido por los generadores PV perteneciente del área que exportará energía eléctrica. Así, la potencia activa de la barra i perteneciente a las barras PV es dada por:

$$P_{PVi}(\lambda) = P_{Gi0} + \lambda ger_i \cdot Ptr_0 \quad (9)$$

siendo P_{Gi0} la potencia activa generada por la barra i en el caso base y ger_i el factor de participación del generador i . Los factores de participación de los generadores son calculados a partir da solución del caso base de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$ger_i = P_{Gi0} / \sum_{j=1}^{ngcr} P_{Gj0} \quad (10)$$

siendo que $ngcr$ representa el número de generadores que atenderán el incremento de carga. De las ecuaciones (2) y (3), se tiene que para una barra k cualquiera se tiene:

$$P_k^{esp}(\lambda) = P_{PVi}(\lambda) - P_{PQi}(\lambda), \quad k \in PQ, PV$$

$$Q_k^{esp} = Q_k^{ger} - Q_k^{car}, \quad k \in PQ$$

La cual indica la potencia especificada como siendo la potencia generada menos potencia consumida de cada barra, de acuerdo a las barras que fueron escogidos para tener los incrementos de carga ($P_{PQ}(\lambda)$) y de generación ($P_{PV}(\lambda)$). Para una barra k cualquiera, la potencia activa ($P_k(q, V)$) y reactiva ($Q_k(q, V)$) calculadas son escritas como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta PI \\ \Delta g \end{bmatrix}^V = \begin{bmatrix} H & N & \frac{\partial P}{\partial P_G} \\ M & L & \frac{\partial Q}{\partial P_G} \\ \frac{\partial PI}{\partial \theta} & \frac{\partial PI}{\partial V} & \frac{\partial PI}{\partial P_G} \\ \frac{\partial g}{\partial \theta} & \frac{\partial g}{\partial V} & \frac{\partial g}{\partial P_G} \end{bmatrix}^V \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta P_G \end{bmatrix} \quad (11)$$

En la ecuación (4), $PI^{esp}(\lambda)$ es el intercambio especificado. Con el intuito de viabilizar la máxima transferencia de potencia entre áreas, la área que aumenta la generación tendrá un incremento (λPtr_0) en su intercambio, en cuanto que la área que aumenta la carga tendrá un decremento en su intercambio. Así, $PI^{esp}(\lambda)$ puede ser reescrito como:

$$\begin{aligned} PI_{ger-0}^{esp}(\lambda) &= PI_{ger-0}^{esp} + \lambda Ptr_0 \\ PI_{carg-0}^{esp}(\lambda) &= PI_{carg-0}^{esp} - \lambda Ptr_0 \end{aligned} \quad (12)$$

donde PI_{ger-0}^{esp} , PI_{carg-0}^{esp} son los intercambios de las áreas en el caso base donde serán incrementados la generación y la carga. Se observa que las áreas restantes mantienen su intercambio constante. La ecuación (4), que corresponde las restricciones del control de intercambio entre áreas, tiene por objetivo regular el intercambio total de cada área. Para eso, las inyecciones de potencia activa de las barras slack de las áreas envueltas son ajustadas para mantener los intercambios líquidos en sus respectivos valores especificados. El intercambio líquido del área es definido como la suma algébrica de los flujos de potencia activa en las líneas que conectan esa área con las demás, [8] siendo calculado por:

$$PI(\theta, V) = \sum_{\substack{m \in \Omega_k \\ m \neq i}} P_{km} \quad (13)$$

donde el flujo de potencia activa en la línea $k-m$ es dado por:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (14)$$

En esta ecuación k es la barra de intercambio del área y Ω_k el conjunto de barras directamente conectadas a la barra k , pero no pertenecientes al área.

