DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCION POR COMPUTADORA DIGITAL

GALO NINA

INECEL - DOSNI

RESUMEN

En este trabajo se propone un método que utiliza diversos métodos de programación matemática para realizar el diseño de redes aéreas de distribución en alta y baja tensión.

Conocida la topología preliminar de la red de alta y baja tensión (implantación de los postes), se localizan los transformadores y se proyectan los circuitos de baja tensión y el calibre del conductor para todo el sistema. El problema es tratado como localización en redes, para el cual los costos asociados a cada arco son las distancias mínimas de los transformadores a las distintas demandas. Los resultados para una red típica se presentan y analizan utilizando el método propuesto.

INTRODUCCION

El diseño de redes de distribución para nuevas cargas residenciales, de cualquier tipo, es una tarea realizada tanto por empresas eléctricas como por compañías privadas con el consiguiente empleo de recursos materiales y humanos. Este es actualmente realizado manualmente y empleando casi siempre el buen criterio de la persona que realiza ésta tarea, por la cual pocas veces se garantiza una solución que satisfaga tanto los criterios del proyecto, (caída de voltaje y límite térmico), | 1| como una solución con un costo de valor mínimo. Debido al énfasis que se ha dado actualmente a la construcción de viviendas de tipo social, el ahorro de recursos debe ser una condicion indispensable en todo proyecto.

Varios trabajos se han realizado en el área de localización tanto en forma teórica como en la aplicacion a problemas específicos de planificacion en distribucion. En el problema que se está tratando se supone que el sistema puede ser descrito por una red. En redes la localizacion de almacenes ha sido efectuada por métodos exactos | 2 | y por métodos heurísticos. El problema de localizacion de transformadores para sistemas de distribucion subterranea ha sido resuelto considerando un espacio contínuo | 3 |, o una red | 4 | | 5 |, el método empleado en éstos últimos trabajos es el de ramificacion y acotacion donde el transporte es un subproblema en la solucion. En la determinacion del calibre del conductor se ha utilizado programación dinámica | 6 |, programacion cero-uno, | 7 | y calculo de variaciones | 8 |.

El proposito de este trabajo es encontrar un diseño optimo de una red aérea de alta y baja tension. Se suponen conocidas la implantación de los postes y un trayecto preliminar de la red de alta y baja tension. Para llegar al proyecto final en primer lugar se encuentran las distancias minimas desde los posibles centros de transformación a los diferentes centros de carga | 9 |, inmediatamente se localizan los transformadores utilizando una adaptacion del modelo | 5 |; en donde los costos son las distancias mínimas obtenidas en el paso anterior. Este proceso de optimizacion da como resultado además los diferentes circuitos de baja tension asociados a cada transformador. Finalmente se encuentra el calibre del conductor en todo el sistema.

FORMULACION DEL PROBLEMA

Para llegar al diseño óptimo del sistema de distribucion se deben resolver varios subproblemas cuya descripcion matemática se da a continuacion.

1. Primer Subproblema. Cálculo de la Matríz de Distancias Mínimas: Se supone conocida una red G con m nodos y n arcos y un costo c_{ij} asociado con cada arco $(i,j) \varepsilon G$; que es la distancia del nodo i al nodo j. El primer subproblema consiste en encontrar la distancia mínima del nodo i a todos los nodos j, $i \neq j$, para todo $(i,j) \varepsilon G$.

Para ésto se encuentra la matríz $V\ (v_{ij})$, nxn, definida de la siguiente manera:

$$v_{ij} = \begin{cases} \text{distancia del nodo } i \text{ al nodo } j; & \text{si } (i,j) \varepsilon G \\ \infty & ; \text{ si } (i,j) \not\varepsilon G \\ 0 & ; \text{ si } i=j \end{cases}$$

realizando con los elementos v_{ij} la operación definida como:

$$v^2_{ij} = \min \{ v_{ik} + v_{kj} : k = 1,..,n\}$$

se llega a una nueva matríz $V^2\ (v^2_{ij})$. Efectuando repetidamente esta operacion; la matríz $V^n\ (v^n_{ij})$ nos da las distancias mínimas buscadas.

