

IMPACTO DE LA INMERSIÓN DE TURBINAS EÓLICAS EN LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE

Impact of wind turbines immersion in the voltage stability

RESUMEN

El fuerte crecimiento y, penetración de los sistemas de generación distribuida en los sistemas de potencia, conlleva a la necesidad de evaluar el impacto que tiene sobre la estabilidad de voltaje. En este artículo se estudia el impacto de esta inmersión o penetración de turbinas eólicas en un sistema de potencia, con respecto a la estabilidad de voltaje del mismo.

PALABRAS CLAVES: Análisis en estado estable, análisis modal, DFIG, estabilidad de voltaje, flujo de carga continuo, FSG, RBTS, turbinas eólicas.

ABSTRACT

The strong growth and penetration of distributed generation systems, in the power systems, implies the need to assess the impact on voltage stability. This paper shows what the impact that brings the immersion or penetration of wind turbines is in a power system with respect to voltage stability thereof.

KEYWORDS: Continue power flow, DFIG, FSG, modal analysis, RBTS, stability voltage, steady state analysis, wind turbines.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento y la integración de la generación eólica en los sistemas de potencia se ha desarrollado de forma rápida y continua especialmente en la última década; lo cual conlleva a que actualmente la capacidad de generación eólica instalada alrededor del mundo sea cercana a los 40GW [1], cuando hasta finales del año 1999 ésta no superaba los 17,6 GW; ejemplo de esta penetración es Alemania donde se tiene alrededor de 6GW supliendo así el 13% de su demanda para el año 2007.

Dentro del crecimiento de los sistemas eólicos, se identifica el uso de dos tipos de turbinas: Turbinas a velocidad constante (FSG por sus siglas en inglés “*fixed speed induction generator*”) y turbinas doblemente alimentadas (DFIG por sus siglas en inglés “*Double feed induction generator*”) [2].

Este fuerte crecimiento y, penetración en los sistemas de potencia, implica la preocupación y necesidad de evaluar el impacto que tiene sobre la estabilidad de voltaje.

El objetivo, de este documento es analizar el impacto en la estabilidad de voltaje de un sistema de potencia, para diferentes niveles de penetración de las turbinas eólicas. La sección 2 presenta los conceptos básicos al análisis de estabilidad de voltaje con base en el flujo de carga continuado (CPF por su sigla en inglés “*Continuation*

HUMBERTO A. FORERO

Ingeniero Eléctrico,
Ingeniero Electrónico.
Universidad de los Andes
hu-forer@uniandes.edu.co

MARIO A. RIOS

Ingeniero Eléctrico, Ph.D.
Profesor Asociado
Universidad de Los Andes
mrios@uniandes.edu.co

Power Flow”); así como, en el análisis modal del Jacobiano reducido, base del análisis desarrollado.

La sección 3 presenta la metodología empleada, desglosada por cada actividad desarrollada y comparaciones ejecutadas a lo largo de los análisis en estado estable. La sección 4, presenta el sistema base bajo estudio y su comportamiento en estado estable.

La 5ª sección, presenta resultados y simulaciones en el impacto para la estabilidad de voltaje sobre el sistema, debido a la penetración de las turbinas, por último la sección 6 entrega conclusiones de este trabajo.

2. ESTABILIDAD DE VOLTAJE

El estudio correspondiente a la estabilidad de voltaje, es de fuerte importancia en un sistema desde el diseño y posteriores análisis en la operación. Su objetivo, es determinar la capacidad del sistema, de operar adecuadamente aún tras presentarse perturbaciones tales como aumentos o disminuciones en la demanda del sistema, antes de generarse inestabilidad o colapso de voltaje [3], [4].

Se entiende por inestabilidad de voltaje, la caída incontrolada del nivel de tensión sobre cada uno de los nodos del sistema; y por colapso de voltaje una consecuencia de lo anterior. Esta última ocurre cuando la

caída del nivel de tensión, se da de forma lenta en principio y caen todos los nodos en forma brusca.

