

TESE
419

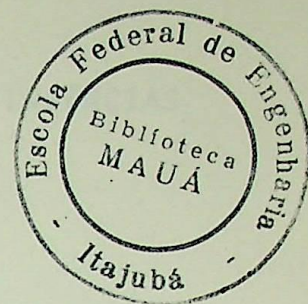
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UM ALGORÍTMO GERAL PARA FALTAS E
CONTINGÊNCIAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Eng.º CARLOS RIBEIRO

EI - 78

CLASS. 681.3.056:621.3.014.7(043,2)
CUT. R 484 w
TOMBO 419



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UM ALGORÍTMO GERAL PARA FALTAS E CONTINGÊNCIAS

EM SISTEMAS ELÉTRICOS

APRESENTADA POR : Carlos Ribeiro
ORIENTADOR : Prof. Hector Arango
CO-ORIENTADOR : Prof. Júlio César Tibúrcio

UM ALGORITMO GERAL PARA FALTAS E CONTINGÊNCIAS
EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Autor : Eng^o Carlos Ribeiro

Orientador : Prof. Hector Arango

Co-Orientador : Prof. Júlio César Tibúrcio

O presente trabalho teve por finalidade ser apresentado como Dissertação de Mestrado, com vistas a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

Itajubá, agosto de 1978



Ministério da Educação e Cultura
 ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: UM ALGORÍTMO GERAL PARA FALTAS E
CONTINGÊNCIAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Autor: CARLOS RIBEIRO

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A +	<i>J. G. Barros</i>
2º	A +	<i>J. C. Tibúrcio</i>
3º	A +	<i>H. Arango</i>

Resultado médio: Conceito A+, ou seja Aprovado
com distinção

Observações: _____

Itajubá, 26 de agosto de 1978

J. G. Barros
 1º Examinador

Engº João Guedes de Campos Barros

J. C. Tibúrcio
 2º Examinador

Prof. Júlio César Tibúrcio

H. Arango

3º Examinador

Prof. Hector Arango

Rua Cel. Renó. 7 - 37.500 - ITAJUBÁ - MG

À minha avô, pais e irmãos que sempre se esforçaram por mim.
À minha noiva, Elizabeth, que sempre confiou em meu trabalho.
Às minhas sobrinhas Ana Lúcia e Gisely pelo descanso que me
proporcionaram.

Agradecimentos

Ao professor e amigo Hector Arango que, com sua brilhante inteligência e boa vontade, forneceu subsídios indispensáveis a realização deste trabalho.

Ao também amigo, e brilhante, professor Júlio César Tibúrcio, pelo apoio sempre demonstrado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Computação da EFEI, em especial ao professor Edison Oliveira de Jesus, pela receptividade sempre encontrada.

LINGUAGEM UTILIZADA

Procurou-se neste trabalho apresentar uma linguagem tal que um compilador, idealizado para sua utilização, pudesse entendê-la diretamente, fazendo sua tradução para uma linguagem de alto nível já existente, evitando assim a necessidade de se escrever trechos de programa, por exemplo destinados a efetuar produtos matriciais ou a extrair submatrizes a partir das matrizes originais e vetores de escolha, etc.. Assim sendo as equações obtidas, no contexto geral, têm formas um pouco distintas em relação às convencionais, o que torna necessário um esclarecimento baseado na lista de símbolos empregados, conforme se segue.

A - Matriz de incidência do sistema, particionada em :

AO - Sequência nula

AP - Sequência positiva

AN - Sequência negativa

AF - Matriz de incidência das ligações de falta, particionada em :

AFO - Sequência nula

AFP - Sequência positiva

AFN - Sequência negativa

c - Símbolo que precedendo o nome de uma matriz indica sua conjugada.

C - Vetor de correntes nos elementos primitivos do sistema, particionado em :

CO - Sequência nula

CP - Sequência positiva

CN - Sequência negativa

- CG - Vetor de correntes dos equivalentes Norton dos elementos geradores.
- CB - Vetor de correntes de barra do sistema, particionado em :
- CB0 - Sequência nula
 - CBP - Sequência positiva
 - CBN - Sequência negativa
- CBW - Vetor de correntes totais nas barras do sistema, obtido pela aplicação da primeira lei de Kirchhoff a todas elas.
- CBG - Vetor de correntes totais, injetadas nas barras de geração pelos elementos geradores.
- CBF - Vetor de correntes de contribuição das barras em falta para as faltas, particionado em :
- CBF0 - Sequência nula
 - CBFP - Sequência positiva
 - CBFN - Sequência negativa
- CX - Vetor de correntes de falta através das ligações que definem a falta.
- FOR - Matriz de transformação de coordenadas simétricas para coordenadas de fase.
- i - Símbolo que precedendo o nome de uma matriz indica a sua inversa.
- KF - Vetor que contém as barras em falta
- KG - Vetor que contém as barras de geração.
- KS - Vetor que contém as barras que não estão em falta.
- $S = e^{j120^\circ}$
- t - Símbolo que precedendo o nome de uma matriz indica sua transposta.

- tc - Símbolo que precedendo o nome de uma matriz indica sua trans-conjugada.
- U - Matriz identidade.
- UGP - Vetor de forças eletromotrizes dos elementos geradores.
- V - Vetor de tensões nos elementos primitivos do sistema particionado em :
- V0 - Sequência nula
 - VP - Sequência positiva
 - VN - Sequência negativa
- VG - Vetor de forças eletromotrizes dos elementos primitivos.
- VGP - Vetor de forças eletromotrizes de sequência positiva dos elementos primitivos.
- VGP(KG) - Vetor de forças eletromotrizes dos elementos geradores, obtido a partir dos vetores VGP e KG.
- VB - Vetor de tensões das barras do sistema em relação a referência, particionado em :
- VB0 - Sequência nula
 - VBP - Sequência positiva
 - VBN - Sequência negativa
- VBR - Vetor de tensões pré-falta nas barras do sistema.
- VBRF - Vetor de tensões pré-falta nas barras em falta, particionado em :
- VBRF0 - Sequência nula
 - VBRFP - Sequência positiva
 - VBRFN - Sequência negativa
- VBFB - Vetor de tensões de falta nas barras em falta, particionado em :

VBFO - Sequência nula

VBFP - Sequência positiva

VBFN - Sequência negativa

VBff - Vetor de tensões de falta nas barras em falta, em coordenadas de fase.

VBS - Vetor de tensões de falta nas barras que não estão em falta, particionado em :

VBSO - Sequência nula

VBSP - Sequência positiva

VBSN - Sequência negativa

VX - Vetor de tensões nas ligações que definem as faltas.

Z - Matriz de impedância dos elementos primitivos do sistema, particionado em :

Z0 - Sequência nula

ZP - Sequência positiva

ZN - Sequência negativa

$zP(...,KG)$ - Submatriz que contém todos os elementos das filas da inversa de ZP, das colunas relativas aos elementos geradores definidos pelo vetor KG.

ZB - Matriz de impedâncias de barra do sistema, particionada em:

ZB0 - Sequência nula

ZBP - Sequência positiva

ZBN - Sequência negativa

$ZBP(KF,...)$ - Submatriz que contém todos os elementos das colunas de ZBP, somente das filas relativas às barras em falta, definidas pelo vetor KF.

ZBFF - ZB(KF,KF) - Submatriz obtida a partir de ZB e do vetor KF, que contém apenas as características de impedâncias das barras em falta. É particionada em :

ZB0(KF,KF) - sequência nula

ZBP(KF,KF) - Sequência positiva

ZBN(KF,KF) - Sequência negativa

ZX - Matriz de impedâncias das ligações que definem a falta.

ZFX - Matriz que traduz as interligações entre os circuitos de sequência para o estudo da falta em questão.

Í N D I C E

	PÁG.
1 - <u>INTRODUÇÃO</u>	01
2 - <u>CONCEITUAÇÃO GERAL</u>	03
2.1 - <u>O ESTADO PRÉ-FALTA</u>	03
2.2 - <u>O ESTADO DURANTE A FALTA</u>	04
2.3 - <u>OS CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA</u>	05
2.4 - <u>AS TÉCNICAS COMPUTACIONAIS</u>	07
3 - <u>DESENVOLVIMENTO DO ALGORÍTMO GERAL</u>	08
3.1 - <u>EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO</u>	08
3.2 - <u>EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORITMO</u>	19
4 - <u>DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL DO ALGORITMO</u>	31
4.1 - <u>OBTENÇÃO DAS MATRIZES DE IMPEDÂNCIA NODAL</u> <u>DE SEQUÊNCIA POSITIVA, NEGATIVA E NULA DO SISTEMA</u> .	31
4.1.1 - <u>Matriz de sequência positiva</u>	32
4.1.2 - <u>Matriz de sequência nula</u>	36
4.1.3 - <u>Descrição dos Sub-Programas</u>	43
4.2 - <u>CÁLCULO DAS CORRENTES NOS PONTOS</u> <u>DE FALTA DO SISTEMA</u>	59
4.2.1 - <u>Especificação das Falhas</u>	60
4.2.2 - <u>Determinação das Matrizes de</u> <u>Incidência de Falta</u>	61
4.2.3 - <u>Modificação das Matrizes de Impedância</u> <u>Nodal para o Cálculo da Falta</u>	64

4.2.4 - Determinação das Matrizes de Impedância de Falta em Coordenadas Simétricas e de fase	69
4.2.5 - Cálculo das Tensões Prê-Falta nas Barras em Falta	71
4.2.6 - Cálculo das Correntes através das Ligações que definem as Falhas	72
4.3 - <u>CÁLCULO DAS TENSÕES PÓS-FALTA NAS BARRAS DO SISTEMA</u>	73
4.4 - <u>CÁLCULO DOS FLUXOS DE CORRENTES NAS LINHAS DO SISTEMA, DEVIDO AS FALTAS</u>	74
4.4.1 - Fluxos de Corrente de Sequência Positiva .	75
4.4.2 - Fluxos de Corrente de Sequência Negativa .	76
4.4.3 - Fluxos de Corrente de Sequência Nula	76
5 - <u>DADOS GERAIS DO SISTEMA E DAS FALTAS</u>	78
5.1 - <u>DADOS DE LINHA</u>	78
5.1.1 - Transformadores de Dois Enrolamentos	79
5.1.2 - Transformadores Três Enrolamentos	80
5.1.3 - Autotransformadores	82
5.2 - <u>DADOS DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO ENTRE LINHAS</u>	84
5.3 - <u>DADOS DE GERAÇÃO</u>	86
5.4 - <u>DADOS DOS ELEMENTOS EM FALTA</u>	87
5.5 - <u>DADOS ESPECÍFICOS DE CADA FALTA</u>	87

6 - <u>EXEMPLOS DE APLICAÇÃO</u>	89
6.1 - <u>EXEMPLO NÚMERO 1</u>	89
6.2 - <u>EXEMPLO NÚMERO 2</u>	95
6.3 - <u>OBSERVAÇÕES</u>	101
7 - <u>COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS</u>	102
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	104

1 - INTRODUÇÃO

A grande expansão dos sistemas elétricos de potência, bem como a diversificação dos equipamentos utilizados neste processo desenvolvimentista, podem levar estes sistemas a situações totalmente adversas àquelas que se poderia esperar em um passado próximo.

Seja por exemplo, considerarmos um sistema no qual há disjuntores monopolares, operados independentemente. Ao ocorrer um tipo qualquer de falta em um ponto qualquer, haverá a possibilidade da não abertura de algum, ou alguns, dos disjuntores, ficando, portanto, o sistema submetido a uma dupla falta, simultaneamente.

Esta situação e muitas outras, possíveis de ocorrer, merecem um estudo mais profundo tanto do ponto de vista da falta em si, como de suas consequências no sistema em termos das solicitações dos equipamentos.

Até o presente momento, os programas, dos quais se tem conhecimento, disponíveis para o cálculo de faltas em grandes sistemas, se restringem a uma gama limitada de problemas, envolvendo quase que exclusivamente as faltas do tipo "shunt", trifásicas e fase terra, ocorrendo isoladamente, o que em um futuro próximo, a nosso ver, deixará a desejar.

Neste trabalho pretende-se dar um tratamento geral ao problema do cálculo de faltas, com vistas a flexibilidade no estudo das mais diversas situações possíveis ou imagináveis, bastando para tal que elas sejam especificadas e codificadas de acordo com as normas exigidas.

Como não poderia deixar de ser, o equacionamento do problema é totalmente matricial, para tornar possível sua solução através de computadores digitais. Há que se ressaltar que este equacionamento é baseado na hipótese da linearidade do sistema, sendo esta a simplificação mais significativa introduzida no modelo matemático.

O objetivo primordial deste trabalho, é portanto, visando um futuro não muito distante, capacitar-nos já, à solução de questões que serão apresentadas e necessitarão respostas dentro de padrões aceitáveis, tanto em termos de precisão como de eficiência de cálculo.

