

SELECCION AUTOMATICA DE CASOS DE FALLAS  
EN LAS TAREAS DE VIGILANCIA DE SISTEMAS ELECTRICOS

Ricardo NOZICA  
Jorge F. RIVERA

Instituto de Energía Eléctrica  
Universidad Nacional de San Juan  
San Juan - Argentina

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de investigaciones referidas a la modelación matemática y al desarrollo de algoritmos y programas de cálculo digital para efectuar la selección automática de casos de fallas que mas perjudican al sistema electrico.

El método esta basado en la predicción del indice de performance para cada salida de línea y el rankeado de acuerdo con la severidad de los efectos que provoca, dado por estos indices.

ABSTRACT

In this paper, the results of the investigation refered to the mathematical modelation to exert a method for automatic contingency selection are presented together with the algorithm and digital calculation programs developed with that purpose.

The method is based on the prediction of the value of a system wide performance index for each transmission line outage and the subsequent ranking of the severity of the outages according to the predicted values of the performance index.

## 1. INTRODUCCION

Los centros de despacho de cargas de las empresas de suministro de energía eléctrica cumplen las funciones de vigilancia y mando del sistema de transmisión y mando de la operación del sistema de centrales eléctricas. La vigilancia de la red de transmisión abarca en si tres tareas, determinación y análisis momentáneo del estado del sistema, análisis de la confiabilidad y elección y ejecución de medidas correctivas para mejorar la confiabilidad del sistema. Como primera tarea, apartir de los valores de medición y con ayuda de procedimientos de cálculo para reconocimiento de topología y estimación de estado se determina una base de datos que es el punto de partida de los siguientes estudios. La segunda tarea consiste en determinar la confiabilidad del sistema en base a criterios de probabilidades de ocurrencia de fallas, necesitando la disponibilidad de una lista de fallas críticas para el sistema. A través de la simulación de fallas críticas se analizan los estados cuasi-estacionarios, a los cuales llega el sistema despues de producida la falla, para comprobar si el estado actual del sistema puede ser calificado como momentaneamente confiable. Un sistema vigilado es calificado como confiable cuando aún bajo la ocurrencia de fallas críticas previamente determinadas, tiene la capacidad de posibilitar la operación estacionaria con suficiente calidad y sin interrupciones de suministro de energía. Si despues de ejecutadas las dos primeras tareas de vigilancia se detecta que el sistema no es momentaneamente confiable o bien existen restricciones de operación de la red no satisfechas, surge la necesidad de efectuar las tercera tarea, es decir, la tarea de eliminación de los estados de operación inadmisibles a través de medidas correctivas. La función procedentemente descrita referida a vigilancia de la red requiere de apoyo de modernos métodos de la matemática aplicada y de computadoras digitales ya que el volumen de información y la cantidad de restricciones a satisfacer son de tal magnitud que la aplicación de solo criterios de ingeniería le sería insuficiente al operador para resolver el problema.

El procedimiento tradicional para las tareas de vigilancia en línea, ha sido mediante la consideración de un número de casos de fallas definido por el despachante, cuando de hecho pueden no ser los casos más significativos, una selección a priori tiene ciertamente obvias desventajas. Este hecho, ha mostrado la necesidad de buscar en forma sistemática caminos para la selección automática de los casos de fallas mas importantes. El objetivo es reducir el número de casos potenciales bajo consideración y al mismo tiempo determinar el ranking de estos casos de acuerdo con la severidad de los efectos que provoca. El algoritmo utilizado es el de índices de perfomance (PI). El PI es una función escalar de las

variables de la red, elegida para describir algunas características de el estado de operación de la red. La función del algoritmo es calcular desde el caso base los índices rápidamente para cada uno de los cambios que se pueden producir en la red. Los casos con mayor índice son considerados como los más severos, y por lo tanto los primeros de la lista y así sucesivamente, es decir el algoritmo elige de una lista de casos potenciales, un conjunto reducido para realizar la tarea de vigilancia de la red.