a) Control de Intercambio de Áreas Considerando una Barra slack por Área

El CIA es realizado a través de la incorporación de ecuaciones de control de intercambio, en la forma linealizada, en el sistema de ecuaciones general de flujo de potencia [5]. El número de ecuaciones del CIA es igual al número de áreas, que tienen sus intercambios líquidos controlados durante el proceso iterativo, menos 1. Sea f la barra slack de una área, $DP_f(h)$ representa el residuo de potencia de la barra slack a cada iteración (h) y es dado por:

$$\Delta P_f^{(h)}(\theta, V) = P_{Gf}^{(h)} - P_{Lf}^{esp} - P_f^{(h)}(\theta, V) \quad (15)$$

siendo $P_{Gf}^{(h)}$ la potencia activa generada, P_{Lf}^{esp} la potencia de carga especificada, y $P_f^{(h)}$ la potencia activa calculada. La forma linealizada de la ecuación (15), que será incorporada a la matriz Jacobiana, es dada por:

$$\Delta P_f = \Delta P_{Gf} - \frac{\partial P_f}{\partial \theta} \Delta \theta - \frac{\partial P_f}{\partial V} \Delta V \quad (16)$$

A cada iteración, la potencia activa generada por la barra slack ($P_{Gf}^{(h+1)}$) es actualizada como muestra la ecuación a seguir:

$$P_{Gf}^{(h+1)} = P_{Gf}^{(h)} + \Delta P_{Gf}^{(h)} \quad (17)$$

b) Múltiples Barras slack en una Misma Área

La ecuación (5) es usada cuando se considera múltiples barras slack en una misma área, las variables de estado continúan siendo los incrementos de potencia activa generada de las barras slack (Castro, 2007).

Sea i una área compuesta por nf barras slack. Las relaciones entre las contribuciones de generación de potencia activa de las barras slack (P_{Gf}) son calculadas por [5]:

$$P_{G(nf-1)} = \alpha_{(nf-1)nf} P_{Gnf} \quad (18)$$

donde $\alpha_{(nf-1)nf}$, que es la relación entre los factores de participación de las barras $nf-1$ y nf , es calculado a través de la siguiente expresión:

$$\alpha_{(nf-1)nf} = g_{er(nf-1)} / g_{er nf} = P_{G(nf-1)0} / P_{Gnf0} \quad (19)$$

La ecuación (18) puede ser reescrita de la siguiente forma:

$$\Delta g_{(nf-1)} = P_{G(nf-1)}^{(h)} - \alpha_{(nf-1)nf} P_{Gnf}^{(h)} \quad (20)$$

La ecuación de control (Δg) en la forma linealizada que deberá ser incluida a la matriz Jacobiana es dada por:

$$\Delta g_{(nf-1)} = \Delta P_{G(nf-1)} - \alpha_{(nf-1)nf} \Delta P_{Gnf} \quad (21)$$

donde ΔP_G son los incrementos de potencia activa generado en las barras slack. En el caso de múltiples barras slack la forma compacta del sistema, a ser resuelto por el método de Newton-Raphson, es dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta PI \\ \Delta g \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} H & N & \frac{\partial P}{\partial P_G} \\ M & L & \frac{\partial Q}{\partial P_G} \\ \frac{\partial PI}{\partial \theta} & \frac{\partial PI}{\partial V} & \frac{\partial PI}{\partial P_G} \\ \frac{\partial g}{\partial \theta} & \frac{\partial g}{\partial V} & \frac{\partial g}{\partial P_G} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta P_G \end{bmatrix} \quad (22)$$

Se observa que en el caso de una barra slack por área, se deben excluir las ecuaciones de Δg .

2) Flujo de Carga Continuado

Las ecuaciones de flujo de carga convencional representan un límite para la región de operación estable, siendo que este, está asociado con la singularidad de la matriz Jacobiana en el PMC. El método de la continuación posibilita el trazado completo del perfil de tensión por medio de las parametrizaciones adecuadas que eliminan los problemas numéricos consecuente de la singularidad de la matriz Jacobiana en el PMC [1] Cuando el sistema es parametrizado por el factor de cargamento hay la necesidad del cambio de parámetro próximo al PMC porque el determinante de la matriz Jacobiana es nulo en el PMC y así, no es posible efectuar el trazado completo de la curva P-V con el uso de ese parámetro. En general, el nuevo parámetro escogido será la magnitud de tensión de la barra que presenta la mayor variación de magnitud. Con la reparametrización, el determinante de la matriz Jacobiana deja de ser

nulo, la matriz Jacobiana no es singular. Con este cambio, λ pasa a ser considerado como variable dependiente y el nuevo parámetro (en el caso la magnitud de tensión de una barra k cualquiera V_k) como variable independiente. A partir de ahí la magnitud de tensión de esa barra puede ser pre fijada y su respectiva solución determinada.

