



Comité Nacional Venezolano

II CONGRESO VENEZOLANO DE REDES Y ENERGÍA ELÉCTRICA

Junio 2009

C6-101

EFFECTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA

F. González-Longatt* A. Hernández* F. Guillen*
R. Terán** C. Peraza*** E. Gavorskis*

* Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Maracay, 2122, Venezuela. Grupo de Investigaciones Avanzadas en Energía Eléctrica, giaELEC, <http://www.giaelec.org>

** Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Eléctrica, Valencia, Venezuela

*** Instituto Tecnológico Valencia, Departamento de Eléctrica, Valencia, Venezuela

RESUMEN

El problema de la estabilidad de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia, es generalmente considerado como un inconveniente del suministro de potencia reactiva. La integración de fuentes de generación distribuida impone nuevos retos a ser evaluados en cuando a la estabilidad de voltaje, debido a sus muy variados modos de operación, en cuanto al control de voltaje y generación de potencia reactiva. El presente artículo muestra un análisis cualitativo del problema de la estabilidad de voltaje de sistemas de potencia, considerando la integración fuentes de generación distribuida. Se ha considerado una Red de Prueba y se han generado las curvas *PV*, variando la potencia activa y reactiva de las cargas y manteniendo constante la potencia activa entregada por la unidad de generación distribuida. Las curvas *PV* del sistema, fueron determinadas a través de las simulaciones dinámicas de término largo (60 segundos). Los valores de los voltajes de barra y otras variables, fueron tomados a partir de estas simulaciones en forma repetidas, hasta construir la curva *PV*. Típicamente se espera que la instalación de generadores cerca de las cargas, produzca un aumento en el margen de la estabilidad de voltaje. Sin embargo, el impacto en el margen, depende del intercambio de potencia reactiva entre el generador y la red, lo cual es diferente para las distintas tecnologías de generación distribuida. En este artículo se demuestra que la generación distribuida que consume reactivos, produce un impacto negativo en el margen de estabilidad de voltaje.

PALABRAS-CLAVE

Control de Voltaje, Curvas *PV*, estabilidad de voltaje, generación distribuida.

1. Introducción

El estudio del flujo de potencia considerado en este artículo, se efectúa para condiciones en régimen estacionario de operación normal de la red y de las fuentes. La comparación de un atributo medido en el flujo de potencia con generación distribuida y el caso base (sin generación distribuida), permiten obtener el impacto que tiene la integración de este tipo de fuentes de generación. Se consideran los siguientes atributos principales sin excluir discusiones de otros efectos notorios:

- *Regulación de Voltaje*. Idealmente, las empresas ayudan a mantener el voltaje de servicio a todos los consumidores, es típico que se respete el rango A en el estándar ANSI C84.1. Para propósitos de este

artículo, se ha considerado que un voltaje aceptable para la operación, está comprendido en una banda de $\pm 5\%$, medido desde el voltaje nominal (0.95 a 1.05 p.u).

- *Pérdidas de Potencia Activa y Reactiva.* En este artículo, se ha considerado aceptable que la magnitud de las pérdidas de potencia, sean menores a 0.05 p.u, respecto a la potencia nominal de la carga.

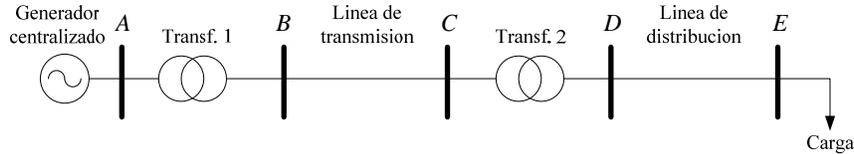


Fig.1. Red de Prueba: Sistema de transmisión-distribución

| Nodo Inicial | Nodo Final | R (p.u) | X (p.u) | B (p.u) | P_{load} (p.u) | Q_{load} (p.u) |
|--------------|------------|---------|---------|---------|------------------|------------------|
| 1 | 2 | 0.00300 | 0.07500 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 2 | 3 | 0.00040 | 0.00120 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 3 | 4 | 0.00300 | 0.10600 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 4 | 5 | 0.01200 | 0.02340 | 0.00000 | 0.88000 | 0.19700 |

