

UN MODELO MIXTO PARA DEFINICION DE ESQUEMAS CONCEPTUALES EN LA PLANIFICACION DE REDES DE TRANSMISION

Ing. Ramón Villasana S., Msc., PhD.
Universidad Simón Bolívar
Caracas, Venezuela

Ing. Julio C. Montenegro L. MSc
Universidad Simón Bolívar
Caracas, Venezuela

RESUMEN

Este artículo resume la estructura de un modelo matemático con características mixtas (variables reales-enteras), concebido para determinar las instalaciones de transmisión que deban efectuarse en un sistema eléctrico, a fin de que éste pueda transportar la potencia necesaria en forma económica y segura sin rebasar la capacidad de sus elementos. El modelo se fundamenta en una extensión a la simulación DC de los sistemas eléctricos de potencia.

ABSTRACT

This paper presents a linear integer mathematical model conceived to define conceptual schemes for long term Transmission System Planning. The model is an extended version of the DC simulation of power systems load flow. An application example is presented and solution is compared with the original methodology [8].

INTRODUCCION

Uno de los problemas más significativos que confrontan los ingenieros planificadores de la industria eléctrica, es el de seleccionar la mejor alternativa de expansión para su sistema. En general esto requiere la especificación de cuando, donde y en que capacidad deben construirse nuevas plantas de generación y líneas de transmisión en el sistema, a fin de que los requerimientos de energía eléctrica sean satisfecho a su debido tiempo a un mínimo costo y a niveles de seguridad aceptables en un horizonte considerado, 20 años por ejemplo.

En los modernos sistemas de potencia, la red de transmisión representa una parte considerable del total de las inversiones, por consiguiente, es necesario tener extremo cuidado en la escogencia de un plan de expansión de los medios de transmisión de éstos sistemas, que garantice la operación de los mismos aún bajo condiciones de emergencia, a un costo mínimo.

Una de las primeras proposiciones que formuló un criterio para el diseño y la expansión del parque de transmisión de los sistemas de potencia, de tal manera que el problema pudiera ser resuelto mediante un proceso automático de optimización, fue expuesta por Knight (2) en 1.961. Knight usó un método reciente para la época, para resolver problemas de programación entera minimizando una función objetivo, sujeta a un conjunto de restricciones lineales que básicamente representaban requisitos de seguridad del sistema. Esta aproximación determinística de Knight estuvo altamente limitada, debido a la dimensionalidad del problema y al comportamiento del método de programación entera del cual dispuso.

Ocurrieron contemporáneamente otros intentos alternativos para construir métodos automáticos buscando resolver problemas de diseño y expansión de redes de transmisión de potencia de tamaños reales, muchos de ellos resultaron ser simples aproximaciones heurísticas (referencias 3, 4, 5), y más adelante, el advenimiento de técnicas digitales avanzadas, estimuló el desarrollo de métodos interactivos (referencias 6 y 7).

En 1970, Len L. Garver, (referencia 8), presentó un método para estimar el número de líneas de transmisión necesarias en una red, con el objeto de aliviar las sobrecargas que se producían con el incremento de la demanda. Este método, basado en programación lineal, constituye actualmente una herramienta valiosa en la planificación de los sistemas de transmisión; incurre sin embargo en procedimientos heurísticos que tienden a oscurecer sus bondades.

Se han incorporado otros modelos usando diversas técnicas de programación matemática (referencias 9, 10, 11), las cuales procuran solución al problema de sobrecarga a través del tiempo es decir, año a año van incorporando líneas de transmisión y resolviendo el problema de expansión hasta alcanzar un año horizonte para el cual se ha estipulado el plan. Esta forma de resolver el problema, resulta por lo general más costosa al final (año horizonte) que la solución polarizada por el plan horizonte.

La idea aceptada generalmente entre los planificadores de transmisión, es la de diseñar la red en base a un sistema conceptual concebido para el año horizonte; esto es: conociendo el estimado de carga y la estructura de la generación para un año horizonte, se puede encontrar una solución a la expansión de la transmisión para ese año. La solución para los años intermedios se puede encontrar usando aquella como solución de referencia o de polarización. El modelo que se expone en éste trabajo, está concebido para encontrar esa red referencial del año horizonte, el cual corresponde al momento en el tiempo cuando la red se encuentra más desconectada.

Insertar refuerzos en una red es un problema de índole discreta. Cuando la red se simula en forma lineal la adición de nuevos elementos se efectúa en forma sucesiva a juicio y discreción del planificador. Con el presente modelo se pretende dar simultaneidad al proceso de identificación de los refuerzos que requiere la red. En una sola iteración se identifica el número óptimo de líneas que en conjunto representa la solución más económica para una condición dada del sistema. Esta es una de las ventajas principales que incorpora esta formulación en relación a la modelación lineal y otras modelaciones discretas existentes. Otra facilidad que se obtiene

con esta metodología es la posibilidad de considerar simultáneamente distintos niveles de tensión y obtener otras soluciones factibles cercanas a la óptima.