2 - CONCEITUAÇÃO GERAL

2.1 - O ESTADO PRÉ-FALTA

O estado do sistema nos instantes anteriores à ocorrência de falta supõe-se caracterizado por uma operação normal: os geradores devidamente excitados e sincronizados transferem a energia das máquinas primárias até as cargas, estando a produção, consumo e perdas energéticas perfeitamente balanceadas numa condição estacionária. O conhecimento, cálculo ou estimação deste regime operativo é muito importante, já que são as condições de demanda e geração bem como as características do sistema passivo que definem os perfis dos módulos e ângulos das tensões nas barras do sistema. Estes, por sua vez, determinam junto às potências de geração as correntes nos geradores. Finalmente, as quedas de tensão produzidas por elas, nas reatâncias, sub-transitória, transitória ou síncrona (segundo o período considerado), permitem calcular as tensões internas de geração atuando no sistema, ou seja, o estado pré-falta dos geradores.

O algoritmo em foco, neste trabalho, é baseado num modelo totalmente linear do sistema de potência, onde as linhas e cargas são representadas por impedâncias e os geradores por forças eletromotrizes atrás de adequadas impedâncias. Além disso, o sistema é suposto fisicamente equilibrado, o que permite desacoplar suas redes de sequência.

Deste modo o simples conhecimento do estado pré-falta dos geradores, permite-nos calcular as tensões pré-falta de todas as barras, para qualquer tipo de contingência, simplesmente baseados nas injeções de corrente por parte dos gerado-

res e no modelo linear do circuito de sequência positiva do sistema, já que no estado pré-falta não há circulação de outros tipos de correntes que não as de sequência positiva.

Portanto, as condições iniciais ficam prontamente definidas, para qualquer situação, uma vez conhecidas as condições de operação normal dos geradores, bem como as características do circuito de sequência positiva do sistema.

2.2 - O ESTADO DURANTE A FALTA

Durante a falta, de uma maneira geral, o sistema trabalha de maneira desequilibrada, sendo portanto solicitadas todas as redes de sequência, ficando então os elementos submetidos a tensões e correntes de sequência positiva, negativa e nula. Naturalmente o desequilíbrio é função do tipo de falta ocorrido, podendo, em certos casos, não intervir a rede de sequência negativa ou a de sequência nula, ou ambas.

Os procedimentos tradicionais para o cálculo de faltas em sistemas elétricos, consistem na associação conveniente dos circuitos de sequência, a partir do ponto de falta e usando como tensão Thèvenin a tensão pré-falta neste ponto, calcular as correntes que circulam em cada um dos citados circuitos. Porém, o conhecimento prévio da associação relativa a cada tipo de falta é fundamental, fato que torna impraticável o desenvolvimento de um programa geral baseado neste método, já que tornar-se-ia necessária a formulação de um conjunto de equações para cada possibilidade de falta. Raciocinando em termos de faltas múltiplas, vemos que o número destas possibilidades seria muito grande.

Conceituação geral

No método aqui apresentado, a introdução da chamada matriz de incidência de falta torna desnecessário qualquer outro tipo de procedimento. As correntes nos pontos de falta são calculadas em coordenadas de fase, após o que, a passagem das mesmas para coordenadas simétricas, possibilita o cálculo das tensões pós-falta das barras e os correspondentes fluxos de corrente nas linhas, em coordenadas simétricas ou de fase, segundo a conveniência. Assim sendo, a generalidade é conseguida bastando para tal que cada falta seja identificada pelas coordenadas dos pontos envolvidos, bem como pela respectiva matriz de incidência que evidencia claramente a situação ocorrida.

2.3 - OS CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA

É de fundamental importância, no cálculo de faltas, o conhecimento profundo dos circuitos de sequência positiva, negativa e nula do sistema. Via de regra e também neste trabalho, na análise de sistemas de potência, o circuito de sequência negativa é considerado idêntico ao de sequência positiva, excessão feita as fontes que não intervêm no circuito de sequência negativa. Isto é devido ao fato de que no período mais importante do transitório de falta os geradores se modelam com impedâncias de sequência positiva e negativa semelhantes.

O sistema fica então perfeitamente definido para o cálculo de condições anormais, pelas matrizes de impedância de sequência positiva e nula, que fornecem os meios mais eficientes para o estudo das referidas situações [7].

O processo utilizado para a determinação das matrizes é o de montagem direta, conforme proposto em [1].

Há, porém, neste trabalho um tratamento diferente do convencional em relação ao circuito de sequência nula. Geralmente, prefere-se operar com os circuitos de sequência positiva e nula, considerando-os com topologias idênticas. Para fazê-lo é necessário um esforço adicional em termos da entrada de dados, visto que os transformadores deverão ter seus equivalentes convenientemente seccionados, da computação destes dados, visto que frequentemente aparecem impedâncias infinitas, e da memória utilizada pelo programa em função do aumento do número de barras e linhas devido ao seccionamento dos transformadores.

Preferimos neste caso, a utilização de circuitos de sequência positiva e nula com topologias diferentes. Assim sendo, a cada linha do sistema, transformadores inclusive, corresponde um código simples, que será utilizado em subrotina denominada "CHANGE", para determinar em cada sequência as linhas relativas a mesma. Evita-se assim os problemas anteriormente citados.

Naturalmente em decorrência deste procedimento surgem problemas adicionais, como por exemplo a impossibilidade da computação dos dois circuitos simultaneamente. Tentou-se então ganhar eficiência utilizando para a montagem da matriz de impedância de sequência nula, um procedimento baseado na sub-árvore "Lagrangeana" deste circuito, onde os laços são fechados a medida que aparecem, tendo em vista que a grande maioria dos laços do circuito de sequência nula, de grandes sistemas, se fecha sobre esta sub-árvore montada a partir da "barra terra".

O problema das coordenadas matriciais das barras em ambas sequências foi contornado usando-se sempre: "coordenada matricial = número da barra". A fim de não aumentar o tempo

de computação, desnecessariamente, foram aproveitados os ponteiros empregados para pesquisa rápida da lista "push-down" de processamento das barras.

Aproveitando a facilidade das coordenadas matriciais idênticas ao número das barras, as matrizes de sequência positiva e nula foram montados em um mesmo "array" retangular de dimensão (n° de barras, n° de barras + 1), onde a área triangular inferior contém as informações acerca do circuito de sequência positiva e a triangular superior acerca do circuito de sequência nula.

2.4 - AS TÉCNICAS COMPUTACIONAIS

A programação foi desenvolvida em linguagem FORTRAN IV, havendo que se ressaltar as técnicas de pesquisa rápida de listas baseadas nos ponteiros "Pais" e "Filhos", que é utilizada ao longo de toda a programação. Estes ponteiros são obtidos através do uso da subrotina denominada "DADSON".

3 - DESENVOLVIMENTO DO ALGORÍTMO GERAL

Nesta seção será desenvolvido um algoritmo para determinar a situação elétrica de um sistema de potência, antes e depois de uma falta nele ocorrida.

Para efeito de esclarecer a notação e os detalhes da dedução matemática, um exemplo elementar é resolvido e as expressões matemáticas são todas ilustradas em relação ao exemplo.

3.1 - EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO

Seja considerado um sistema de potência qualquer. Os dados dos elementos do sistema em valores por unidade e em componentes simétricas, serão expressos por :

$$Z = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Z_0 & & \\ \hline & Z_P & \\ \hline & & Z_N \\ \hline \end{array} \quad (3.1)$$

Onde Z é a matriz de impedância primitiva dos elementos do sistema.

Z_P e Z_N são matrizes diagonais idênticas, já que estamos considerando idênticos os circuitos de sequência positiva e negativa.

Z₀ é uma matriz que não é diagonal, a menos que não haja acoplamentos magnéticos entre as linhas do circuito de sequência nula.

$$A = \begin{array}{|c|c|c|} \hline A_0 & & \\ \hline & A_P & \\ \hline & & A_N \\ \hline \end{array} \quad (3.2)$$

Onde A é a matriz de incidência do sistema.

A_P e A_N são matrizes idênticas, ao passo que A_0 é de uma maneira geral distinta, já que consideramos topologia distinta para o circuito de sequência nula.

$$VG = \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline VGP \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} \quad (3.3)$$

Onde VG é o vetor de forças eletromotrizes dos geradores conectados às barras.

Neste vetor temos :

$$VGP(KG) = UGP \quad \text{e} \quad VGP(.NÃO.KG) = 0 \quad (3.4)$$

onde KG indica os elementos que são geradores.

As relações elétricas existentes nos elementos do sistema, de uma maneira geral, são :

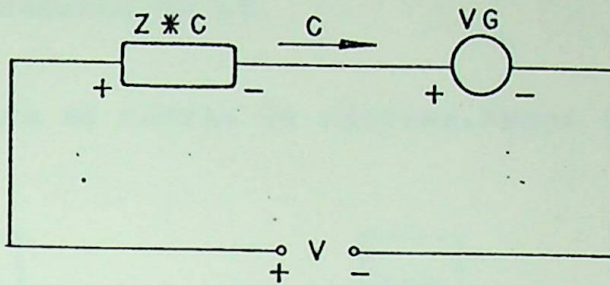


Fig. 3.1

$$V = Z * C + VG \quad (3.5)$$

ou

$$C = iZ * V - iZ * VG \quad (3.6)$$

onde iZ indica a inversa de Z .

chamando

$$CG = iZ * VG \quad (3.7)$$

$$C = iZ * V - CG \quad (3.8)$$

Expressando cada variável de (3.8) em termos de suas componentes simétricas :

$$V = \begin{array}{|c|} \hline V_0 \\ \hline V_P \\ \hline V_N \\ \hline \end{array} \quad C = \begin{array}{|c|} \hline C_0 \\ \hline C_P \\ \hline C_N \\ \hline \end{array} \quad CG = \begin{array}{|c|} \hline 0. \\ \hline iZ_P(\dots, KG) * UGP. \\ \hline 0. \\ \hline \end{array} \quad (3.9)$$

onde

este número é proporcional ao quadrado do número de barras já processadas.

O reconhecimento de cada tipo de linha é muito simples, visto que o passo 3 da rotina de reordenamento garante que para a barra em estudo, apenas a primeira das linhas a ser processada não é do tipo fecha-laço, sendo que todas as demais o são. Portanto para o processamento da primeira linha é utilizado o sub-programa de incorporação de linha radial ligada a referência ou a de linha radial a nova barra e para as demais o sub-programa de linha fecha laço.

Pode-se notar facilmente que o número de pesquisas no sentido de se obter todas as linhas conectadas a uma determinada barra é muito grande, razão pela qual foram utilizados vetores indicativos da posição inicial de cada barra na lista de linhas, bem como as sucessivas posições onde as referidas barras são encontradas. O sub-programa chamado "DADSON" se encarrega da determinação destes vetores. Como a lista de linhas é de dupla entrada é necessária a determinação de ponteiros para ambas. Para maior clareza, consideremos o exemplo :

Sejam a lista de linhas representadas pelas barras iniciais $NB1(J)$ e finais $NB2(J)$, onde $J = 1, NL$ (N° de linhas) e os vetores fornecidos por "DADSON".

J	NB1(J)	NB2(J)
1	3	7
2	4	8
3	5	3
4	7	1
5	6	4
6	5	4
7	6	7
8	8	2
9	4	2

Barra	KOMD	KOMH
1	0	4
2	0	8
3	1	3
4	2	5
5	3	0
6	5	0
7	4	1
8	8	2

Linha	IFID	IFIN
1	0	7
2	9	0
3	6	0
4	0	0
5	7	6
6	0	0
7	0	0
8	0	9
9	0	0

Os vetores KOMD e KOMH definem as posições J das linhas onde aparece pela primeira vez dos lados de NB1 e NB2, respectivamente, cada uma das barras.

Os vetores IFID e IFIH definem as posições J das linhas onde aparece dos lados de NB1 e NB2, respectivamente, a próxima linha cuja barra inicial ou final coincide com a inicial ou final da linha em estudo. Assim para localizarmos todas as linhas conectadas, por exemplo, a barra 4 faríamos :

$$L1D = KOMD(4) = 2 \quad L2D = IFID(2) = 9 \quad L3D = IFID(9) = 0$$

$$L1H = KOMH(4) = 5 \quad L2H = IFIH(5) = 6 \quad L3H = IFIH(6) = 0$$

N

Naturalmente o significado dos valores nulos nos vetores posição é simplesmente o de final de pesquisa. Então

todas as linhas conectadas a barra 4 são aquelas cujos valores de "J" são: 2, 3, 5, 6.

Notamos assim que as pesquisas feitas deste modo são muito rápidas. Pode-se ainda proceder ao "packing" dos vetores para economia de memória.

A medida que as barras vão sendo incorporadas na matriz, também vão sendo acrescentadas em outro vetor posição-chamado "IPO", que define em um dado instante as barras já incorporadas, com vistas a permitir que apenas elas participem do processo de incorporação da próxima linha.

Como usamos para as matrizes: "coordenada matricial = número da barra", e ainda da matriz de impedância nodal de sequência positiva só armazenamos a área triangular inferior devemos sempre comparar os números das barras, a fim de sempre acrescentarmos na matriz somente os elementos (I, J) onde $I \geq J$.

Através dos procedimentos descritos associados aos sub-programas de incorporação de linhas em função do seu tipo, descritos mais adiante, obtemos a matriz de impedância nodal de sequência positiva do sistema de maneira relativamente simples e muito mais eficiente que a obtenção pela fórmula (3.19) deduzida anteriormente.

