

Desarrollo Metodológico de Ubicación Óptima de Fuentes de Generación Distribuida en Redes de Distribución

Frednides Guillén Guerra, Francisco González-Longatt

Resumen— El presente artículo tiene como objetivo mostrar una metodología que permita determinar la localización óptima de fuentes de generación distribuida (GD) en redes eléctricas de distribución, con el objetivo de minimizar las pérdidas técnicas globales de potencia eléctrica. Para ello se construye la función objetivo, el cual consiste en calcular las pérdidas globales de potencia del sistema y se definen el conjunto de restricciones: restricción por capacidad de corriente máxima del conductor que conecta la GD con la red, restricción de niveles de cortocircuito en la barra *slack*, restricción de regulación de voltaje y límites del recurso energético disponible. La metodología propuesta fue implementada en un programa empleando rutinas del *Toolbox* de Optimización de *Matlab*TM, para encontrar el mínimo o máximo de una función multivariable con función objetivo y restricciones lineales y no lineales. En este artículo se muestran los resultados de las simulaciones, donde se evidencia el correcto desempeño de la metodología planteada.

Palabras claves— Generación distribuida (GD), localización óptima, redes de distribución.

I. INTRODUCCIÓN

Gracias a los avances de la tecnología, en los últimos años se ha introducido en el sector eléctrico las fuentes de generación distribuida (FGD), como una alternativa para suplir la demanda de energía, gracias a las ventajas que éstas ofrecen como: bajo impacto al medio ambiente, bajos costos de inversión y corto tiempo de construcción [1]. Actualmente, hay un aumento en la generación de electricidad mediante fuentes de energía renovables debido a las ventajas de ser energía limpia y no contaminante, lo que ha motivado a algunos gobiernos de Europa y Asia a establecer políticas que incentiven a generar un porcentaje de la demanda total por medio de fuentes renovables [1]. Debido a estas políticas y al continuo aumento de la demanda de energía eléctrica, motiva la instalación de FGD a las redes de distribución de los servicios públicos, lo cual trae consigo algunas implicaciones como: modificación del perfil de voltaje, modificación de los

niveles de cortocircuito, flujo bidireccional de la corriente, entre otros, pudiendo afectar la estabilidad del sistema, la coordinación de protecciones, pérdidas de rendimiento, la regulación de voltaje, la calidad y la confiabilidad [2]. Estas variaciones pudiesen ocasionar costos adicionales en el rediseño del sistema eléctrico, que pudieran resultar ineficientes si estos no se planifican de manera adecuada. La planificación del sistema eléctrico con la presencia de FGD requiere de la definición de varios factores, tales como: la tecnología que se utilizará, el número y la capacidad de las unidades generadoras, la mejor ubicación, el tipo de conexión a la red, etc. [3].

El problema de la ubicación y dimensionamiento de las FGD es de gran importancia, ya que la instalación en lugares no adecuados puede resultar en un aumento de las pérdidas del sistema, lo que supone un aumento de los costos y por lo tanto, tener un efecto contrario al deseado. Por ese motivo, el uso de una metodología de optimización capaz de indicar la mejor solución para una determinada red de distribución, puede ser muy útil para la planificación de sistemas eléctricos. La selección de la ubicación óptima para la instalación y dimensionamiento de las FGD en redes de distribución es un complejo problema de optimización combinatoria [3].

En este artículo se presenta una metodología para la localización óptima de generación distribuida, en el cual se seleccionan inicialmente un conjunto de barras en el que se instalaran las FGD y se obtiene la potencia que deben entregar a la red, con el objetivo de minimizar las pérdidas globales de potencia activa, esto sujeto a una serie de restricciones como: restricción de la corriente de los alimentadores, restricción del nivel de cortocircuito de la barra *slack*, límites máximo y mínimos de los voltajes en las barras y restricción correspondiente al recurso de energía disponible [4]. Los coeficientes de las ecuaciones de las restricciones son obtenidos mediante un estudio de sensibilidades lineales y la optimización se resuelve mediante las funciones del *Toolbox* de Optimización de *Matlab*TM, el cual permite que la función objetivo y las restricciones sean lineales o no lineales.

