



Reconfiguración de la red de 33 kV para pérdidas mínimas con generación distribuida en Villa Clara

Maily Medel
Leonardo Casas

Recibido: Octubre del 2007
Aprobado: Diciembre del 2007

Resumen / Abstract

Reconfiguración de circuitos, automatización de la distribución y generación distribuida han sido integrados en el análisis de la red de 33 kV de la provincia de Villa Clara con el objetivo de encontrar las opciones más adecuadas para operar dicha red, y su alimentación compuesta por las líneas de 110 kV. Se han encontrado las variantes de operación con pérdidas mínimas mediante la aplicación del método de reconfiguración de Civanlar utilizando el software PSX como herramienta de flujo de carga para analizar la red de subtransmisión de la provincia. El análisis realizado ha permitido encontrar las variantes de operación con pérdidas mínimas de la red de 33 kV, las líneas de 110 kV y la propuesta de la primera etapa de automatización relacionada con la manipulación a distancia de los desconectivos que conformen las configuraciones óptimas de las redes de 33 kV que tienen emplazamientos sincronizados.

Palabras clave: Reconfiguración, automatización, generación distribuida, pérdidas

The 33 kV feeders reconfiguration taking into consideration the distributed generation and the distant link breakers manipulations have been integrated in the Villa Clara power system analysis in order to get the best options to operate it, and the their 110 kV lines. The minimum losses variants have been found applying the Civanlar reconfiguration method using PSX software for load flow studies. Distant manipulations of breakers are studied in the 33 kV network to achieve the outcomes as a first automation step of the local power system.

Key words: Reconfiguration, automation, distributed generation, losses

INTRODUCCIÓN

Las pérdidas de energía eléctrica solo recientemente han merecido la atención que por su importancia requieren, lo que se debe, principalmente, al aumento de los costos que encarecen la prestación de servicio debido a que los montos de energía que se disipan y que no representan un ingreso para la empresa son cada vez más elevados. Esta realidad y su evolución obligan a tomar medidas para disminuir las pérdidas o por lo menos detener su tasa de crecimiento.

Se considera que el máximo nivel de pérdidas en un sistema eléctrico no debe ser mayor de un 10 %, y que idealmente debe estar entre un 6 y 8 %. En los países en vías de desarrollo es común que este valor sea superior a un 20 %, encontrándose en Cuba en un 18 % aproximadamente, por lo tanto, cualquier esfuerzo destinado a la reducción de las pérdidas es justificable.

Las pérdidas de energía eléctrica pueden ser técnicas o no técnicas. Siendo las pérdidas técnicas las que se analizan en este trabajo.

Los principales métodos de reducción de pérdidas técnicas más empleados son:

- Ubicación de capacitores.
- Cambio de conductor.
- Elevación de los niveles de tensión de servicio.
- Reconfiguración.

La reconfiguración de los alimentadores de distribución es la que mayor relación beneficio/costo reporta y ha producido excelentes resultados en las empresas de energía que la han implementado.

La implementación de la automatización y la reconfiguración desempeñan un papel muy importante y necesario en Cuba actualmente, para hacer uso eficiente y seguro de la generación distribuida.

La reconfiguración de circuitos, la automatización de la distribución y la generación distribuida han sido integradas en este trabajo, analizando la red de 33 kV de la provincia de Villa Clara, con el objetivo de encontrar las opciones más adecuadas para operar dicha red y las líneas de 110 kV.

RECONFIGURACIÓN DE SISTEMAS

Los circuitos radiales son los más ampliamente utilizados en todo el mundo para llevar la energía eléctrica desde las redes de transmisión, de elevados voltajes, hasta los consumidores, debido fundamentalmente a su bajo costo de instalación y a su sencillez, aunque con este esquema se compromete la fiabilidad del servicio. Sin embargo, con el objetivo de elevarla, estos circuitos se diseñan con interconexiones, que operan normalmente abiertas, con alimentadores vecinos a fin de apoyarse mutuamente en casos de averías mediante el traspaso de cargas de unos a otros a través de la manipulación de interruptores adecuadamente instalados, que permiten realizar esta función conservando el carácter radial de los circuitos.