4.1.2 - Matriz de sequência Nula

Foi também obtida por processamento sucessivo das linhas do sistema, porém não as mesmas do circuito de sequência positiva e sim apenas aquelas correspondentes a topologia de sequência nula. Portanto a primeira etapa de obtenção da referida matriz foi destinada a determinar as linhas do circuito de se-

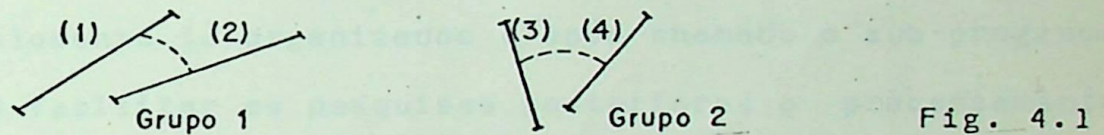
quência nula. Para tal foi utilizado o sub-programa denominado "CHANGE" que a partir dos códigos das linhas do sistema, introduzidos como dados, faz a conversão das barras inicial e final dos transformadores de acordo com a possibilidade de circulação de corrente de sequência nula nos terminais dos mesmos. Os códigos são :

0. Para geradores, cargas, linhas de transmissão e transformadores do tipo $Y_{\bar{r}} - Y_{\bar{r}}$ que dão passagem direta às correntes de sequência nula.
1. Para transformadores do tipo $Y_{\bar{r}} - \Delta$ nos quais não há correntes de sequência nula nos terminais do "secundário".
2. Para transformadores do tipo $\Delta - Y_{\bar{r}}$ nos quais não há correntes de sequência nula nos terminais do primário.
3. Para transformadores do tipo $Y - Y$ ou $\Delta - \Delta$ ou de tipos correlatos, que se comportam como circuitos totalmente abertos em relação as correntes de sequência nula.
4. Para transformadores de aterramento, ou elementos que apenas deixam passar correntes de sequência nula.

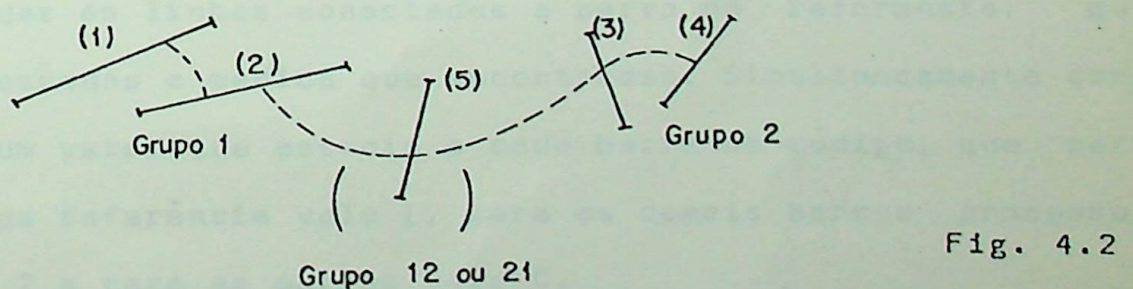
Naturalmente os códigos, devidamente utilizados, podem abranger qualquer tipo de equipamento, inclusive transformadores de mais de dois enrolamentos.

Além dos códigos o sub-programa leva ainda em consideração as impedâncias de aterramento dos equipamentos, que devem ser fornecidas, convenientemente conforme veremos, junto aos dados de linha.

No caso de haver acoplamento magnético entre algumas linhas do circuito, estes devem ser dados logo após aos dados de linha, em grupos devidamente numerados para maior facilidade de processamento. No caso do programa em questão foram considerados como números máximos dez grupos de dez linhas cada, totalizando cem linhas acopladas. Foi prevista a união de dois ou mais grupos, devido, por exemplo a construção de uma nova linha acoplada com linhas dos citados grupos, bastando para tal que o número do grupo da nova linha seja formado pelos algarismos referentes aos grupos unidos, em ordem qualquer. Então se tivéssemos a situação da figura 4.1, abaixo :



a construção de uma nova linha que ficasse acoplada com linhas de ambos os grupos de acordo com a figura 4.2, daria origem ao grupo



12 ou 21 que no final seria chamado totalmente de grupo 1 conforme figura 4.3.

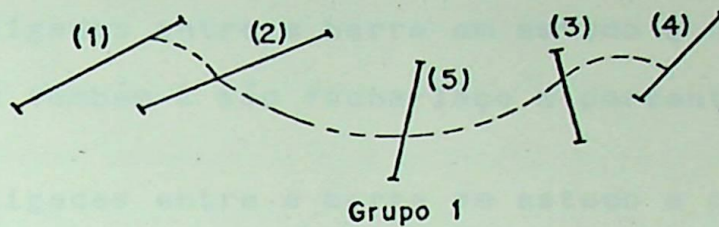


Fig. 4.3

Para que isso seja possível é necessário que a numeração dos grupos seja feita com números de 1 a 10.

Obtida, então, a nova lista de linhas, cujas impedâncias de sequência nula ficam todas definidas, bem como os dados de acoplamento já organizados e após chamado o sub-programa "DADSON" para facilitar as pesquisas posteriores o processamento das linhas é iniciado. Poder-se-ia usar o mesmo procedimento usado para a sequência positiva. Preferimos no entanto optar por outro processo baseado na sub-árvore "Lagrangeana" do sistema, cuja sequência de operações se segue :

1. As linhas do circuito de sequência nula são examinadas na busca de todas as linhas conectadas a barra de referência, que são processadas a medida que encontradas. Simultaneamente constrói-se um vetor que associa a cada barra um código, que para a barra de referência vale 1, para as demais barras processadas vale 2 e para as outras vale 0.
2. As linhas são examinadas para todas as barras cujos códigos é 2. Para cada uma destas barras são pesquisadas e processadas todas as linhas que ainda não o foram de acordo com o seguinte :

- a. Linhas ligadas entre a barra em estudo e a referência não são processadas, pois já o foram.
 - b. Linhas ligadas entre a barra em estudo e outra barra cujo código é também 2 são fecha-laço e portanto processadas.
 - c. Linhas ligadas entre a barra em estudo e outra cujo código é 0 são radiais a nova barra e portanto processadas. Após isto a nova barra recebe o código 3.
 - d. Após pesquisadas todas as linhas ligadas a uma das barras cujo código era 2 este é mudado para 1.
3. Este passo é uma generalização do segundo, ou seja: Após pesquisadas todas as linhas ligadas as barras cujos códigos eram $(n-1)$ e foram mudados para 1, inicia-se a pesquisa de todas as linhas ligadas as barras cujos códigos são (n) , de acordo com o seguinte procedimento.
- a. Linhas conectadas entre a barra em estudo e outra barra cujo código é 1, foram processadas.
 - b. Linhas conectadas entre a barra em estudo e outra barra cujo código é maior que 1, são fecha-laço e portanto processadas.
 - c. Linhas conectadas entre a barra em estudo e outra barra cujo código é 0, são radiais a nova barra e portanto processadas. Após isto a nova barra recebe o código $(n+1)$.
4. O passo 3 é repetido até que não haja mais barras com código maior que 1, quando a rotina está encerrada.

Se após concluído o procedimento exposto ainda restarem linhas não processadas, estas são desconectadas do sistema de sequência nula, o que é perfeitamente normal. As posições diagonais da matriz de sequência nula, relativas as barras desconexas, ficam zeradas o que significa que a impedância própria de sequência nula de tais barras é infinita.

Espera-se, em virtude da topologia do circuito de sequência nula dos sistemas elétricos de potência, que após concluído o passo 2 a maior parte dos laços existentes já tenha sido fechada.

Seja, por exemplo, analisarmos o grafo do circuito de sequência nula de um sistema, conforme mostrado na figura 4.4.

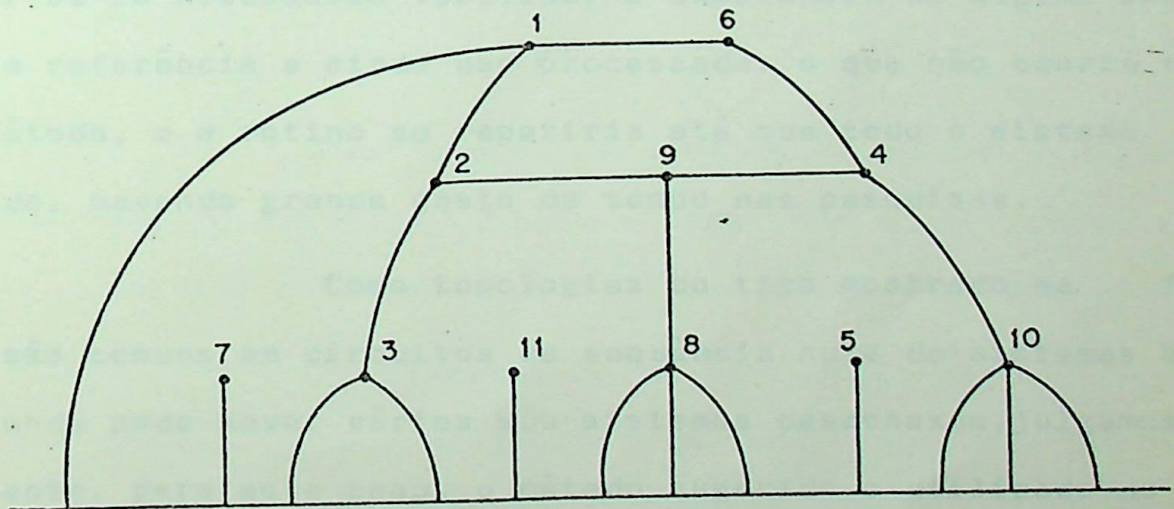


Fig. 4.4 - Grafo do circuito de sequência nula de um sistema elétrico

Vemos que a aplicação do método exposto, para o processamento do circuito de sequência nula, faz com que concluído o primeiro passo já tenham sido fechados todos os laços que se formam entre a referência e as barras 3, 8 e 10, sendo que estes fechamentos são muito simples, não passando de associação, em paralelo, de impedâncias. Além disso, no primeiro passo são incorporadas as barras 1, 5, 7 e 11.

Se ao invés deste procedimento usássemos o mesmo utilizado para a sequência positiva, deveríamos começar o processo através de uma das barras ligadas a referência. Se esta fosse uma dentre 7, 11, 5 dever-se-ia processá-la e após buscar outra barra ligada a referência visto que a primeira não dá continuidade ao sistema. Depois de montado o sistema principal formado pelas barras 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9 e 10, onde já não seria possível fechar laços simplesmente associando impedâncias em paralelo, tornar-se-ia necessário verificar a existência de alguma barra ligada a referência e ainda não processada, o que não ocorre no outro método, e a rotina se repetiria até que todo o sistema fosse montado, havendo grande gasto de tempo nas pesquisas.

Como topologias do tipo mostrado na figura 4.4, são comuns em circuitos de sequência nula de sistemas elétricos, onde pode haver vários sub-sistemas desconexos, julgamos mais eficiente, para este caso, o método sugerido e utilizado no programa em questão.

Naturalmente, os acoplamentos magnéticos entre as linhas trazem complicações adicionais a seu processamento, o que implicou na utilização de sub-programas distintos para a incorporação de linhas radiais ou fecha-laço acopladas, além de ou-

tro sub-programa para a determinação da matriz de admitância de acoplamento, em cada caso.

A utilização de "coordenada matricial = número da barra" no caso da sequência nula só pode valer para as filas da matriz, visto que tendo armazenado a matriz de sequência positiva na área triangular inferior do "array" fomos obrigados a deslocar as colunas da matriz de impedância de sequência nula de uma unidade ficando assim com a matriz total com número de filas igual ao número de barras e número de colunas igual ao número de barras mais 1, conforme mostrado abaixo.

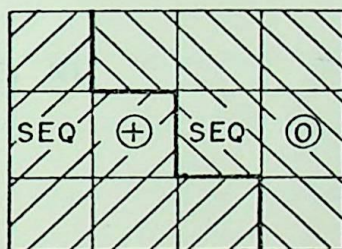


Fig. 4.5

Além disso, as posições ocupadas na matriz pelos elementos relativos a sequência nula, são apenas aquelas $(I, J+1)$ onde $J \geq I$ e tanto I como J são números de barras.

Obviamente, os procedimentos descritos nos levam a obtenção da matriz de impedância nodal sequência nula do sistema, de forma muito mais eficiente que aquela mostrada pela fórmula (3.18), deduzida anteriormente.

4.1.3 - Descrição dos Sub-Programas

Conforme mencionado a formação das matrizes de impedância nodal de sequência positiva e nula, exigiu nove

sub-programas, os quais foram os seguintes :

4.1.3.1 - Sub-programa para Determinação dos Ponteiros
de Pesquisa rápida

Sua finalidade já foi exposta anteriormente, bem como os vetores obtidos por seu intermédio foram exemplificados. Foi chamado de "DADSON".