a) Parametrización por el factor de carga (λ)

Con la inclusión de λ el nuevo sistema de ecuaciones modificado pasa a tener más una incógnita. Con la parametrización por λ , el sistema de ecuaciones pasa a ser:

$$\begin{aligned} G(\theta, V, P_G, \lambda) &= 0 \\ \lambda - \lambda^e &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

siendo λ^e el valor especificado de λ . El proceso de linealización de la ecuación anterior es:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta PI \\ \Delta g \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_\theta & G_V & G_{P_G} & G_\lambda \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta P_G \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (24)$$

donde se considera $\lambda^e = \lambda^{\text{actual}} + \Delta\lambda$, siendo $\Delta\lambda$ el paso adoptado. Se inicia Inicia-se con $\lambda^{\text{actual}} = 0$, se considera un paso razonable para la obtención de los puntos de operación de la curva P-V, hasta la (i ?) al PMC.

b) Parametrización por la magnitud de tensión de una barra k cualquiera (V_k)

Para superar las dificultades numéricas representadas por la singularidad de la matriz Jacobiana en el PMC, se necesita efectuar la troca de parámetro, de λ para V_k . La elección de la barra cuya magnitud de tensión será considerada como parámetro (p) es realizada por

$$p \leftarrow \max \left(\frac{|V^j - V^{j-1}|}{|V^j|} \right) \quad (25)$$

donde V^j se refiere a la magnitud de tensión en el punto de operación actual y V^{j-1} su valor anterior (Alves et al., 2003)] En este caso el sistema de ecuaciones pasa a ser dado por

$$\begin{aligned} G(\theta, V, P_G, \lambda) &= 0 \\ V_k - V_k^e &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

siendo V_k^e el valor especificado de la magnitud de tensión de la barra k que va ser considerada como parámetro de la continuación. El proceso de linealización de la ecuación anterior es:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta PI \\ \Delta g \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_\theta & G_V^* & G_{P_G} & G_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V^* \\ \Delta P_G \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (27)$$

siendo ΔV^* el ΔV^* vector de las magnitudes de tensión de las barras PQ y G_V^* ΔV^* el vector de las derivadas de G con relación a las magnitudes de tensión de las barras PQ. Ambos excluyen el elemento k correspondiente a la barra escogida como parámetro. Se considera G_V^* que:

$$V_k^e = V_k^{\text{actual}} + \Delta V \quad (28)$$

Para la obtención de los puntos de operación del sistema en la (i ?) del PMC, próximo a la nariz de la curva P-V, adoptase la magnitud de tensión de la barra (V_k^{actual}) escogida como parámetro en el último punto de operación convergido. Se considera un paso de tensión (ΔV) apropiado, y negativo porque la magnitud disminuye con el aumento de λ . Una vez superado el PMC, y próximo a él, se realiza nuevamente el cambio de parámetro, de V^k para λ , se cambia la señal del paso $\Delta\lambda$, y completase el trazado de la curva P-V.

III. RESULTADOS

El método propuesto fue aplicado al sistema de IEEE de 9 barras [3] y al sistema New England de 30 barras [6] los cuales fueron divididos en áreas. Esa división tiene por objetivo evidenciar las diferencias entre los valores de la capacidad de transferencia de potencia activa obtenidas con el flujo de carga continuado sin y con las restricciones impuestas por las ecuaciones del control de intercambio entre áreas.

A. Sistema IEEE de 9 barras

La figura 1, presenta el diagrama unifilar del sistema IEEE-9 barras que es dividido en tres áreas. El área 1 es la área de referencia. La barra 1 es la barra de referencia (tipo Vq), la cual pertenece al área de referencia. Para este sistema se analiza el efecto sobre el margen de carga del sistema cuando se incrementa a potencia de la carga en la barra 8, con y sin el control de intercambio entre áreas. En ambos casos, la barra de generación que va suplir

el incremento de carga es la barra de generación 2 perteneciente al área 2, que en este caso es una barra slack (tipo V). Ambas barras (2 y 8), pertenecen a la misma área 2.

