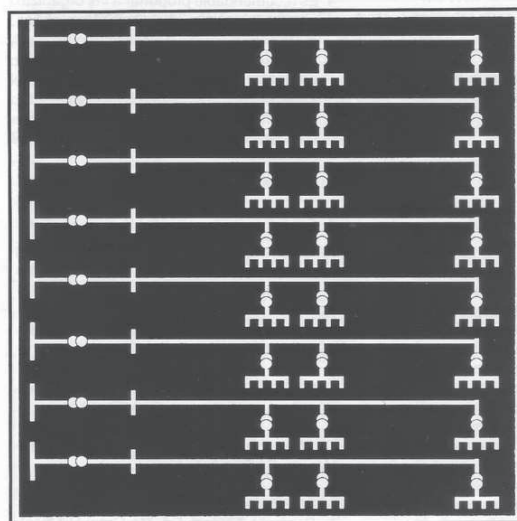


Automatización de sistemas de distribución

Reconfiguración de circuitos y localización de capacitores



□ K. L. Lo, Ph.D.
Profesor Jefe Grupo de Sistemas de Potencia
Universidad de Strathclyde
Glasgow
Gran Bretaña

□ Juan Manuel Gers Ospina, M.sc.
Ingeniero Electricista
Profesor Titular
Departamento de Ingeniería
Eléctrica-Universidad del Valle

60
.....

RESUMEN

Este artículo presenta un método que facilita la automatización de Sistemas de Distribución. El método corresponde a un algoritmo para reconfigurar circuitos e incluye una formulación para dimensionar y localizar capacitores. El trabajo incorpora también un flujo de carga que utiliza el algoritmo completo de Newton Raphson, teniendo en cuenta la alta relación R/X que tienen los Sistemas de Distribución.

ABSTRACT

This Paper presents a method to ease the automated operation of Distribution Systems. The method corresponds to an algorithm to reconfigure feeders and encompasses a formulae to size and place capacitors. The work includes a load flow program based on the full Newton Raphson algorithm, taking into account the high R/X ratio of

Distribution Systems

1. INTRODUCCION

El desarrollo de modernos equipos de medida, así como la amplia disponibilidad de computadores digitales, ha permitido que la automatización de los Sistemas de Distribución sea una realidad. De esta manera se pueden, con mayor facilidad y precisión, planear, coordinar, operar y monitorear algunos o todos los componentes de un sistema, en tiempo real o fuera de línea. Un aspecto importante de

esta tecnología es su aplicabilidad a la reducción de pérdidas eléctricas.

El método propuesto en este artículo se basa en el mejoramiento de desarrollos existentes, los cuales han sido adaptados a las circunstancias de los centros de control existentes y al hardware disponible.

La naturaleza radial de los Sistemas de Distribución es plenamente utilizada con una técnica de codificación para ordenar los nodos y reducir, de esta manera, los tiempos de ejecución sin afectar la flexibilidad de la aplicación.

Existe una gran cantidad de técnicas matemáticas para dimensionar y localizar capacitores en alimentadores. Un procedimiento más simple se utiliza aquí, junto con el algoritmo de reconfiguración, para obtener un método que se pueda implementar en un software aplicable a Sistemas de Distribución.

La reconfiguración de redes consiste en modificar la topología mediante el cierre y la apertura de enlaces y seccionadores con el fin de obtener una operación más eficiente de ellas.

Un método para identificar las mejores maniobras se fundamenta en el uso de programación lineal. Este procedimiento es complejo y demanda mucho tiempo. El algoritmo usado en este artículo se basa en técnicas heurísticas que superan algunas falencias de métodos propuestos por investigadores anteriores, mejora la precisión de los resultados y reduce los tiempos de computación.