Seu desenvolvimento é simples e baseado nas seguintes declarações :

```

DO 1 I = 1, MAX
1 LAS(I) = 0
DO 10 I = 1, NL
KA = NB1(I)
KE = LAS(KA)
IF(KE.EQ.0) GO TO 4
IFID(KE) = I
GO TO 7
4 KOMD(KA) = I
7 LAS(KA) = I
10 CONTINUE

```

Onde :

MAX é o número da barra de maior número do sistema.

NL é o número de linhas do sistema.

NB1(I) é o número da barra inicial da linha (I).

LAS(KA) é o número da linha onde pela última vez apareceu a barra (KA);

IFID(KE) é o número da próxima linha onde aparece como bar-

ra inicial a mesma barra inicial de (KE).

KOMD(KA) é o número da linha onde pela primeira vez aparece como barra inicial a barra (KA).

KE e KA são variáveis auxiliares.

Obviamente, como a lista de linhas é de dupla entrada, tudo que se fez para as barras iniciais deve ser repetido para as finais e obteremos também os vetores KOMH(I) e IFIH(I), já referidos.

4.1.3.2 - Sub-Programa para Incorporar Linhas radiais

Ligadas a Referência

Este foi denominado "RADREF" e seu funcionamento é muito simples, já que a introdução de uma linha radial ligada a referência do sistema não altera as impedâncias próprias e de transferência das outras barras. Assim sendo, apenas o elemento diagonal da matriz correspondente a barra introduzida, é acrescentado.

Como o sub-programa é válido tanto para a sequência positiva como para a nula, foi usado o seguinte procedimento para a introdução do novo elemento da matriz em posição correta :

KK = 0

IF(NSEQ.EQ.0) KK = 1

E então :

ZETA(NB, (NB+KK)) = ZLIN

Onde :

NSEQ é o número correspondente a sequência que está sendo trabalhada, valendo 1 para a sequência positiva e 0 para a sequência nula.

ZETA(I,J) é o "array" comum usado para as matrizes de impedância nodal de sequência positiva e nula.

ZLIN é a impedância da linha que está sendo incorporada, recebida do programa principal.

NB é o número da nova barra que está sendo incorporada.

Notamos então que apenas os elementos da matriz de sequência nula sofrem um deslocamento de uma unidade em sua coluna, permanecendo a fila inalterada.

Neste sub-programa começa e tem continuidade a montagem do já mencionado vetor "IPO" que define em um dado instante as barras já incorporadas. Procede-se para tal do seguinte modo :

```
IF(LANT.EQ.0) GO TO 10
IPO(LANT) = NB
10 LANT = NB
```

Onde LANT é o número da última barra processada antes da barra NB e seu valor é recebido do programa principal.

4.1.3.3 - Sub-Programa para Incorporar Linhas Radiais

Ligadas a Novas Barras

Este foi denominado "RADNOV" e seu funcionamento também é muito simples já que uma nova barra conectada ao sistema através de uma linha radial partindo de uma das barras já

processadas, dá origem a um novo eixo na matriz de impedância, que é porém, a menos de seu elemento diagonal, cópia do eixo relativo àquela barra. Basta então a obtenção do elemento diagonal o que se faz acrescentando à impedância própria da barra já processada a impedância da linha que está sendo incorporada.

Neste caso devemos comparar o número da nova barra sendo incorporada, com os números daquelas que antes já o foram, para em função do circuito de sequência em estudo fazer a introdução dos elementos relativos ao eixo que está sendo montado, nas posições corretas, devido o sub-programa valer tanto para a sequência positiva como para a nula.

Procedeu-se do seguinte modo :

```

K = 1
KK = 0
KB = KOM
IF(NSEQ.NE.0) GO TO 1
K = -1
KK = 1
1  NB1M = K * NB1
   NB2M = K * NB2
   KBM = K * KB

```

Onde :

KOM é o número da primeira barra que foi processada.

NB1 é o número da barra já processada, pertencente a linha que está sendo incorporada.

NB2 é o número da nova barra.

K, KK e KB são variáveis auxiliares.

As comparações entre os números das barras são feitas agora entre NB1M, NB2M, KBM que no caso de sequência positiva são todos valores positivos e no caso de sequência nula são valores negativos. Dependendo das comparações feitas a cópia do eixo existente na matriz para a obtenção do novo é feita através de uma das possíveis combinações entre o primeiro e segundo membros das expressões abaixo :

$$\begin{aligned} \text{ZETA}(\text{KB}, (\text{NB2} + \text{KK})) &= \text{ZETA}(\text{NB1}, (\text{KB} + \text{KK})) \\ \text{ZETA}(\text{NB2}, (\text{KB} + \text{KK})) &= \text{ZETA}(\text{KB}, (\text{NB1} + \text{KK})) \end{aligned}$$

A continuação do processo é conseguida fazendo do KB obter valores correspondentes a todas as barras processadas antes de NB2, o que é possível pela utilização do vetor "IPO", repetindo sucessivamente a operação :

$$\text{KB} = \text{IPO}(\text{KB})$$

até que KB tome o valor zero, o que significa que se esgotaram as barras. Calcula-se então o elemento diagonal e finaliza-se implementando o vetor "IPO", através das declarações :

$$\text{ZETA}(\text{NB2}, (\text{NB2} + \text{KK})) = \text{ZETA}(\text{NB1}, (\text{NB1} + \text{KK})) + \text{ZLIN}$$

$$\text{IPO}(\text{LANT}) = \text{NB2}$$

$$\text{LANT} = \text{NB2}$$

4.1.3.4 - Sub-Programa para Incorporar Linhas Fecha-Laço

Este foi denominado "LOOP" e devido não acrescentar nenhuma barra ao sistema, também não faz com que um novo eixo seja introduzido na matriz. Um eixo fictício é, porém, criado e o método de redução de Kron |1| é utilizado a fim de que es-

te eixo seja eliminado. Sua obtenção é simples bastando subtrair os eixos relativos às barras terminais da linha. O elemento diagonal do eixo fictício deve ser calculado como mostrado pouco mais adiante.

No caso de uma das barras da linha ser a referência o processo sofre uma simplificação já que esta não participa da matriz de impedância nodal.

Para se efetuar a citada diferença entre os eixos existentes, novamente são necessárias comparações entre os números das barras, realizadas de maneira idêntica a descrita no sub-programa "RADNOV". Os valores correspondentes ao eixo obtido são introduzidos sempre na primeira fila de ZETA em virtude desta não ser utilizada efetivamente, pois embora nos dados a barra de referência receba o número zero, internamente ao programa é identificada pelo número um, devido a dificuldade de se trabalhar computacionalmente com variáveis indexadas de índice nulo. Após calculados todos os elementos possíveis de fora da diagonal, com o auxílio de "IPO", calcula-se o elemento diagonal através da seguinte fórmula :

$$\begin{aligned} \text{ZETA}(1, (\text{MAX} + \text{KK} + 1)) &= \text{ZETA}(\text{NB1}, (\text{NB1} + \text{KK})) + \text{ZETA}(\text{NB2}, (\text{NB2} + \text{KK})) - \\ &\quad \text{ZETA}(\text{NB1}, (\text{NB2} + \text{KK})) \\ - 2 * &\quad \text{ou} \quad + \text{ZLIN} \\ &\quad \text{ZETA}(\text{NB2}, (\text{NB1} + \text{KK})) \end{aligned}$$

Note-se que se uma das barras, por exemplo NB2 for a referência :

ZETA(NB2, (KB2 + KK)) = 0.

ZETA(NB2, (NB2 + KK)) = 0.

ZETA(NB2, (NB1 + KK)) = 0.

Definidos então todos os elementos do eixo fictício procede-se a sua eliminação, através do método de Kron, o que se faz através das seguintes declarações :

```

      I = KOM
      J = KOM
10   IM = K * I
20   JM = K * J
      IF(J.EQ.0) GO TO 40
      IF(JM.GT.IM) GO TO 30
      ZETA(I, (J + KK)) = ZETA(I, (J + KK)) - ZETA(1, (I + KK)) *
* ZETA(1, (J + KK)) / ZETA(1, (MAX + KK + 1))
30   J = IPO(J)
      GO TO 20
40   I = IPO(I)
      IF(I.EQ.0) GO TO 50
      J = KOM
      GO TO 10
50   RETURN

```

Concluída esta etapa o sub-programa foi executado integralmente e a matriz de impedância obtida já está levando em consideração a influência da nova linha introduzida.

Para uma nova introdução de linha fecha-laço o eixo fictício novamente será armazenado na primeira fila da matriz ZETA, sem necessidade de que esta seja zerada previamente, pois sendo os novos elementos sobrepostos aos anteriores não há

possibilidade de interferência.

4.1.3.5 - Sub-Programa para Determinação das Linhas do Circuito de Sequência Nula

Este foi denominado "CHANGE" e seu funcionamento se baseia nos códigos especificados nos dados de linha, para cada uma delas, conforme citado em 4.1.2.

Pesquisa-se então os dados de linha analisando o código de cada uma delas, procedendo-se da seguinte maneira:

1. Linhas cujos códigos se referem a elementos que dão passagem direta a corrente de sequência nula (códigos 0 ou 4) são introduzidas na nova lista de linhas e o número delas é incrementado.
2. Linhas cujos códigos se referem a elementos que se comportam como circuitos abertos em relação a corrente de sequência nula (código 3) são ignoradas no processo.
3. Linhas cujos códigos se referem a transformadores tipo $\Delta - Y_{\neq}$ ou $Y_{\neq} - \Delta$ ou com conexão correlata a uma delas, têm uma de suas barras, inicial ou final mudada, do número correspondente ao lado do triângulo, para a barra de referência. A nova linha é acrescentada na lista de linhas do circuito de sequência nula, cujo número total de linhas é incrementado. O cálculo da impedância desta nova linha é feita com base nos dados de impedância de sequência nula, bem como de aterramento referentes a linha em questão.

Então, se tivéssemos definida a seguinte situação, para uma linha :

ICOD(I) = 2 NB1(I) = 10 NB2(I) = 15 ZZER(I) = Z0
 ZTER(I) = ZOT

Onde :

ICOD(I) é o código relativo a linha I.

ZZER(I) é a impedância de sequência nula.

ZTER(I) é a impedância de aterramento.

Os dados estariam representando um transformador ligado entre as barras 10 e 15 conforme figura 4.6, abaixo.

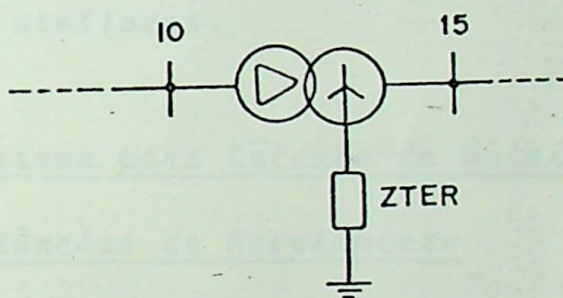


Fig. 4.6

A mudança daria, portanto, origem a linha J do circuito de sequência nula, onde :

NB1(J) = 0 NB2(J) = 15 ZZER(J) = Z0 + 3 * ZOT ,

ficando a representação equivalente desta parte do sistema, para sequência nula, conforme figura 4.7, abaixo.

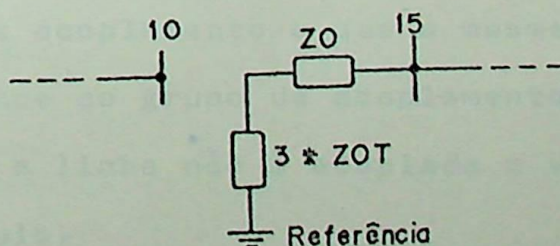


Fig. 4.7

Naturalmente, para outros casos o procedimento é análogo.

Conforme pode-se verificar, a simples identificação dos códigos, possibilita a determinação das linhas do circuito de sequência nula bem como suas características. Em casos mais complicados, porém, deve-se ter cuidado com os dados ZZER e ZTER conforme explicado mais adiante.

Evidentemente, a linha 10 - 15 do exemplo anterior já não mais fará parte do circuito de sequência nula, devendo ter sido substituída pela 0 - 15, motivo pelo qual não se calcula fluxo de corrente de sequência nula através de linhas do tipo de 10 - 15, ou similares.

4.1.3.6 - Sub-Programa para Cálculo da Matriz de Admitâncias de Acoplamento

Para o processamento de uma linha acoplada magneticamente a outras o algoritmo utilizado, devido a Reitan [10], exige a montagem da matriz de admitância de acoplamento entre a linha sendo incorporada e as demais, do mesmo grupo que já tenham sido processadas.

O reconhecimento das linhas acopladas é conseguido facilmente através de um vetor montado com este fim, chamado "KACL". Este vetor faz corresponder a cada linha acoplada o número do grupo de acoplamento a que a mesma pertence. Assim se a linha (I) pertence ao grupo de acoplamento de número N, $KACL(I) = N$. Se a linha não é acoplada o valor correspondente a ela em "KACL" é nulo.

Ao ser processada uma linha magneticamente

acoplada, o valor de "KACL" que lhe é correspondente, tem o sinal trocado o que possibilita a fácil identificação das linhas pertencentes a um dado grupo de acoplamento, que já foram processadas.

Deste modo, os simples procedimentos mostrados a seguir possibilitam a montagem da matriz de admitâncias de acoplamento, pretendida, aqui chamada "XAC".