Se presenta en este trabajo el método matemático, algoritmos y programas de cálculo digital que resuelven este problema como así mismo un análisis de los ahorros de tiempo de cálculo y las ventajas que el algoritmo de selección de fallas introduce a las tareas de vigilancia del sistema de suministro de energía eléctrica.

## 2. FORMULACION MATEMATICA

### 2.1. ANALISIS DE LAS ECUACIONES DE SIMULACION DE CONTINGENCIAS

Para que en un sistema de generación y transmisión de energía eléctrica pueda calcularse el estado de funcionamiento, tensiones complejas en todos los nodos (módulo de tensión,  $V$ , y ángulo de fase,  $\theta$ ), debe conocerse la topología del mismo, es decir la cantidad de ramas o líneas ( $m$ ), la cantidad de nodos ( $n$ ) y su forma de vincularse, los datos de los parametros de las líneas y de la potencia aparente en cada nodo del sistema eléctrico.

El conocimiento de las tensiones nodales complejas ( $V, \theta$ ) a través de la resolución iterativa del sistema de ecuaciones (1) permite calcular otras magnitudes eléctricas de importancia de la red, consecuentemente efectuar el control de valores límites.

El sistema de ecuaciones que resuelve el problema de flujo de potencia por el método de Newton-Raphson es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde  $[J]$  es la matriz jacobiana dependiente de los valores de los parametros de las líneas y de los valores de  $V$  y  $\theta$  actualizados en cada iteración, es decir que la matriz  $[J]$  cambia en cada una de las iteraciones a lo largo de su ciclo de ejecución, con los lógicos inconvenientes en tiempo de tener que recalcularse. Siendo  $J_{ik}$  igual a cero si no existe línea que vincule el nodo  $i$  con el nodo  $k$ .

El sistema de ecuaciones (1) para resolverlo en forma rápida se utiliza el método de Newton Raphon en la version desacoplada [1], que divide a (1) en dos sistemas de ecuaciones (2) y (3), donde la matriz de suceptancia [B] permanece constante a través del ciclo iterativo, por lo tanto se factoriza una sola vez, este método si bien es más rápido es aproximado, pero presenta una muy buena precisión en redes de alta tensión > 110 Kv.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B + \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V \end{bmatrix} \quad (3)$$

La forma más general de representar el modelo del problema de análisis de contingencia es a través de la indicación de cambio en la matriz [J]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J + \Delta J \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde  $\Delta J$  son las variaciones en los elementos de la matriz jacobiana directamente afectados por la salida de un elemento de transmisión.

$\Delta P$  y  $\Delta Q$  son las variaciones de las inyecciones de potencias activas y reactivas.

$\Delta V$  y  $\Delta \theta$  son las correcciones en el módulo de tensión y en ángulo de fase de la tensión.

De igual manera a través del método [1] se pueden representar el sistema de ecuaciones (4) de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B + \Delta B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B + \Delta B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V \end{bmatrix} \quad (6)$$

El sistema de ecuaciones (5-6) se resuelve y se actualiza según (7)

$$\begin{bmatrix} \theta^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \theta \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta V \end{bmatrix} \quad (7)$$

para cada uno de los distintos  $\Delta B$ , que corresponden a cada uno de los casos de contingencia en línea que se pretenden calcular. Por lo tanto un  $\Delta B^1$  (contingencia en la línea 1) da a lugar un  $\Delta \theta^1$  que hace cambiar el  $\theta^0$  (calculado en el caso base), en  $\theta^1$ , la línea 2 producirá un  $\Delta B^2$  en el sistema de ecuaciones (5-6) y dará a lugar un  $\Delta \theta^2$ , quedando  $\theta^2 = \theta^0 + \Delta \theta^2$  de igual manera se hace con los V, y de esta manera se va obteniendo el estado del sistema ante cada una de las contingencias. Una vez obtenido el estado del sistema ante cada salida de las ramas i,  $[V_i]$  y  $[\theta_i]$ , con estos valores se calculan los flujos de potencia activa y aparente comparándolos con los máximos admisibles, se establece así cuales líneas ante esa contingencia violan sus límites, así sucesivamente se realiza una verificación con todas las contingencias en líneas, verificándose que muchas de ellas no generan violaciones de los límites, o conducen a pequeños apartamientos de los límites, que a su vez en otro caso de simulación de contingencia es más severa. Por lo tanto estamos calculando contingencias entre el 50 y 90% que no son necesarias, es decir con solo simular algunas contingencias elegidas del conjunto total sería suficiente para resolver el problema, es por ello que se pretende desde el cálculo del estado del sistema en el caso base, determinar cuales contingencias en líneas hay que considerar.