Como herramientas o metodologías implementadas para el análisis de estabilidad de voltaje en estado estable, dos técnicas se aplican: El flujo de carga continuo y el análisis modal del Jacobiano reducido.

a) FLUJO DE CARGA CONTINUADO

El CPF determina la máxima cargabilidad del sistema antes de presentarse inestabilidad de voltaje [6], [7]; para ello de forma sistemática y continua, esta herramienta realiza aumentos sobre el parámetro de carga hasta el punto de bifurcación $\lambda_{m\acute{a}xima}$, el cual es el punto de colapso. Este análisis es normalmente referido o ilustrado mediante las curvas PV, como se ilustra en la Figura 1

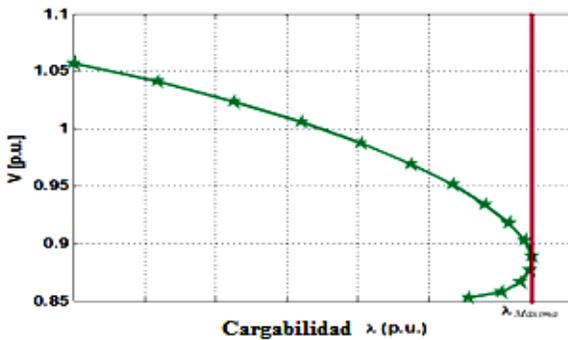


Figura 1. Curva PV propia del CPF.

b) ANALISIS MODAL

El análisis de sensibilidad VQ [6], [7], [8], representa la variación de voltaje con respecto a la variación en la demanda de potencia reactiva Q; este método, parte del análisis en estado estable a partir de un flujo de carga y tras asumir variaciones nulas en la potencia activa, relaciona las variables de estado (V, Θ) con las variables [P,Q] a partir de la matriz jacobina

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dp}{d\delta} & \frac{dp}{dv} \\ \frac{dQ}{d\delta} & \frac{dQ}{dv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta v \end{bmatrix} \Rightarrow J = \begin{bmatrix} \frac{dp}{d\delta} & \frac{dp}{dv} \\ \frac{dQ}{d\delta} & \frac{dQ}{dv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\delta} & J_{PV} \\ J_{Q\delta} & J_{QV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Así:

$$\Delta Q = [J_{Q\delta} \quad J_{QV} J_{PV}^{-1} J_{P\delta}] \Delta V \quad (2)$$

$$(J_{QV} - (J_{Q\delta} J_{PV}^{-1} J_{P\delta})) = J_R \quad (3)$$

Obteniendo la relación de sensibilidad VQ:

$$\Delta V = J^{-1}_R \Delta Q \quad (4)$$

Donde J_R se puede descomponer bajo un análisis de diagonalización matricial tal que es representada en función de los vectores propios de derecha (ε), los valores propios (λ) de dicha matriz y los vectores propios de izquierda (η).

Así, el valor propio λ de J_R , determina si la variación de voltaje con respecto a Q es estable ó por el contrario presenta inestabilidad o colapso de voltaje en el sistema de potencia de la siguiente forma:

- $\lambda_n > 0$ implica estabilidad del sistema, es decir condiciones de equilibrio estable del mismo resumido que ante una variación positiva en la demanda de Q implica un aumento también en un aumento de voltaje en los nodos.
- $\lambda_n < 0$, implica inestabilidad o colapso de voltaje en los nodos del sistema.
- Aun cuando el valor propio cumple con la condición de estabilidad $\lambda_n > 0$, hay que tener en cuenta que los nodos con valores propios más cercanos a cero son los nodos más críticos o más factibles de presentar una inestabilidad de voltaje, es decir los modos críticos son aquellos que se acercan a cero.