En resumen el presente modelo formulado para la solución mediante programación mixta, usa una extensión a la aproximación lineal DC del flujo de carga y resuelve el sistema utilizando un paquete de computación codificado para la solución de problemas de programación lineal, programación mixta, programación entera y programación separable. El modelo incorpora las vías o corredores nuevos o existentes, en donde se puede construir nuevos refuerzos, y arroja dentro de su solución, el número de líneas que deben erigirse en cada corredor así como una buena aproximación al flujo de potencia a través de ellas.

Planteamiento del problema

Dados:

- a) La red existente.
- b) Los corredores existentes con posibilidades de expansión.
- c) Las posibles vías por donde se pudieran tender nuevos corredores de transmisión.
- d) El despacho de potencia activa de los centros de generación, para el año horizonte.
- e) La demanda estimada para la cual se desea diseñar a largo plazo.

Se persigue identificar:

- 1) Sitios de la red existente donde no hay capacidad para la transmisión.
- 2) Corredores existentes factibles de ser expandidos
- 3) Nuevos corredores de transmisión que deben incorporarse a la red.
- 4) El conjunto de líneas que deben añadirse a la red a largo plazo.
- 5) Estado de operación del sistema a largo plazo.

Jerarquización del método

El modelo que se presenta en éste trabajo está destinado a la planificación de redes cuyos parámetros se pueden jerarquizar como determinísticos, variables mixtas, estáticos y de condición única (condición normal o de emergencia); intentando responder a la interrogante de ¿Cuál es el mejor bloque de transmisión que debe insertarse en el sistemas de manera que las futuras operaciones del mismo, funciones del despacho de carga, no se vean limitadas por falta de capacidad de transmisión?.

Objetivo

El objetivo del modelo que se presenta en éste trabajo, es el de minimizar los cos-

tos de instalación de los elementos de la red de transmisión, asociados con la expansión del sistemas para año horizonte determinado, cuando se desea expandir un sistema de servicio eléctrico a mínimo costo satisfaciendo al mismo tiempo los requerimientos de los usuarios.

Para una carga y una estructura de generación dadas, se requiere identificar aquellos corredores en los cuales se deben construir nuevas líneas de transmisión y determinar al mismo tiempo, el número de refuerzos requeridos.

Descripción del modelo matemático

Considérese una red definida mediante los siguientes conjuntos y variables:

N : Conjuntos de nodos existentes en la red actual.

W : Conjuntos de nuevos nodos con posibilidad de ser incorporados al sistema.

R : Conjunto de corredores que se pudieran expandir, o establecer, usando nodos de la red actual.

T : Conjunto de nuevos corredores que se pudieran establecer entre nodos de la red actual y nuevos nodos.

S_n : Conjunto de nodos de la red actual que mantienen alguna conexión con el nodo n . ($n \in N$).

L_r : Máximo número de líneas que pueden construirse en el corredor r . ($r \in R$).

L_t : Máximo número de líneas que pueden construirse en el corredor t . ($t \in T$).

$L_{k,r}$: Variable entera (0,1) = 1 si k líneas son suficientes en el corredor r . = 0 en caso contrario.

$L_{k,t}$: Variable entera (0,1) que define el número de líneas requeridas en el corredor tipo t . = 1 si k líneas son suficientes en corredor t . = 0 en caso contrario.

$L_{r,0}$ = 1 si para la solución, el corredor r no requiere modificación. = 0 en caso contrario.

Utilizando éstas variables se plantea un modelo lineal que formulado como un problema de programación matemática, persigue la minimización de una función objetivo que representa el costo de las instalaciones de transmisión requeridas para resolver la sobrecarga del sistema, sometida al siguiente conjunto de restricciones:

a) Balance de potencia en los nodos.

b) Restricciones de capacidad de transmisión de los elementos existentes en el sistema.

c) Balance Generación-Carga en la red.

d) Control del límite de capacidad por el corredor.

e) Cálculo y control del flujo de potencia por las líneas.

f) Restricciones de ángulos de potencia entre nodos.

g) Identificación del número de refuerzos por corredor expandible.