1. Se a linha (I) que está sendo incorporada é acoplada, $KACL(I) = N > 0$, onde N é o número do grupo de acoplamento a que pertence (I). Se (I) é a primeira linha do grupo N, sendo incorporada, seu processamento é normal, como se não fosse acoplada. Faz-se, porém, $KACL(I) = -N$. Se não for a primeira passa-se a 2.
2. Faz-se $KACL(I) = -N$ e pesquisa-se todas as linhas do grupo N, verificando em "KACL" aquelas cujos valores correspondentes são negativos, armazenando-as num vetor auxiliar chamado "KK".
3. Monta-se a matriz de impedâncias de acoplamento das linhas contidas em "KK", introduzindo na sua diagonal as impedâncias próprias das referidas linhas e nos elementos fora da diagonal as impedâncias mútuas entre elas, sempre na mesma ordem em que estão colocadas em "KK".
3. Inverte-se a matriz de impedâncias de acoplamento, que é simétrica, e está determinada a matriz de admitâncias de acoplamento.

Para as pesquisas usa-se, neste caso também, vetores de pesquisa rápida chamados "KOMAC" e "IFIAC", análogos àqueles resultantes do sub-programa "DADSON" e para a inversão matricial necessária ao processo é chamado o sub-programa "SHIPL",

baseado no método de Shipley [18], para inversão de matrizes com elementos reais.

O sub-programa em questão foi chamado de "AUX1" por se tratar de auxiliar aos sub-programas de incorporação de linhas radiais ou fecha-laço acopladas.

4.1.3.7 - Sub-Programa para Incorporar Linhas Radiais

Magneticamente Acopladas

Este foi chamado "RANOAC" e baseia-se no método sugerido por Reitan e Kruempel [10].

Primeiramente este sub-programa chama o já descrito "AUX1" do qual recebe a matriz de admitâncias de acoplamento, bem como a posição dentro da mesma onde se situa a linha que está sendo incorporada. Passa-se então ao cálculo das impedâncias de transferência entre a nova barra e as já incorporadas, dadas pelo vetor "IPO" através de declarações do tipo mostrado abaixo.

```

CHAVE = 0
KB1 = KOM
10 IF(KB1.EQ.0) GO TO 60
15 SOMA = 0.
DO 35 J = 1, II
IF(K.EQ.J) GO TO 35
IF(NB1(KK(J)).GT.KB1) GO TO 20
IF(NB2(KK(J)).GT.KB1) GO TO 25
SOMA = SOMA + XAC(K,J) * (ZETA(NB1(KK(J)),(KB1 + 1)) -
* ZETA(NB2(KK(J)),(KB1 + 1)))

```

```

GO TO 35
.
.
.
.
35 CONTINUE

IF(CHAVE.EQ.200) GO TO 65
IF(N1.GT.KB1) GO TO 40
IF(N2.GT.KB1) GO TO 45

ZETA(N2,(KB1 + 1)) = ZETA(N1,(KB1 + 1)) + SOMA/XAC(K,K)

GO TO 55
.
.
.
.
55 KB1 = IPO(KB1)

GO TO 10

```

Onde :

- II é a ordem da matriz de admitâncias de acoplamento.
- K é a fila e coluna da referida matriz relativas a linha sendo processada.
- KK é o vetor que contém as linhas acopladas já processadas e em processo do grupo em questão.
- XAC é a matriz de admitâncias de acoplamento.
- N1 é o número da barra já processada, da linha em processo.
- N2 é o número da nova barra.
- KB1, SOMA, CHAVE são variáveis auxiliares.

As expressões omitidas são análogas àquelas imediatamente anteriores as omissões, simplesmente considerando a ordem dos índices de ZETA, de acordo com o resultado dos testes.

Esgotadas todas as possibilidades para KB1 en

tre as barras processadas, quando $KB1 = 0$, procede-se o cálculo da impedância própria da barra $N2$ e sua introdução em "IPO", através das seguintes declarações :

```

60  KB1 = N2
    CHAVE = 200
    GO TO 15
65  IF(N1.GT.N2) GO TO 70
    ZETA(N2,(N2 + 1)) = ZETA(N1,(N2 + 1)) + (SOMA + 1.)/XAC(K,K)
    GO TO 75
    .      .
    .      .
    .      .
    .      .
75  IPO(LANT) = N2
    LANT = N2

```

Vemos assim que o cálculo de "SOMA" é feito pelas mesmas declarações tanto para os termos fora da diagonal, como para o elemento da diagonal, motivo pelo qual o artifício do uso de CHAVE é necessário.

4.1.3.8 - Sub-Programa para Incorporar Linhas Fecha-Laço Magneticamente Acopladas

Este foi chamado "LOOPAC" e baseia-se no mesmo método usado para as linhas radiais.

Após então, chamar o sub-programa "AUX1" e tendo recebido a matriz "XAC", bem como a posição K da linha sendo incorporada, no interior do mesmo passa-se a definição do eixo fictício em "ZETA", correspondente ao laço fechado, que posteriormente é eliminado através da redução de Kron.

A determinação do citado eixo é feita de maneira parecida àquela usada no sub-programa "RANOAC" para o novo eixo, sendo, porém, introduzido na primeira fila da matriz "ZETA". As declarações a seguir ilustram o processo.

```

        CHAVE = 0
        KB1 = KOM
10     IF(KB1.EQ.0) GO TO 60
15     SOMA = 0.
        DO 35 J = 1, II
            .
            .
            .
35     CONTINUE
        IF(CHAVE.EQ.200) GO TO 65
        IF(N1.GT.KB1) GO TO 40
        IF(N2.GT.KB1) GO TO 45
        ZETA(1,(KB1 + 1)) = ZETA(N1,(KB1 + 1)) - ZETA(N2,(KB1 + 1)) +
* SOMA/XAC(K,K)
        GO TO 55
        .
        .
        .
        .
55     KB1 = IPO(KB1)
        GO TO 10

```

onde a declaração "DO" tem por finalidade o cálculo de "SOMA" de maneira idêntica ao mesmo cálculo do sub-programa "RANOAC".

Esgotadas todas as possibilidades para KB1 entre as barras processadas, procede-se o cálculo do elemento diagonal do eixo fictício, através das seguintes declarações :

```
60  KBI = 1
    CHAVE = 200
    GO TO 15
65  ZETA(1,(MAX + 2)) = ZETA(1,(N1 + 1)) - ZETA(1,(N2 + 1)) +
    * (SOMA + 1.)/XAC(K,K)
```

Encerrada esta etapa passa-se a eliminação do eixo pela redução de Kron, o que se faz de maneira idêntica àquela descrita no sub-programa "Loop".

4.1.3.9 - Sub-Programa para Inversão de Matrizes

Este foi chamado "SHIPL" por se basear no método de inversão de Shipley.

Tem por finalidade a inversão da matriz de impedâncias de acoplamento, para a obtenção da matriz de admitâncias de acoplamento.

4.2 - CÁLCULO DAS CORRENTES NOS PONTOS DE FALTA DO SISTEMA

Concluída a montagem das matrizes de impedância nodal do sistema, conforme exposto, é chamado o sub-programa denominado "FALTA 1" no qual são calculadas as correntes de falta no sistema, bem como os fluxos de corrente nas linhas adjacentes as faltas. Neste sub-programa são lidos os dados de falta e processadas todas as matrizes e vetores necessários a seu cálculo, conforme deduzido no capítulo 3. As diversas etapas deste sub-programa, são relacionadas a seguir.

4.2.1 - Especificação das Faltas

Esta especificação é conseguida através dos dados de falta, os quais são fornecidos em duas etapas. Na primeira delas são estabelecidas as identidades dos elementos, barras ou linhas, onde ocorreram as faltas. Em caso de barras, os seus próprios números as especificam, porém em caso de linhas é preciso que sejam dados os números de suas barras iniciais e finais, os números dos circuitos correspondentes, bem como as frações das linhas, medidas em relação as barras iniciais, onde ocorreram as faltas.

Na segunda etapa, a falta em cada um dos elementos, é rigorosamente caracterizada, com vistas a montagem da matriz de incidência de falta. Para tal é necessário que o destino de cada fase do sistema, nos pontos de falta seja definido. No caso de faltas do tipo "Shunt" isto se faz definindo entre quais fases ou fases e terra foram estabelecidas ligações e quais as impedâncias das mesmas. Para faltas série, raciocinando com a linha aberta e definindo quais as ligações, bem como suas impedâncias, devem ser estabelecidas entre as três fases de cada extremidade, para que a falta fique caracterizada. Se fossemos, então, especificar a falta calculada no exemplo do capítulo 3 teríamos :

1^a Etapa:

Índice	Barra inicial	Barra final	circuito	fração
1	4	2	1	1.
2	3			

Que significa que ocorreram faltas na linha 4-2 e na barra 3. Naturalmente se a falta se dá em uma barra, perdem o sentido dados como barra final, circuito e fração.

2^a Etapa:

Índice	Fase	Fase	Impedância
	inicial	final	
1	2A	4A	0.
1	4C	T	0.
2	3B	T	0.

Que significa que na linha 4-2 a fase A está normal, a fase C do lado da barra 4 foi a terra de maneira sólida e as demais fases permanecem desconectadas. Na barra 3 a fase B foi a terra também de maneira sólida.

Os índices dados tanto em uma etapa como em outra, são responsáveis pela correlação entre os dados, ou seja para definir a que elementos da primeira etapa, correspondem os dados da segunda. No programa pode-se entrar com duplo índice na segunda etapa dos dados, prevendo-se assim possíveis faltas entre linhas do sistema.

4.2.2 - Determinação das Matrizes de Incidência de Falta

A cada cartão de dado lido na segunda etapa dos dados de falta, corresponde uma ligação da falta e portanto uma coluna da matriz de incidência de falta em componentes de fase designada $IM(I,M)$. Como a cada ligação correspondem apenas duas posições preenchidas na matriz, início e fim, ela não foi armazenada no seu todo, porém apenas os elementos de interesse. Pa

ra tal o índice "I" variou de 1 até o número total de ligações da falta "NF" e M de 1 até 2, sendo que o índice 1 indica o início da ligação e 2 seu final.

Então, para cada lado, o número da barra em falta é pesquisado entre os dados da primeira etapa sendo sua posição determinada e designada por II. Dependendo da fase A, B ou C, correspondente temos :

$$\text{Fase A} - \text{IM}(I, M) = \text{II}$$

$$\text{Fase B} - \text{IM}(I, M) = \text{NBF} + \text{II}$$

$$\text{Fase C} - \text{IM}(I, M) = 2 * \text{NBF} + \text{II}$$

Se a falta for à terra: $\text{IM}(I, M) = 0$

Naturalmente, para o cálculo das matrizes de incidência de falta de sequência positiva, negativa e nula é muito simples retirar as informações da matriz de incidência de falta em componentes de fase dada na forma "IM" através de operações inversas as usadas na sua obtenção.

Conforme mostrado pela equação (3.36) do equacionamento mostrado no capítulo 3 temos :

$$\text{AFO} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\text{AFA} + \text{AFB} + \text{AFC})$$

$$\text{AFP} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\text{AFA} + \text{S} * \text{AFB} + \text{tcS} * \text{AFC})$$

$$\text{AFN} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\text{AFA} + \text{tcS} * \text{AFB} + \text{S} * \text{AFC})$$

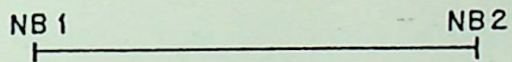
Estas somas matriciais, são obtidas computacionalmente pelas seguintes declarações :

```
S = (.5,.866)
DO 50 I = 1, NF
  KM = 1
  DO 40 M = 1,2
    IF(M.EQ.2) KM = -1
    IF(IM(I,M).LE.NBF) GO TO 10
    IF(IM(I,M).LE.(2*NBF)) GO TO 20
    II = IM(I,M) - 2 * NBF
    S1 = CONJG(S)
    GO TO 30
10  IF(IM(I,M).EQ.0) GO TO 40
    II = IM(I,M)
    S1 = (1., 0.)
    GO TO 30
20  II = IM(I,M) - NBF
    S1 = S
30  AFO(II,I) = AFO(II,I) + KM * SQRT(3.)/2.
    AFP(II,I) = AFP(II,I) + KM * S1 * SQRT(3.)/2.
    AFN(II,I) = AFN(II,I) + KM * CONJG(S1) * SQRT(3.)/2.
40  CONTINUE
50  CONTINUE
```

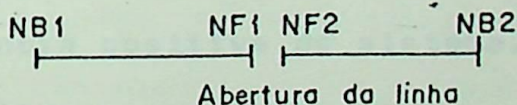
Vemos que "AFO", "AFP", "AFN", já não estão em forma compactada, como ocorria com "IM", para maior facilidade com as operações matriciais necessárias ao desenvolvimento do processo.