La metodología propuesta se probó con una red de distribución de ejemplo de 15 barras, en el que se obtuvo resultados satisfactorios, consiguiéndose una reducción en las pérdidas de potencia activa de hasta el 95% con respecto al caso base sin generación distribuida.

Manuscrito recibido el 4 de marzo de 2008. Este artículo fue financiado por la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada.

F.G.G. está con la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, Carretera Tapa Tapa – Mariara, Sector Boca de Río, frente a Base Sucre, Maracay, Estado Aragua, Venezuela, Tlf. +58-416-6465411, E-mail: frednides@yahoo.es

F.G.L. está con la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, Carretera Tapa Tapa – Mariara, Sector Boca de Río, frente a Base Sucre, Maracay, Estado Aragua, Venezuela, Tlf. +58-414-5869605, E-mail: fglongatt@cantv.net

II. METODOLOGÍA

La optimización, también denominada programación matemática, sirve para encontrar la respuesta que proporciona el mejor resultado, la que logra mayores ganancias, mayor producción, o la que logra el menor costo. El objetivo de la optimización global es encontrar la mejor solución de modelos de decisiones difíciles frente a las múltiples soluciones locales [5]. Las técnicas de optimización son empleadas para encontrar un juego de parámetros de diseño $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, que puede de algún modo ser definido como óptimo. En un caso simple esto podría ser la minimización o la maximización de alguna característica de sistema que es dependiente de x . En una formulación más avanzada la función objetivo $f(x)$ es minimizada o maximizada, estando sujeta a restricciones de igualdad $G_i(x) = 0$ ($i = 1, \dots, m_e$); restricciones de desigualdad $G_i(x) \leq 0$ ($i = m_e + 1, \dots, m_e$); y/o límites de parámetro X_l, X_u , [6].

A. Función Objetivo

La función objetivo es el cálculo de las pérdidas de potencia de la red eléctrica en estudio y los parámetros de diseño van a ser las potencias activas de las fuentes de generación distribuida conectadas a la red; por lo tanto: $\mathbf{x} = [P_{GD1}, P_{GD2}, \dots, P_{GDN}]$.

La función objetivo se puede escribir como [7]:

$$P_L = P_{g_{slack}} + \sum_{i=1}^N P_{GD,i} - \sum_{i=1}^N P_{d,i} \quad (1)$$

Donde:

P_L : Pérdidas totales del sistema

$P_{g_{slack}}$: Potencia generada por la barra principal de alimentación de la red

$P_{GD,i}$: Potencia generada en la barra i por las FGD.

$P_{d,i}$: Potencia demandada en la barra i

La ecuación anterior representa las pérdidas totales I^2R en las líneas de transmisión y transformadores de la red y se puede calcular como la potencia total generada menos la potencia total demandada.

B. Restricciones

- *Restricción de capacidad de corriente*: La corriente que fluya desde la FGD hacia la barra de la red, no debe ser mayor a la corriente nominal que puede soportar el conductor que las une.

$$I_i \leq I_i^{\text{nominal}} \quad (2)$$

Para poder implementar esta restricción debe tener una relación directa con los parámetros de diseño que son las potencias activas de las fuentes de generación, se hizo lo siguiente:

$$P = S \times Fp$$

$$Sgd_i = Pgd_i / Fp_i \quad (3)$$

$$S_L = Sgd_i$$

De modo que la potencia aparente que circula por la línea (S_L) será la que entrega la fuente de generación, por lo que finalmente puede apreciarse que esta no podrá ser mayor al valor de potencia nominal que pueda soportar el conductor ($S_{\text{nominal}L}$), asociado a ésta. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} S_L &\leq S_{\text{nominal}L} \\ P_{GD,i} &\leq S_{\text{nominal}L} Fp_i \end{aligned} \quad (4)$$

De igual manera esto aplica para en el caso que se emplee un transformador donde la potencia aparente que entrega el generador a la línea (S_L), no podrá ser mayor al valor de potencia activa nominal del transformador ($S_{\text{nominal}Tx}$) empleado para conectar la fuente de generación distribuida a la red.