2. CODIFICACION DE NODOS

Una técnica simple pero efectiva, para numerar los nodos, tal como se propone en la referencia [1], fue utilizada en este trabajo. De acuerdo a ese código, cada nodo recibe cuatro dígitos. Los dos primeros dígitos, están en el rango 01 a 99 y representan el número correspondiente a los alimentadores que salen de las subestaciones. El tercer dígito representa el número de la sección dentro del alimentador respectivo, desde el cual se derivan otras cargas. El cuarto dígito es cero para nodos que pertenecen al alimentador principal ó 1 a 9 para nodos secundarios.

De otro lado, como parte de la codificación, cada nodo de recibo se identifica con un número, el cual indica la función del nodo respectivo. Esto es muy importante para el ordenamiento de líneas. El código para el número de identificación es el siguiente:

1. Primer nodo principal de cualquier alimentador
2. Nodo intermedio
3. Último nodo de la ruta principal
4. Nodo secundario
5. Primer nodo de todo el sistema.

3. MODELO DE CARGA

Se considera un modelo general que corresponde a cargas distribuidas a lo largo de los alimentadores, el cual tiene la posibilidad de tener una carga concentrada al final. Si la corriente en el extremo de la subestación es I_1 y la de la carga concentrada en el otro extremo es I_2 , la corriente a lo largo del alimentador depende de la distancia desde la subestación de acuerdo a la siguiente expresión:

$$i(x) = I_1 [(p-1)x + 1] \quad (1)$$

$$\text{Donde } p = \frac{I_2}{I_1}$$

El perfil correspondiente se muestra en la figura No. 1

4. ALGORITMO PROPUESTO

En este trabajo se considera el efecto de la reconfiguración de alimentadores sobre la corriente que circula, por el enlace y por las líneas que hacen parte de la bucla objeto del cambio topológico. De esta manera se logra un cálculo más aproximado para las pérdidas de potencia, tanto antes como después de que la reconfiguración se haya hecho. El procedimiento se explica con el sistema de la figura 2, el cual tiene dos alimentadores principales, a y b.

Se asume que después de haberse corrido el flujo de carga, el voltaje en el barraje b x es menor que el del barraje a. Suponiendo que estos nodos pueden conectarse mediante un enlace, se considera la maniobra para determinar si ella produce o no ahorro en pérdidas. Las pérdidas asociadas a los elementos de la bucla, para la condición inicial, se denominan P, y se calculan con la siguiente expresión:

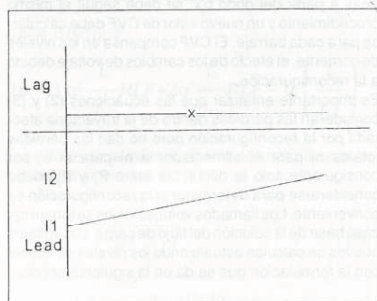


Figura No. 1 Perfil de corriente para cargas uniformemente distribuidas

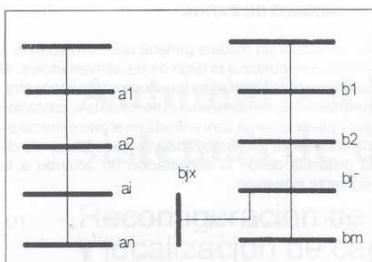


Figura 2- Topología básica para ilustrar la reconfiguración

$$P_1 = P_{a_1} R_{0-a_1} + P_{a_2} R_{a_1-a_2} + \dots + P_{a_i} R_{a_{(i-1)}-a_i} + P_{b_1} R_{0-b_1} + P_{b_2} R_{b_1-b_2} + \dots + P_{b_j} R_{b_{(j-1)}-b_j} + P_{b_m} R_{b_j-b_m} \quad (2)$$