A continuación se presenta cada una de estas restricciones :

a) Balance de potencia en los nodos:

Usando la versión expandida de la aproximación DC al problema del flujo de carga se obtiene la siguiente ecuación para cualquier nodo n de la red existente. (n ∈ N).

$$\begin{aligned}
 & -\sum_s (B_{sn})\theta_n + \sum_s (B_{sn} \theta_s) + \\
 & \sum_{un} \sum_k B_{k-r} (Y_{nk} - Y_{nu}) + \\
 & \sum_u B_{r_0} (Y_{nu} - Y_{nuo}) + \\
 & \sum_{un} \sum_k B_{k-t} (Y_{nk} - Y_{nw}) + \\
 P_{g_n} = P_{l_n} & \qquad (1) \\
 & \begin{aligned}
 & s \in S_n \\
 & w \in W \\
 & n \in N \\
 & r \in R \\
 & t \in T
 \end{aligned}
 \end{aligned}$$

B_{sn}= Susceptancia (1/X_{sn}) de las líneas de transmisión existentes en el corredor definido entre los nodos s y n.

θ_n= Ángulo de potencia del nodo n.

B_{k-r}= Susceptancia de k líneas de transmisión en el corredor r, definidos entre los nodos u y n.

B_{k-t}= Susceptancia de k líneas de transmisión en el corredor t, definido entre los nodos w y n.

Y_{nk} (Y_{nu})= Diferencia de ángulos de potencia entre los nodos u y n cuando k líneas de transmisión son requeridas en el corredor r y cuando el flujo de potencia sea en dirección n a u. (cuando el flujo de potencia sea en dirección n a u, el modelo usará la variable Y_{nk}).

Y_{nk}(Y_{nw})= Sigue exactamente la descripción dada a la variable Y_{nk}, sólo que ahora se refiere a un corredor tipo t.

Y_{nuo}(Y_{nuo})= Diferencia de ángulos de potencia entre las barras u y n cuando el corredor definido entre éstas barras, no se altera durante la solución. (Si el flujo de potencia en este corredor fuese en la dirección n a u, el modelo usará la variable Y_{nuo}).

B_{r₀}= Susceptancia de las líneas existentes en el corredor r con terminales u y n.

P_{g_n}= Potencia activa despachada en la barra n.

P_{l_n}= Demanda en MW estimada para la barra n.

Los dos primeros términos del lado izquierdo de la ecuación (1), son producto de la modelación lineal DC del flujo de carga. Los términos siguientes son resultado de la expansión al modelo lineal que se presenta. El tercer término considera el flujo de potencia direccional en todos los corredores tipo r nuevos o expandidos que terminan en el nodo n. El cuarto término se introduce para considerar el flujo de potencia en las líneas de transmisión de aquellos corredores expandibles, que terminan en el nodo n pero que para la solución no requieren ser modificados. El quinto término considera el flujo de potencia direccional en todos los nuevos corredores tipo t que terminan en el nodo n.

Para los nuevos nodos a incorporar, es decir nodos del conjunto W, sólo se requieren el quinto y sexto término de la izquierda y el término de la derecha. La relación queda como:

$$\sum_t \sum_k B_{k-t} (Y_{nw} - Y_{nw}) + P_{g_n} = P_{l_n} \qquad (2)$$

b) Restricciones de capacidad de transmisión de los elementos existentes en el sistema.

El flujo de potencia en las líneas de los corredores no modificados, es estimado usando la siguiente desigualdad.

$$[G] [\theta_n] \leq [H] \qquad (3)$$

donde [G] es la matriz de transmisión. En esta matriz cualquier vector fila g_i, es un vector cero con excepción de los elementos i y j en cuyos lugares contiene los valores de B_{ij} y B_{ji} respectivamente. [θ] es el vector de ángulos de potencia de los nodos de la red existente y [H] es el vector capacidad instalada en los corredores.

c) Balance Generación-Carga en la red.

Este modelo lineal donde las pérdidas no son consideradas, la generación total en MW tiene que ser igual a la carga activa del sistema. La siguiente ecuación considera éste aspecto :

$$\sum_n P_{g_n} + \sum_w P_{g_w} = \sum_n P_{l_n} + \sum_w P_{l_w} \qquad (4)$$

En los casos de predespacho, ésta relación es innecesaria debido a que el predespacho satisface automáticamente esta igualdad.

d) Control del límite de capacidad por corredor.

Bajo cualquier condición, la contribución a la solución final de cada corredor considerado, debe cumplir con las restricciones de capacidad del conjunto de líneas que allí se instalen, esta restricción se establece de la siguiente forma:

1) Para corredores conformados en la red existente, corredores tipo r.

$$Br_c (Yuno - Ynuo) +$$

$$\sum_k B_{k-r} (Yunk - Ynuk) \leq$$

$$Cap_{r_c} \cdot Lr_c + \sum_k Cap_{k-r} \cdot L_{k-r} \quad (5)$$

2) Para corredores tipo t,

$$\sum_k B_{k-t} (Ywnk - Ynwk) \leq$$

$$\sum_k Cap_{k-t} \cdot L_{k-t} \quad (6)$$

Cap_{k-r} , Cap_{k-t} : Capacidad de K líneas de transmisión en corredores tipo r y tipo t respectivamente.