El factor de participación [6], [7], [8], permite determinar el grado de contribución de cada uno de los nodos del sistema en el análisis de sensibilidad, determinando los nodos o la región con mayor participación ante una inestabilidad de voltaje, para ello tras la identificación del modo o el valor propio negativo que determina la inestabilidad del sistema se procede a determinar el factor de participación de cada nodo:

$$P_n = \varepsilon_n \eta_n \quad (5)$$

3. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

El objeto de este artículo, es obtener y analizar el impacto que trae la penetración de turbinas eólicas en la estabilidad de voltaje sobre un sistema de potencia al ubicar la misma en diferentes partes del sistema, a saber: a nivel del sistema de subtransmisión (sistema anillado) y a nivel de los alimentadores de media tensión (sistema radial).

Igualmente, se evalúa el impacto que pueda tener la tecnología de las turbinas, FSG o DFIG.

La metodología de análisis de evaluación del impacto desarrolla los siguientes pasos:

- Definir el escenario de penetración (ubicación y cantidad de potencia de fuente eólica)
- Evaluar condiciones de estado estable usando flujo de carga. En cada caso se evalúa y

compara con el escenario sin generación eólica, las condiciones de pérdidas eléctricas, flujos de potencia reactiva y perfil de voltaje.

- iii. Análisis de cargabilidad del sistema con CPF
- iv. Análisis de sensibilidad QV, por medio del análisis modal del J_R .

La Tabla 1 presenta los casos o escenarios de estudio contemplados para ser considerados en un estudio de impacto de la penetración de generación eólica.

| | Ubicación parque eólico | % de penetración (Potencia Eólica Generada / Demanda) |
|---|--|---|
| 1 | Inicio cada Alimentador | 50 |
| 2 | Inicio cada Alimentador | 100 |
| 3 | Inicio cada Alimentador | 200 |
| 4 | Suplencia entre alimentadores | 50 |
| 5 | Suplencia entre alimentadores | 100 |
| 6 | S/E frontera al nivel de sub transmisión | 100 |

Tabla 1 Escenarios de penetración.

4. SISTEMA DE ESTUDIO

Como sistema de estudio se empleó el sistema RBTS (de su sigla en inglés “Roy Billinton Test System”) [9], el cual presenta un anillo de transmisión conformado por 6 nodos: 5 nodos de carga (bus 2-bus 6), 2 nodos de generación con 11 unidades convencionales y una capacidad instalada total de 240 MW, nueve líneas de transmisión (L1-L9), Figura 2.

Este sistema opera a un nivel de tensión nominal de 230 kV, y con un rango de operación adecuado en el nivel de tensión entre [0.9-1.1] p.u.

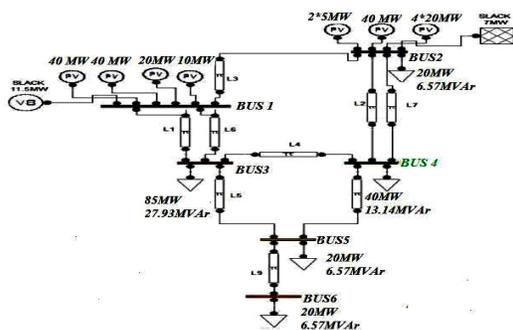


Figura 2. Sistema de transmisión bajo estudio RBTS

En el nodo 4 se conecta un sistema de subtransmisión, tal como se muestra en la Figura 3. El sistema de subtransmisión cuenta con un anillo de 3 subestaciones y a estas se conectan 7 alimentadores de media tensión, radiales.

Acorde a la Tabla 1, se estudian los escenarios de penetración en el rango de 50% a 200% de la demanda total del bus 4, la cual es 40MW. La Figura 3 ilustra igualmente las tres áreas de conexión que se emplearon, las dos primeras operaron con turbinas FSGs y el área 3 con turbinas DFIGs.