- *Restricción del nivel de cortocircuito de la barra slack*:

Esta restricción se asegura que el nivel de cortocircuito en la barra *slack* no sea exceda su valor nominal, a medida que aumente la capacidad de generación instalada. Esta restricción viene dada por, [4]:

$$SCL_{Tx} \leq SCL_{\text{nominal}} \quad (5)$$

Donde:

SCL_{Tx} : Es el nivel de cortocircuito en la barra de referencia (*Slack*).

SCL_{nominal} : Representa el valor de corriente a la que el interruptor de barra puede operar de forma segura bajo condición de falla.

A fin de realizar la relación de esta restricción con los parámetros de diseño ($P_{GD,i}$) las contribuciones del nivel de cortocircuito por parte de la GD en cada una de las barras, son combinadas y formalizadas en la siguiente ecuación algebraica [4]:

$$\sum_{j=1}^N \delta_{jTx} P_{GD,j} + \alpha_{Tx} \leq SCL_{\text{nominal}} \text{ (kA)} \quad (6)$$

Donde:

δ_{jTx} : Es la dependencia del nivel de cortocircuito en la barra *slack* para inyecciones de potencia en la j -ésima barra de la red.

$P_{GD,j}$: Potencia inyectada desde la barra j -ésima.

α_{Tx} : Valor inicial de SCL en la barra *slack* sin generación distribuida presente.

SCL_{nominal} : Representa el valor de corriente de cortocircuito a la que el interruptor de barra *slack* puede operar de forma segura bajo condición de falla.

- *Restricción de límites de voltajes* en las barras de la red ante las inyecciones de potencia de las FGD.

El incremento del flujo de potencia activa sobre las redes de distribución, tienen un gran impacto sobre el nivel de voltaje, porque el elemento resistivo de las líneas en las redes de distribución son más altas que en otras líneas, [4]. El voltaje en las barras debe mantenerse en unos límites.

$$V_{\text{mini}} \leq V_i \leq V_{\text{maxi}}, \quad i \forall N \quad (7)$$

A fin de relacionar esta restricción correspondiente al efecto que presenta la inyección de potencia por parte de las FGD ($P_{GD,i}$), sobre el perfil de voltaje, esta se obtiene mediante los parámetros de dependencia e interdependencia de voltaje (μ_i , y μ_{ji}), los cuales se obtienen del estudio de análisis de sensibilidad. La restricción representativa a este estudio puede ser formalizada de la siguiente forma, [4]:

$$V_{\min i} \leq \mu_i P_{GD,i} + \sum_{j=1}^N \mu_{ji} P_{GD,j} + \beta_i \leq V_{\max i} \quad i \neq j \quad (8)$$

Donde:

μ_i : Dependencia del nivel de voltaje en la barra i respecto a la potencia inyectada en la barra i .

β_i : Se refiere al valor inicial de voltaje en la barra i sin generación conectada.

μ_{ji} : Se refiere a la dependencia del nivel de voltaje en la barra i respecto a la potencia inyectada en la barra j .

- Restricción correspondiente a los límites del recurso de energía disponible e iniciativas del cliente.

Todas las barras presentes en la red no pueden tener un recurso substancial de energía disponible. Esto puede ser modelado añadiendo para cada barra de la red una restricción que limite la inyección del recurso de energía disponible en cada barra, [4].

De modo que la ecuación de la restricción es realizada de la siguiente forma:

$$P_{\text{instalada},i} \leq P_{GD,i} \leq P_{\text{disponible},i} \quad (9)$$

Esta restricción es tratada de la forma $\mathbf{lb} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{ub}$, donde \mathbf{lb} y \mathbf{ub} son vectores que corresponderán a los límites superior e inferior respectivamente.

C. Análisis de sensibilidades

El análisis de sensibilidad es una herramienta especialmente útil cuando no se tiene una certeza absoluta sobre los valores que se han dado a los términos independientes de las restricciones o los coeficientes de la función objetivo, [8]. El análisis de sensibilidad propiamente dicho estudia los intervalos para los cuales la modificación de un valor (coeficiente de la función objetivo o término independiente) en el programa lineal, de forma individualizada, no cambia las variables que componen la base de la solución. Hallando, para el rango de valores definido en el intervalo, la evolución de la función objetivo [8].