Bus voltage = 34.5kV, Base MVA = 100 MVA

Tabla I. Parámetros de líneas y datos de las cargas de la Red de Prueba

Para medir el impacto técnico que tiene la generación distribuida sobre la regulación de voltaje y las pérdidas de potencia en los sistemas transmisión/distribución, se ha emprendido el análisis de flujo de potencia sobre una red de prueba que corresponde a una red representativa de un generador centralizado alimentando a una carga, mediante un sistema de transmisión-distribución. Esta red incluye varios niveles de voltaje. La topología y los parámetros son representativos de un sistema de potencia real, y correspondientes a un modelo que puede ser obtenido, a partir de adecuadas simplificaciones y equivalencias. En la Fig 1, se observa la estructura de dicha red, cuyos parámetros son presentados en la Tabla I.

2. Modo de Operación de la Generación Distribuida.

En régimen estacionario, el comportamiento de una fuente de generación distribuida puede ser caracterizado en el flujo de potencia, tanto por la potencia que entrega en terminales como por la forma en que lo hace; en tal sentido, conviene distinguir al menos tres modos característicos a considerar.

- *Factor de potencia constante.* En este caso, la unidad de generación distribuida es programada para que entregue una potencia activa ($P_g = P_{GD}$), y la potencia reactiva (Q_g) que la unidad entregará, satisface un determinado factor de potencia considerado ($\cos \phi^*$):

$$\frac{P_g}{\sqrt{P_g^2 + Q_g^2}} = \cos \phi^* \quad (1)$$

En este modo de operación, hay dos límites que deben ser respetados: (i) la capacidad nominal de la unidad (S_{nom}) y (ii) el factor de potencia debe permanecer constante e igual a (1). Cuando la unidad de GD opera a factor de potencia constante, se tiene la ventaja de que la generación de reactivos aumenta, conforme aumenta la generación de potencia activa. Este modo de operación permite una cierta capacidad de soporte de voltaje, sin embargo, esta no es la razón principal que motiva a su aplicación. En la Fig 2, se

observa que para una operación a factor de potencia constante a ϕ_1 , un incremento en la potencia activa producida de P_{g1} a P_{g2} , crea un aumento en la potencia reactiva generada por la unidad Q_{g1} a Q_{g2} .

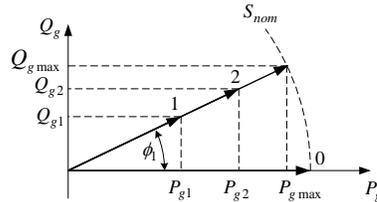


Fig 2. Diagrama de operación PQ para una unidad de GD en modo de factor de potencia constante

- **Compensación de Reactivos con Límite.** Las tecnologías de generación distribuida basadas en generadores sincrónicos directamente conectados a la red, al igual que algunas que emplean interfaz a la red basada en convertidores de potencia, poseen límites asociados en cuanto a la entrega de reactivos. Es muy común que estos límites vengan expresados en el diagrama de operación de potencia activa versus potencia reactiva, es decir, el clásico diagrama del círculo (es poco común que $Q_{\min} \neq 0$).

$$Q_{\min} \leq Q_g \leq Q_{\max} \quad (2)$$

En este modo de operación se limita al generador en función de restricciones físicas reales: límite de la capacidad térmica de los conductores del estator y del arrollado de campo, límite de la capacidad de potencia de la fuente primaria y restricciones más complejas, como el límite de sub-excitación o límite de estabilidad estática, capacidad de corriente y frecuencia de conmutación de los dispositivos electrónicos de conmutación.