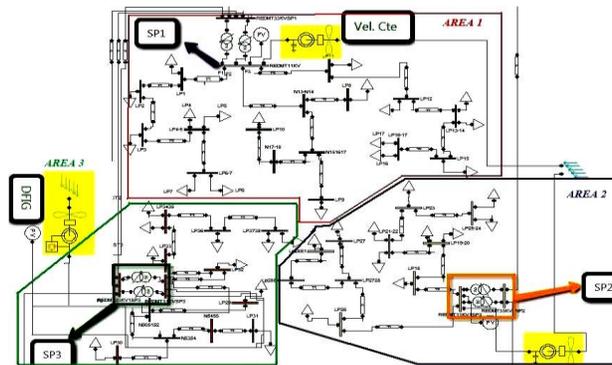


Figura 3 Sistema de Sub transmisión escenario 1.

Dada la capacidad de poder controlar el voltaje en sus terminales por parte de la turbina DFIGs, para efectos de este análisis se mantuvo el voltaje en 1 p.u., para la misma. El sistema se simuló en PSAT y los parámetros se modelaron con $S_{base} = 100MVA$, $V_{base} = 230kV$.

La Tabla 2 presenta las características generales del comportamiento del sistema en el caso de no tener la generación eólica [8], [12]. Las pérdidas de potencia activa del sistema son 12,3 MW y la generación de potencia reactiva es de 94,6 MVar. El menor voltaje en el sistema de distribución asociado el Bus 4 del sistema de transmisión es de 0,93 p.u.

| Nodos Generación | Potencia generada [MW] | Capacidad Generación [MW] | Potencia Reactiva generada [MVar] | Capacidad Generación Reactiva [MVar] |
|------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 67,3 | 55 | 73,2 | [79,5 -55,5] |
| 2 | 130 | 130 | 21,4 | [112,5- 4,5] |

Tabla 2. Resultado flujo de carga caso base.

5. RESULTADOS DE LA GENERACIÓN EÓLICA

La Figura 4 y la Figura 5, comparan los perfiles de voltajes para los 6 escenarios de estudio acorde a la ubicación y potencia inyectada por las unidades de generación eólica en el sistema.

Como era de esperar, el perfil de voltaje se ve mejorado al colocar la generación cerca de la demanda debido a la reducción de flujos de corriente por el sistema. El mejor perfil de voltaje se obtiene en el escenario 4.

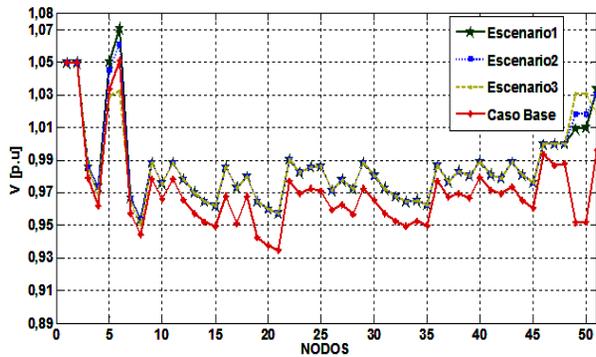


Figura 4. Perfiles de voltaje escenarios 1, 2, 3 Vs Caso base

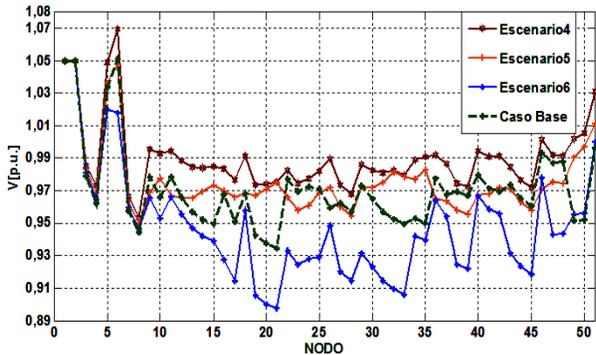


Figura 5. Perfiles de voltaje escenarios 4,5,6 Vs Caso base

La inclusión de las turbinas, implica cambios en los flujos de potencia sobre el sistema, a su vez estos cambios producen la reducción o el aumento en el suministro de reactivos por parte de los generadores del sistema de transmisión (barras 1 y 2).