## 2.2. CALCULO DE LA CORRECCIÓN $Q_i$ POR EL METODO DE COMPENSACIÓN

El ángulo de fase de la tensión  $O_i$  después de la contingencia en la rama i puede expresarse:

$$\theta_i = \theta^0 + \Delta \theta_i$$

Donde  $\Delta \theta_i$  es la corrección del ángulo de fase obtenido de la solución del sistema de ecuaciones (5-6) cuando se produce una modificación  $\Delta B$ . Ese valor de  $\Delta \theta_i$ , lo vamos a obtener en base al método de compensación [2]:

Dada la ecuación lineal del tipo.

$$[Y + \Delta Y] \cdot [V] = [I] \quad (8)$$

donde Y es una matriz rala de orden (n x n), Y es una modificación que indica la salida de un elemento de transmisión de la red, el objetivo es resolver la ecuación (8) lo más eficientemente.

La forma como es expresado  $\Delta Y$  es fundamental para el desarrollo de las formulas de compensación.

Reemplazamos en la ecuación (8)  $\Delta Y$

$$[Y + M \cdot Dy \cdot M^t] \cdot [V] = [I] \quad (9)$$



obtiene la modificación  $\Delta V$  en función de los valores calculados inicialmente

### 2.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE COMPENSACIÓN AL PROBLEMA

Volviendo al sistema original

$$\theta_i = \theta^0 + \Delta\theta_i \quad (11)$$

y reemplazando el valor de  $\Delta\theta_i$  en el encontrado por el método de compensación

$$\Delta\theta = -B^{-1} \cdot M \cdot (\theta^0 + D_b \cdot M \cdot B^{-1} \cdot M) \cdot D_b \cdot M \cdot \theta$$

llamando

$$d = (\theta^0 + D_b \cdot [M \cdot B^{-1} \cdot M])$$

y como el flujo de potencia activa en forma aproximada se puede calcular como  $f = B_l \cdot (\theta_i - \theta_k)$  donde  $(\theta_i - \theta_k) = \theta$  y  $B_l$  es la susceptancia de la línea  $ik$  entonces podemos denominar el vector  $F$  de los flujos por las líneas

$$F = D_b \cdot M \cdot \theta$$

por lo tanto queda

$$\Delta\theta = B^{-1} \cdot M \cdot d \cdot F \quad (11')$$

Reemplazando el valor de  $\theta$  encontrado en base al método de compensación en la ecuación (11)

$$\theta_i = \theta^0 + \Delta\theta_i = \theta^0 + [B^{-1} \cdot M] \cdot d \cdot F$$

El flujo de potencia activa en cualquier línea es

$$f_i = f^0_i + \Delta f_i = f^0_i + b_i \cdot M_i \cdot \Delta\theta \quad (12)$$

reemplazando  $\Delta\theta$  por el de la ecuación (11')

$$f_i = f^0_i + b_i [M_i \cdot B^{-1} \cdot M] \cdot d \quad (13)$$

### 2.4 CALCULO DEL INDICE DE PERFORMANCE PI

El índice de performance es una función escalar de un estado de la red cuyo valor representa el grado de exceso de los límites cuando el sistema estaría operando ante una contingencia. Existen diferentes formulas para el cálculo de PI [4,5,6,7,8,9,10], la más comunmente usada es la siguiente:

$$PI^{\circ} = \sum_{i=1}^1 W_i \cdot f^{\circ} i / \bar{f} i^2 = \sum_{i=1}^1 a_i \cdot (f^{\circ} i)^2 \quad (14)$$

donde  $a_i = W_i / \bar{f} i^2$

Este valor de  $PI^{\circ}$ , considerado para el caso base, se hace grande cuando estan presentes sobrecargas y más pequeños cuando no existen sobrecargas en las líneas despues de la salida de un elemento de transmisión.