Cap_{r_c} : Capacidad total de los circuitos existentes en un corredor tipo r.

e) Cálculo y control del flujo de potencia por las líneas.

Cualquiera sea la solución, se requiere conocer la calidad de potencia que lleva cada corredor una vez reforzada la red. Las siguientes restricciones de igualdad sirven para éste propósito.

1) Corredor tipo r

$$\sum_k B_{k-r} (Yunk - Ynwk) +$$

$$Br_c (Yuno - Ynuo) = P_r \quad (7)$$

2) Corredores tipo t

$$\sum_k B_{k-t} (Ywnk - Ynwk) = P_t \quad (8)$$

Nótese que las variables P_r y P_t representan flujo de potencia total en los corredores, y como la potencia puede fluir en cualquier dirección, en el modelo las variables P_r y P_t deben declararse variables libres.

Para cada corredor a lo sumo, habrá una alternativa en la solución final óptima. Cualquiera sea esa alternativa, se requiere que la potencia que fluye por el corredor esté dentro del rango de capacidad de la alternativa resuelta. Pongamos por caso que en la solución final, la alternativa 2 del corredor 7, aparezca seleccionada ($L_{7,2}=1$, debe cumplirse entonces que el flujo de potencia por este corredor, no debe superar la capacidad de transmisión de las dos líneas. En la formulación entera esta condición puede modelarse definiendo para todos los corredores la desigualdad:

$$\text{FLUJO} - \text{CAPACIDAD} \leq 0$$

En términos de las variables definidas para el modelo esta desigualdad se puede representar de la siguiente forma:

$$B_{k-r} \cdot Yunk - Cap_{k-r} \cdot L_{k-r} \leq 0 \quad (9.a)$$

$$B_{k-r} \cdot Ynuk - Cap_{k-r} \cdot L_{k-r} \leq 0 \quad (9.b)$$

$$Br_c \cdot Yuno - Cap_{r_c} \cdot Lr_c \leq 0 \quad (9.c)$$

$$Br_c \cdot Ynuo - Cap_{r_c} \cdot Lr_c \leq 0 \quad (9.d)$$

$$B_{k-t} \cdot Ywnk - Cap_{k-t} \cdot L_{k-t} \leq 0 \quad (9.e)$$

$$B_{k-t} \cdot Ynwk - Cap_{k-t} \cdot L_{k-t} \leq 0 \quad (9.f)$$

Este conjunto de restricciones satisface también las condiciones de que una variable lógica L_{k-r} ó L_{k-t} es igual a 1, solo cuando el correspondiente término $Yunk$ o $Ywnk$ es mayor que cero. Por ejemplo, si en la relación de desigualdad (9.b), el elemento $Ynuk \geq 0$, implica que para la desigualdad sea satisfecha, el elemento L_{k-r} tiene que tomar el valor de 1.

Por otro lado, se puede observar que en el conjunto de restricciones (9), cabría la posibilidad de que siendo una variable $Ynuk$ por ejemplo igual a cero, la correspondiente variable L_{k-r} pudiera tomar valores de 0 ó 1 y satisface la respectiva desigualdad. Pongamos por caso la desigualdad (9.e), si $Ywnk = 0$, L_{k-t} puede ser 0 ó 1. Si bajo esta condición $L_{k-t} = 1$ indicaría que k líneas deberían construirse en el corredor t pero sin flujo de potencia a través de ellas. De ser así, fallaría el modelo. Sin embargo esta posibilidad no ocurrirá nunca, porque insertar líneas en un corredor tiene un elevado costo en la función objetivo; y como el propósito es minimizar costos, el proceso garantiza que cuando quiera que una variable Y sea cero, su correspondiente variable entera L , será forzada a ser cero también.

f) Restricciones de ángulos de potencia entre nodos.

El valor de la variable Y para la alternativa seleccionada en cada corredor, determina la relación entre los ángulos de potencia de los nodos entre los cuales está conformado el corredor. Para obtener esta relación explícitamente se hace necesario añadir otro conjunto de restricciones con las siguientes características:

1) Para un nuevo corredor conformado bien entre nodos de la red actual o entre un nodo nuevo y un nodo existente, se puede argumentar lo siguiente:

Asumamos un corredor general con terminales u-n. Si ese corredor va a entrar en la solución, sabemos que las variables lógicas asociadas a él, sumarán 1, en cuyo caso la relación entre los ángulos de ese par de nodos se puede determinar mediante la ecuación:

$$\theta_u - \theta_n = \sum_k (Yunk - Ynuk) \quad (10)$$

pero esta relación no es válida en general por que si el corredor u - n no es incluido en la solución final, la relación (10) resulta en:

$$\theta_u = \theta_n$$

lo cual no tiene sentido para los nodos entre los cuales no existe conexión, por tanto, es necesario establecer un procedimiento que garantice que la igualdad (10), se cumple solamente cuando el corredor es usado.