4.2.3 - Modificação das Matrizes de Impedância Nodal para o Cálculo da Falta

O algoritmo descrito no ítem 4.1 para montagem das matrizes de impedância nodal do sistema é empregado para o processamento dos dados de operação normal do sistema. No caso de faltas do tipo série em linhas, o cálculo da condição anormal através dos equivalentes Thèvenin, vistos dos pontos de falta, torna necessário a abertura das linhas exatamente nestes pontos. Para o completo conhecimento das características do sistema nesta nova situação é preciso que modifiquemos as matrizes de impedância nodal, em função das aberturas de linhas requeridas. Isto se faz por partes, primeiramente retirando totalmente todas as linhas envolvidas e após acrescentando linhas radiais até barras fictícias nos extremos das faltas.



Falta do tipo série



Abertura da linha

Fig. 4.8 - Abertura da linha. NF1 e NF2 são barras fictícias introduzidas

Os algoritmos usuais para abertura de linhas são bastante simples e gerais, porém podem se apresentar problemas distintos quanto aos circuitos de sequência positiva e nula, motivo pelo qual trataremos separadamente cada caso.

4.2.3.1 - Modificação da Matriz de Sequência positiva

A abertura total de uma linha pode ser conseguida computacionalmente, pela introdução, em paralelo com ela, de uma nova linha. Naturalmente a impedância desta nova linha deve ser igual e de sinal contrário a da linha existente. Assim sendo a simples utilização do sub-programa "Loop" para a introdução da nova linha referida, providencia a abertura total da linha a que nos propusemos abrir.

No caso do algoritmo em questão há a necessidade de abertura da linha apenas no ponto de falta, o que se consegue através de duas linhas radiais indo a barras fictícias, nos terminais da falta, a partir das barras inicial e final da linha aberta. Para a introdução destas linhas é usado o sub-programa "RADNOV" sendo que as impedâncias das novas linhas são calculadas pelas frações da impedância da linha anterior, correspondentes ao ponto de falta.

Este procedimento, usado para cada linha em falta do tipo série, produz as modificações na matriz de impedância nodal de sequência positiva do sistema, tornando-a pronta para o estudo das faltas.

Um só problema pode ocorrer e é o que corresponde a tentativa de estudo de uma falta série em uma linha que é radial no circuito de sequência positiva. Para esta situação o programa prevê uma mensagem de erro, já que não faz sentido tal estudo.

4.2.3.2 - Modificação da Matriz de Sequência Nula

No caso da sequência nula, se a linha submetida a falta não for magneticamente acoplada a outras, o procedimento para sua abertura é exatamente o mesmo. Porém, se houver acoplamento o processo é um pouco mais complexo. O procedimento aqui utilizado é devido a Reitan e Kruempel [10]. A abertura total da linha acoplada se faz adicionando uma linha em paralelo com ela, cuja impedância própria é igual e de sinal contrário a da original, porém com impedâncias mútuas às outras linhas idênticas às da linha original. Isso é possível através do sub-programa "LOOPAC" e de uma pequena extensão do sub-programa AUX1, que incrementa a matriz de impedâncias de acoplamento em mais uma fila e coluna, referentes a linha sendo introduzida, com base na fila e coluna referentes a linha existente.

Após a abertura total da linha, a introdução das linhas radiais indo a barras fictícias, nos terminais da falta, é conseguida através do uso do sub-programa "RANOAC", sendo que tanto as impedâncias próprias, como as de acoplamento das novas linhas, são calculadas pelas frações, das impedâncias próprias e mútuas da linha anterior, correspondentes ao ponto de falta.

Apesar do procedimento descrito, ser também relativamente simples, para a modificação da matriz de impedância nodal de sequência nula, o problema de que eventualmente seja necessário se processar a abertura de uma linha radial não pode ser evitado, devido ao fato de que pode uma linha ser radial no circuito de sequência nula, não o sendo em sequência positiva. Quando problemas desse tipo ocorrem devemos evitar o prosseguimento

normal da rotina computacional, sob o risco de provocar "overflow", devido as impedâncias infinitas que apareceriam para as barras que ficariam desprovidas de caminho até a referência.

Há vários processos com os quais poderíamos contar para contornar tal problema, dentre os quais citaremos alguns.

1. Este processo consiste na introdução de linhas ligadas entre as barras inicial e final da linha a ser aberta e a referência, com impedâncias de $1.0 |pu|$, antes de qualquer outro procedimento. Abre-se então totalmente a linha, através dos métodos citados, após o que verifica-se se alguma das barras terminais da linha, tem sua impedância igual a $1.0 |pu|$. Se isto ocorrer a correspondente barra, bem como todas a ela ligadas ficaram isoladas. A busca destas outras barras pode ser feita, com base na sub-árvore do sistema, a partir da barra isolada conhecida. Tendo, ou não se verificado o problema, devem ser retiradas as linhas auxiliares, ligadas a referência, correspondentes as barras que permaneceram conectadas ao sistema principal.

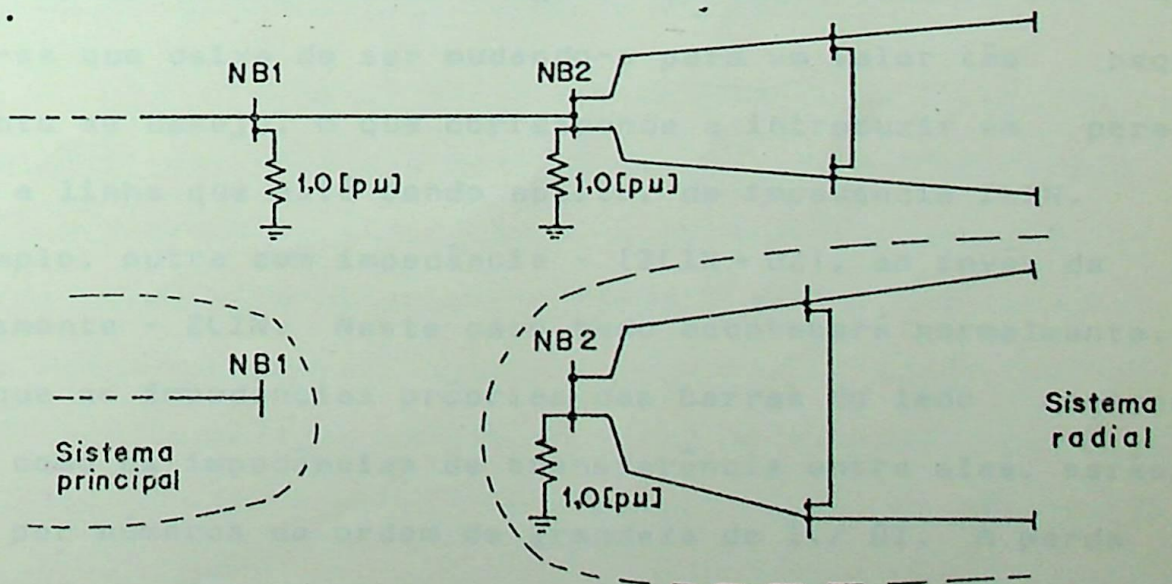


Fig. 4.9 - Abertura de linha radial

Evidentemente, as barras do sistema radial terão impedâncias próprias e de transferência entre si, infinitas e impedâncias de transferência em relação as barras do chamado sistema principal, nulas.

2. Consiste em processar naturalmente a abertura total da linha o que se faz através do sub-programa "LOOP" ou "LOOPAC". Verifica-se, porém antes de se efetuar a redução de Kron o valor do elemento diagonal do eixo fictício construído. Se for nulo, a linha que está sendo aberta é radial e o processo não tem continuidade, ao passo que em caso contrário tudo ocorre normalmente. O reconhecimento da barra que ficou do lado desconectado da referência é simples, pois corresponde àquela cuja impedância própria é maior. As demais barras isoladas podem ser reconhecidas da mesma maneira anteriormente citada.
3. Este processo é o mais simples de todos, embora não absolutamente preciso. Consiste em se determinar se a linha a ser aberta é radial ou não, da mesma maneira mostrada no processo 2. Então, se o elemento diagonal do eixo fictício for nulo, faz-se que deixe de ser mudando-o para um valor tão pequeno quanto se deseje, o que corresponde a introduzir em paralelo com a linha que está sendo aberta, de impedância Z_{LIN} , por exemplo, outra com impedância $-(Z_{LIN} + DZ)$, ao invés de simplesmente $-Z_{LIN}$. Neste caso tudo acontecerá normalmente, sendo que as impedâncias próprias das barras do lado desconexo, bem como as impedâncias de transferência entre elas, serão dadas por números da ordem de grandeza de $1./DZ$. A perda da precisão está ligada com operações feitas com estes números para cálculos de faltas, o que certamente não é problema visto

que a influência aparecerá em casas decimais que não têm interesse, se DZ for escolhido convenientemente. Além disso, poder-se-ia supor que durante a aplicação da redução de "Kron", que deve ser realizada no processo de abertura, as impedâncias das barras do sistema que permanece ligado a referência, fossem alteradas. Isto só ocorreria se houvesse por mínima que fossem, diferenças entre os valores, armazenados na memória do computador, das impedâncias de transferência das barras terminais da linha sendo extraída, para as barras daquele sistema, o que não ocorre, visto que estes valores são transferidos de uma posição de memória a outra, durante o processo de incorporação de linhas radiais a novas barras, o que garante a identidade das características e mantissas daqueles números armazenados. Este processo, devido maior simplicidade de implementação, foi utilizado neste trabalho, evitando assim maiores complicações que apenas obscureceriam o algoritmo geral empregado.

4.2.4 - Determinação das Matrizes de Impedância de Falta em Coordenadas Simétricas e de Fase

As matrizes de impedância de falta, em coordenadas simétricas, chamadas na dedução teórica de "ZB0", "ZBP" e "ZBN", são facilmente conseguidas, simplesmente extraíndo-as da matriz de impedância do sistema, "ZETA", modificada para as condições de falta. Para tal, monta-se um vetor, chamado "KBI", no qual são armazenadas as barras em falta do sistema, após o que, as declarações do tipo a seguir retiram de "ZETA", as informações de interesse.

```

DO 20 I = 1,NBF
    DO 10 J = 1, NBF
        II = I
        JJ = J
        IF(KBI(J).LE.KBI(I)) GO TO 5
        II = J
        JJ = I
5      ZBP(I,J) = ZETA(KBI(II),KBI(JJ))
        ZBP(J,I) = ZBP(I,J)
        ZB0(I,J) = ZETA(KBI(JJ),(KBI(II) + 1))
        ZB0(J,I) = ZB0(I,J)
10     CONTINUE
20    CONTINUE

```

Como podem ocorrer barras no sistema de sequência nula não processadas, pode acontecer que algum dos elementos da diagonal de ZB0 seja nulo o que significa exatamente que a barra correspondente é desconectada do sistema. Mudamos então este elemento de zero para um valor suficientemente grande, para substituir o infinito que deveria aparecer na referida posição.

Uma vez obtidas ZB0 e ZBP estamos aptos para a obtenção da matriz de impedância de falta, em componentes de fase, "ZFX", uma vez que consideramos ZBN = ZBP, pela utilização da equação (3.37) do equacionamento matemático. Assim sendo, os produtos matriciais do tipo $t_{cAF} \cdot ZB \cdot (K_F, K_F) \cdot AF$, efetuados para as três sequências e somados, nos proporcionam "ZFX", sem maiores problemas.

4.2.5 - Cálculo das Tensões Prê-Falta nas Barras em Falta

Uma vez abertas as linhas em falta do tipo série, com a conseqüente modificação das matrizes de impedância do sistema, podemos também efetuar o cálculo do chamado vetor "VBRFP", que dá, para cada barra em falta, a tensão Thèvenin usada no modelo. Naturalmente, são apenas tensões de sequência positiva, calculadas a partir das injeções de corrente nas barras de geração, que por sua vez são obtidas através dos dados de geração lidos no programa principal. Estes dados, constam, para cada gerador do sistema, ou gerador equivalente em cada barra de geração, do número da barra, impedância adequada, tensão por trás da impedância e do número do circuito da linha correspondente nos dados de linha. A medida que cada cartão é lido, são contados o número de geradores, "NG", bem como o número de barras de geração "NUBG" sendo que as barras correspondentes a cada gerador e as barras de geração são armazenadas em vetores auxiliares "NBI" e "KBG" respectivamente. Então o cálculo das injeções de corrente nas barras de geração é feito pelas declarações :

```
DO 10 I = 1, NG
```

```
10  CBG(NBG(I)) = CBG(NBG(I)) + UG(I) * SORT(3.)/ZZP(I)
```

Onde :

UG(I) é a tensão atrás da impedância do gerador I.

ZZP(I) é a impedância do gerador I.

Já de posse de "CBG", o cálculo das tensões pré-falta nas barras em falta é feito a partir dos elementos da matriz de impedância de sequência positiva modificada do sistema,

pelas seguintes declarações :

```

DO 25 I = 1, NBF
  DO 20 J = 1, NUBG
    IF(KBI(I).LT.KBG(J)) GO TO 15
    VBRFP(I) = VBRFP(I) + ZETA(KBI(I),KBG(J)) * CBG(KBG(J))
  GO TO 20
15  VBRFP(I) = VBRFP(I) + ZETA(KBG(J),KBI(I)) * CBG(KBG(J))
20  CONTINUE
25  CONTINUE

```

Note-se que no caso os valores de VBRFP(I) , correspondem as barras KBI(I), que são exatamente as barras em falta.

