

MEDIDAS PARA MITIGAR PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

Counter-measures to mitigate voltage instability problems

RESUMEN

Actualmente existe una gran cantidad de información sobre estabilidad de voltaje en sistemas de potencia, la mayor parte de la cual trata sobre las metodologías para detectar las condiciones operativas que pueden llevar a problemas de inestabilidad y colapso. Sin embargo, un asunto de gran interés para quienes planean y operan los sistemas de potencia son las medidas que se pueden aplicar para mitigar estos problemas. Así, en este artículo se presenta un inventario de estas medidas, su descripción, taxonomía y áreas actuales de investigación y desarrollo.

PALABRAS CLAVES: Estabilidad de voltaje, planeamiento de sistemas de potencia, seguridad de sistemas de potencia.

ABSTRACT

Currently there is a lot of information about power system voltage stability, most of which deal with the methodologies for the detection of the operating conditions that could lead to problems of instability and collapse. However, a subject of great interest for power system planners and operators is the counter-measures that can be applied to mitigate these problems. Thus, this paper presents an inventory of these counter-measures, their description, taxonomy and current research and development areas.

KEYWORDS: Voltage stability, power system planning, power system security.

1. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de voltaje está directamente relacionada con el balance de energía reactiva en el sistema de potencia; cuando existe déficit de reactivos se produce una disminución en la magnitud del voltaje la cual acciona los sistemas de control para restaurarla a un valor normal de operación. Si el déficit de reactivos persiste, el decremento en la magnitud del voltaje continúa hasta violar los límites de operación del sistema lo cual acciona los sistemas de protección provocando la salida en cascada de componentes del sistema, lo cual, agrava aún más el déficit y puede llevar al colapso del sistema.

Se dice que un sistema experimenta inestabilidad de voltaje cuando presenta una caída continua e incontrolable en la magnitud del voltaje. La inestabilidad de voltaje no conduce necesariamente al colapso de voltaje. El colapso de voltaje es uno de los problemas de inestabilidad de voltaje y se caracteriza por una disminución inicial lenta en la magnitud de voltaje y una caída brusca final. Este proceso se extiende en períodos de segundos hasta unas pocas horas. Ver el ejemplo de la Figura 1.

Los problemas de estabilidad de voltaje se presentan en sistemas que no cuentan con reserva para atender temporalmente demandas excepcionales de energía. Este es el caso de los sistemas que operan cerca a sus límites de capacidad o aquellos en los cuales existe importación de energía a grandes distancias o desde otros sistemas.

MARIO A. RIOS

Ingeniero Eléctrico, Ph.D.
Profesor Asociado
Universidad de los Andes
mrrios@uniandes.edu.co

CARLOS J. ZAPATA

Ingeniero Electricista, Ph.D (C)
Profesor Asociado
Universidad Tecnológica de Pereira
cjzapata@utp.edu.co

OSCAR GÓMEZ

Ingeniero Electricista, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad tecnológica de Pereira
jr@utp.edu.co

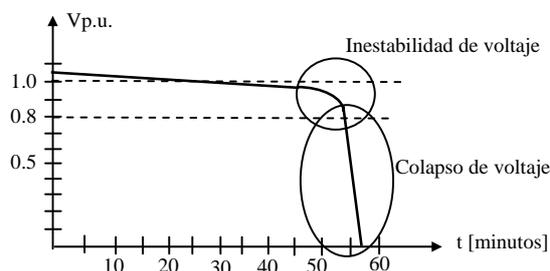


Figura 1 Fenómeno de inestabilidad y colapso de voltaje

Aunque se reportan casos de colapso de voltaje desde los años setentas, durante esa década y la siguiente no se consideró de mayor importancia este tipo de problema y los estudios de los sistemas de potencia se centraron en la estabilidad angular transitoria y de pequeña señal; solo es a partir de la década de los noventas, cuando se empiezan a reportar con más frecuencia problemas de estabilidad de voltaje en todo el mundo, que se inicia una intensa búsqueda de métodos para determinar su presencia y conocer la forma en que se desarrolla [1]. Actualmente existe una gran cantidad de información sobre estabilidad de voltaje en sistemas de potencia, la mayor parte de la cual trata sobre las metodologías para detectar las condiciones operativas que pueden llevar a problemas de inestabilidad y colapso. Sin embargo, un asunto de gran interés para quienes planean y operan los sistemas de potencia son las medidas que se pueden aplicar para mitigar estos problemas. Este es el tema de este artículo.