La exclusividad de la solución garantiza que para cada corredor tan sólo una de las

variables L , asociadas a él, es igual a 1 si el corredor es usado, de lo contrario, todas las variables L de ese corredor serán cero, es decir para un corredor que se usa en la solución se cumple que:

$$\sum_k L_{k-r} = 1$$

El siguiente procedimiento resuelve esta dificultad:

Consideremos una constante M , la cual puede tener una cualidad de valor límite superior para la diferencia entre los ángulos de potencia de cualquier par de nodos de la red.

Transformemos la ecuación (10) en dos desigualdades de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \theta_u - \theta_n - \sum_k (Y_{nk} - Y_{uk}) + \\ M \left(\sum_k L_{k-r} \right) \leq M \end{aligned} \quad (11.a)$$

$$\begin{aligned} \theta_n - \theta_u + \sum_k (Y_{nk} - Y_{uk}) + \\ M \left(\sum_k L_{k-r} \right) \leq M \end{aligned} \quad (11.b)$$

Resulta evidente que si $\sum_k L_{k-r} = 1$, estas desigualdades se convierten en la ecuación (10) respectivamente. Y por otro lado si $L_{k-r} = 0$ ambas desigualdades se convierten en:

$$\begin{aligned} \theta_u - \theta_n \leq M \\ \theta_n - \theta_u \leq M \end{aligned}$$

$$\text{o en } -M \leq \theta_u - \theta_n \leq M \quad (12)$$

lo cual indica que las variables θ_u y θ_n , deben ser declaradas variables libres.

2) Para el caso de corredores existentes con capacidad de expansión, este procedimiento no es necesario debido a que las líneas de transmisión originales de este corredor, permanecerán en la solución, aunque el corredor no se expanda, de tal manera que este tipo de corredor está garantizado que una de sus variables lógicas L , será igual a 1. Para este tipo de corredor, la ecuación (10) debe reestructurarse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \theta_u - \theta_n - \sum_k (Y_{nk} - Y_{uk}) - Y_{no} + \\ Y_{nu} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

g) Identificación del número de refuerzos por corredor expandido

Como se mencionó anteriormente, en cada nuevo corredor a lo sumo una alternativa estará presente en la solución final. Por ejemplo si en un corredor No. 20 de una red son necesaria 3 líneas de transmisión, la variable lógica $L_{j,20}$ relativa a ese corredor es igual a 1 y las restantes variables lógicas que definen posibilidades en ese corredor son cero. En general para un corredor nuevo tipo t , de cumplirse:

$$\sum_k L_{k-t} \leq 1 \quad (14)$$

Similarmente para corredores existentes con capacidad de expansión se cumple:

$$L_{r0} + \sum_k L_{k-r} \leq 1 \quad (15)$$

Función Objetivo

La función objetivo a minimizar tiene la forma siguiente:

$$Z = \sum_k \sum_r C^k \cdot L_{k-r} +$$

$$\sum_k \sum_t C^k \cdot L_{k-t} \quad (16)$$

Ejemplo de aplicación

A manera de ilustración, el modelo descrito se aplicó al ejemplo tratado en el artículo de Len L. Garver, [8]. Este es un sistema original de 5 nodos donde dos de ellos poseen generación. Para el aspecto de planificación se asume que la carga del sistema se cuadruplica para un año horizonte por lo que se hace necesario establecer un nuevo nodo de generación. El sistema que se desea planificar se ilustra en la figura 1. Allí se muestra el nuevo nodo que se va a conectar a la red (nodo 6), y en trazos punteados se representan los corredores factibles para realizar la expansión.

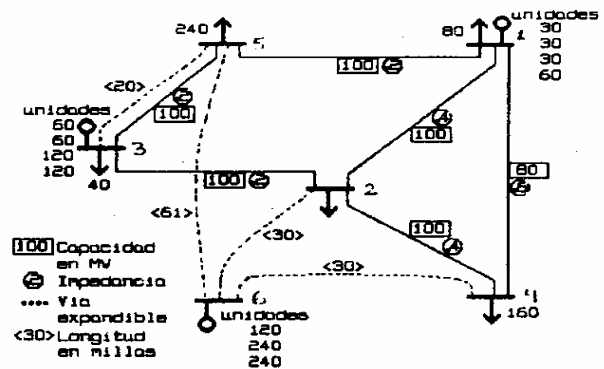


Figura 1 Sistema eléctrico a planificar

Los datos de barras, líneas y corredores para el sistema del ejemplo, se recogen en la tabla I y II respectivamente.