La Tabla 3 muestra como la reducción en el suministro de reactivos por parte de los generadores de las barras 1 y 2, ocurre en mayor porcentaje cuando la penetración de la generación eólica es menor. En todos los escenarios se presenta una reducción en pérdidas de potencia activa en el sistema, como era de esperar.

| Escenario | Pg [MW] | Qg [MVAr] | Reducción Q [%] | Reducción Pérdidas [%] |
|-----------|---------|-----------|-----------------|------------------------|
| 1 | 194,8 | 86,1 | 9,0 | 20,3 |
| 2 | 194,5 | 89,5 | 5,4 | 22,8 |
| 3 | 195,2 | 94,7 | -0,1 | 17,1 |
| 4 | 194,9 | 86,7 | 8,4 | 19,5 |
| 5 | 196,5 | 93,8 | 0,8 | 6,5 |
| 6 | 195,4 | 99,7 | -5,4 | 15,4 |

Tabla 3. Impacto en pérdidas y reactivos generados - escenarios con generación eólica Vs caso base.

a) ESTABILIDAD DE VOLTAJE

La Figura 6 compara las curvas de cargabilidad del sistema con base en el cálculo del CPF. En todos los escenarios es evidente el aumento de la cargabilidad máxima, dándole mayor robustez al sistema en cuanto a potenciales problemas de estabilidad de voltaje.

La Tabla 4 compara el parámetro de cargabilidad máxima; así como la cargabilidad a la cual se alcanza el voltaje de 0,9 p.u. (V_{min}) considerado como límite inferior en la operación del sistema bajo perturbaciones. Es importante observar que estos dos parámetros de cargabilidad presentan resultados contrapuestos en cuanto a cual es el mejor escenario, cuando se comparan los escenarios 4 a 6. Por ejemplo, el 4 escenario presenta una mayor cargabilidad que los escenarios 5 y 6 para conservar un perfil de voltaje superior a 0,9 p.u. mientras que los escenarios 5 y 6 presentan una mayor cargabilidad; estos resultados se ven reflejados en la ubicación de la nariz de la curva.

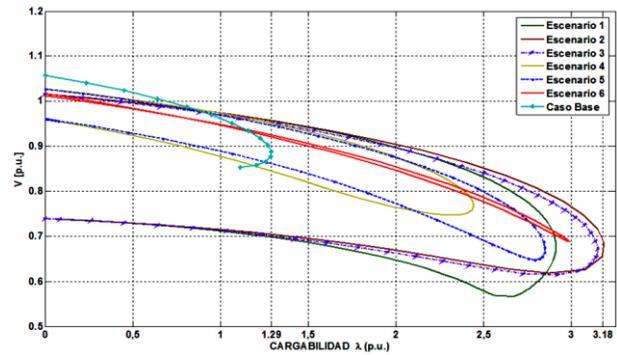


Figura 6. Curvas PV escenarios de estudio Vs Caso Base.

| Escenario | λ_{Maxima} | $\lambda_{V=0,9 p.u.}$ |
|-----------|--------------------|------------------------|
| Caso Base | 1,3 | 1,3 |
| 1 | 2,9 | 1,97 |
| 2 | 3,2 | 2,04 |
| 3 | 3,1 | 1,95 |
| 4 | 2,4 | 1,81 |
| 5 | 2,8 | 1,77 |
| 6 | 2,9 | 1,56 |

Tabla 4. Cargabilidad escenarios resultado CPF.

La Tabla 5 presenta los resultados del análisis modal o de sensibilidad QV del sistema. En ésta, se evidencia la variación en el mínimo modo o mínima sensibilidad QV para cada uno de los seis escenarios.