El esquema así formado permite el traspaso de cargas entre circuitos no solo en casos de emergencia, sino también para buscar la operación más ventajosa desde el punto de vista de las pérdidas y demás parámetros operativos. A estos posibles arreglos se les denomina reconfiguración.

En general, los métodos para la reconfiguración de redes de distribución pueden ser clasificados¹ como se muestra:

Métodos basados en conocimientos.

Técnicas heurísticas.^{2,5}

Técnica de programación lineal.⁶

Técnica utilizando lógica difusa.⁷

Técnica utilizando sistemas expertos.⁸

Técnicas utilizando redes neuronales.^{9,10}

Métodos basados en técnicas evolutivas

Técnicas de enfriamiento simulado.¹¹

Técnicas de algoritmos genéticos.¹²

MÉTODO DE CIVANLAR

El método de reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica desarrollado por Civanlar³ es un método heurístico confiable y muy rápido puesto que disminuye ostensiblemente la cantidad de flujos de carga que deben ser corridos, por lo que se ha convertido en el método más utilizado para la reconfiguración de alimentadores según bibliografía consultada.¹³

El método de Civanlar plantea la alta posibilidad de obtener disminución de pérdidas cuando se transfieren cargas de un nodo I a un nodo II, siempre y cuando el voltaje del nodo I sea mayor.

La magnitud en la cual cambian las pérdidas como resultado de la transferencia de un grupo de cargas de un alimentador I a otro alimentador II aparece en la figura 1, y puede estimarse a partir de la ecuación siguiente:

$$\Delta P = \operatorname{Re}\{2(\sum_{i \in D} I_i)(E_m - E_n)\} + R_{\text{lazo}} \left[\sum_{i \in D} I_i \right]^2 \quad (1)$$



Sistema de distribución para ilustrar el método de Civanlar.

1

donde:

D: Grupo de nodos desconectados del alimentador II y conectados al alimentador I.

m: Nodo de enlace del alimentador I al cual se conectarán las cargas que provienen del alimentador II.

n: Nodo de enlace del alimentador II que será conectado al nodo m a través de un dispositivo de corte de enlace.

I_i : corriente compleja en el nodo i.

R_{lazo} : Resistencia en serie del camino que conecta los dos nodos de las subestaciones del alimentador I y del alimentador II a través del cierre del dispositivo de corte de enlace especificado.

E_m : Componente de $E = R_{\text{nodo}} I_{\text{nodo}}$ correspondiente al nodo m. R_{nodo} es la matriz de resistencia de nodos del alimentador I, antes de la transferencia de carga, que se calcula usando el nodo de la subestación como referencia. I_{nodo} es el vector de corrientes de nodo para el alimentador I.

E_n : Similar a E_m pero definido para el nodo n del alimentador II.

$R_e \{.\}$: Operador de parte real.

*: Operador complejo conjugado.

|.| Operador magnitud.

AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS

La reconfiguración automatizada de las redes de distribución constituye el primer paso, y la base para lograr un sistema automatizado para la toma de decisiones con todos los beneficios que esta trae.

Se entiende por automatización de la distribución la aplicación de las técnicas y recursos necesarios para que el sistema de distribución en conjunto pueda ser operado y controlado remotamente, coordinando el uso de sus distintos elementos en tiempo real.

Cuando se va a automatizar un sistema de distribución, normalmente solo una porción del mismo debe seleccionarse,¹³ puesto que existen secciones que no requieren de esta herramienta. La automatización se puede acometer utilizando la metodología multietapas,¹⁴ la cual fue aplicada en la ciudad de Morelia en México logrando excelentes resultados.