Para el caso de interés del presente artículo se considera el estudio de la sensibilidad de voltaje frente a inyecciones de potencia activa, en las barras seleccionadas para instalar generación distribuida. Esto se realiza mediante la resolución de un flujo de potencia para cada valor de potencia activa inyectada; es importante destacar que la barra de conexión de la FGD se simula en modo PQ, y la potencia reactiva se calcula considerando un factor de potencia de 0.99 (para este caso en particular). De estos flujos de potencia se obtienen las curvas de los voltajes en las barras de estudio y la curva de los cortocircuitos en la barra de alimentación principal, y de las pendientes de estas curvas se obtiene [4]:

- μ_i (kV/MW): Dependencias de voltaje en la propia barra de estudio
- μ_{ji} (kV/MW): Interdependencias de voltajes en las otras barras
- δ_{jTx} (kA/MW): Dependencia de los niveles de cortocircuitos en la barra *slack* ante las inyecciones de potencias en las barras de estudio.

III. PROGRAMA LOPTIGD 2.0

El estudio de ubicación óptima de FGD en redes de distribución se resume en el diagrama de flujo mostrado en la Fig. 1.

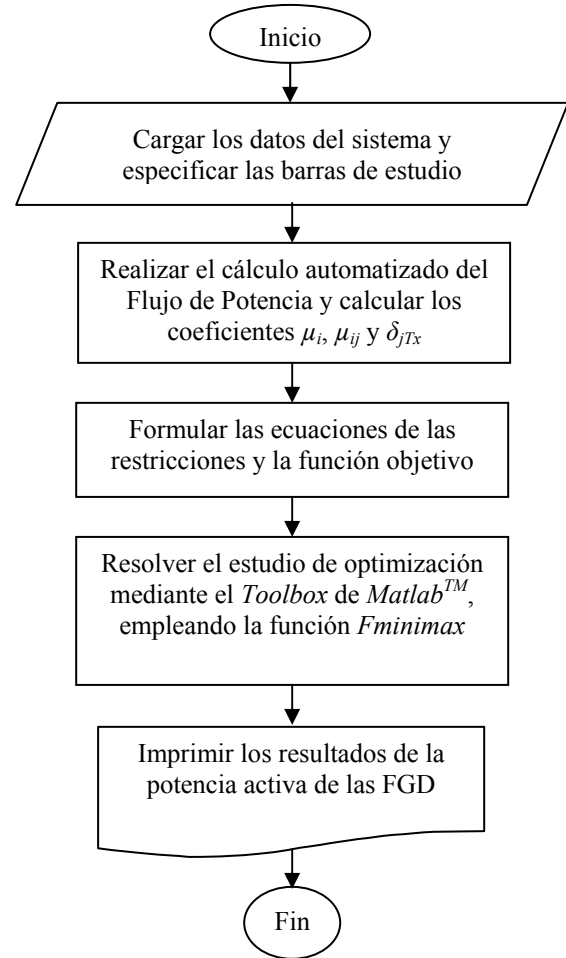


FIG. 1. Metodología de ubicación óptima de GD

Esta metodología se codificó en un programa desarrollado en *MatLab™* y se le dio el nombre de *LoptiGD 2.0*, cuya función objetivo son las pérdidas de potencia globales del sistema. Este programa arroja como resultado la potencia activa que deben inyectar las FGD para minimizar la función objetivo; es decir, para minimizar las pérdidas en el sistema. Para el cálculo de las restricciones se automatiza un proceso en donde se implementa una rutina para el cálculo del flujo de potencia que aplica el método de *Newton-Raphson*, además considera los modelos de generadores asincrónicos, por los métodos RX y PQs. El flujo de potencia incluye la modelación de la dependencia de voltaje en las cargas, por medio de la representación de un modelo polinomial [9]. Se implementó además una rutina de cortocircuito por el método de las FEMs, de manera tal que considera los flujos de potencia del sistema, y que incluye los modelos detallados de las máquinas sincrónicas y asincrónicas. Una vez que se construyen las restricciones, el estudio de optimización se resuelve mediante una rutina de *Matlab™* denominada "*fminimax*" el cual encuentra el mínimo o el máximo de una función objetivo de varias variables; esta función forma parte del *Toolbox* de

optimización de *Matlab*TM y permite funciones objetivos y restricciones lineales y no lineales [6].