2. DEFINICIONES

En el año 2004, un grupo de trabajo conjunto entre IEEE y CIGRE presentó definiciones y clasificaciones de los diferentes tipos de estabilidad de los sistemas de potencia [2]. Allí se define la estabilidad de voltaje como: “La habilidad del sistema para mantener voltajes estables en todas las barras después de ser sujeto a una perturbación”. Sobre la inestabilidad de voltaje se dice en esta misma referencia: “La inestabilidad que pudiese resultar (como resultado de una perturbación) ocurre en la forma de una progresiva caída o elevación de voltaje en algunas barras. Un posible resultado de la inestabilidad de voltaje es la pérdida de carga en una zona o el disparo de líneas de transmisión u otros elementos, lo cual puede llevar a salidas en cascada”.

Una definición más detallada para la inestabilidad de voltaje se presenta en un reporte realizado en 1990 por un grupo de trabajo de IEEE [3]: “Un sistema entra a un estado de inestabilidad de voltaje cuando una perturbación, incremento en la carga ó cambio en el sistema, causa que el voltaje caiga rápidamente ó sea llevado hacia abajo, y los operadores y sistemas de control fallan para detener la caída. La caída del voltaje podría tomar unos pocos segundos ó 10 a 20 minutos. Si el descenso en el voltaje continúa, ocurrirá inestabilidad angular de estado estable ó colapso de voltaje”. De otra parte, H. K. Clark definió en 1991 la inestabilidad de voltaje como el evento donde [4]: “Los voltajes caen del valor normal a 90% o menos durante un período de varios minutos, con los operadores inhabilitados para detener esta caída”.

El colapso de voltaje se definió en [2] como: “El proceso por el cual la secuencia de eventos que acompaña a la inestabilidad de voltaje conduce a un apagón o voltajes anormalmente bajos en una significativa parte del sistema”. La anterior definición es la misma presentada en 1990 en [3]. Por su parte, Clark define el colapso de voltaje como el evento donde [4]: “Los voltajes alcanzan alrededor de 85% y un motor se bloquea, llevando el voltaje más abajo y se inicia un bloqueo en cascada de otros motores”.

Para la seguridad de voltaje, no se presenta en [2] una definición específica. Solo se define la seguridad de un sistema de potencia como: “El grado de riesgo en la habilidad para sobrevivir perturbaciones inminentes sin interrupción del servicio a los usuarios”. Sin embargo, una definición específica para seguridad de voltaje se encuentra en [3]: “Es la habilidad del sistema, no únicamente para operar estable, sino también para permanecer estable después de cualquier contingencia razonablemente creíble o un cambio adverso en el sistema”. Esta última definición aplica, claro esta, dentro del contexto de inestabilidad de voltaje definido por dicha referencia.

3. TAXONOMÍA

Una primera taxonomía de las medidas para mitigar los problemas de estabilidad de voltaje se encuentra en el reporte de un grupo de trabajo de IEEE del año 1993 [5]. Dicha taxonomía incluye las siguientes categorías: *i.* Soluciones operativas, *ii.* Modificaciones al sistema y *iii.* Deslaste de carga por voltaje.

Aunque en [5] se utiliza el término “solución” para estas categorías, en este artículo se reemplaza dicho término por “medida de mitigamiento”, dado que es difícil asegurar en sentido general que dichas medidas siempre sean soluciones. En este documento, la segunda categoría de [5] se divide en expansión del sistema y compensación reactiva controlada y se añaden tres categorías más. Así, la taxonomía aquí propuesta comprende las siguientes categorías:

1. Medidas operativas.
2. Expansión del sistema.
3. Compensación reactiva controlada.
4. Bloqueo de los cambiadores de taps bajo carga.
5. Sistemas de medida de área amplia.
6. Sistemas de protección de área amplia.
7. Partición del sistema en islas o subsistemas.

La Figura 2 presenta un esquema de la taxonomía propuesta. Cada una de las categorías se describe a continuación.