2. Segundo Subproblema. Localización de los Transformadores: El trayecto preliminar de la red de alta tension determina un árbol T con t nodos que nos permite plantear el problema de la localización de los transformadores como programacion mixta de la forma:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=1}^{n} v^n_{ij}\, x_{ij} + \sum_{i=1}^{t} f_i\, y_i$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{t} x_{ij} = b_j \ ; \ j=1,..,n$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \le a_i\, y_i \quad , \quad i=1,..,t$$

$$\sum_{i=1}^{t} y_i \le r \qquad (1)$$

$$x_{ij} \ge 0 \quad , \forall_{i,j}$$

$$y_i \ \varepsilon \ \{0,1\}$$

Donde f_i es el costo de los transformadores, b_j es la demanda del nodo j, a_i es la capacidad del transformador i, y r es el número máximo de transformadores a instalarse que va a depender de la demanda total del sistema, del tipo de transformador a instalarse y del factor de utilizacion y diversidad de la demanda. Este problema es resuelto utilizando el algoritmo de enumeracion implícita descrito en el Apéndice A.

3. Tercer Subproblema. Determinacion de la Configura

cion de la Red de Baja Tension: Como un resultado adicional del segundo subproblema se obtienen las demandas asociadas a cada transformador devido a, que los costos utilizados en éste fueron las distancias mínimas, es necesario conocer cuales son los arcos que las conforman.

Partiendo de la matríz $S(s_{ij})$ de arcos no modificados definida como:

$$s_{ij} = \begin{cases} 1 & ; \quad \text{si} \quad v_{ij} = v_{ij}^n \\ 0 & ; \quad \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

y de la matríz $V^n(v_{ij}^n)$ se encuentran estos arcos dando como resultado un árbol asociado a cada transformador. El algoritmo utilizado se cita en el Apéndice B.

4. Cuarto Subproblema. Determinacion del Calibre del Conductor: Conocido el árbol asociado a cada transformador el siguiente paso es determinar el calibre del conductor para los diferentes arcos que la conforman. Para ésto asociamos una variable boleana x_{ijk} para cada arco (i,j) y conductor estándar k respectivamente. La caída de tension para cada uno de los arcos dependiendo del conductor estándar k será

$$R_k\, v_{ij}\, I_{ij}\, x_{ijk}$$

donde R_k es la resistencia por unidad de longitud de conductor estándar k e I_{ij} es la corriente que pasa por el arco (i,j). Si son conocidos los costos por unidad de longitud de los diterentes conductores c_k; el problema de determinar el calibre de conductor más economico puede plantearse como un problema de programacion cero-uno de la siguiente forma.

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{(i,j)} \sum_k c_k\, v_{ij}\, x_{ijk}$$

s.a.

$$\sum_k x_{ijk} = 1 \quad , \quad \forall\, (i,j)$$

$$\sum_{(i,j)} t_{ij} \sum_k R_k\, v_{ij}\, I_{ij}\, x_{ijk} \leq \overline{V} \quad \forall\, (i,j)$$

$$t_{ij},\, x_{ijk} \in \{0,1\}$$

Donde t_{ij} es una variable boleana que asume valor igual a 1 si el arco (i,j) esta en el camino que va del transformador al arco (i,j) y o en el caso contrario, $\overline{V}$ es el valor permitido de caída de voltaje.

EJEMPLO

Como un ejemplo de la utilizacion del método se ha considerado la urbanizacion de la Fig. 1. Esta ilustra la topología inicial, tanto de la red de baja tension como de la red de alta tension. Ocho sitios posibles existen para los transformadores de capacidad de 45 KVA. La urbanizacion consiste de 108 lotes con una demanda máxima unitaria proyectada a 10 años, que da como resultado 2.86 KVA, que se alimentan de 34 postes.

El diseño obtenido por el método que ha sido implementado en el lenguaje FORTRAN IV en un computador PRIME consta en la Fig. 2, en donde se muestran los circuitos de baja tension con sus conductores dentro de los límites establecidos de caída de voltaje (4%) y la ubicacion de los transformadores.