GENERACIÓN DISTRIBUIDA

La generación distribuida resultó ser la gran decisión a tomar en el país en el año 2004, para resolver la difícil situación energética. Esta alternativa tecnológica permite generar la energía eléctrica lo más cerca posible del lugar del consumo, la cual está situada dentro o cerca de los centros de carga o conectada directamente en las redes de distribución; representa por tanto un cambio en el paradigma de la generación de energía eléctrica centralizada. El éxito de la difusión y fomento de la generación distribuida, radica en la existencia de tecnologías de punta que permiten, para potencias pequeñas, generar energía eléctrica en forma eficiente, confiable y de calidad con pérdidas mínimas.

En Villa Clara comienza a introducirse la generación distribuida desde finales del 2005, en dos variantes fundamentales como: Grupos aislados o en baterías, ubicados en emplazamientos con la composición que se muestra en la tabla 1.

En estos nuevos escenarios introducidos con la generación distribuida, se analiza la red de 33 kV de la provincia con el objetivo de buscar las mejores condiciones de operación con una reconfiguración que propicie las pérdidas mínimas en las redes de 110 y 33 kV.

Emplazamiento	Tipo	Cantidad de unidades	Potencia por unidad (kVA)	Potencia efectiva total (kW)	Puesta en marcha
Sto. Domingo	Aislado	2 MTU	2 360	3 021	Octubre -05
Bermejál	Aislado	2 MTU	1 150	1 472	Octubre-05
Ranchuelo	Aislado	4 MTU	2 360	6 042	Diciembre-05
Cifuentes	Aislado	2 MTU	2 360	3 021	Abril-06
Sta. Clara 110kV	Batería	8 MTU	2 338	11 970	Mayo-06
SC Industrial 110 kV	Batería	16 MTU	2 338	23 941	Mayo-06
Remedios 110kV	Batería	16 MTU	2 338	23 941	Julio-06
Placetás 110kV	Batería	8 MTU	2 338	11 970	Agosto-06
Total	Aislados	4 emplazamientos		13 555	
	Baterías	4 emplazamientos		71 822	

APLICACIÓN DE LA RECONFIGURACIÓN

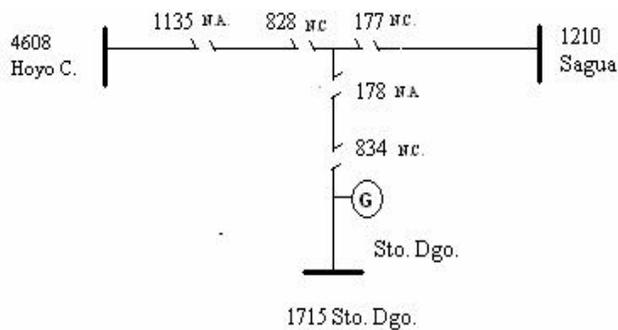
Las características actuales del país en general, y de las provincias en particular, apuntan hacia el método de Civanlar³ para la reconfiguración de los principales enlaces de las redes de subtransmisión, donde existe generación distribuida.

El sistema completo de subtransmisión se modela con software Power System eXplorer (PSX) versión 2.75 del Centro de Estudios Electroenergéticos de la Universidad Central de Las Villas. La red consta de 625 nodos, 86 máquinas, 295 transformadores, 171,7 MW de carga activa y 97,4 MVAR de carga reactiva.

La configuración óptima se calcula considerando la generación de los grupos electrogenos y las baterías a un 80% de la potencia instalada. Se considera que existen desconectivos automáticos en cada rama del sistema y las restricciones chequeadas son: Radiabilidad y voltaje. Hay configuraciones que se eliminan directamente porque causan que una parte de un alimentador quede aislada.