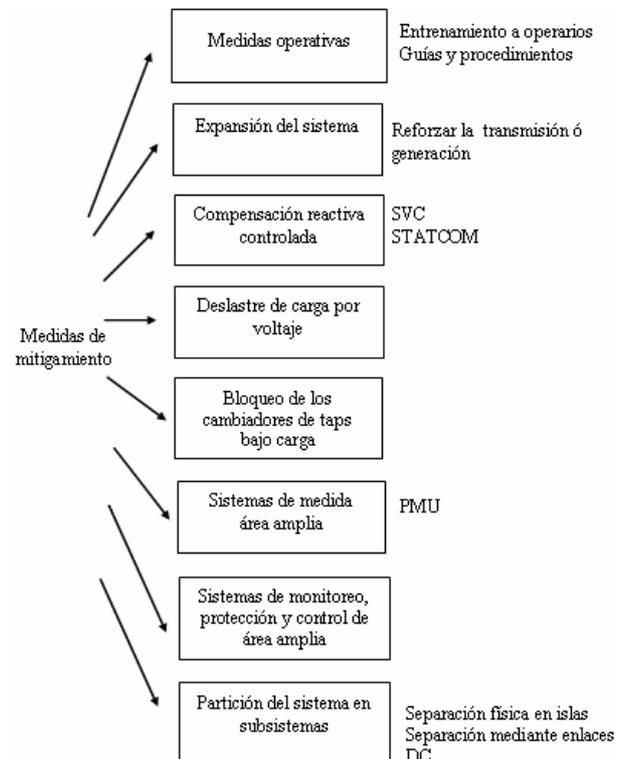


Figura 2 Medidas para mitigar los problemas de estabilidad de voltaje.

4. MEDIDAS OPERATIVAS

Se refiere al entrenamiento que se debe ofrecer a los operadores del sistema para reconocer los problemas de inestabilidad de voltaje y aplicar medidas como:

1. Deslastre manual de carga.
2. Suspender la operación automática de los cambiadores de taps bajo carga.
3. Reducir el voltaje a las cargas para disminuir la demanda
4. Operar manualmente las fuentes de reactivos: desconectar reactores, conectar bancos de condensadores.
5. Estrategias de despacho de los generadores: Arranque de unidades rápidas, limitación de la corriente de armadura, etc.

También se refiere a establecer guías y procedimientos para operar en eventos de inestabilidad de voltaje y para coordinar la operación entre operadores de diferentes centros de control.

Esta medida preventiva es muy importante, pues entre las lecciones que dejó el incidente del 4 de noviembre de 2006, que casi lleva a toda la Europa continental a un apagón, se mencionan [6]:

1. La inapropiada estimación por parte de los operadores de los centros de control de la situación conducente a la violación de las reglas de seguridad operativa.
2. La debilidad de los procedimientos de coordinación entre los operadores de los centros de control de distintos sistemas.
3. Las malas decisiones de los operadores en situaciones críticas.
4. La falta de conocimiento por parte de los operadores de los centros de control en cuanto a lo que sucede más allá de las fronteras de su sistema.

Estas dos últimas causas también se menciona como parte del apagón de Agosto 14 de 2003 en los Estados Unidos y Canadá [7].

En un examen presentado en el año 2006 por Veloza y Céspedes [8]-[9] sobre las causas de los más recientes apagones también se enfatiza sobre la importancia de implementar programas de entrenamiento y certificación de los operadores de centros de control.

De otra parte, la aplicación de medidas como el cambio en el despacho de generadores [10]-[11] y deslastre de carga no puede dejarse a la intuición y experiencia de los operadores del sistema y deben implementarse mediante controles automáticos pues el determinar la estrategia óptima (cantidad de despacho o deslastre, generadores y puntos de carga donde se aplica la medida) requiere estudios detallados del sistema.

Otra razón que justifica el implementar controles automáticos para la implementación de estas medidas es el poco tiempo que pueden tener los operadores para en la operación en tiempo real detectar las condiciones de inestabilidad y determinar una estrategia óptima de re-despacho o deslastre. Aunque en [8] se menciona que en

la serie de apagones analizados, los tiempos de reacción de un operador fueron de 30 minutos a 4 horas, no siempre este tiempo se ubicará cerca al límite superior. De otra parte, [12] aclara que la compensación reactiva debe ser aplicada rápidamente para que tenga efecto y que deslastre de carga tiene inercia de algunos minutos.

5. EXPANSIÓN DEL SISTEMA

La adición de componentes de transmisión y generación es una de las formas más efectivas de mitigar los problemas de estabilidad de voltaje. Sin embargo, las restricciones ambientales y económicas limitan la aplicación de este tipo de medida preventiva. De hecho, son estas limitaciones las causantes de que haya poca expansión en generación y transmisión, lo cual ha llevado a la falta de reserva actual en los sistemas de potencia, que a su vez, ha traído problemas de estabilidad de voltaje.