Si la línea a-bx se cierra y la línea b-bx se abre, las nuevas pérdidas se denominan P_2 y se calculan así:

$$P_2 = (I_{a_1} + I_{b_{jx}} \text{CVF})^2 R_{0-a_1} + (I_{a_2} + I_{b_{jx}} \text{CVF})^2 R_{a_1-a_2} + \dots + (I_{a_i} + I_{b_{jx}} \text{CVF})^2 R_{a_{(i-1)}-a_i} + (I_{b_1} - I_{b_{jx}})^2 R_{0-b_1} + (I_{b_2} - I_{b_{jx}})^2 R_{b_1-b_2} + \dots + (I_{b_j} - I_{b_{jx}})^2 R_{b_{(j-1)}-b_j} + P_{b_{jx}} R_{a_i-b_{jx}} \quad (3)$$

El factor de corrección de voltaje CVF se obtiene dividiendo los voltajes viejo y nuevo en el nodo bx. Si posteriormente se considera la apertura de otras líneas a partir del nodo bx, se debe seguir el mismo procedimiento y un nuevo valor de CVF debe calcularse para cada barraje. El CVF compensa en los niveles de corriente, el efecto de los cambios de voltaje debido a la reconfiguración.

Es importante enfatizar que las ecuaciones (2) y (3) consideran las pérdidas dentro de la trayectoria afectada por la reconfiguración pero no dan las pérdidas totales ni para el alimentador a ni para el b; por consiguiente solo la diferencia entre P_1 y P_2 debe considerarse para determinar si la reconfiguración es conveniente. Los llamados voltajes viejos se toman del caso base de la solución del flujo de carga. Los voltajes nuevos se calculan actualizando los niveles de voltaje con la formulación que se da en la siguiente sección.

5. ACTUALIZACION DE NIVELES DE VOLTAJE

Debido a que el modelo utilizado para las cargas es el

de potencia constante, los niveles de voltaje afectan las magnitudes de las corrientes. Por lo tanto, es importante actualizar el perfil de voltaje, especialmente en aquellas cargas involucradas en la reconfiguración. Un brillante algoritmo se propone en la referencia [5] para calcular los voltajes en los barrajes de carga, conociendo los voltajes en los extremos de la fuente. El método se ilustra con la figura 3, en donde las letras s y r designan los extremos fuente y de recibo respectivamente.

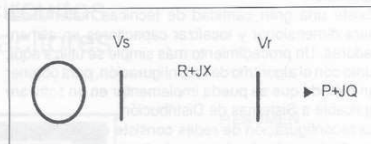


Figura 3 Circuito equivalente de un alimentador

La expresión para la corriente es:

$$I = \frac{P - JQ}{V_s \angle -\delta_r} \quad (4)$$

La correspondiente expresión para el voltaje es:

$$V_s \angle \delta_s = \left(\frac{P - JQ}{V_s \angle -\delta_r} \right) (R + jX) + V_r \angle \delta_r \quad (5)$$

La ecuación anterior es equivalente a la siguiente:

$$V_r^4 + (2(RP + XQ) - V_s^2)V_r^2 + (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2) = 0 \quad (6)$$

La ecuación (6) tiene una solución simple debido a que es independiente de los ángulos de los voltajes. Estos, sin embargo, pueden ser obtenidos si se requieren, invirtiendo el procedimiento al final. La solución de la ecuación se hace mediante técnicas numéricas estandarizadas. Como se indicó, para el barraje a ser transferido, el voltaje antes de la reconfiguración dividido por la nueva magnitud de V_r obtenido con la ecuación (6), da el CVF que permite reducir o incrementar la corriente del barraje debido al cambio de topología.

6 LOCALIZACION Y DIMENSIONAMIENTO DE CAPACITORES

La reducción en pérdidas utilizando la reconfiguración de redes, puede ser aumentada aún más mediante la instalación de capacitores a lo largo de los alimentadores. El efecto de ellos debe considerarse tanto en

ahorros en pérdidas por potencia como por consumo de energía.