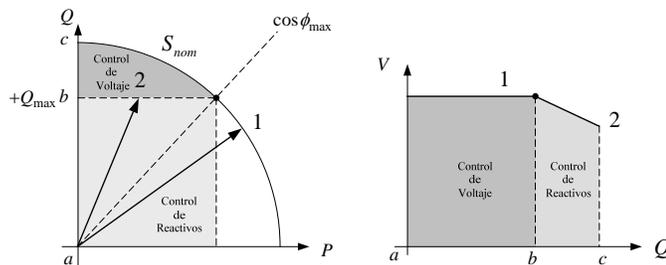


Fig 3. Diagrama de operación PQ y diagrama de V-P considerando la compensación de reactivos con límites prácticos

En tal sentido, este modo permite un control limitado del voltaje local por la inyección variable de potencia reactiva dentro de ciertos límites (Fig 3). Las tecnologías de generación distribuida basadas en generadores sincrónicos, y algunos casos muy particulares de unidades con interfaz electrónica de potencia a la red, permiten este modo de operación.

- **Factor de Potencia Variable.** En algunas tecnologías de generación distribuida, se permite la operación a factor de potencia variable, aceptando el soporte de voltaje en la barra de conexión mediante la generación de reactivos. Este es un modo de operación relativamente nuevo en las unidades de generación distribuida. La generación de reactivos ayuda al soporte del voltaje, mas no es la variable de control. Las unidades que operan en este modo, generan potencia reactiva (Q_g) con la capacidad de potencia reactiva remanente de la unidad. Es decir, que para una unidad de capacidad S_n , y que entrega una potencia activa P_g , el valor de la potencia reactiva viene dado por:

$$Q_g = \sqrt{\left(S_{nom} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{P_g}{S_{nom}} \right) \right) \right)^2 - P_g^2} \quad (3)$$

El diagrama de operación para el modo a factor de potencia variable es mostrado en la Fig 4. Corresponde al funcionamiento de la unidad sobre todo el lugar geométrico en forma de círculo, de acuerdo a la potencia nominal de la fuente de generación distribuida. Se observa en el primer caso extremo, es decir, cuando la unidad no entregue potencia activa, que toda la capacidad de la máquina es empleada para la producción de reactivos (punto 4); a medida que la unidad comienza a generar potencia activa, se modifica el factor de potencia para garantizar que toda la capacidad de la unidad se emplee (puntos 3, 2, y 1); en el segundo caso extremo, es decir, cuando la unidad entregue toda su capacidad en potencia activa, no se generará potencia reactiva (operación a factor de potencia unitario, punto 0). Todos los puntos son referidos a la Fig 4).

Este modo de operación, sacrifica la entrega de potencia reactiva en función de la entrega de potencia activa, pero garantiza que la fuente primaria siempre opere a su potencia nominal. Por esta razón, dicho modo es admitido por algunas de las tecnologías de generación distribuidas, basadas en convertidores electrónicos de potencia como interfaz a la red.

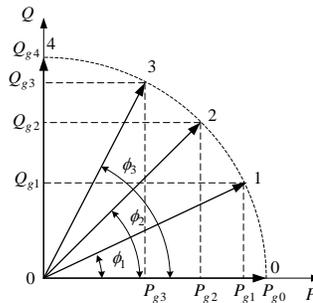


Fig 4. Diagrama de operación PQ para una unidad de GD en modo a factor de potencia variable

- *Generación dependiente del Voltaje*; consumo de reactivos. Algunas tecnologías de generación distribuida, producen potencia activa pero a costa de un consumo de reactivos, siendo esta característica influenciada por la magnitud del voltaje en terminales. Este es el caso típico de la generación distribuida que emplea al generador de inducción del tipo jaula de ardilla.

Para evaluar el efecto de la integración de gran cantidad de generadores de inducción en el desempeño del sistema de potencia, se ha supuesto un grupo de 10 generadores de inducción de 350 kVA, como son típicamente encontrados en granjas de viento [9]. Cada generador es compensado con un capacitor para la corrección del factor de potencia de 220 kVAr, y conectado a través de un transformador de 500 kVA con reactancia de 5% a una barra con nivel de cortocircuito de 100 MVA, la cual es representada por una impedancia de fuente conectada a una barra de potencia infinita (Fig 5).