Para éste ejemplo se asume que la generación de la barra 1 está predespachada en 50 MW, la de la barra 3 en 165 MW y en el nodo 6 en 545 MW.

Identificación de conjuntos y variables para el ejemplo.

Utilizando los datos presentados en las tablas I y II, los conjuntos definidos para esta red estarían dados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} N = [1, 2, 3, 4, 5] \text{ de la tabla I} \\ W = [6] \text{ de la tabla I} \end{aligned}$$

**TABLA I
DATOS DE BARRAS**

Barras	Despacho de carga en MW	Carga en MW	Potencia neta en MW
1 (existente)	50	80	-30
2 (existente)	0	240	-240
3 (existente)	165	40	125
4 (existente)	0	160	-160
5 (existente)	0	240	-240
6 (nueva)	545	0	545

**TABLA II
DATOS DE LINEAS Y CORREDORES**

Línea o corredor	termi- nales	X (p.u.)	Capacidad MW Línea	Long. Kms.	corredor nuevo o ampliable	Costo total de instala- ción, 1 Lí- nea/corredor en (p.u).
1	1 - 2	0.4	100	40	no	----
2	1 - 4	0.6	80	60	no	----
3	1 - 5	0.2	100	20	no	----
4	2 - 3	0.2	100	20	no	----
5	2 - 4	0.4	100	40	no	----
6	3 - 5	0.2	100	20	sí	100
7	6 - 2	-	-	30	sí	100
8	6 - 4	-	-	30	sí	100
9	6 - 5	-	-	61	sí	305

Figura 2.- Programa de control en MPSCL estructurado para resolver el ejemplo.

```

1      1MPSX/37OPLG      MPSCL Compilation
2      0                0001      PROGRAM
3      0                0002      INITIALZ
4      0                0205      MOVE (XDATA, `EJEMPLO`)
5      0                0206      MOVE (XPBNAME, `MPSXLP`)
6      0                0207      CONVERT
7      0                0208      DEBOUT
8      0                0209      SETUP(`BOUND`..`BND1`..`RANGE`..`RAN1`)
9      0                0210      MOVE [XOBJ, `COST`]
10     0                0211      MOVE[XRHS, `RHS`]
11     0                0212      CRASH
13     0                0214      XMXFNLOG=P
14     0                0215      OPTIMIX
15     0                0240      EXIT
16     0                0241      PEND

```

TABLA 3.- Resumen de soluciones factibles al ejemplo, obtenidas mediante el procedimiento OPTIMIX del programa control

NODE	20	22	29	34	36
FUNTIONAL	1018.0500	018.0500	083.0500	8330500	733.0500
ESTIMATION	INTEGER	INTEGER	INTEGER	INTEGER	INTEGER
112-L230-623	1.0000	1.0000	.	.	.
113-L230-624	.	.	.	1.0000	1.0000
114-L230-625	.	.	1.0000	.	.
116-L230-642	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
121-L230-351	.	1.0000	1.0000	.	1.0000
122-L230-352	1.0000	.	.	1.0000	.
123-L230-651	1.0000	1.0000	.	.	.

R=[6] de la tabla II
 T=[7,8,9] de la tabla II

Para los conjuntos S_n , podemos identificar de la tabla I, las siguientes estructuras:

$S_1 = [2, 4, 5]$
 $S_2 = [1, 3, 4]$
 $S_3 = [2]$
 $S_4 = [1, 2]$
 $S_5 = [1]$
 $S_6 = [\phi]$

Asumamos los siguiente valores para las cantidades L_i y L_j .

$L_6 = 2$: Máximo dos líneas de transmisión pueden ser añadidas al corredor 6 (nodos terminales 3 y 5).

$L_7 = 5$: Corredor tipo t donde un máximo de cinco líneas de transmisión pueden ser construidas (nodos terminales 6 y 2)

$L_8 = 5$: Corredor tipo t donde un máximo de cinco líneas de transmisión pueden ser construidas. (nodos terminales 6 y 4)

$L_9 = 3$: Máximo tres líneas pueden construirse en el corredor 9 (nodos 6 y 4)

Asumamos igualmente que la máxima capacidad de transmisión de una línea nueva en cualquier corredor, es de 100 MW (1.0 p.u.).