Si un alimentador tiene carga distribuida uniformemente, su corriente es dada por la ecuación (1). Las pérdidas totales de potencia debido a la componente reactiva se llaman P_1 y se calculan con la expresión siguiente:

$$P_1 = 3 \int_0^1 [I_{1R} ((p-1)x + 1)]^2 R dx \quad (7)$$

Donde:

$$p = I_{2R}/I_{1R}$$

I_{1R} = Corriente reactiva en la subestación

I_{2R} = Corriente reactiva en el extremo de la línea

El resultado de la ecuación (7) es:

$$P_1 = RI_{1R}^2 (p^2 + p + 1) \quad (8)$$

Las pérdidas de energía a lo largo del alimentador, se llaman E_1 , y se calculan tomando la integral de la expresión dada en la ecuación anterior, durante un tiempo T , de donde se obtiene la siguiente expresión:

$$E_1 = RI_{1R}^2 T (RLF)(p^2 + p + 1) \\ = P_1 T (RLF) \quad (9)$$

Donde:

$$RLF = \frac{1}{T} \int_0^T R I_{1R}^2(t) dt \\ RLF = \frac{0}{RI_{1R}^2} \quad (10)$$

6.1 Ahorros en potencia con un banco de capacitores

Si un capacitor es instalado a una distancia a de la fuente y toma una corriente I_c , la nueva expresión para las pérdidas se denomina P_2 y se calcula así:

$$P_2 = 3 \int_0^a [I_{1R} ((p-1)x + 1) - I_c]^2 dx + \\ 3 \int_a^1 [I_{1R} (p-1)x + 1]^2 dx \quad (11)$$

La reducción de pérdidas se obtiene sustrayendo a la ecuación (8) el resultado de la ecuación (11), de donde se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \\ 3RI_{1R}^2 \left[(p-1) \frac{I_c}{I_{1R}} a^2 + 2 \frac{I_c}{I_{1R}} a - \left(\frac{I_c}{I_{1R}} \right)^2 a \right] \quad (12)$$

La localización óptima de un banco de capacitores para reducir las pérdidas de potencia se puede determinar tomando las derivadas parciales de la ecuación (12), con respecto a I_c y a la distancia a ; de esa manera se obtienen las siguientes expresiones:

$$I_c = \frac{2}{3} I_{1R} \quad (13)$$

$$a = \frac{2}{3(1-p)} \quad (14)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en la ecuación (12), se obtiene el máximo ahorro de potencia con la siguiente expresión:

$$\Delta P_{MAX} = RI_{1R}^2 \frac{8}{9(1-p)} \quad (15)$$

Las ecuaciones (13), (14) y (15) son válidas si $p \leq 1/3$. Para valores mayores de p la magnitud de a se hace mayor a 1 e incluso negativa, lo cual no tiene significado físico. Por consiguiente para $p > 1/3$, el capacitor debe localizarse al final del alimentador, lo que corresponde a un valor de $a=1$ y por consiguiente la corriente del capacitor y el ahorro máximo de pérdidas obedecen a las siguientes expresiones:

$$I_c = \frac{1}{2} I_{1R} (p + 1) \quad (16)$$

$$\Delta P = \frac{3}{4} RI_{1R}^2 (p + 1)^2 \quad (17)$$

6.2 Ahorros en energía con un banco de capacitores

Siguiendo el mismo procedimiento puede demostrarse que el ahorro por consumo de energía cuando se instala un capacitor corresponde a:

$$\Delta E = 3RI_{1R}^2 T \\ \left[(p-1) \alpha^2 \frac{I_c}{I_{1R}} RLF + 2\alpha \frac{I_c}{I_{1R}} RLF - \alpha \left(\frac{I_c}{I_{1R}} \right)^2 \right] \quad (18)$$