4.2.6 - Cálculo das Correntes através das Ligações que definem as Faltas

Estas correntes, encontradas no equacionamento matemático no vetor "CX", são dadas pela equação (3.39), e determinadas pelos produtos de matrizes, das quais já se comentou, pois :

$$CX = i(ZX + ZFX) * tcAFP * VBRFP$$

ZX é geralmente uma matriz diagonal de dimensão igual ao número de ligações que definem as faltas, "NF", evidentemente igual a de "ZFX" e a soma que aparece na equação é feita simplesmente acrescentando aos elementos diagonais de "ZFX" os correspondentes valores de "ZX".

A inversão da matriz resultante é conseguida

através do sub-programa chamado "SHIPLC" para inversão de matrizes de elementos complexos, também baseado no método de inversão de Shipley. Obtida então a matriz inversa e efetuando os produtos matriciais indicados, usando diretamente os elementos da matriz "AFP", conjugados e operados em sequência, tal como se estivesse transposta, obtém-se "CX".

"CX", é o vetor de corrente nas ligações das faltas em componentes de fase e a determinação das correntes de contribuição das barras em falta para as faltas, em componentes simétricas, são facilmente calculadas através das equações (3.42), (3.43), (3.44). Assim obtemos os vetores "CBFO", "CBFP" e "CBFN".

4.3 - CÁLCULO DAS TENSÕES PÓS-FALTA NAS BARRAS DO SISTEMA

No equacionamento do capítulo 3 as equações (3.45) e (3.46), fazem distinção entre o cálculo das tensões pós-falta nas barras em falta e nas ditas sadias. Porém os procedimentos são praticamente os mesmos não havendo, portanto, a necessidade dos cálculos por separado e após o citado "Merging" dos vetores.

Assim sendo os vetores VBO, VBP e VBN, são calculados por inteiro, a uma só vez, no programa em questão. Para tal há a necessidade de se calcular as tensões pré-falta nas barras sadias, o que se faz de maneira idêntica àquela usada para as barras em falta. As declarações a seguir, resolvem o problema de maneira rápida e simples.

```

      I = KOM
10  IF(I.EQ.0) GO TO 25
      DO 20 J = 1, NBF
      IF(I.LT.KBI(J)) GO TO 15
      VBP(I) = VBP(I) + ZETA(I,KBI(J)) * CBFP(J)
      VBN(I) = VBN(I) - ZETA(I,KBI(J)) * CBFN(J)
      VBO(I) = VBO(I) - ZETA(KBI(J),(I + 1)) * CBFO(J)
15  VBP(I) = VBP(I) + ZETA(KBI(J),I) * CBFP(J)
      .
      .
      .
      .
20  CONTINUE
      VBP(I) = VBRFP(I) - VBP(I)
      I = IPO(I)
      GO TO 10

```

Naturalmente, em IPO estão incluídas todas as barras, sadias ou não e a rotina mostrada calcula as tensões pós falta em todas as barras do sistema. Note-se que as declarações omitidas são idênticas as anteriores, simplesmente invertendo-se os índices de "ZETA" como feito na declaração 15 em relação a correspondente anterior.

4.4 - CÁLCULO DOS FLUXOS DE CORRENTES NAS LINHAS DO SISTEMA, DEVIDO AS FALTAS

Uma vez calculadas as tensões, em componentes simétricas, em todas as barras do sistema é imediato o cálculo dos fluxos de corrente em suas linhas, também em componentes simétricas. Não foram, porém, utilizadas as equações (3.47), (3.48) e (3.49) por motivo de eficiência do programa.

Como aparecem algumas pequenas diferenças nos cálculos dos fluxos de corrente de sequência positiva, negativa e nula, cada caso será analisado separadamente, visando melhor entendimento dos métodos empregados.

4.4.1 - Fluxos de Corrente de Sequência Positiva

Neste caso há que se distinguir duas situações distintas que se referem a linhas correspondentes a geradores, ou linhas simplesmente passivas.

Em se tratando de linhas ativas, uma de suas barras forçosamente será a referência e a outra constará da lista de barras de geração. Verifica-se, em cada caso, a tensão por trás da impedância adequada do gerador correspondente, "UG" e o cálculo do fluxo de corrente se processa através da declaração:

$$CP = (UG(J) * SORT(3.) - VBP(N1)) / ZPOS(LIN)$$

Onde :

LIN é o código da linha na qual se calcula o fluxo.

J é o código da linha correspondente a "LIN" nos dados de geração.

N1 é o número da barra de geração.

CP é o fluxo de corrente de sequência positiva na linha.

No caso de linhas passivas o cálculo do fluxo de corrente é feito através do quociente entre a diferença de tensão de sequência positiva em suas barras terminais e suas impedâncias de sequência positiva.

Então :

$$CP = (VBP(N1) - VPB(N2))/ZPOS(LIN)$$

4.4.2 - Fluxos de Corrente de Sequência Negativa

Em sequência negativa não aparecem problemas para cálculo dos fluxos de corrente, que são feitos do mesmo modo que para sequência positiva, em linhas passivas.

$$CN = (VBN(N1) - VBN(N2))/ZPOS(LIN)$$

4.4.3 - Fluxos de Corrente de Sequência nula

Neste caso devemos distinguir diversas situações devido aos acoplamentos magnéticos entre as linhas, que em sequência nula podem ocorrer.

Para as linhas não acopladas os cálculos dos fluxos de sequência nula são tão simples quanto os de sequência negativa e neste caso calculados pela declaração :

$$CO = (VBO(N1) - VBO(N2))/ZZER(LIN)$$

Para as linhas acopladas o processo é um pouco mais complexo sendo necessário, a cada vez, a montagem da matriz de admitâncias de acoplamento das linhas pertencentes ao mesmo grupo daquela onde o fluxo se calcula.

Assim, não tendo sido considerado nenhuma falta do tipo série em alguma das linhas do grupo, o fluxo de corrente de sequência nula, em alguma delas, é dado por :

$$C = XAC(K,K) * (VBO(N1) - VBO(N2)) + SOMA$$

Onde :

XAC(K,K) é a admitância própria da linha N1 - N2, retirada da matriz de admitâncias de acoplamento.

SOMA é a soma de produtos do tipo "XAC(K,J) * (VBO(N) - VBO(N4))", onde "XAC(K,J)" são as admitâncias de acoplamento entre as linhas "N1 - N2" e "N3 - N4" para todas as linhas "N3 - N4" do mesmo grupo de acoplamento de "N1 - N2".

Tendo sido considerado falta série em alguma das linhas do grupo, processa-se o cálculo da matriz de admitâncias de acoplamento apenas das linhas que não sofreram problema, visto que o efeito da linha em falta é incluído diretamente através das impedâncias de acoplamento entre ela e as demais, em virtude de já serem conhecidas as correntes nesta linha, por se tratarem de correntes de falta. Na determinação de "SOMA" cada parcela é influenciada pelas correntes da linha acoplada em falta e no cálculo final do fluxo, esta influência é novamente considerada, sendo o resultado obtido. Poder-se-ia efetuar este mesmo cálculo de outra maneira, considerando a matriz de admitâncias de acoplamento total do grupo, modificada, para a condição de falta. Julgamos, porém este procedimento menos eficiente, pois além de exigir a modificação dos dados de acoplamento, implica na montagem e inversão de matrizes de impedâncias de acoplamento de maiores ordens.

5 - DADOS GERAIS DO SISTEMA E DAS FALTAS

Conforme já mencionado, são necessários para o processamento do programa desenvolvido os seguintes dados :

Dados de linha;

Dados de acoplamento magnético entre linhas;

Dados de geração;

Dados dos elementos em falta;

Dados específicos de cada falta.

Cada conjunto de dados citados acima é fornecido em um bloco de cartões separados por cartão "flag" em branco. Descrevemos a seguir as peculiaridades de cada um deles.

5.1 - DADOS DE LINHA

Entende-se por linha, neste caso, qualquer elemento do sistema, quer seja um gerador, transformador, carga, linha de transmissão, etc.. Naturalmente, a cada um deles deverá corresponder um conjunto de características, diferindo para cada tipo de elemento. De um modo geral a cada elemento deve constar os seguintes dados, com os respectivos símbolos empregados :

ICOD(I) - Código, conforme mencionado no item 4.1.2.

NB1(I) - Número da barra inicial.

NB2(I) - Número da barra final.

ZPOS(I) - Impedância de sequência positiva.

Dados gerais do sistema e das faltas

ZZER(I) - Impedância de sequência nula.

ZTER(I) - Impedância de aterramento.

NCIRC(I) - Número do circuito correspondente.

Todas as impedâncias devem ser dadas em valores por unidade, sendo os valores base convenientemente escolhidos.

Exceção feita aos transformadores, cujos dados são um pouco mais complicados, para os demais elementos não deverá ocorrer problemas. Discutiremos, portanto, apenas os casos referentes a transformadores.

5.1.1 - Transformadores de Dois Enrolamentos

Para estes tipos de elementos há códigos específicos, conforme ítem 4.1.2, dependendo de seu comportamento em relação às correntes de sequência nula. Deve-se simplesmente prestar atenção a coerência entre o código e a ordem em que são dados os números das barras terminais. Seja o exemplo da figura 5.1.

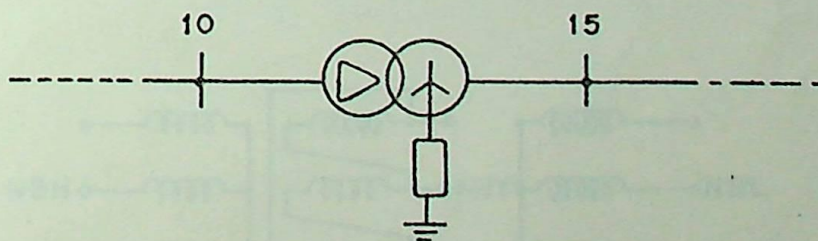


Fig. 5.1

Dados gerais do sistema e das faltas

O transformador mostrado na figura anterior, obviamente pode ser considerado triângulo-estrela ou estrela-triângulo, conforme observado a partir da barra 10 ou 15 respectivamente. Pode-se, portanto, atribuir-se-lhe código 1 ou 2 dependendo do que se considera barra inicial e final. Os dados podem ser:

ICOD = 2 NB1 = 10 NB2 = 15 , ou
ICOD = 1 NB1 = 15 NB2 = 10

Os demais dados são perfeitamente normais, não necessitando de maiores comentários.

5.1.2 - Transformadores Três Enrolamentos

Desde que sejam desprezadas as correntes de magnetização, tais elementos são dados através de suas estrelas equivalentes, onde as barras centrais são fictícias e aparecem exclusivamente devido ao modelo empregado na representação dos transformadores. Assim sendo a um transformador de três enrolamentos correspondem três linhas, que devem ser dadas separadamente. A cada uma delas se associa um dos códigos que seja coerente com seu comportamento perante as correntes de sequência nula.

Seja, por exemplo, o transformador de três enrolamentos mostrado na figura 5.2.

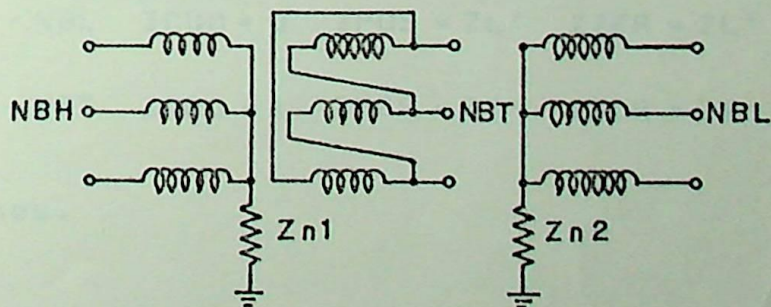


Fig. 5.2

Dados gerais do sistema
e das faltas

As barras reais existentes "NBH", "NBL", "NBT",
deve-se juntar a fictícia "NBF", para a obtenção da estrela equi-
valente, que para cada sequência será :

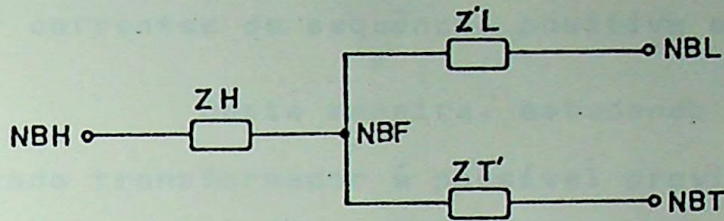


Fig. 5.3 - Estrela de sequência positiva

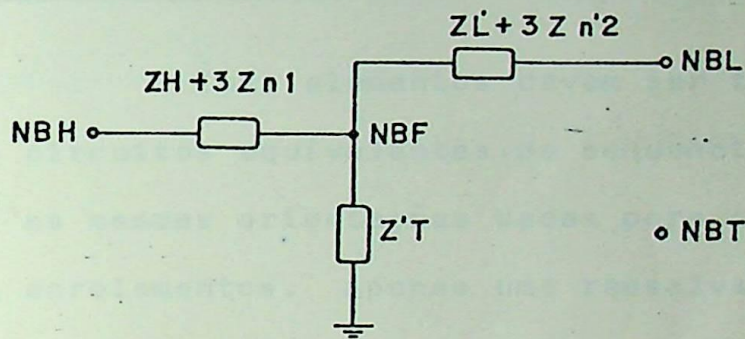


Fig. 5.4 - Estrela de sequência nula

Facilmente verificamos que os dados relativos
ao transformador em questão, devem ser os seguintes :

Linha NBH - NBF ICOD = 0 ZPOS = ZH ZZER = ZH ZTER = Zn1,

Linha NBF - NBL ICOD = 0 ZPOS = ZL' ZZER = ZL' ZTER = Zn2',

Linha NBF - NBT ICOD = 1 ZPOS = ZT' ZZER = ZT' ZTER = 0. ,

ou equivalentes.