El esquema está formado por la línea 75 de Cruces de 110 kV, la línea 108 de Santa Clara de 110 kV y la línea 1710 de Santo Domingo de 110 kV, las cuales están interconectadas y entrelazan a los municipios: Santa Clara, Ranchuelo, Santo Domingo y Cruces de la provincia de Cienfuegos, según se muestra en la

figura 2. En este esquema se encuentra sincronizado el grupo electrógeno de Ranchuelo, compuesto por cuatro grupos y el de Bermejil compuesto por dos grupos.



Santa Clara, Ranchuelo, Santo Domingo y Cruces.

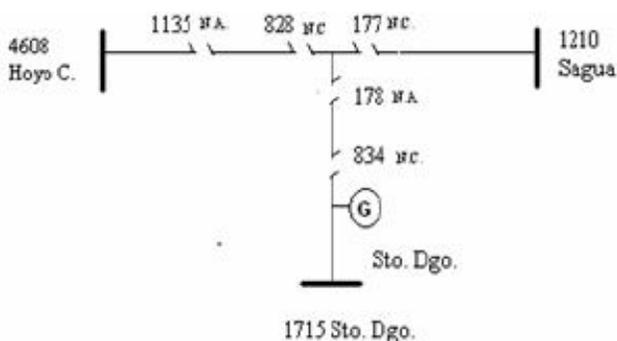
2

La configuración que resulta de aplicar el método de reconfiguración de Civanlar es:

- Cerrar el interruptor normalmente abierto 167 y abrir el interruptor entre los nodos Esperanza II y Jicotea.
- Cerrar el interruptor normalmente abierto 477 y abrir el interruptor 464.

Las pérdidas en las líneas disminuyen en un 24,5 % con esta configuración, que resulta ser la óptima.

En la figura 3 se muestra un esquema formado por: La línea 4608 de Hoyo Colorado de 110 kV, línea 1210 de Sagua de 110 kV y línea 1715 de Santo Domingo de 110 kV, las cuales están interconectadas y entrelazan a los municipios: Santo Domingo, Corralillo, Quemado y Sagua, En el esquema se encuentra sincronizado el grupo electrógeno de Santo Domingo compuesto por dos grupos.



Santo Domingo, Corralillo, Quemado y Sagua.

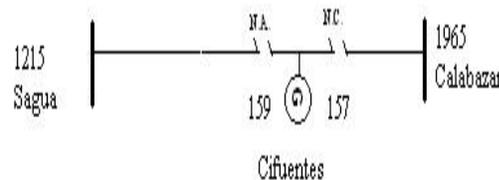
3

La configuración que resulta al aplicar el método de reconfiguración de Civanlar se logra:

- Dejando abierto el interruptor normalmente abierto 1135 entre los nodos la Sierra Rancho Veloz.
- Cerrando el interruptor normalmente abierto 178 y abriendo el interruptor 177.

Las pérdidas en las líneas disminuyen en un 39,3 % con esta configuración, que resulta ser la óptima.

Asímismo, la figura 4 muestra un esquema formado por: La línea 1215 de Sagua de 110 kV y la línea 1965 de Calabazar de 110 kV, interconectadas y que entrelazan los municipios: Sagua y Cifuentes.



Sagua y Cifuentes.

4

En este esquema se encuentra sincronizado el grupo electrógeno de Cifuentes compuesto por dos grupos. La configuración que resulta de aplicar el método de reconfiguración de Civanlar es:

- Cerrar el interruptor normalmente abierto 159 y abrir el interruptor 157.

Las pérdidas en las líneas disminuyen en un 30,0 % con esta configuración, que resulta ser la óptima.

COMPORTAMIENTO DE LAS PÉRDIDAS SEGÚN COMPORTAMIENTO DE LA GENERACIÓN

La generación distribuida desempeña un papel muy importante en la disminución de las pérdidas, dependiendo de la generación de cada emplazamiento, lo que se muestra en la tabla 2.

donde:

Generación: Generación del emplazamiento es la potencia efectiva total del emplazamiento, representa el 80 % la potencia instalada.

Pérdidas: Pérdidas del sistema electroenergético de la provincia de Villa Clara, corridos en el PSX.