La expansión en transmisión y generación se obtiene de estudios de planeamiento de largo plazo donde se identifica la localización de componentes requeridos y su capacidad. Para este planeamiento, CIGRE recomienda aplicar el criterio de pérdida de componentes $n-2$ [13].

6. COMPENSACIÓN REACTIVA CONTROLADA

Otra medida para mitigar los problemas de estabilidad de voltaje es la adición de fuentes de reactivos controladas las cuales hacen parte de la familia de dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*). Para los problemas de estabilidad de voltaje, se aplican los siguientes dispositivos [14]:

1. Los SVC (*Static Var Compensation*): Condensadores y reactores para conexión paralelo los cuales son controlados con dispositivos electrónicos (estáticos)
2. Los STATCOM (*Static Compensation*): Dispositivos para conexión en paralelo los cuales actúan como una fuente de corriente de reactivos constante.

Este tipo de dispositivos se utilizan porque las compensaciones capacitivas de tipo fijo pierden su capacidad de producir reactivos ante la disminución del voltaje de barra al cual están conectados y porque las compensaciones capacitivas dinámicas, como los condensadores sincrónicos, son muy costosas de operar. Sobre esta medida de mitigamiento hay mucha literatura, la mayoría enfocada al modelamiento de este tipo de dispositivos, a su localización óptima y al desarrollo de los algoritmos para controlar la compensación en forma dinámica de acuerdo con las condiciones operativas del sistema [15]- [16].

7. DESLASTRE DE CARGA POR VOLTAJE

Así como los problemas de estabilidad angular llevaron a la implementación del deslastre de carga por frecuencia, una medida obvia para los problemas de estabilidad de voltaje es el deslastre de carga por voltaje. La intención es que cuando haya bajo voltaje en una parte del sistema, se desconecte carga para ayudar a que el voltaje se recupere y el problema de bajo voltaje no empeore o se

extienda a una zona mayor. Al respecto, hay mucha literatura publicada, la cual se puede clasificar en los siguientes aspectos:

1. La localización de los relés de deslastre por voltaje [16]
2. Los algoritmos para deslastre [17]-[19].
3. El esquema del sistema de deslastre. Se refiere a si los relés distribuidos en el sistema actúan independientemente o un sistema centralizado de medida les envía la orden de deslastre [20].

Sobre estos tres aspectos se centra la investigación que se desarrolla actualmente sobre esta medida de mitigamiento.

8. BLOQUEO DE LOS CAMBIADORES DE TAPS

Cuando el voltaje disminuye, los cambiadores de taps bajo carga actúan para recuperar el voltaje, lo cual aumenta la demanda de reactivos y empeora el problema de inestabilidad de voltaje. Esta fue una de las primeras causas conducentes a problemas de estabilidad de voltaje que fueron identificadas [21]. Así, se ha encontrado que bajo condiciones de inestabilidad de voltaje estos dispositivos deben ser desconectados. Para esto, el sistema se divide en zonas donde se monitorea el voltaje y se implementa un dispositivo de control que bloquea la acción de los cambiadores de taps bajo carga cuando se detecta una disminución en el voltaje de la zona.

La investigación sobre este tipo de medida de mitigamiento se concentra actualmente en determinar las zonas de aplicación de medida y los algoritmos de control [22]-[23]. Se reporta la existencia de uno de estos sistemas en Francia desde el año 1993 [24].

9. SISTEMAS DE MEDIDA DE ÁREA AMPLIA

La disponibilidad de unidades de medida fasorial (PMUS: *Phase Measurement Units*) [25]-[29], que proveen en tiempo real medidas de alta precisión y sincronizadas desde varios puntos del sistema permite implementar algoritmos de detección de los problemas de inestabilidad de voltaje y proximidad al colapso directamente de las medidas y en forma on-line. El sistema completo de unidades de medida fasorial se denomina sistema de medida o sistema de monitoreo de área amplia. La tecnología de estas unidades se desarrolló a finales de los años 80 y los primeros productos aparecieron en principios de los años 90 [27]-[28]. Las ventajas de las medidas sincronizadas y de alta precisión van más allá del simple monitoreo y control pues permiten conformar sistemas más avanzados para el monitoreo, control y protección de los sistemas de potencia. En la Ref. [28] se da crédito a Arun G. Phadke como el visionario que a principio de los años 80 vislumbró las aplicaciones de medidas sincronizadas en tiempo real y sus grandes ventajas para la operación de los sistemas de potencia. La Ref. [27] presenta una detallada descripción de 11 áreas donde este tipo de tecnología brinda ventajas y donde existe la integración

con sistemas de protección y control.