De acuerdo al modelo se requiere definir las siguientes variables lógicas para el ejemplo:

Corr.6 Corr. 7 Corr.8 Corr.9

L_{6_0}	L_{1-7}	L_{1-8}	L_{1-9}
L_{1-6}	L_{2-7}	L_{2-8}	L_{2-9}
L_{2-6}	L_{3-7}	L_{3-8}	L_{3-9}
	L_{4-7}	L_{4-8}	
	L_{5-7}	L_{5-8}	

La interpretación de éstas variables sería como sigue: por ejemplo para el corredor 6;

$L_{6_0} = 1$ si este corredor no requiere ser modificado.

= 0 en caso contrario.

$L_{1-6} = 1$ si sólo una línea es necesario añadir en el corredor 6.

$L_{2-6} = 1$ si dos líneas son necesarias en este corredor.

= 0 en caso contrario

y así sucesivamente para los corredores 7, 8 y 9.

Repetimos que para cada corredor a lo sumo una sola variable lógica va a ser incluida en la solución final.

Herramienta de computación

JIEE, Vol. 13, 1992

Para resolver el modelo aplicando el ejemplo en cuestión se utilizó un paquete de computación codificado, desarrollado por la IBM, (MPSX|370), para la solución de problemas de programación lineal, programación mixta, programación entera y programación separable (referencias 12 y 13).

Programa de control

La figura 2 muestra el programa de control estructurado para resolver el ejemplo de la figura 1.

Soluciones alternativas

En la TABLA 3, se presenta un resumen de las soluciones factibles al ejemplo, obtenidas mediante el procedimiento OPTIMIX del programa de control. En esa tabla se muestran cuatro bloques de información: **NODE** es un código del paquete que indica el vértice generado durante el proceso de solución mediante la técnica de "rama y límite", en el cual se consiguió una solución factible. **FUNCTIONAL** contiene el costo de la solución encontrada en el nodo correspondiente. **ESTIMATION**, indica la característica de la solución (continua, entera, etc.).

El último bloque lista las variables enteras que participan en cualquiera de las soluciones. Por ejemplo, las variables L230-623, L230-642, L230-352 y L 230-651, participan en la solución encontrada en el nodo 20. El costo total de esa solución es de 1.038.05 unidades. Nótese que si una variable entera del problema no participa en ninguna solución, ella no es incluida en éste bloque.

Para este momento, el lector ya habrá notado que ocurrió un pequeño cambio en la designación de las variables lógicas del ejemplo. En la tabla 3, las variables se designan indicando el nivel de tensión del corredor, los nodos terminales del mismo, y el número de líneas que representa la variable lógica en particular. Tomemos por caso la variable L230-623 de la tabla 3. Esta indica la posibilidad de tres líneas en el corredor cuyos nodos terminales son el 6 y el 2, a 230 Kv. En resumen esta variable lógica es idéntica a la variable L_{3-7} definida anteriormente.

La mejor solución encontrada para el ejemplo, está dado en la última columna de la tabla 3. Fue encontrada en el vértice 36, a un costo de 733.05 unidades. Las variables enteras que aparecen en la solución son: L230-624 = 1, L230-642 = 1 y L230-351 = 1, indicando que se requieren 4 líneas en el corredor tendido entre los nodos 6 y 2, 2 líneas en el corredor tendido entre los nodos 6 y 4, y una línea extra en el corredor tendido entre los nodos 3 y 5.

La solución óptima se muestra en la figura 3. Compárese ésta solución en una iteración con la obtenida por Garver (referencia*), mediante un proceso heurístico de estimación lineal, el cual requiere tantas iteraciones como líneas sean necesarias.

La tabla 3 presenta además 5 soluciones alternativas extras de costo comparable a la solución óptima. Esta es posiblemente

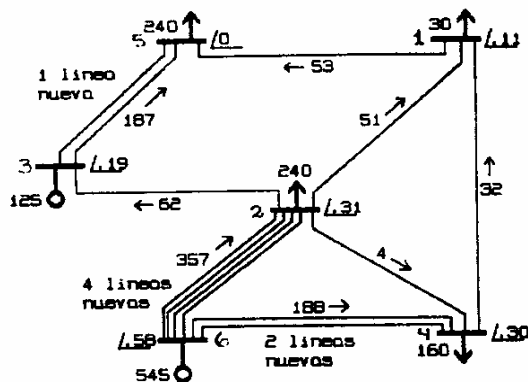


Figura 3 Solución más económica obtenida para el sistema ejemplo.

la mayor bondad que ofrece el paquete MPSX|370, puesto que soluciones alternativas constituyen una información valiosa para los planificadores de redes de transmisión de potencia al momento de la toma de decisiones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En éste trabajo se presenta un modelo matemático de programación mixta concebido para diseñar una red conceptual de transmisión de potencia eléctrica, con miras hacia la planificación óptima a largo plazo de los sistemas de potencia. El modelo se describe como una extensión a la aproximación DC de las ecuaciones de flujo de carga. Se aplica la solución de un sistema ejemplo de planificación a largo plazo.