El grupo de máquinas puede ser considerado como un generador único equivalente de 3.5 MW. En el sistema por unidad, esta transformación se logra manteniendo constantes todas las impedancias en por unidad de los generadores, capacitores y transformadores, pero cambiando la base de potencia de los cálculos. Esto posee el efecto de incrementar la impedancia efectiva de la conexión a la barra de potencia infinita por el número de generadores (en este caso diez).

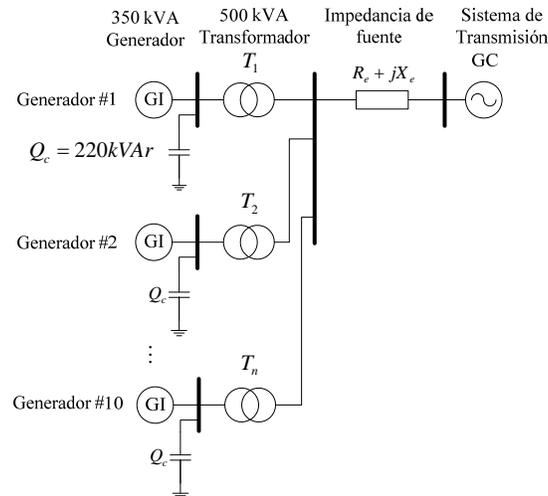


Fig 5. Representación de una Típica Granja de Viento con 10 Generadores de Inducción, con compensación de factor de potencia local, alimentando por medio de transformadores elevadores a un sistema de transmisión

En la Fig 6(a), se muestra la curva de torque-deslizamiento del generador coherente de 3.5 MVA (línea punteada). Se puede ver que el torque máximo ha caído significativamente desde 1.868 p.u hasta 1.286 p.u (350 kVA por turbina) debido a la impedancia adicional de la fuente.

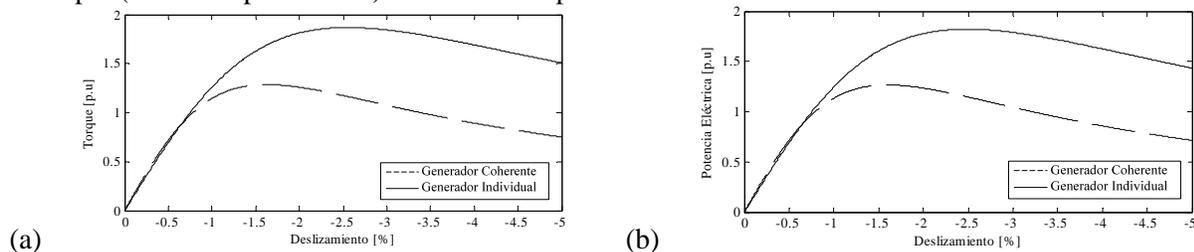


Fig 6. Curva de (a) torque y (b) potencia eléctrica versus deslizamiento de un generador de inducción y un generador coherente equivalente para un grupo de 10 generadores, con compensación de factor de potencia local

El incremento en el número de generadores de inducción en la barra de conexión, aumenta efectivamente el impacto de la impedancia de la fuente y puede llevar a la inestabilidad cuando el generador deja de ser capaz de transmitir el torque de rotación, aplicado por la fuente primaria de energía.

La sensible disminución en la potencia eléctrica que se experimenta por la presencia de la impedancia del circuito de conexión, es evidente en el trazado de la curva de potencia activa versus deslizamiento, como se muestra en la Fig 6(b). El cambio en el máximo valor de potencia que puede ser extraído del generador, es latente, un decremento mayor al 30% (pasa de 1.822 p.u a 1.265 p.u), además de una reducción en el deslizamiento al cual ocurre la potencia máxima (-2.480% a -1.639%).