La investigación sobre este tipo de medida de mitigamiento se centra en los algoritmos de identificación a partir de las medidas de las condiciones de estabilidad y de proximidad al colapso de voltaje [30]-[38]. En la parte de desarrollo el trabajo se centra en la confiabilidad del hardware y en la velocidad de procesamiento y transmisión de datos.

10. SISTEMAS DE MONITOREO, PROTECCIÓN Y CONTROL DE ÁREA AMPLIA

Los sistemas WAMPAC (*Wide Area Monitoring, Protection and Control*) [39]-[47] surgen de integrar el control y las protecciones de un sistema para optimizar las estrategias de mitigamiento de los problemas de estabilidad de voltaje. Estos sistemas integran el control y protección de las fuentes de reactivos, el deslastre de carga por voltaje, el bloqueo de cambiadores de taps bajo carga y la información de los sistemas SCADA y de las unidades de medida fasorial.

Las acciones que toma el sistema WAMPAC son: desconexión de reactores, manejo de las fuentes de reactivos, arranque de unidades de generación, deslastre de carga, bloqueo de cambiadores de taps, etc.

Actualmente existe gran investigación sobre esta medida de mitigamiento, especialmente en estudios para definir las zonas de control. El desarrollo se centra en los aspectos de hardware que den confiabilidad y velocidad a estos sistemas para soportar la operación en tiempo real. Se reporta la existencia de estos sistemas en USA, Canadá, Brasil, Suecia y China.

11. PARTICIÓN DEL SISTEMA

Otra medida preventiva ampliamente recomendada en la literatura técnica es el dividir los grandes sistemas de potencia en subsistemas mediante una de las siguientes formas:

1. Separar el sistema en varios subsistemas que se interconectan mediante enlaces DC. Así, se pretende aislar los subsistemas resultantes en cada isla de los problemas de estabilidad que se propagan en los sistemas con interconexiones AC [48]-[49].

2. Dividir físicamente el sistema en islas o subsistemas que operan en forma independiente [50].

La Ref. [50] reporta la existencia de un sistema del segundo tipo en Rusia el cual crea islas ante situaciones de inestabilidad. La investigación y desarrollo sobre este tipo de medida de mitigamiento se centra en:

1. La tecnología de los equipos terminales de interconexión como los "*Voltage Sourced Converters*" y los sistemas de transmisión DC [49], para la división del sistema en islas interconectadas mediante enlaces DC.

2. Los algoritmos para detectar las condiciones de inestabilidad que lleven a la necesidad de hacer la división del sistema en islas y en los algoritmos para determinar la mejor partición del sistema.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Existen varias medidas para mitigar los problemas de estabilidad de voltaje. Estas abarcan desde las estrategias operativas que deben aplicar los operadores de los centros de control, el deslastre de carga por voltaje, el bloqueo de los cambiadores de taps bajo carga, hasta la implementación de sistemas WAMPAC que integran los dos anteriores dispositivos con los sistemas de medida con PMUS. En un mayor nivel de inversión se tiene la adición de fuentes de reactivos controladas y dispositivos FACTS y, más aún, la puesta en servicio de nuevos componentes de transmisión y generación. Sin embargo, esto último es lo menos atractivo pues las restricciones ambientales y económicas han limitado la implementación de este tipo de medidas, lo cual ha provocado que aparezcan los problemas de estabilidad de voltaje. En un extremo, más radical aparece como medida de mitigamiento la división del sistema en subsistemas o islas sean mediante interconexiones DC o separados físicamente durante los eventos de inestabilidad.