IV. CASO DE ESTUDIO

Para comprobar la funcionalidad de la metodología propuesta se considera la red de Kumamoto de Japón presentada en [10], el diagrama unifilar se muestra en la Fig. 2 y los datos están expresados en la Tabla I. Esta red es un circuito típico de distribución, de medio voltaje con un total de 15 barras, 14 de ellas con carga.

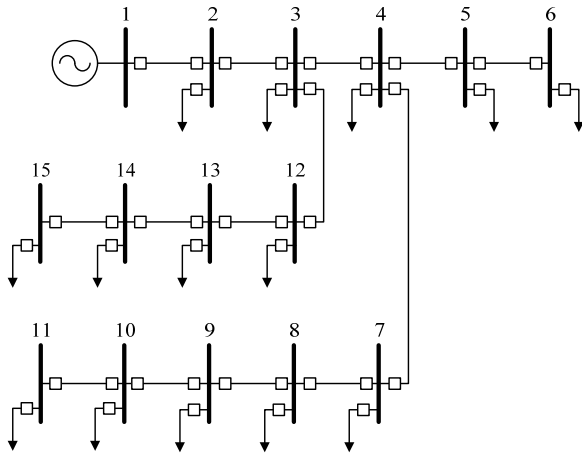


FIG. 2. Red de prueba, sistema de distribución Kumamoto

TABLA I. Datos de Líneas y Cargas del Sistema de Distribución de Kumamoto [10]

| Nodo de Inicio | Nodo Final | R (p.u) | X (p.u) | B (p.u) | P_{load} (p.u) | Q_{load} (p.u) |
|----------------|------------|---------|----------|---------|------------------|------------------|
| 1 | 2 | 0.00315 | 0.075207 | 0.00000 | 0.02080 | 0.0021 |
| 2 | 3 | 0.00033 | 0.001849 | 0.00150 | 0.04950 | 0.0051 |
| 3 | 4 | 0.00667 | 0.030808 | 0.03525 | 0.09580 | 0.0098 |
| 4 | 5 | 0.00579 | 0.014949 | 0.00250 | 0.04420 | 0.0045 |
| 5 | 6 | 0.01414 | 0.036547 | 0.00000 | 0.01130 | 0.0012 |
| 4 | 7 | 0.00800 | 0.036961 | 0.03120 | 0.06380 | 0.0066 |
| 7 | 8 | 0.00900 | 0.041575 | 0.00000 | 0.03230 | 0.0033 |
| 8 | 9 | 0.00700 | 0.032346 | 0.00150 | 0.02130 | 0.0022 |
| 9 | 10 | 0.00367 | 0.01694 | 0.00350 | 0.02800 | 0.0029 |
| 10 | 11 | 0.00900 | 0.041575 | 0.00200 | 0.21700 | 0.0022 |
| 3 | 12 | 0.02750 | 0.127043 | 0.00000 | 0.01320 | 0.0014 |
| 12 | 13 | 0.03150 | 0.081405 | 0.00000 | 0.00290 | 0.0003 |
| 13 | 14 | 0.03965 | 0.102984 | 0.00000 | 0.01610 | 0.0016 |
| 14 | 15 | 0.01061 | 0.004153 | 0.00000 | 0.01390 | 0.0014 |

Nota: Voltaje base = 11.432 kV, Potencia base = 30 MVA

A. Flujo de potencia para el caso base

En la Tabla II se muestra el resultado de los voltajes en las barras y las pérdidas de potencia activa y reactiva, mediante la resolución del flujo de potencia del caso base; es decir sin fuentes de generación distribuida.