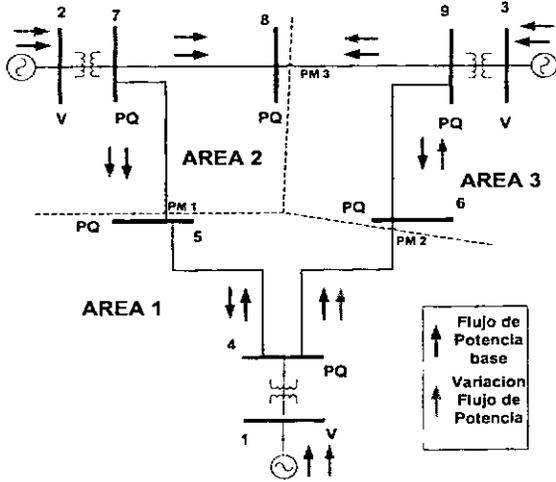


Fig. 1. Sistema de 9 barras

En este caso, se evalúa el margen de carga de la barra 8 del área 2. Los resultados presentados para este sistema posibilitan la comprensión de los efectos del flujo de circulación y que ocurre debido a los caminos paralelos existentes. Así, la transferencia de potencia entre dos puntos de la red se dará de forma inversamente proporcional a las impedancias equivalentes de cada camino, obligando con eso al aumento (o disminución) de las generaciones de las áreas envueltas de forma a suplir las variaciones de las pérdidas.

La figura 2, presenta las curvas λ -V de la barra 8 para los dos casos. Se puede verificar que el margen de carga con la inclusión del control de intercambio es menor de la obtenida sin el control, en 3,5%.

En la figura 3 (b) se muestra el efecto del flujo de circulación sobre la generación de las áreas envueltas. Se puede observar que las variaciones (con relación al caso base) en las pérdidas activas de las líneas de transmisión de las áreas hacen que las barras slack de estas áreas varíen sus generaciones en igual proporción para poder controlar el intercambio de sus áreas conforme se puede ver en la figura 4(b).

En la figura 4, se puede observar la comparación de los intercambios entre áreas con y sin el control. Sin control de intercambio (figura 4(a)) el sistema es visto como un área donde la barra de referencia (barra 1) es la responsable por el balance de potencia, como se puede ver en la figura 5, una vez que no hay barras slack que puedan controlar el intercambio.

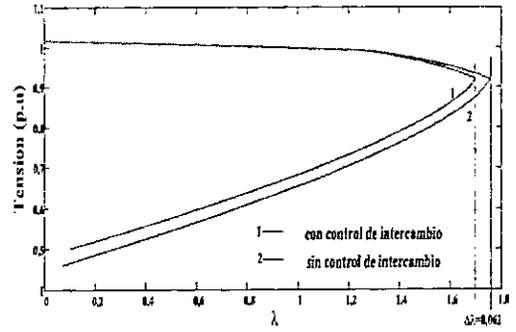
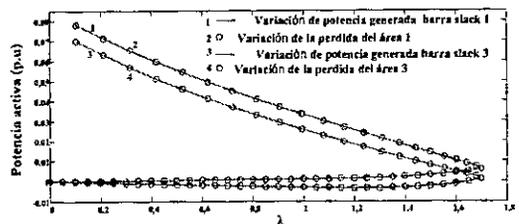
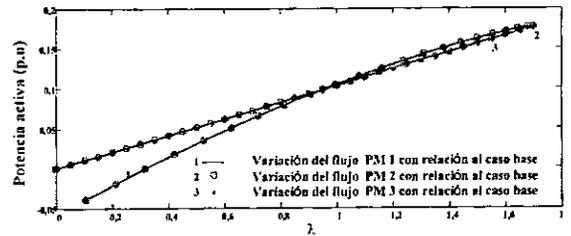
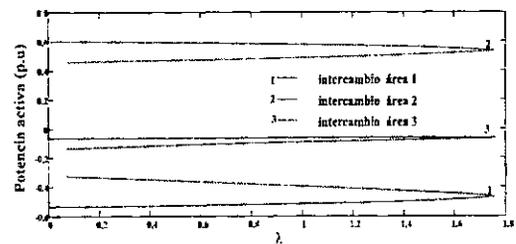


Fig. 2. Comparación entre las curvas λ -V de la barra 8 (parámetro), sin y con CIA