Disminución de pérdidas: Disminución de las pérdidas del sistema con el emplazamiento sincronizado, respecto al sistema sin ningún emplazamiento sincronizado.

% $\Delta P/G$: Relación entre la disminución de las pérdidas del sistema y la generación del emplazamiento en porcentaje.

Por el análisis de la tabla 2, el índice % $\Delta P/G$, apunta a la utilización de la generación de los emplazamientos desde el punto de vista de disminución de pérdidas para el sistema electroenergético de Villa Clara, siempre que se cumpla con los intervalos de mantenimiento y con las condiciones ambientales establecidas. Se debe realizar en el siguiente orden:

1. Emplazamiento Ranchuelo.
2. Emplazamiento Bermejál.
3. Emplazamiento Cifuentes.
4. Emplazamiento Santa Clara 110 kV.
5. Emplazamiento Santo Domingo.
6. Emplazamiento Placetás 110 kV.
7. Emplazamiento Santa Clara Industrial 110 kV.
8. Emplazamiento Remedios 110 kV.

Los dos últimos emplazamientos, que además coinciden con los de mayor potencia instalada, provocan un incremento en las pérdidas.

En dependencia de la generación asignada por el Despacho Nacional al Despacho Provincial, se adoptan distintas combinaciones de los emplazamientos, teniendo en cuenta que cumplan los intervalos de mantenimiento y con las condiciones ambientales establecidas de los mismos, las combinaciones más usadas se muestran en la tabla 3.

Emplazamiento	Generación G (kW)	Pérdidas ΔP (kW)	Disminución P (kW)	P/G (%)
Ranchuelo	6 042	7 849	478	7,9
Bermejál	1 472	8 251	76	5,2
Cifuentes	3 021	8 238	89	2,9
Sta. Clara 110 kV	11 970	7 975	352	2,9
Santo Domingo	3 021	8 251	76	2,5
Placetás 110 kV	11 970	8 083	244	2,0
Todo los emplazam. sincronizados	85 378	7 507	820	1,0
Sin generación de emplazamiento	0	8 327	0	0,0
Sta. Clara industrial 110kV	11 970	8 365	-38	-0,3
Remedios 110kV	23 941	8 578	-251	-1,0

Tabla 3
Principales combinaciones de los emplazamientos

Variantes	Combinaciones de emplazamientos
Variante 1	Todos los aislados + Batería Santa Clara + Batería Placetás
Variante 2	Todos los aislados + Batería Santa Clara Industrial
Variante 3	Todos los aislados + Batería Remedios
Variante 4	Batería Santa Clara + Batería Remedios
Variante 5	Batería Santa Clara + Batería Santa Clara Industrial

Realizando un análisis similar al anterior se determina que la utilización de combinaciones de emplazamientos desde el punto de vista de disminución de pérdidas se debe realizar en el siguiente orden:

1. Variante 1.
2. Variante 2.
3. Variante 3.
4. Variante 5.
5. Variante 4.

La generación distribuida tiene también una función muy importante en las pérdidas de las líneas de 110 kV de la provincia. De las corridas realizadas con el PSX se concluye que el uso de la generación de los emplazamientos de la provincia provoca una reducción en las pérdidas de las líneas de 110 kV, al disminuir las transferencias por ellas.

PRIMERA ETAPA DE AUTOMATIZACIÓN

El estudio realizado ha creado las condiciones para comenzar el trabajo de automatización de la red 33 kV de la provincia, lo cual requiere de estudios complementarios no abordados en el presente. Sin embargo, se considera que con el objetivo de ganar experiencia es posible acometer una primera etapa relacionada con la manipulación a distancia de los desconectivos que conformen las configuraciones óptimas. Los desconectivos que se proponen automatizar o instalar son los que se involucran en la configuración óptima de los esquemas analizados:

Esquema 1: Santa Clara, Ranchuelo, Santo Domingo y Cruces.