Las grandes áreas de investigación y desarrollo sobre el deslastre y bloqueo de cambiadores de taps se centran en el desarrollo de algoritmos para determinar la localización óptima de estos dispositivos, algoritmos para controlar su operación y estudios para determinar las zonas de control. En cuanto a los sistemas WAMPAC, se centran en los algoritmos de control para detectar las condiciones de inestabilidad y aplicar otras medidas de mitigamiento como re-despacho, deslastre, etc. Respecto a la división de sistema en islas, la investigación y desarrollo se centra en los dispositivos DC o en los algoritmos que permitan determinar cuando hacer separación física del sistema y cuáles serían las islas a crear. En cuanto a hardware, la investigación y desarrollo sobre los dispositivos que permiten implementar estas medidas de mitigamiento se centra en los aspectos de confiabilidad y velocidad de tal manera que estos dispositivos realmente puedan apoyar la operación en tiempo real. Sin embargo, varias referencias enfatizan la importancia del entrenamiento que deben tener los operarios de los centros de control para determinar las condiciones de inestabilidad de voltaje no sólo de su sistema sino también de los vecinos. Esto es de trascendental importancia, pues sin importar el nivel de sofisticación disponible para la operación de un sistema, el recurso humano es la base de su operación, y hasta el momento no hay tecnología que haya podido desplazar la inteligencia humana.

13. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación otorgada al proyecto de investigación "Proyección Operativa de Seguridad de Voltaje" por parte de COLCIENCIAS y XM S.A. E.S.P. provenientes del Convenio Interadministrativo de Cooperación Técnicas No. 055-SENA y 030-2005 COLCIENCIAS.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C.J. Zapata, "Colapsos de voltaje en sistemas de potencia", Curso Técnico sobre Tópicos de la Desregularización del Sector Eléctrico, ACIEM, 1996
- [2] IEEE/CIGRE Task Force, "Definition and classification of power system stability", *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 19, No. 2, 2004.
- [3] IEEE, "Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools and Industry Experience", IEEE Publication 90TH0358-2-PWR, 1990.
- [4] Clark H. K, "The Voltage Collapse Phenomenon", Minnesota Power Systems Conference, October 1-3, 1991.
- [5] IEEE, "System Protection and Voltage Stability", documento 93TH0 596-7 PWR, 1993.
- [6] Merlin A, Desbrosses J. P, "European incident of 4th November 2006 – The events and the first lessons drawn". *Electra*, No. 230, Febrero de 2007.
- [7] Andersson G, Donalek P, Farmer R, "Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe", *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 20, No. 4, 2005.
- [8] O.P. Veloza, R.H. Cespedes, "Regulatory mechanisms to mitigate the vulnerability of power systems to blackouts", *Transmission and Distribution Latinamerica Conference, IEEE*, 2006.
- [9] O.P. Veloza, R.H. Cespedes, "Vulnerability of the Colombian electric system to blackouts and possible remedial actions", *Transmission and Distribution LatinAmerica Conference, IEEE*, 2006.
- [10] S.G. Johansson, "Mitigation of voltage collapse by armature current protection", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, No. 2, 1999.
- [11] Z. Feng, V. Ajjarapu, D.J. Maratukulam, "A comprehensive approach for preventive and corrective control to mitigate voltage collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, No. 2, 2000.
- [12] L.S. Vargas, C.A. Cañizares, "Time dependence of controls to avoid voltage collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 4, 2000.
- [13] CIGRE, Planning Against Voltage Collapse, SC 38-01 TF 03, 1986.
- [14] C.A. Cañizares, Z.T. Faur, "Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, 1999.
- [15] El Arabi E. E, Yorino N, Sasaki H, "A comprehensive approach for FACTS devices optimal allocation to mitigate voltage collapse", *Transmission and Distribution Asia Pacific Conference, IEEE*, 2002.
- [16] S.A. Nirenberg, D.A. McInnis, K.D. Sparks, "Fast acting load shedding", *Power Industry Computer Application Conference, IEEE*, 1991.
- [17] Z. Feng, V. Ajjarapu, D.J. Maratukulam, "A practical minimum load shedding strategy to