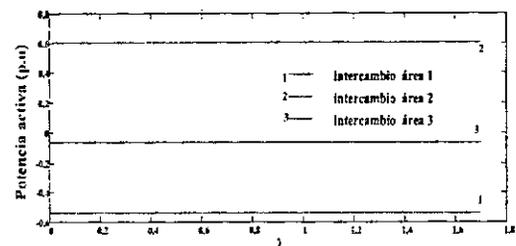


b)

Fig. 3. (a) Comparación entre las variaciones de flujo en los Puntos de Medición (b) Comparación de las variaciones de las potencias generadas en las barras slack de las áreas 1 y 3 con la variación de las pérdidas



(a)



(b)

Fig. 4. Comparación de los intercambios entre áreas. (a) sin control, (b) con control

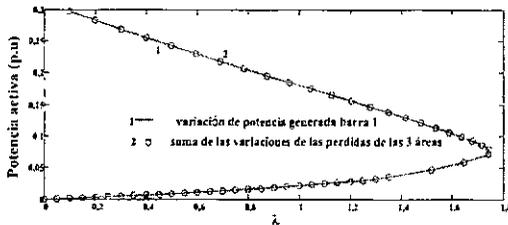


Fig. 5. Comparación de la variación de la potencia generada en la barra slack con la suma de las variaciones de las pérdidas de las respectivas áreas

B. Sistema New England de 30 barras

Este sistema (ver figura 6) é dividido en dos áreas [1]. Los datos de este sistema son presentados en Incrementa-se las potencias de las cargas localizadas en las barras 24, 27 y 28 de la área 2, proporcionalmente al caso base. Las barras de generación escogidas para suplir el incremento de carga son las barras 19, 20 e 23 de la misma área 2. O El objetivo aquí es demostrar la influencia del controle de intercambio con múltiples barras slack sobre la capacidad de transferencia de potencia dentro de una área. Son presentados dos escenarios: sin y con el controle de intercambio entre áreas. En ambos casos a barra 30 es la barra de referencia. Os Los respectivos factores de participación de las barras de generación 19, 20 e 23, calculados a partir del caso base, son iguales a 37,15%, 29,86% y 32,99%.

La figura 7(b) presenta los intercambios líquidos y las respectivas curvas λ-V de la barra 15 para los dos escenarios. Se puede verificar que el margen de carga con la inclusión del controle de intercambio es menor de la obtenida sin el controle, hay una reducción de 5,86%.

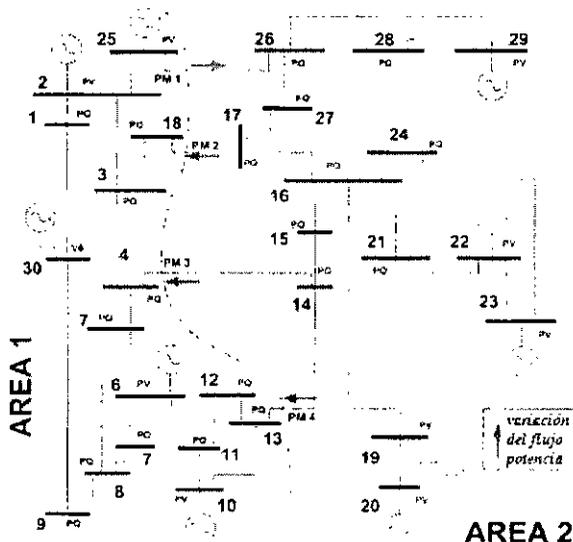
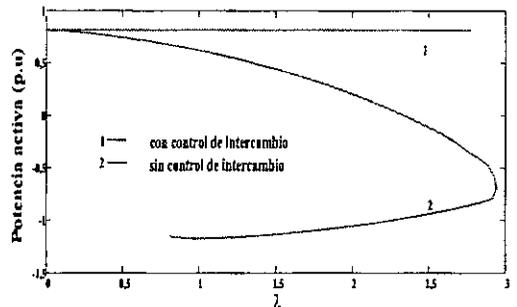


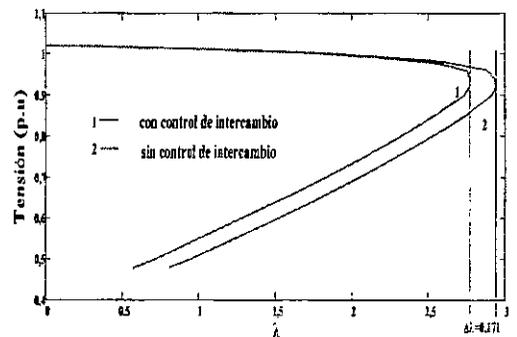
Fig. 6. Representação do sistema New England de 30 barras com a divisão arbitrária das áreas.