TABLA II. Voltajes en las barras para el caso base (sin FGD)

| Barra | Voltaje [p.u] | Ángulo [Grados] |
|-------|---------------|-----------------|
| 1 | 1.0000 | 0.0000 |
| 2 | 0.9975 | -2.7469 |
| 3 | 0.9973 | -2.8125 |
| 4 | 0.9940 | -3.7369 |
| 5 | 0.9936 | -3.7835 |
| 6 | 0.9934 | -3.8065 |
| 7 | 0.9908 | -4.5185 |
| 8 | 0.9876 | -5.2434 |
| 9 | 0.9855 | -5.7500 |
| 10 | 0.9845 | -5.9947 |
| 11 | 0.9824 | -6.5285 |
| 12 | 0.9953 | -3.1434 |
| 13 | 0.9940 | -3.2925 |
| 14 | 0.9925 | -3.4650 |
| 15 | 0.9923 | -3.4671 |

Pérdidas de potencia: $P_L = 0.193562 \text{ MW}$ $Q_L = 0.662106 \text{ MVAR}$

B. Estudio de optimización

Para esta red de prueba se considera la instalación de FGD en 5 barras, las cuales son seleccionadas por un criterio de prioridad por carga, que consiste en seleccionar las 5 barras que tienen mayor potencia demandada, siendo estas las barras: 3, 4, 5, 7 y 11.

El interruptor de la barra *slack* (barra 1) tiene una capacidad de cortocircuito nominal de 20 kA, este dato es importante para evaluar la restricción de cortocircuito en la barra *slack*.

Se considera como fuentes de generación distribuida máquinas sincrónicas, cuyos datos de relevancia para este estudio son:

- Potencia nominal: 7.801 MVA
- Voltaje nominal: 11.432 kV
- Resistencia de Armadura: 0.0479 p.u.
- Reactancia sub-transitoria: 0.195 p.u.

Los datos de la máquina conectada en la barra 1 son los siguientes:

- Potencia nominal: 20 MVA
- Voltaje nominal: 11.432 kV
- Reactancia sub-transitoria: 0.12 p.u.

Las FGD se consideran conectadas directamente a la red, por lo que no se evalúa la restricción de la capacidad de corriente de los alimentadores.

Los límites de voltaje en las barras son:

$$0.95 \text{ p.u.} \leq V_i \leq 1.05 \text{ p.u.} \quad (10)$$

Para la restricción correspondiente al recurso disponible de energía, se emplea lo siguiente:

$$0 \text{ MW} \leq P_{GD,i} \leq 7 \text{ MW} \quad (11)$$

Para resolver el análisis de sensibilidad de las barras de estudio, se inyecta potencia para cada una de las barras desde 0 MW hasta 7 MW en intervalos de 1 MW, a un factor de

potencia $f_p = 0.99$. En la Tabla III se muestran los resultados de las dependencias e interdependencias de voltaje y en la Tabla IV se muestran las dependencias de cortocircuito en la barra *slack*.

TABLA III. Dependencias e Interdependencias de Voltaje (μ_i, μ_{ij}) en kV/MW

| Barra | 3 | 4 | 5 | 7 | 11 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3 | 0.0068 | 0.0069 | 0.0069 | 0.0069 | 0.007 |
| 4 | 0.0076 | 0.012 | 0.012 | 0.0121 | 0.0122 |
| 5 | 0.0075 | 0.012 | 0.015 | 0.012 | 0.0122 |
| 7 | 0.0082 | 0.0128 | 0.0129 | 0.0181 | 0.0183 |
| 11 | 0.0093 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0203 | 0.0395 |

Los elementos de la diagonal principal son las dependencias de voltaje (μ_i) y los elementos fuera de la diagonal principal son las interdependencias de voltaje (μ_{ij}).

TABLA IV. Dependencias de cortocircuito en la barra *slack*

| Barra de estudio | δ_{Tx} (kA/MW) |
|------------------|-----------------------|
| 3 | -0.0003598 |
| 4 | -0.0005393 |
| 5 | -0.0005471 |
| 7 | -0.0006638 |
| 11 | -0.0008572 |

La corriente de cortocircuito en la barra *slack* sin generación distribuida, por el método de las FEMs es de: $I_{cc_{slack}} = 8.5062$ KA

Con estos resultados y con los datos y consideraciones del caso de estudio, se construyen las restricciones expresadas en las ecuaciones (6), (8) y (9). Por último con estas restricciones y la función objetivo se procede a resolver el estudio de optimización, para ello se emplea la función *fminimax* de *Matlab*TM.