El uso de capacitores para la compensación local del factor de potencia, tiene el efecto de trasladar el diagrama del círculo hacia al origen. Sin embargo, es evidente un incremento en el consumo de potencia reactiva en vacío (pasa de 0.3369 p.u a 0.3686 p.u). Resulta importante, el hecho del incremento en demanda de potencia reactiva a una potencia activa de salida mayor a 1.0 p.u.

La Fig 7, muestra las variaciones en la potencia reactiva, drenada desde la barra de potencia infinita con el deslizamiento. Se puede ver en este ejemplo, que si el conjunto de turbinas de viento es

acelerado, más allá del torque máximo (y se mantienen conectadas), cada máquina requerirá una potencia reactiva de más de 1.721 p.u.; esto puede llevar a un colapso de voltaje en la red, aunque en la práctica, los generadores deberían haber sido disparados por sobre velocidad o bajo voltaje.

Cuando el torque máximo es excedido en un generador de inducción, el exceso de potencia reactiva, ocasiona un descenso del voltaje hasta alcanzar el colapso del mismo y el generador se acelera hasta que su fuente de pri-motor es puesto fuera de servicio, para prevenir cualquier daño. Desde el punto de vista del análisis de la estabilidad del voltaje, es de interés la relación de potencia activa al voltaje. De hecho, tal estabilidad depende de las relaciones entre la potencia activa, reactiva y el voltaje.

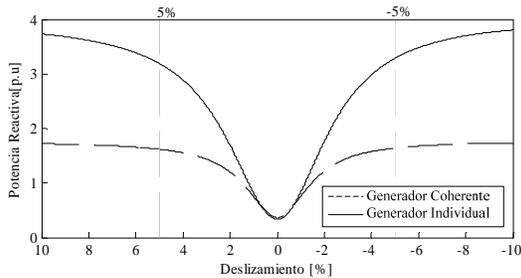


Fig 7. Curva de potencia reactiva versus deslizamiento para un generador de 350 kVA y un generador coherente equivalente para 10 generadores de inducción, con 100% compensación de factor de potencia local

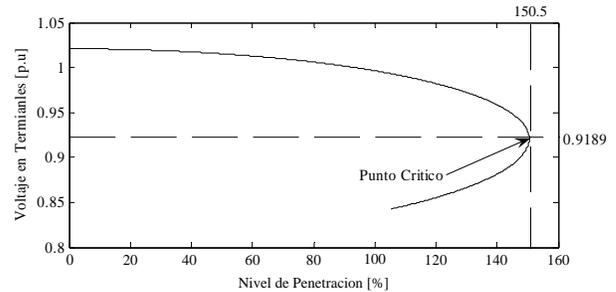


Fig 8. Curva característica de potencia activa versus voltaje de un generador coherente equivalente a 10 generadores de inducción, con 100% compensación de factor de potencia local

En la Fig 8, se muestra la característica de potencia activa-voltaje para el generador coherente en consideración, indicando el punto crítico de operación, el cual, corresponde al límite de potencia para operación satisfactoria, para valores más altos de la potencia generada. Como se puede observar, hay problemas de estabilidad, es decir, el voltaje decrece progresivamente.

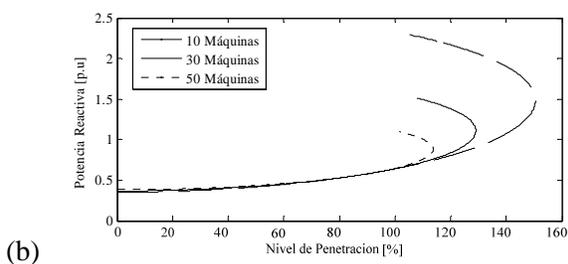
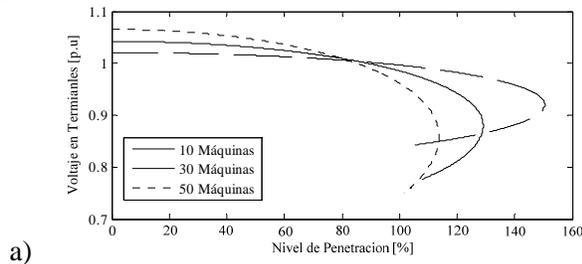