El valor de  $PI$  para los casos de contingencias es:

$$PI = \sum_{i=1}^1 a_i \cdot (f_i)^2 - \sum_{i \in B} a_i \cdot (f_i)^2 \quad (15)$$

donde  $B$  es el conjunto de las líneas que salen

Sustituyendo en la ecuación (15)  $f_i$  de la ecuación (13) en el sumando derecho, y siendo que los  $f_i^{\circ}$  son cero entoces ese sumando queda

$$\sum_{i \in B} a_i \cdot (f_i) = d \cdot Da \cdot d$$

Siendo  $Da$  una matriz (mxm) diagonal con los valores de  $a_i$ , luego si se reemplaza en el primer sumando la ecuación (12) se resuelve el binomio queda la siguiente expresión

$$PI = \sum a_i \cdot (f_i^{\circ} + b_i \cdot [M \cdot B \cdot M] \cdot d)^2 - d \cdot Da \cdot d$$

$$PI = \sum a_i \cdot (f_i^{\circ})^2 + \sum_{i=1}^1 a_i \cdot 2 \cdot f_i^{\circ} \cdot [M \cdot B \cdot M] \cdot d +$$

$$+ \sum_{i=1}^1 a_i \cdot b_i^2 \cdot [M \cdot B \cdot M]^2 - d \cdot Da \cdot d$$

quedando la formula final de cálculo de  $PI$

$$PI = PI^{\circ} + \bar{\theta} \cdot M \cdot d + d \cdot ([M \cdot T \cdot M] - Da) \cdot d$$

(16)

Que es la formula final para el cálculo de  $PI$ , habiendose llamado

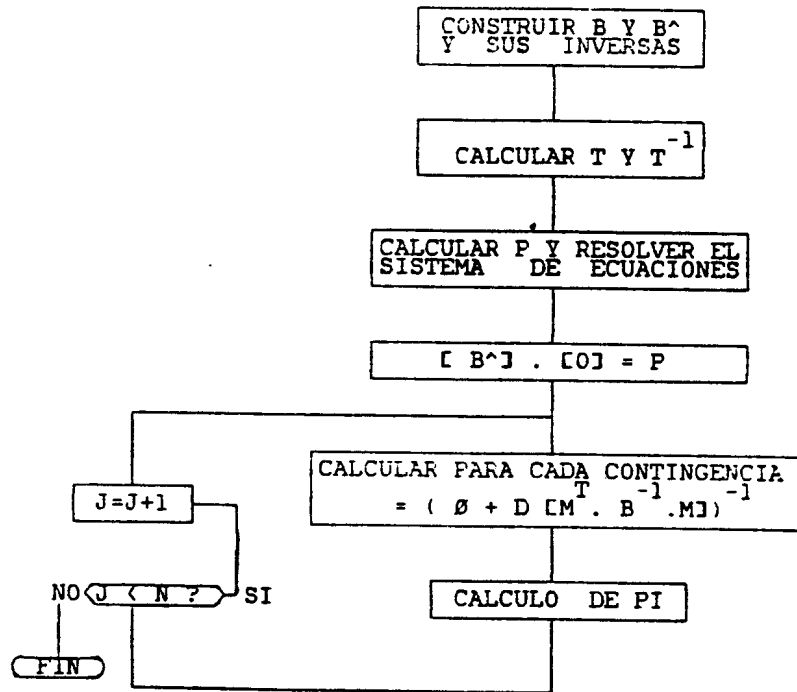
$$T = B \cdot \bar{B} \cdot B \quad \text{con} \quad \bar{B} = \sum_{i=1}^1 M_i \cdot a_i \cdot b_i^2 \cdot M_i$$



$$\bar{\theta} = B^{-1} \cdot \bar{P} \quad \text{con} \quad \bar{P} = \sum_{i=1}^1 M_i \cdot 2 \cdot a_i \cdot b_i \cdot f_i^{\circ}$$