En la Tabla V se muestran los resultados obtenidos del estudio de localización óptima:

TABLA V. Resultados del estudio de localización óptima

| Barra | P_{GD} (MW) |
|-------|---------------|
| 3 | 0.9514 |
| 4 | 2.4462 |
| 5 | 2.5641 |
| 7 | 3.7226 |
| 11 | 7.0000 |

Potencia total generada por las FGD: 16.6844 MW

Es importante recalcar que la potencia inyectada por las FGD se considera a un factor de potencia igual a 0.99. En la Tabla VI se muestran los resultados del flujo de potencia, cuando se conectan a la red de distribución las 5 fuentes de generación distribuida.

TABLA VI. Voltajes en las barras del sistema, cuando se conectan a red las FGD

| Barra | Voltaje [p.u] | Ángulo [Grados] |
|-------|---------------|-----------------|
| 1 | 1 | 0 |
| 2 | 1.0082 | -0.3375 |
| 3 | 1.0083 | -0.3452 |
| 4 | 1.0115 | -0.3648 |
| 5 | 1.0118 | -0.3422 |
| 6 | 1.0116 | -0.3644 |
| 7 | 1.0135 | -0.4006 |
| 8 | 1.0142 | -0.5668 |
| 9 | 1.015 | -0.6388 |
| 10 | 1.0155 | -0.6563 |
| 11 | 1.0169 | -0.6346 |
| 12 | 1.0064 | -0.6688 |
| 13 | 1.0051 | -0.8147 |
| 14 | 1.0036 | -0.9834 |
| 15 | 1.0034 | -0.9854 |

Pérdidas de potencia $P_L = 0.01104$ MW $Q_L = -2.29851$ MVAR

Cuando se conectan las fuentes de generación distribuida en las barras 3, 4, 5, 7 y 11, las pérdidas de potencia activa del sistema son de 0.01104 MW, lo que representa un 5.7% de las pérdidas del caso base, lo que se traduce como una disminución de más de un 94% de las pérdidas de potencia activa, sin embargo las pérdidas de potencia reactiva aumentaron en más de un 380%. También se puede observar en la Tabla V, la potencia inyectada en la barra 11 llegó al límite de 7 MW, esto es debido a la restricción correspondiente al recurso disponible de energía expresada en (11).

Para evaluar la veracidad de los resultados se ha escogido tres escenarios:

- *Escenario 1*: Sistema eléctrico optimizado (Corresponde al caso de estudio, y los resultados de la potencia de las FGD están en la Tabla V)
- *Escenario 2*: Aumento de un 20% de la potencia aparente obtenida en el caso 1.
- *Escenario 3*: Disminución de un 20% de la potencia aparente obtenida en el caso 1.

Lo que se persigue con el planteamiento de estos tres escenarios, es simular el flujo de potencia para cada caso y verificar las pérdidas de potencia activa, los voltajes en las barras y las restricciones planteadas anteriormente. En la Tabla VII se muestran los valores de las potencias inyectadas por las FGD para cada escenario a evaluar.

TABLA VII. Potencias generadas por las FGD

| Barra | Escenario 1 P_{GD} (MW) | Escenario 2 P_{GD} (MW) | Escenario 3 P_{GD} (MW) |
|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 3 | 0.9514 | 1.6449 | 1.0966 |
| 4 | 2.4462 | 2.8840 | 1.9226 |
| 5 | 2.5641 | 2.5141 | 1.6761 |
| 7 | 3.7226 | 4.3504 | 2.9002 |
| 11 | 7.0000 | 7.0000 | 5.6000 |

A continuación en la Tabla VIII se muestra el perfil de voltaje para los escenarios 2 y 3, y las pérdidas de potencia activa del sistema.