Fig 9. Curva característica (a) voltaje y (b) potencia reactiva versus nivel de penetración un generador coherente equivalente para una Típica Granja de Viento con 10, 30 y 50 Generadores de Inducción, para 100% de compensación de factor de potencia local

El número de máquinas que conforma una granja de viento, es un factor, que junto a la impedancia de la fuente, definen el punto crítico a partir del cual la inestabilidad de voltaje se hará presente. En la Fig 9, se muestra el comportamiento del lugar geométrico del voltaje en terminales del generador de inducción coherente y la potencia reactiva, siendo evidente que el aumento en el número de máquinas (manteniendo constante la impedancia de la fuente), disminuye el máximo valor de potencia que puede ser extraída de la granja de viento, haciendo que el voltaje en terminales de la granja disminuya más rápidamente. Un análisis más completo, fue efectuado a fin de establecer el punto crítico de la estabilidad de voltaje en función del número de generadores conectados (Fig 10). En particular, se encontró que para

el valor de impedancia dada en el circuito de conexión, a partir de sesenta (60) generadores, el voltaje al cual ocurre la inestabilidad de voltaje, se encuentra por debajo del ajuste típico de protección por bajo voltaje típico, y a partir de ochenta (80) generadores, el punto crítico se ubica a una potencia menor a la potencia nominal de la granja.

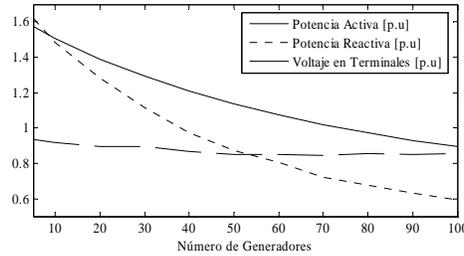


Fig 10. Lugar geométrico de potencia activa, reactiva y voltaje en Terminales que definen el punto crítico en función del número de generadores

3. Consideraciones de la Estabilidad de Voltaje

Las curvas *PV* del sistema, fueron determinadas a través de las simulaciones dinámicas de término largo (60 segundos). En $t = 0$ segundos, un escalón de potencia de 1% fue aplicado, y se efectuó la simulación en el dominio del tiempo. Los valores de los voltajes de barra y otras variables, fueron tomados a partir de estas simulaciones en forma repetidas, hasta construir la curva *PV*. En la Fig 11, se muestra que para la barra de conexión de la unidad de generación distribuida, considerando diferentes modos de control en la entrega de reactivos.

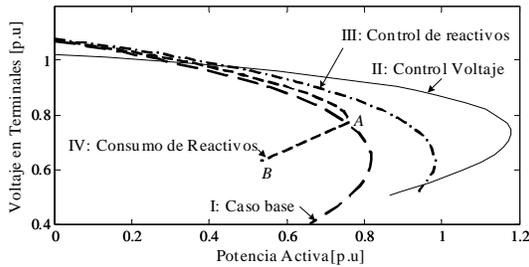


Fig 11. Curva *PV* para la Barra *E* de la Red de Prueba, varios modos de control. Nivel de Penetración 100%

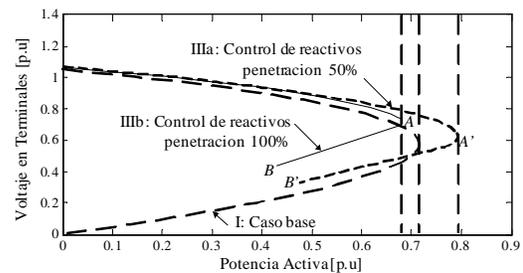


Fig 12. Curva *PV* para la Barra *E* de la Red de Prueba, empleando un generador de inducción, para varios niveles de penetración