Se puede notar que  $\bar{B}$  es simétrica y con la misma estructura para la B, y que  $\bar{P}$  es un vector y el cálculo de  $\theta$  involucra la solución de un sistema de ecuaciones, la matriz T depende solo de la topología del caso base, mientras que la matriz  $\bar{\theta}$  depende solo del estado del caso base. Los flujos de potencia activa  $f_i^{\circ}$  están contenidos en el vector P y son obtenidos una vez calculado el caso base.

### 3. SECUENCIA COMPUTACIONAL



#### 4. CALCULO DE LAS MATRICES Y SUS INVERSAS

En el proceso de cálculo primero se obtiene B y B<sup>-1</sup> factorizada ya que es necesario resolver las ecuaciones para encontrar el estado inicial del caso base.

$$[B] \cdot [\Delta\theta] = [\Delta P]$$

$$[B] \cdot [\Delta V] = [\Delta Q]$$

y luego se actualizan  $\theta^o = \theta + \Delta\theta$  y  $V^o = V + \Delta V$  para conocer el estado ( $\theta, V$ ) del sistema, por lo tanto contamos para el cálculo de PI con la matriz B y B factorizada

Dado que se necesita calcular B y T estos se tendrán en cuenta en base a la propuesta [11] que consiste en:  
Se construye la matriz G

$$G = \begin{array}{|c|c|} \hline B & \bar{B} \\ \hline 0 & B \\ \hline \end{array}$$

la matriz inversa de G es la adjunta de G (G') sobre el determinante |G|

$$G^{-1} = \frac{G'}{|G|} = \frac{\begin{array}{|c|c|} \hline B & 0 \\ \hline -\bar{B} & B \\ \hline \end{array}^t}{B^2} = \frac{\begin{array}{|c|c|} \hline B & -\bar{B} \\ \hline 0 & B \\ \hline \end{array}}{B^2} =$$

$$G^{-1} = \begin{array}{|c|c|} \hline 1/B & -\bar{B}/B^2 \\ \hline 0 & 1/B \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline B^{-1} & T^{-1} \\ \hline 0 & B^{-1} \\ \hline \end{array}$$

Dado que  $T^{-1} = B^{-1} \cdot \bar{B} \cdot B^{-1}$   
 entonces todo lo que necesitamos es invertir la matriz  $G$ ,  
 sin embargo reorganizando las filas y columnas de  $G$ , puede  
 ser transformada en una matriz  $\bar{G}$  que tiene la estructura de  
 bloques de  $(2 \times 2)$  igual a  $B$ , por lo tanto cada elemento  $i_k$   
 del bloque estará compuesto por

$$\bar{G}_{ik} = \begin{bmatrix} B_{ik} & -\bar{B}_{ik} \\ 0 & B_{ik} \end{bmatrix}$$

La inversa de  $G$  y  $\bar{G}$  contienen exactamente los mismos  
 elementos pero en diferente orden, pero  $\bar{G}$  es simétrica en  
 bloques con el mismo llenado de la matriz  $B$ , bajo normales  
 circunstancias la factorización y la inversa rara de la  
 matriz de bloques de  $(2 \times 2)$  requiere de un tiempo aproximado  
 de 8 veces el tiempo de factorización de  $B$ , sin embargo en  
 base a una técnica especial solo se requiere de un tiempo  
 de 2 veces el tiempo antes citado. Esto se basa en la  
 composición de  $\bar{G}$ , dada que durante toda la factorización  
 el término de abajo a la izquierda permanece en cero y los  
 elementos de la diagonal son los idénticos e iguales al  
 valor que ocurriría si la matriz  $B$  fuera factorizada en sí  
 misma, entonces todo lo necesario es factorizar  $B$ , y  
 agregar los elementos de la parte de arriba a la derecha  
 del bloque de  $(2 \times 2)$ .