Los valores para máximo ahorro de energía se obtienen de las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{2}{3(1-p)} \quad (19)$$

$$I_c = \frac{2}{3} I_{1R} (RLF) \quad (20)$$

$$\Delta E_{MAX} = R I_{1R}^2 T (RLF)^2 \frac{8}{9} \frac{1}{(1-p)}$$

$$= \Delta P_{MAX} T (RLF)^2 \quad (21)$$

De igual manera las expresiones para máximo ahorro de energía cuando $p > 1/3$ son:

$$I_c = I_{1R} (RLF) \left(1 + \frac{1}{2} (p-1)\right) \quad (22)$$

$$\Delta E_{MAX} = \frac{3}{4} R I_{1R}^2 (p+1)^2 T (RLF)^2$$

$$= T (RLF)^2 \Delta P_{MAX} \quad (23)$$

6.3 Instalación de varios capacitores

Cuando existe mas de un segmento que es el caso normal, las expresiones (12) y (18) siguen siendo válidas. En estas circunstancias debe colocarse $a=1$ lo cual es aplicable a un solo segmento a la vez. Por lo tanto, para un segmento m , cuando se instala un capacitor aguas abajo en un segmento n , las reducciones en pérdidas por potencia y consumo de energía corresponden a las ecuaciones siguientes:

$$\Delta P_m = P_{1m} - P_{2m} =$$

$$3 R_m \left[(I_{1Rm} + I_{2Rm}) I_{cn} - I_{cn}^2 \right] \quad (24)$$

$$\Delta E_m = 3 R_m T$$

$$\left[(I_{1Rm} + I_{2Rm}) (RLF) I_{cn} - I_{cn}^2 \right] \quad (25)$$

Las expresiones generales se obtienen considerando el efecto de un capacitor a la vez para cada sección hacia la fuente como sigue:

$$\Delta P = \Delta P_n + \sum_{m=1}^{n-1} \Delta P_m \quad (26)$$

$$\Delta E = \Delta E_n + \sum_{m=1}^{n-1} \Delta E_m \quad (27)$$

7. IMPLEMENTACION

El procedimiento explicado se implementó en un programa escrito en FORTRAN 77, versión para Windows. Las etapas que constituyen el programa son:

- Entrada de datos

- Solución de flujo de carga.
- Determinación de posibilidades de reconfiguración
- Chequeo del perfil de voltajes mediante la fórmula cuadrática
- Dimensionamiento y localización de capacitores
- Edición de resultados

8. RESULTADOS

La evaluación del procedimiento se hizo con el sistema tomado de la Referencia. [2], para las 8 alternativas donde la transferencia de carga es desde el barraje con el menor nivel de voltaje al barraje con mayor voltaje, de acuerdo al método heurístico mencionado. El sistema se reproduce en la figura 4.

Los datos de entrada se presentan en la tabla 1 con la codificación sugerida en este trabajo. La tabla 2 muestra que la aplicación del método produce resultados consistentes para todos los casos, aún para aquellos donde el punto de apertura esté alejado del punto de cierre. Los valores de reducción de pérdidas obtenidas con el método se muestran en la última columna y son muy similares a la solución con el flujo de carga.

La tabla 3 muestra los niveles de voltaje para las nodos de los tres casos que dieron la máxima reducción de pérdidas. La tercera columna da los valores que se obtienen con el flujo de carga y la cuarta los valores que se obtienen con el método. Todos los valores están en un rango de precisión del 1.2%, lo cual se considera muy interesante.

9. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un método para llevar a cabo la reconfiguración de sistemas de distribución, teniendo en cuenta la localización de capacitores. Los niveles de voltaje de los nodos son actualizados después de la solución de flujo de carga para el caso base, utilizando una fórmula cuadrática que da buena precisión sin tener que acudir a nuevas corridas de flujo de carga.

El procedimiento se facilita gracias a una técnica sencilla de codificación. El método propuesto ofrece una forma conveniente para considerar la carga, ya sea concentrada en los extremos de los alimentadores o distribuida a lo largo de su ruta.