- mitigate voltage collapse”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 4, 1998.
- [18] A.A. Sallam, A.M. Khafaga, “Artificial neural network application to alleviate voltage stability problem”, *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, IEEE*, 2002.
- [19] M. Klaric, I. Kuzle, S. Tesnjak, “Undervoltage load shedding using global voltage collapse index”, *IEEE Conference*, 2004.
- [20] C.J. Mozina, “Undervoltage load shedding”, *58 Conference for Protective Relaying Engineers, IEEE*, 2007.
- [21] C. Liu, K.T. Vu, “Analysis of tap changer dynamics and construction of voltage stability regions”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 36, Abril, 1989.
- [22] C.D. Vournas, “Emergency tap-blocking to prevent voltage collapse”, *Porto Power Tech, IEEE*, 2001.
- [23] Y. Schlumberger, C. Lebrevelec, M. Pasquale, “Power systems security analysis – New approaches used at EDF”, *IEEE Summer Power Meeting*, 1999.
- [24] F. Bourgin, G. Testud, B. Heilbron, J. Verseille, “Present practices and trends on the French power system to prevent voltage collapse”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, 1993.
- [25] B. Bhargava, G. Rodríguez, “Monitoring the power grid”, *T&D World*, Diciembre 2004.
- [26] K.E. Martin, “Phasor measurement systems in the WECC”, *IEEE Summer Power Meeting*, 2006.
- [27] D. Novosel, V. Madani, B. Bhargava, K. Vu, J. Cole, “Dawn of the grid synchronization”, *IEEE Power and Energy Magazine*, Enero 2008.
- [28] A.G. Phadke, “Synchronized phasor measurements in power systems”, *IEEE Computer Applications in Power*, Abril, 1993.
- [29] IEEE Working Group, “Synchronized sampling and phasor measurements for relaying and control”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Enero, 1994.
- [30] Gubina F, Strmcnik B, “Voltage collapse proximity index determination using voltage phasors approach”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10 No. 2, Mayo de 1994.
- [31] Verbic G, Gubina F, “A new concept of protection against voltage collapse based on local phasors”, *IEEE Conference*, 2000.
- [32] Verbic G, Gubina F, “A novel concept for voltage collapse protection based on local phasors”, *IEEE Conference*, 2002.
- [33] Verbic G, Gubina F, “Fast algorithm for voltage collapse protection based on local phasors”, *IEEE Conference*, 2002.
- [34] Verbic G, Gubina F, “Countermeasures against voltage collapse based on apparent-power losses and local phasors”, *IEEE Eurocon*, 2003.
- [35] Verbic G, Gubina F, “A new concept of voltage-collapse protection based on local phasors”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 2, Abril de 2004.
- [36] Vu K, Begovic M, Novosel D, Saha M. M, “Use of local measurements to estimate voltage-stability margin”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Agosto, 1999.
- [37] Smon I, Verbic G, Gubina F, “Local voltage-stability index using Tellegen’s theorem”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Agosto, 2006.
- [38] Milosevic B, Begovic M, “Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Febrero, 2003.
- [39] D. Atanackovic, J.H. Clapauch, G. Dwernychuck, J. Gurney, H. Lee, “First steps to wide area control”, *IEEE Power and Energy Magazine*, Enero 2008.
- [40] X. Xie, Y. Xin, J. Xiao, J. Wu, Y. Han, “WAMS applications in Chinese power systems”, *IEEE Power and Energy Magazine*, Enero 2006.
- [41] B. Milosevic, M. Begovic, “Voltage stability protection and control using a wide area network of phasor measurements”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, 2003.
- [42] B. Ingelsson, P. Lindsrom, D. Karlsson, G. Runvik, J. Sjodin, “Wide area protection against Voltage collapse”, *IEEE Computer Applications in Power*, Octubre 1997.
- [43] A. Guzman, D.A. Tziouvaras, E.O. Schweitzer, K. Martin, “Local and wide area network protection systems to improve power system reliability”, *Power Systems Conference*, 2006.
- [44] C.W. Taylor, “The future in on-line security assessment and wide area stability control”, *IEEE*, 2000.
- [45] J.S. Thorp, A.G. Phadke, S.H. Horowitz, M.M. Begovic, “Some applications of phasor measurements to adaptive protection”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Mayo, 1988.
- [46] M. Begovic, D. Novosel, “On wide area protection”, *IEEE Conference*, 2007.
- [47] M.G. Adamiak, A.P. Apostolov, M.M. Begovic, C.F. Henville, K.E. Martin, G.L. Michel, A.G. Phadke, J.S. Thorp, “Wide area protection – Technology and infrastructures”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Abril, 2006.
- [48] G.C. Loehr, “Is it time to cut the ties that bind?”, *Transmission and Distribution World*, Marzo, 2004.
- [49] H. Clark, A. Edris, M. El-Gasseir, K. Epp, A. Isaacs, D. Woodford, “Softening the blow of disturbances”, *IEEE Power and Energy Magazine*, Enero 2008.
- [50] Y. Marakov, V.I. Reshetov, V.A. Stroeve, N.I. Voropa, “Blackout prevention in the United States, Europe and Russia”, *Proceedings of the IEEE*, vol 93, no. 11, Noviembre 2005.