La figura 8 muestra las variaciones de los flujos en los puntos de medición (PM) con relación al caso base. Una vez que el flujo de intercambio debe ser mantenido constante e igual al valor en el caso base (curva 1 de la figura 7(a)), el sumatorio de las variaciones de los flujos de potencia activa en los puntos

de medición (PM) debe ser igual a cero, conforme se puede ver en la figura 8. Se observa que la variación del flujo en el PM1 que sale (positivo) del área 1, es igual a la suma de las variaciones de los flujos en los PM2, PM3 y PM4 que entran (negativos) en el área 1. Estos flujos, conocidos como flujos de circulación generan pérdidas en las líneas de transmisión de las áreas envueltas



(b)



(a)

Fig.7 (a) intercambios entre las áreas y (b) curvas λ-V de la barra 15, sin y con CIA.

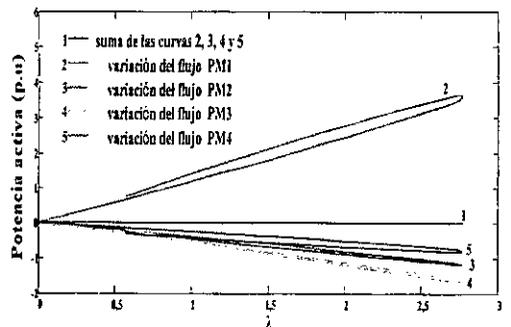


Fig. 8. Comparación entre las variaciones de flujo en los Puntos de Medición)

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo fueron presentados los efectos de la inclusión del control de intercambio entre áreas sobre la capacidad de transferencia de potencia activa. Se mostró que hay la necesidad de considerar las restricciones de intercambio para verificar cual es la máxima transferencia de potencia posible de realizar, sin que ocurran violaciones de los niveles de seguridad del sistema.

Se debe resaltar que la implementación del método propuesto da una mayor flexibilidad al método de la continuación, ya que considera cada área como un sistema independiente regulando su intercambio en el proceso de carga del sistema, donde son consideradas múltiples barras slack en una misma área. Se observa que el método también posibilita la consideración de los límites de potencia para las barras slack. El método permite un trazado completo de las curvas P-V llevando en cuenta el control del intercambio y así, posibilita al ingeniero acompañar las evoluciones de las tensiones y flujos durante todo el proceso de transferencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ajarapu, V and. Christy, C (Feb 1992) "The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, p. 416-423.
- [2] Alves, D and; Silva, L da; Castro, A and Costa, V.da., (Dez 1992). "Study of alternative schemes for the parameterization step of the continuation power flow method based on physical parameters-part-I: mathematical modeling," Electric Power Components and Systems, v. 31, n. 12, p. 1151.
- [3] Anderson, P and Fouad, A., (1994) "Power System Control and Stability", IEEE Press.
- [4] Castro, M. (2007). "Modelagem do controle de tensão por geradores e de múltiplas barras swing na avaliação das condições de estabilidade de tensão," Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, PUC, Rio de Janeiro, RJ, Certificação Digital Nº 0521393/CA, 124p.
- [5] Dos Santos, M; Resende, J; Filho, J; Oliveira, E.da. and Silva Jr, I.da.. (2004). "Uma nova proposta para o controle de intercâmbio entre áreas," Revista Controle & Automação, Campinas, v. 15, n. 4, p. 449-458.
- [6] Gao, B. (1992). "Voltage stability analysis of large power systems," Thesis (Doctor of Philosophy Department of Electrical Engineering) – Department of Electrical Engineering, University of Toronto, Canada, 149p
- [7] Ibsais, A and Ajarapu, V. (1996). "Voltage stability-limited interchange flow," Electric Power Systems Research, Lausanne, v. 38, n.2, p. 91-95.
- [8] Monticelli, A. (1983). Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. Edgar Blucher, Rio de Janeiro - RJ.
- [9] Western Systems Coordinating Council-WSCC, Final Report, (1998). "Voltage stability criteria, under voltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology," Reactive Power Reserve Work Group, 154p