- Interruptores a manipular a distancia: 167, 477 y 464.
- Interruptor a instalar: Interruptor para manipular a distancia entre los nodos: Jicotea y Esperanza II.

Esquema 2: Santo Domingo, Corralillo, Quemado y Sagua.

• Interruptores a manipular a distancia: 1135, 178 y 177.

Esquema 3: Sagua y Cifuentes.

Interruptores a manipular a distancia: 157 y 159.

CONCLUSIONES

1. El método de reconfiguración de Civanlar es confiable, muy rápido y se puede adaptar a los sistemas de distribución de Cuba.

2. La configuración actual de la red de 33 kV para su operación no resulta ser la mejor desde el punto de vista de las pérdidas en las líneas por lo nuevos escenarios de generación introducidos, la cual requiere la reconfiguración de esta.

3. La utilización de la generación de los emplazamientos desde el punto de vista de disminución de pérdidas se debe realizar en el orden que se orientó en este trabajo. Teniendo en cuenta que las mayores instalaciones Santa Clara Industrial 110 kV y Remedios 110 kV, provocan un ligero incremento de las pérdidas al ser sincronizados.

4. Las combinaciones de emplazamientos más usadas según la experiencia del Despacho Provincial se deben utilizar en el orden que se orientó en este trabajo.

5. Las pérdidas de las líneas de 110 kV, disminuyen en todo momento con la sincronización de los emplazamientos, ya que disminuyen las transferencias por las líneas.

6. Acometer una primera etapa de automatización relacionada con la manipulación a distancia de los desconectivos que conforman las configuraciones óptimas de las redes de 33 kV que tienen emplazamientos sincronizados.

REFERENCIAS

- Gers, J.M.:** "Métodos de reconfiguración de redes de distribución", Revista Energía y Computación, Escuela de Ingeniería. Accesible en: mafalda.univalle.edu.co. (Consultado 25/11/2005).
- Baran, M. E. and F. F. Wu:** "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April, 1989.
- Civanlar, S. et al.:** "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, 1988.
- Merlin, Back G.:** "Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban

Power Distribution System", Proc. Of the fifth Power System, Conference (PSCC), Cambridge, 1975.

5. Shirmohammadi, Wayne and H. Hong: "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April, 1989.

6. Wagner, T. P.; A.Y. Chikhani and R. Hackam: "Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: An Application of Distribution Automation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, July, 1991.

7. Lin, W. M. and H.C. Chin: "A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No 3, July, 1998.

8. Liu, C.C.; S. J., Lee and S. S. Venkata: "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May, 1988.

9. Bouchard, D.: "Applications of Hopfield Neural-Networks to Distribution Feeder Reconfiguration", IEEE Transactions on Power Systems, 1993.

10. Kim, H.; Y. Ko and K. H. Jung: "Artificial Neural-Network Based Feeder Reconfiguration For Loss Reduction in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, May, 1993.

11. Nara, K. and M. Kitagawa : "Distribution Systems Loss Minimum Re-Configuration by Simulated Annealing Method", IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, November, 1991.

12. Nara, K.; A. Shiose; M. Kitagawa and T. Ishihara: "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems loss Minimum Re-Configuration", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 3, August, 1992.

13. Gers, J. M.: "Alternativas para automatizar sistemas de distribución". Accesible en: mafalda.univalle.edu.co (Consultado 22/01/2006).

14. Moreno Ruiz, J. J.: "Metodología multietapa para la automatización de redes de distribución", Seminario Internacional sobre automatización de redes de distribución de energía eléctrica y centros de control, São Paulo, Brasil, septiembre, 2002.

AUTORES

Mailyn Medel González

Ingeniera Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Empresa Eléctrica, Villa Clara, Cuba
e-mail:mailyn@elecvccl.une.cu

Leonardo Casas Fernández

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba
e-mail:lcasas@uclv.edu.cu