Normalmente, se espera que la instalación de generadores cerca de las cargas, produzca un aumento en el margen de la estabilidad de voltaje. Sin embargo, el impacto en el margen, depende del intercambio de potencia reactiva entre el generador y la red, lo cual es diferente para las distintas tecnologías de generación distribuida. En la Fig 12 se puede apreciar que el empleo de las unidades de generación distribuida con capacidad de generar reactivos (II y III), aumenta el margen de la estabilidad de voltaje, independientemente del modo de control de la unidad (control de voltaje o de potencia reactiva).

En el caso de las unidades de generación distribuida que consumen reactivos, el margen de estabilidad del sistema se reduce, el punto operativo va de *A* a *B* en la curva, luego de un incremento en la carga de forma de escalón. El punto *A*, corresponde al límite de estabilidad del generador de inducción. Si

la carga se aumenta más aún, la velocidad del rotor de la máquina se incrementará monótonamente. Este hecho ocurre, debido a que la carga se incrementa y el voltaje en terminales disminuye.

4. CONCLUSIONES

- La generación distribuida afecta el nivel de voltaje del sistema, a través del punto de conexión, debido a su aplicación de potencia. Esto mejora el perfil de voltaje y el soporte en la estabilidad del mismo. Permitiendo que el sistema pueda soportar una condición de carga mayor y diferir las inversiones en sistemas de transmisión y distribución.
- La operación en un modo adecuado de la generación distribuida, puede ofrecer una excelente opción de compensación de reactivos a la red. De tal modo, si se provee la apropiada capacidad y ubicación, el soporte de voltaje y el margen del colapso de voltaje, son aumentados.
- El uso de las tecnologías basadas en los generadores sincrónicos directamente acoplados a la red, permite una muy buena controlabilidad del soporte de reactivos, lo que hace posible que la estabilidad de voltaje aumente. Aunque algunos convertidores electrónicos de potencia (en el peor de los casos), puede que no provean potencia reactiva, se debe saber que la integración de este tipo de unidades, tiene un impacto positivo en la estabilidad del voltaje. En cambio, el uso de tecnologías que consumen potencia reactiva de la red, por ejemplo generadores distribuidos, disminuyen el margen de estabilidad de voltaje e incluso, con el uso de los bancos de capacitores para la compensación local del factor de potencia, aumenta el riesgo de un colapso del voltaje en la red al integrar este tipo de un

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Zeballos y M. Vignolo. "Transmission Networks or Embedded Generation?". Proceedings International Association of Science and Technology for Development, IASTED, EUROPE 2001, Greece, June 2001
- [2] Willis, H. Lee and Scott, Walter G. Distributed Power Generation. Planning and Evaluation. Marcel Dekker Inc., 2000.
- [3] Bitrain, E. y Saavedra. "The Regulator and Enterprise Role of the State", Oscar Muñoz, "Hacia el Estado Regulador" (Towards the Regulating State), Chile, CIEPLAN, 1993.
- [4] Hunt, Sally and Shuttleworth, Graham. Competition and Choice in Electricity. John Wiley & Sons, England, 1996.
- [5] CIREN, Dispersed Generation; Preliminary Report of CIREN (International Conference on Electricity Distribution), Working Group WG04, Brussels, Belgium, June 1999.
- [6] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder. "Distributed generation: a definition". Electric Power Systems Research, (57):195–204, 2001.
- [7] "Distributed generation in liberalized electricity market", International Energy Association Publications, 2002. Full document at: <http://www.iea.org/textbase/publications/>
- [8] CIGRE Report: "Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system". CIGRE Study Committee no 37, Final Report, September 1998.
- [9] Electrical Power Research Institute web-page (January 2004): "Electricity Sector Framework For The Future, Volume I. Achieving The 21st Century Transformation" [Online], August, 2003. p. 29. Available: http://www.epri.com/corporate/esff/ESFF_volume1.pdf