Las características más sobresalientes de éste modelo se puede resumir en la siguiente forma:

- 1) Identifica en una sola iteración, el conjunto de refuerzos más económicos que deben incluirse en un sistema de transmisión para satisfacer una carga (MW) estimada a largo plazo, dada una condición de despacho en la generación.
- 2) Utiliza variables lógicas de decisión para identificar el paquete de refuerzos de transmisión requerido.
- 3) Identifica la localización en la red de los nuevos circuitos que deben incorporarse.
- 4) Es adecuado para el diseño de redes de transmisión con varios niveles de tensión.
- 5) La característica clave es la combinación de un modelo lineal de la red de transmisión con una estructura de variables de decisión lógicas.
- 6) El uso del paquete de computación estándar MPSX|370 resulta en una combinación muy poderosa y por demás conveniente. Además de producir la solución más económica, provee otras soluciones alternativas factibles, las cuales son de mucha ayuda al planificador.

En este estudio no se consideran pérdidas ni análisis de contingencias, sin embargo el autor considera que éstos elementos pueden incluirse en el modelo sin mayores inconvenientes.

Referencias :

- 1 Ronald M. Sawey and C. Dale zinn, "A mathematical model for long-range expansion planning of generation and transmission in electric utility system", IEEE Transactions on power apparatus and system, Vol. Pas-96, No.2 pp. 657-666, March/April, 1977
- 2 Knight, U. g. W., "The logical design of electrical network using linear programming methods". Proc. IEEE 1. 960, Vol 1074 A, pp. 306-314
- 3 Grinsdale, R. L., and Sinclao, P. H., "The desing of housing-state distribution systems using a digital computer", Proc. IEEE, 1960, Vol. 107A, pp.295-305
- 4 Busstall, R. M., "Computer desing of electricity supply network using a heuristic method", Computing Journal, 1966, No.9, pp. 263-274.
- 5 Boardman, J.t., and Hogg, B. W., "A digital computer method for the optimal synthesis of eletricity supply networks". Presented at the fifth Universities Power Engineering Conference, Swasea, Jan. 1970.
- 6 Adam, R.N. and Laughton, M. A., "On Line interactive computing for electrical power system planning and desing: IEEE, Conf. publ. 86, 1972, pp. 51-56.
- 7 Boardman, J.T., and hogg, r.W., "Computer methods for desing of electricity supply networks", IEE, 1972 119, (7), pp. 852-856.
- 8 Garver, l. l., "transmission networkk estimation using linear programming", IEEE transaction on power apparatus and systems, VOL. Pas-89, No. 7, pp. 1688-1697, september/october 1970.
- 9 Kaltenbatch, J.J., Peshon, J. and Gehrig, "A mathematical optimization technique for the expansion of electric transmission systems"., ibid No. 1, pp. 113-119 January 1970.
- 10 Adams, R. N.m and Laughton, M. A., "Optimal Planning of power networks using Mixed-Integer Programming", prt 1 Vol 121, No.2 pp.139-147.
- 11 Dodu, j. c. and Merlin, A., An application of linear programming to the planning of large scale power transmission systems", the mexico program, PSCC, 1975, paper 2.2/9.
- 12 IBM, "Mathematical programming system extended/370, control languages", 5740-XM3 (OS/VS), 5746/XM2 (DOS/VS) SH19-1094-2, File No. S370-82, December 1972.
- 13 IBM, Mathematical programming System

extended/370 programreference manual
" Program No. 5740-XM3 (OS/VS)
5746-XM2(DOS/VS), SH19-1095-3, file
No. S370-82, Dec.

Curriculum

Ramón V. Villasana Soto
Ingeniero Electricista, Universidad de
Oriente, 1971. Maestría en Ciencias, Uni-
versity of Manchester, Institute of Scien-
ce and Technology, (UMIST), Inglaterra
1973.
Doctorado en Ciencia (PhD), Rensselaer
Polytechnic Institute,
(R.P.I), Estados Unidos. 1.984.
Actualmente Profesor del Departamento de
Conversión y Transporte de Energía de la
Universidad Simón
Bolívar.

Julio C. Montenegro L.
Ingeniero Electricista, Universidad Simón
Bolívar, 1989. Maestría en Ciencias, Uni-
versidad Simón Bolívar, 1991. Actualmente
Profesor del Departamento de Tecnología
Industrial del Núcleo de Litoral de la
Universidad Simón Bolívar.