CONCLUSIONES

Los modelos presentados en este trabajo permiten realizar el diseño de una red de distribución para nuevas cargas de tipo residencial, con poco esfuerzo y llegando a resultados satisfactorios. El método es muy dependiente del proyecto inicial de la red de alta tension, pero este hecho no obstaculiza que mediante un análisis de sensibilidad se llegue a la solucion optima. Por otro lado el proyecto inicial de alta tension depende del lugar de la acometida que en muchas ocasiones depende de la disponibilidad de circuitos de alta tension adyacentes.

El problema básico presentado es común a otras disciplinas como proyectos de redes de telefonía, aguas servidas o potable. Muchos de estos problemas tienen el mismo objetivo que es encontrar el diseño de menor costo usando conductores de capacidad discreta satisfaciendo ciertas restricciones de flujo.

APENDICE A

Para cualquier conjunto de soluciones $\overline{y}_i$ tales que se cumpla la restriccion (1) y además

$$\sum_{i=1}^{t} a_i\, \overline{y}_i \geq \sum_{j=1}^{n} b_j \qquad (2)$$

se obtiene el siguiente problema de transporte

$$zo = \sum_{i=1}^{t} f_i \overline{y}_i + \min \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=1}^{n} v_{ij}^n\, x_{ij} \qquad (3)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{t} x_{ij} = b_j \quad ; \quad j = 1,..,n$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \leq a_i \quad ; \quad i = 1,..,t$$

$$x_{ij} \geq 0$$

Introduciendo un destino ficticio con demanda

$$b_{n+1} = \sum_{i=1}^{t} a_i \overline{y}_i - \sum_{j=1}^{n} b_j \qquad (4)$$

y un costo $c_{n+1} = 0$, se obtiene la forma estandar del problema de transporte. El dual del problema (3) es

$$z_1 = \sum_{i=1}^{t} a_i\, \overline{y}_i + \max \sum_{j=1}^{n} b_j\, u_j + \sum_{i=1}^{t} a_i\, \overline{y}_i\, v_i$$

sujeto a:

$$u_j - v_i \leq c_{ij} \quad , \quad i = 1,..,t \quad , \quad j = 1,..,n$$

$$v_i \geq 0 \quad , \quad i = 1,..,t$$

$$u_j \ \forall$$

Considerese que las variables duales optimas del problema de transporte estandar son u_j' y v_i' respectivamente; $i= 1,..,t$; $j=1,..,n+ 1$. Aplicando el teorema de la holgura complementar tenemos que

$$u_j = u_j' - u_{n+1}' \quad ; \quad j= 1,..,n$$

y

$$v_i = -u_{n+1}' - v_i' \quad ; \quad i = 1,..,t$$

Supongamos ahora que resolvemos (4) para un número menor de orígenes y obtenemos las variables duales óptimas v_j' pero queremos saber a que serán iguales las variables duales v_j para los orígenes no tomados en cuenta; nuevamente por el teorema de la holgura complementar tenemos

$$v_j = \max \; \{ u_i' - c_{ji} : i= 1,..,t \}$$

El algoritmo utilizado para resolver el problema de localización es uno de enumeración implícita de las variables binarias y_i. Para excluir soluciones de la enumeración se utilizan las restricciones (1) y (2) y además otras restricciones denominadas duales definidas como

$$\sum_{i\varepsilon S^k} (f_i - v_i^k a_i) + \sum_j u_j^k b_j - g^* \leq 0 \qquad (5)$$

donde g^* es el valor de la función objetiva para la mejor solución disponible, S^k es el conjunto de índices para los cuales $y_i= 1$ en la k-ésima enumeración y u_j^k, v_j^k son las variables duales óptimas. El procedimiento itera a traves de los siguientes pasos.

Paso 1. Determine si las restricciones (1) y (2) son violadas, si no lo son vaya al Paso 2, sino vaya al Paso 4.

Paso 2. Verifique si las restricciones duales (5) son violadas, si no lo son vaya al Paso 3, sino vaya al paso 5.

Paso 3. Resuelva el problema de transporte, actualice todas las restricciones y vaya al Paso 4.

Paso 4. Realice el regreso, si éste no es posible, todos los nodos han sido explícita o implícitamente enumerados y el procedimiento termina, sino vaya al Paso 1.

Paso 5. Si es posible a una enumeración descendiente mejorar la solución vaya al Paso 1, sino vaya al Paso 4.