Dado que se cuenta con la matriz factorizada por Zollenkopf  
 [12] se hacen pequeñas modificaciones para adaptarla al  
 método de factorización de Crout [13] que obtiene a la  
 matriz  $G$  en 3 submatrices

$$G = N_g \cdot D_g \cdot V_g$$

donde:

$N_g$  : Matriz triangular inferior

$D_g$  : Matriz diagonal

$V_g$  : Matriz triangular superior

Una vez factorizada la matriz  $G$  queda del tipo

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ N_{21} & 1 & \\ N_{31} & N_{32} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{11} & & \\ & U_{22} & \\ & & U_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & V_{12} & V_{13} \\ & 1 & V_{23} \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

una vez obtenida la matriz factorizada, se calcula la  
 inversa rara por el método de Takahashi [14].

## 5. CONCLUSIONES

Tanto en el problema de análisis de contingencias como en el de control correctivo y preventivo donde es necesario probar con practicamente todas las contingencias posibles, para encontrar una soluciones que asegure que ningun caso importante a sido obviado, la aplicación de un seleccionador de contingencias tiene una enorme importancia no solo por el tiempo que se ahorra, vital para el cálculo en tiempo real, sino tambien que se traduce en una disminución de la cantidad de restricciones que se generan por las violaciones ante una contingencia en problema de control correctivo y preventivo.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Stott, B.; Alsac, O.  
Fast Decoupled load flow  
IEEE Trans. on Power Ap. and Systems May (1974)
- [2] Alsac, O.; Stott, B.; Tinney, W.F.  
Sparsity-oriented compensation methods for modified network solutions  
IEEE Trans on Power Ap and Systems. vol. PAS102 N5 May (1983)
- [3] Limmer, A.  
Techniques and application of security calculations applied to dispatch computers.  
3er Power Systems computation conference (PSCC) Rome (1969)
- [4] Ejebe, G.C.; Wollenberg, B.F.  
Automatic contingency selection  
IEEE Trans. Power Appar and Systems Vol Pas-98 Jan (1979)
- [5] Irisarri, G.; Sasson, A.M.; Levner, L.  
Automatic contingency selection for on line security analysis-real time tests  
IEEE Trans. Power Appar. and Syst vol PAS 98 Sep (1979)
- [6] Albuyeh, F.  
Automatic contingency selection by sensivity matrices  
IEEE PES Winter Meeting Paper A80 060-4 feb (1980)
- [7] Mikolinnas, T.A.; Wollenberg, B.F.  
And advanced contingency selection algorithm  
IEEE Trans. Power Appar. and Syst vol PAS 100 feb (1981)
- [8] Irisarri, G.; Sasson, A.M.  
An automatic contingency selection method for on line security analysis  
IEEE Trans. Power Appar. and Syst vol PAS 100 Abr (1981)
- [9] Vemuri, S.; Usher, R.E.  
On line automatic contingency selection algorithm  
IEEE Trans. Power Appar. and Syst vol PAS 102 feb (1983)

- [10] Debbaghchi, I; Irisarri, G.  
AEP-Automatic Contingency Selector: Branch outage impacts  
on load Bus Voltage Profile.  
IEEE Trans. on Power Systems Vol PWRS 1 N°2 May (1986)
- [11] Alsac, O.; Stott, B.; Alvarado, F.L  
Analytical and computational improvements in performance-index  
ranking algorithms for network  
Electrical Power and Energy Systems vol 7 N°3 July (1985)
- [12] Zollenkopf, B.  
Bi-Factorisation basic computational Algorithm and  
programming techniques
- [13] Fox, L.  
An introduction to numerical linear algebra  
Clarendon pres oxford (1964)
- [14] Takahashi, K.; Fagan, J; Chen, M.  
Formulation of a sparse bus impedance matrix and its application in  
circuit studies.  
Proc PICA conf pp63-69 Minneapolis July 1973