Una ventaja adicional del método es que las cargas de aquellos nodos que no estén incluidas en la bucla o trayectoria, se consideran en el equivalente calculado en el nodo de donde ellas se derivan. Esto es un beneficio importante sobre otros métodos ya publicados. El método propuesto puede ser implementado en paquetes de software para análisis de Sistemas de Distribución o ser la base para algoritmos que consideren aplicaciones en tiempo real. De otro lado, su aplicación no solo es para la reducción de pérdidas

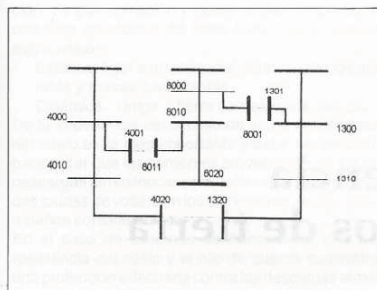


Figura No. 4 -Red de Ejemplo

NODOS DE - A	RESIST. pu	REACT. pu	P MW.	Q MVAR	CAPAC. MVAR
9999-4000	0.075	0.10	2.0	1.6	-
4000-4001	0.08	0.11	3.0	1.5	1.1
4000-4010	0.09	0.18	2.0	0.8	1.2
4010-4020	0.04	0.04	1.5	1.2	-
9999-8000	0.11	0.11	4.0	2.7	-
8000-8010	0.08	0.11	5.0	3.0	1.2
8000-8001	0.11	0.11	1.0	0.9	-
8010-8011	0.11	0.11	0.6	0.1	0.6
8010-8020	0.08	0.11	4.5	2.0	3.7
9999-1300	0.11	0.11	1.0	0.9	-
1300-1301	0.09	0.12	1.0	0.7	1.8
1300-1310	0.08	0.11	1.0	0.9	-
1310-1320	0.04	0.04	2.1	1.0	1.8
4001-8011	0.04	0.04	-	-	-
8001-1301	0.04	0.04	-	-	-
4020-1320	0.09	0.12	-	-	-

CASO	SECC. A CERRAR	SECC. A ABRIR	PERDIDAS TOTALES MW	REDUCCION (FLUJO C) MW	REDUCCION (METODO P) MW
Base	-	-	0.498	-	-
1	4001-8011	9999-8000	1.203	-0.705	-0.662
2	4001-8011	8000-8010	0.688	-0.190	-0.280
3	4001-8011	8010-8011	0.485	+0.013	+0.015
4	8001-1301	9999-8000	1.387	-0.889	-1.150
5	8001-1301	8000-8001	0.476	+0.022	+0.023
6	4020-1320	9999-40000	0.925	-0.427	-0.342
7	4020-1320	4000-4010	0.558	-0.06	-0.073
8	4020-1320	4010-4020	0.510	-0.012	-0.005

NODO	CASO	FLUJO DE C. V EN PU	METODO P V EN PU
8011	3	0.988	0.988
8011	5	0.972	0.977
4020	8	0.982	0.994

sino que puede ampliarse a aspectos de diagnóstico de fallas y restablecimiento del servicio de energía después de fallas.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] L.O. K. L. GERS, J.M., Distribution Automation with Respect to Feeder Reconfiguration and Capacitor Location, Proc. of the DA/DSM 94 Conference, Paris, France September 1994
- [2] CIVANLAR, S., GRAINGER, H., YIN, H., & LEE, S. Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, pp. 1217-1223, 1988
- [3] WAGNER T.P., CHIKHANI, A.Y. Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: An Application of Distribution Automation, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6 No. 4, pp. 1922-1931, 1991
- [4] CHANC, N.E., Determination of Primary Feeder Losses, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 87, No. 12, pp. 1991-1994, 1968
- [5] CESPEDES, R., New Method for the Analysis of Distribution Networks, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 391-396, January 1990.
- [6] LAKERVI, E., HOLMES, E.J., Electricity Distribution Network Design, Peter Peregrinus Ltd., 1st. Edition, London, 1989