TABLA VIII. Perfil de voltaje de la red eléctrica

| Barra | Escenario 2 | | Escenario 3 | |
|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|--------------|
| | V[p.u] | Ang [Grados] | V[p.u] | Ang [Grados] |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 1.0089 | -0.0956 | 1.0064 | -0.8338 |
| 3 | 1.0092 | -0.0975 | 1.0065 | -0.8534 |
| 4 | 1.0127 | -0.0604 | 1.0083 | -1.0771 |
| 5 | 1.0130 | -0.0392 | 1.0083 | -1.0779 |
| 6 | 1.0128 | -0.0613 | 1.0081 | -1.1002 |
| 7 | 1.0150 | -0.0543 | 1.0093 | -1.2624 |
| 8 | 1.0156 | -0.2201 | 1.0092 | -1.5359 |
| 9 | 1.0164 | -0.2918 | 1.0095 | -1.6909 |
| 10 | 1.0169 | -0.3093 | 1.0097 | -1.7516 |
| 11 | 1.0184 | -0.2877 | 1.0105 | -1.8353 |
| 12 | 1.0073 | -0.4205 | 1.0046 | -1.1782 |
| 13 | 1.0060 | -0.5661 | 1.0033 | -1.3245 |
| 14 | 1.0045 | -0.7345 | 1.0018 | -1.4939 |
| 15 | 1.0042 | -0.7366 | 1.0015 | -1.4959 |
| P _I = 0.011386 MW | | P _I = 0.020095 MW | | |

De la tabla anterior, puede verificarse que el perfil de voltaje del sistema de eléctrico de estudio, no viola los límites establecidos en (10), lo que indica que para ambos escenarios el circuito tiene un buen perfil de voltaje.

También se puede apreciar que las pérdidas de potencia activa son mayores en los escenarios 2 y 3, con respecto al caso optimizado, el cual presenta las menores pérdidas de potencia activa, sujeto a las restricciones anteriormente planteadas. Debido a esto los resultados obtenidos en los escenarios 2 y 3 no representan el óptimo.

V. CONCLUSIONES

Con respecto a los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- La metodología empleada en el análisis de sensibilidades permite linealizar las restricciones.
- Cuando se aplica la metodología propuesta en la red de estudio se obtuvo una disminución de las pérdidas de potencia de un 94%
- En la validación de los resultados, se aprecia que al cambiar los valores de las potencias generadas por las FGD, las pérdidas de potencia no son menores que en el caso optimizado.

Por último, en este artículo se ha planteado una metodología para la ubicación óptima de fuentes de generación distribuida en redes de distribución, en el cual se desea minimizar las pérdidas globales de potencia activa.

Se plantea como función objetivo las pérdidas del sistema y un conjunto de restricciones, a saber: 1.- limitación de la capacidad máxima de corriente del conductor que conecta la

FGD a la red, 2.- limitación del nivel de cortocircuito en la barra *slack*, 3.- límites máximo y mínimo de voltaje en las barras del sistema, 4.- límites máximo y mínimos de la potencia suministrada por las FGD.

La formulación de las restricciones se linealizan mediante un análisis de sensibilidades, en el que se inyectan potencia activa en las barras de estudio.

El estudio de optimización es resuelto mediante la función *fminimax* del *Toolbox* de optimización de *Matlab*TM.

Este programa fue probado en una red de distribución de ejemplo, en el que se demostró su desempeño arrojando resultados satisfactorios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Limpananwadi, W. Tayati. "Impacts of Multiple Distributed Generations on a Weak Distribution Network – A Case Study". International Journal of Emerging Electric Power Systems 2006.
- [2] F. González Longatt. "Review of the Distributed Generation: Attempt of Unification". Presentado en el International Conference on Renewable Energy and Power Quality. Zaragoza. España, 2005.
- [3] M. Sedighzadeh, A. Rezaadeh. "Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile". Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. Volume 27, febrero de 2008.
- [4] Andrew Keane; Mark O'Malley. "Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks". IEEE Transactions on Power Systems Volume 20, Issue 3, Aug. 2005 Page(s): 1640 – 1646.
- [5] Hossein Arsham. "Modelos Deterministas: Optimización Lineal", 1994 (Online) Disponible en: <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/opre640S/SpanishD.htm>
- [6] Optimization Toolbox For Use with MATLAB®. "Optimization Toolbox User's Guide". Version 3.
- [7] J. Grainger; W. Stevenson jr. "Análisis De Sistemas de Potencia". Mc Graw Hill. 2001.
- [8] J. Sallán, A. Suñé, J. Baptista, F. Guardiet. "Métodos cuantitativos en organización industrial I". Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, SL. Primera edición: febrero de 2002.
- [9] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. "Standards Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No.3, Augt 1995.
- [10] Li, K. Tomovic, and T. Hiyama, "Load Following Functions Using Distributed Energy Resources" Proceedings of the 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, July 2000, pp. 1756-1761.