APENDICE B

El problema de determinar cuales son los arcos que conforman las distancias mínimas, se resuelve encontrando el vector $\underset{\sim}{l}$ denominado vector de etiquetas. Este vector tiene las siguientes características.

i) El número de elementos es igual al número de nodos de la red.

ii) Si $l_s = s$ éste es el nodo inicial del camino.

iii) Sea un elemento l_j cualquiera, su valor indica el número del último vértice en el camino desde l_i a l_j.

Debe entenderse que camino es una secuencia de arcos $\{ (i_o, i_1), (i_1, i_2),\ldots (i_{p-1}, i_p) \}$ en el cual el nodo inicial de cualquier arco es el mismo que el nodo terminal del arco predecesor en la secuencia.

Algoritmo para hallar el vector etiqueta.

Paso 1. $l_s = s$

Paso 2. Si $s_{sj} = 1$, para $j=1,..,n$ haga $l_j = s$

y sea $L = \{j : s_{sj} = 1 \}$

Paso 3. Para cada uno de los elementos j de L para los cuales $s_{ij} = 1$ y $v^n_{sj} = v^n_{si} + v^n_{ij}$

$i = 1,..,n$

vaya al paso 4.

Paso 4. Si $l_i \neq 0$, haga $l_i = j$ y añada i al conjunto L, vaya al Paso 3.

El algoritmo termina cuando todos los l_i son diferentes de cero, $i=1,..,n$.

REFERENCIAS

| 1 | Empresa Eléctrica Quito S.A., "Normas para Sistemas de Distribución", Parte A, 1979.

| 2 | Ellwein L.B., Gray P. "Solving fixed charge allocation problems with capacity and configuration constraints" A.I.I.E. Trans. 3, 290 - 299, 1971.

| 3 | Grimsdale, R.L., Sinclare, P.H. "The design of housing estate distribution system using a digital computer". Proc. I.E.E., 1960, 107A, pp 295 - 305.

| 4 | Hindi, K.S. Brameller, A, "Design of low voltage distribution networks, a mathematical programming method". Proc. I.E.E. Vol 124, pp 54 - 58, 1977.

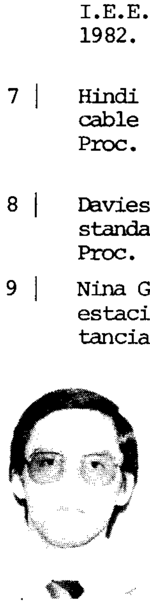
| 5 | Backlund Y., Bunenko J., "Computer - aided distribution system planning", Electrical Power & Energy Systems. Vol. 1, pp 35 - 45. 1979.

| 6 | Ponnavaikko M., Prakasa K.S., "An approach to optimal distribution system planning through conductor gradation". I.E.E.E. Trans Vol PAS - 101, pp 1735 - 1742 1982.

| 7 | Hindi K.S., Brameller A., Haman Y.M., "Optimal cable profile of l.v. radial distributors", Proc. I.E.E. Vol 123, N°4 pp 331 - 334, 1976.

| 8 | Davies, "Design of l.v. distributors from standard cable sizes". Proc. I.E.E., Vol 112, N°5, pp 949 - 956,1965

| 9 | Nina G. "Capacidad y ubicación óptimas de subestaciones minimizando el producto carga-distancia" Tesis de Grado ESPOL, Enero 1979.



NINA, GALO. Graduado de Ingeniero Eléctrico, especialización Potencia en Marzo de 1979 en la ESPOL. Master en Ciencias en la U.F.R.J. Brasil en Ing. de Sistemas (Optimización). Desde Mayo de 1981 trabaja en el Dept. de Planificación Operativa de la DOSNI INECEL. Y en la Facultad de Postgrado en Ing. Sistemas de la Politécnica del Ejército.