Los escenarios con el mejor perfil de voltaje presentan un corrimiento hacia la derecha del valor propio del modo, reflejando una mejor sensibilidad QV del sistema. De igual forma, el factor de participación de los nodos del sistema refleja un cambio del área o de zona más sensible a una inestabilidad de voltaje.

| Escenario | Mínimo λ | Modo | Zona Asociada |
|-----------|------------------|------|---------------|
| Caso Base | 0,024 | 26 | Área 2 |
| 1 | 0,031 | 31 | Área 3 |
| 2 | 0,029 | 31 | Área 1 |
| 3 | 0,027 | 31 | Área 2 |
| 4 | 0,027 | 42 | Área 3 |
| 5 | 0,024 | 42 | Área 1 |
| 6 | 0,025 | 42 | Área 2 |

Tabla 5. Modos asociados a la inestabilidad de voltaje

6. CONCLUSIONES

La ubicación de un conjunto de generadores eólicos en un sistema de sub transmisión, presenta variaciones o impactos tanto en estado estable como en la robustez del sistema ante perturbaciones que afecten la estabilidad de voltaje. Igualmente, se tiene un impacto diferente de acuerdo al grado de penetración de la generación eólica.

Así, la penetración de la generación eólica repercute no solo en los perfiles de voltaje sobre los nodos del sistema, las pérdidas en la red, sino que además la variación en los flujos de potencia repercute en reducción o aumento de suministro de reactivos por parte de las máquinas convencionales.

7. REFERENCIAS

- [1] F. Wu, X.. Zhang, and P. Ju, " Modeling and control of wind turbine with doubly fed induction generator," *IEEE Power Systems Conference and Exposition*, 1404-1409, Oct 2006.
- [2] Vittal. E.; Keane. A.; O'Malley. M.; , "Varying penetration ratios of wind turbine technologies for voltage and frequency stability," *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE* , Vol., no., pp.1-6, July 2008.
- [3] P. Kundur, J. Paserba and S. Vitet " Overview on definition and classification of power system stability," *Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 2003. CIGRE/PES 2003. CIGRE/IEEE PES International Symposium*, pp 1-4, Oct 2003.
- [4] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Cutsem, and V. Vittal, " Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.19, no.3, pp. 1387- 1401, Aug. 2004.
- [5] M. Rios, C. Zapata and O. Gómez, " Medidas para mitigar problemas de estabilidad de voltaje" *Scientia et Technica* Año XIV, No 39, pp 1-6, Sept. 2008.
- [6] J. Machowski, J. Bialek and J. Bumby, *Power systems dynamics:Stability and control*, 2nd ed., New York: Wiley, 2008
- [7] V. Ajjarapuand, *Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control*, 1st ed., New York: Springer, 2006.
- [8] M. Rios, C. Zapata, O. Gómez and J Sánchez " *Voltage Stability assessment with Ranking of Contingencies using QV sensibility*" *IEEE Latin America Transactions*, vol. 7, pp 665-672, Dec 2009.
- [9] R. Billinton, S. Kumar, N. Choudhury, K. Chu, K. Debnat, L. Goel, E. Khan, P. Kos, G. Nourbakhsh, J. and Oteng-Adjei, " A reliability test system for educational purposes basic data," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 4, pp. 1238-1244, Aug. 1989.
- [10] R. N. Allan; R. Billinton; I. Sjarief; L. Goel and K.S.So " A reliability test system for educational purposes- basic distribution system data and results," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 6, pp. 813-820, May. 1991.
- [11] H. Falaghi, M. Haghifam and C. Singh, "Ant colony optimization-based method for placement of sectionalizing switches in distribution networks using a fuzzy multiobjective approach," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 24, pp 268-276, Jan. 2009.
- [12]P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power system control and stability*, 2nd ed., New York: Wiley, 2003, Apx. D.
- [13] Parizad. A.; Khazali. A.; Kalantar. M.; "Optimal placement of distributed generation with sensitivity factors considering voltage stability and losses indices," *Electrical Engineering (ICEE), 2010 18th Iranian Conference on* ,Vol., no., pp.848-855, May 2010.
- [14] K. Yang, A. Garba, C. Tan and K.. Lo, "The Impact of the Wind Generation on Reactive Power Requirement and Voltage Profile.," *IEEE Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp 866-871, Apr. 2008.
- [15]J. Machowski, J. Bialek and J. Bumby, *Power systems dynamics:Stability and control*, 2nd ed., New York: Wiley, 2008.