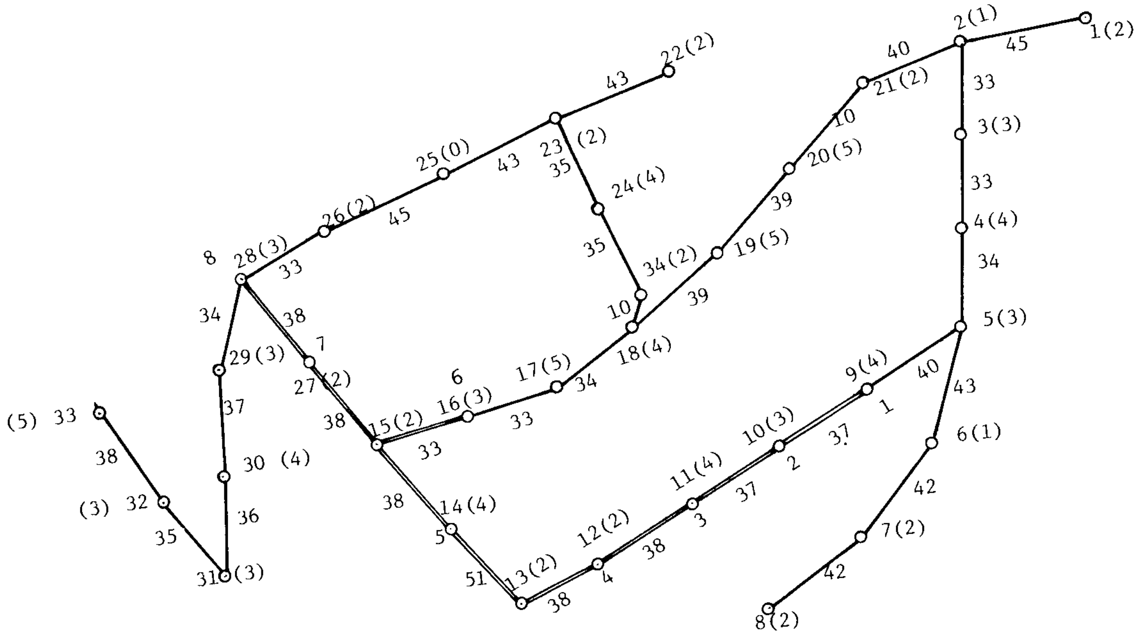


FIG. 1. RED INICIAL QUE MUESTRA LA IMPLANTACION DE LOS POSTES, DISTANCIAS ENTRE ELLOS Y NUMERO DE USUARIOS A SERVIRSE.

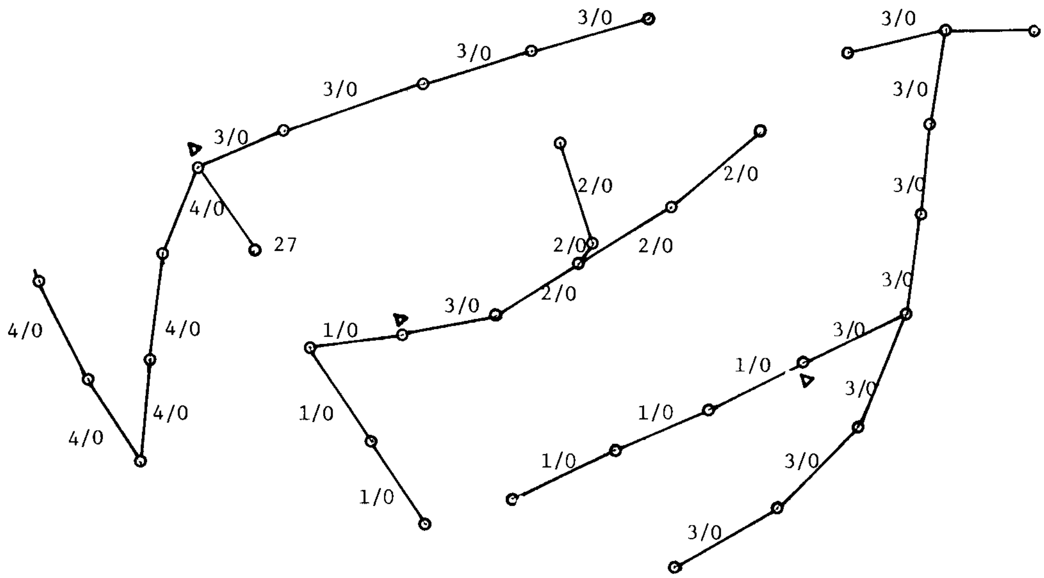


FIG. 2 DISEÑO FINAL OBTENIDO DESPUES DE LA APLICACION DEL METODO.