Se no mesmo transformador da figura 5.2, o

Dados gerais do sistema e das faltas

terciário ligado em triângulo, não tivesse conexão externa, servindo apenas como caminho para as correntes de terceiro harmônico e de sequência nula, a situação seria um tanto distinta, cabendo a tal enrolamento o código 4, devido ao fato de não poder ser percorrido por correntes de sequência positiva e negativa.

Desta maneira, estudando os circuitos equivalentes de cada transformador é possível providenciar seus dados de maneira coerente com o exposto e portanto correta para o exigido pelo programa.

5.1.3 - Autotransformadores

Tais elementos devem ser também dados de acordo com seus circuitos equivalentes de sequência positiva e nula, seguindo-se as mesmas orientações dadas para os transformadores de dois e três enrolamentos. Apenas uma ressalva deve ser feita e se refere as impedâncias de aterramento que devem ser atribuídas a cada uma das linhas do circuito equivalente do autotransformador. Seja o exemplo mostrado na figura 5.5.

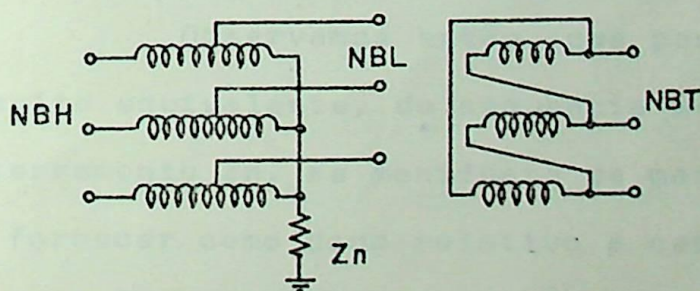


Fig. 5.5

Dados gerais do sistema
e das faltas

Os circuitos equivalentes em cada sequência são :

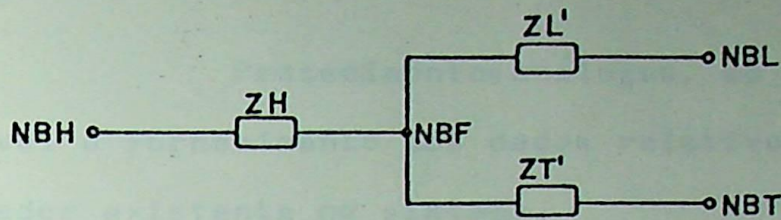


Fig. 5.6 - Equivalente de sequência positiva

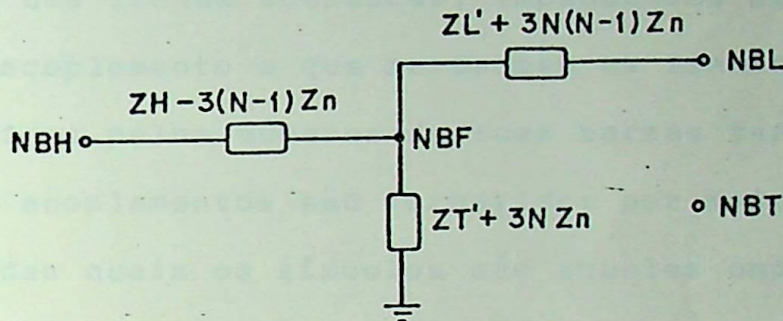


Fig. 5.7 - Equivalente de sequência nula

Onde N é a relação de tensões entre o lado H e o lado L do auto-transformador.

Observamos então, que para cada uma das linhas do circuito equivalente, de sequência nula, o efeito da impedância de aterramento Z_n , se manifesta de maneira diferente e devemos então fornecer como dado relativo a cada uma delas um valor fictício de impedância de aterramento, para que o resultado final seja correto. No caso do exemplo acima estes dados seriam :

Linha NBH - NBF ICOD = 0 ZPOS = Z_H ZZER = Z_H ZTER = $-(N-1) Z_n$,

Linha NBF - NBL ICOD = 0 ZPOS = $Z_{L'}$ ZZER = $Z_{L'}$ ZTER = $N(N-1) Z_n$,

*Dados gerais do sistema
e das faltas*

pladas, corresponde um cartão no qual são fornecidas todas as informações requeridas. Seja então o exemplo mostrado na figura abaixo, onde aparecem apenas as linhas de interesse de um sistema de potência qualquer.

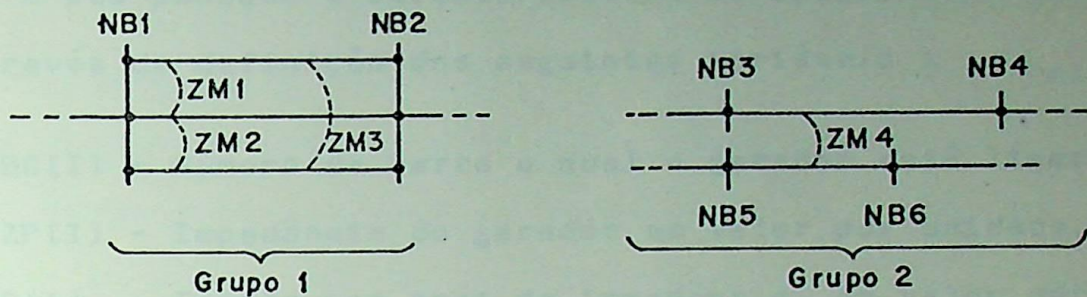


Fig. 5.8 - Diagrama unifilar de partes de um sistema elétrico

Os dados então seriam :

Nº DO GRUPO	DE	PARA	CIRC.	DE	PARA	CIRC.	IMP. MÚTUA
1	NB1	NB2	1	NB1	NB2	2	ZM1
1	NB1	NB2	2	NB1	NB2	3	ZM2
1	NB1	NB2	1	NB1	NB2	3	ZM3
2	NB3	NB4	1	NB5	NB6	1	ZM4

Conforme mencionado em 4.1.2, se uma nova linha for construída unindo dois grupos de acoplamento esta situação é facilmente contornada, atribuindo à nova linha o número do grupo formado pela reunião dos algarismos dos grupos unidos, em qualquer ordem.

5.3 - DADOS DE GERAÇÃO

Nestes dados constam todas as barras de geração, bem como todos os geradores que entraram nos dados de linha. Para cada um deles são fornecidas todas as informações no que se refere a sua posição e características de operação. Isso é possível através da definição das seguintes variáveis :

NBG(I) - Número da barra a qual o gerador está ligado.

ZZP(I) - Impedância do gerador em valor por unidade.

UG(I) - Tensão por trás da impedância, em valor por unidade.

NCIRC2(I) - Número do circuito correspondente ao gerador em questão.

A cada gerador deve corresponder um cartão de dados contendo as quatro informações requeridas, das quais a única que não é conhecida diretamente é a tensão por trás da impedância "UG(I)", que deve ser calculada a partir do "load flow" do caso base de operação do sistema, através das tensões e fluxos de potência ativa e reativa nas barras de geração. Suponhamos, para exemplo uma barra, "NBG(I)", na qual está conectada o gerador "I", onde são conhecidas :

VBP(NBG(I)) - Tensão de operação em valor por unidade.

$S(I) = P(I) + JQ(I)$ - Potência entregue pelo gerador em valor por unidade.

Então :

$C(I) = \text{CONJG}(S(I)) / \text{CONJG}(VBP(NBG(I)))$ - Corrente no gerador.

$UG(I) = VBP(NBG(I)) + ZZP(I) * C(I)$

Dados gerais do sistema e das faltas

Desta maneira, para cada gerador, calcula-se a tensão por trás da impedância, completando os dados de geração.

5.4 - DADOS DOS ELEMENTOS EM FALTA

Com estes dados são especificados os locais em falta, quer sejam barras ou linhas, aos quais são atribuídos índices que aparecerão novamente nos dados específicos de cada falta. Assim sendo, a cada elemento em falta devem corresponder os seguintes dados, com os respectivos símbolos empregados :

KLF(I) - Índice do elemento em falta

NBFC(1,I) - Número da barra inicial do elemento em falta

NBFC(2,I) - Número da barra final do elemento em falta

NCIRC(I) - Número do circuito do elemento em falta

PERC(I) - Fração da linha, a partir da barra inicial, onde ocorreu a falta.

Evidentemente, se o elemento em falta for uma barra do sistema, só têm sentido as duas primeiras variáveis do conjunto mencionado, sendo o restante ignorado.

Um exemplo de utilização dessa maneira de se dar os elementos em falta, já foi mostrado na chamada primeira etapa de especificação das faltas, no ítem 4.2.1 deste trabalho.

5.5 - DADOS ESPECÍFICOS DE CADA FALTA

Cada um dos índices constantes dos dados dos elementos em falta, deve aparecer novamente, uma ou mais vezes, nos dados específicos de cada falta, para a indicação exata do ti

Dados gerais do sistema e das faltas

po de defeito ocorrido em todos os elementos em falta. Conforme mencionado anteriormente, estes dados são necessários a montagem da matriz de incidência de falta e portanto dizem respeito às ligações que definem a situação ocorrida em cada elemento. Isto se consegue repetindo, para cada ligação, o índice do elemento a que corresponde, no caso de falta própria, ou os índices dos elementos, no caso de falta entre dois quaisquer deles, e após definindo a trajetória da referida ligação.

As variáveis que entram em jogo neste caso são :

LIN1 - Índice do primeiro elemento envolvido,

LIN2 - Índice do segundo elemento envolvido

NBI(1) - Número da barra inicial da ligação

KODI(1) - Fase referente ao início da ligação

NBI(2) - Número da barra final da ligação

KODI(2) - Fase referente ao final da ligação

Z(I) - Impedância da ligação.

Como regra, para o conjunto de dados citados, deve-se ressaltar que no caso de falta entre elementos LIN1 e NBI(1) devem se referir ao mesmo elemento, assim como LIN2 e NBI(2), e para falta própria LIN2 não tem sentido. As variáveis KODI(1) e KODI(2) poderão receber os "valores" "A", "B", "C" ou "T", que se referem as três fases do sistema e a barra de referência, respectivamente.

Um exemplo de utilização do procedimento descrito foi mostrado na chamada segunda etapa de especificação das faltas, no ítem 4.2.1 deste trabalho.

6 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Mostramos a seguir, alguns exemplos de aplicação do programa desenvolvido, para o cálculo de faltas em sistemas simples, visando tanto sua comprovação como a análise dos resultados obtidos em diferentes situações. Obviamente a utilização de sistemas complexos para o propósito em questão não tem razão de ser, visto que apenas obscureceriam a análise a ser feita. No mais, o esforço adicional, necessário ao processamento de sistemas de grande porte, se restringe a montagem e eventual modificação das matrizes de impedância nodal de tais sistemas, já que a complexidade da realização do algoritmo de falta depende quase que exclusivamente da falta em si, e não do sistema que a sofreu.

6.1 - EXEMPLO NÚMERO 1

Seja como primeiro exemplo o cálculo automático da falta calculada manualmente no item 3.2. Então, para o sistema mostrado na figura 3.2 e de acordo com a tabela 3.1, os dados são :

a. Dados de linha

ICOD(I)	NB1(I)	NB2(I)	ZPOS(J)	ZZER(J)	ZTER(I)	NCIRC(I)
0	0	1	0.25	0.05	0.	1
0	0	1	2.00	2.00	0.	2
0	0	2	0.30	0.10	0.	1
0	0	2	0.30	0.10	0.	2
1	3	4	0.10	0.10	0.	1
0	0	4	1.00	1.00	0.	1

Exemplos de aplicação

ICOD(I)	NB1(I)	NB2(I)	ZPOS(J)	ZZER(J)	ZTER(I)	NCIRC(I)
0	1	3	0.10	0.20	0	1
0	4	2	0.10	0.30	0	1

CARTÃO EM "BRANCO".

b. Dado de acoplamento

CARTÃO EM "BRANCO"

c. Dados de geração

NBG(I)	ZZP(I)	Re UGP(I)	Im UGP(I)	NCIRC2(I)
1	0.25	1.10	0.	1
2	0.30	1.20	0.	1
2	0.30	1.00	0.	2

CARTÃO EM "BRANCO"

Para a falta especificada, mostrada na figura

3.6, os dados são :

a. Dados dos elementos em falta.

KLF(I)	NBFC(1,I)	NBFC(2,I)	NCIR(I)	PERC(I)
1	4	2	1	1.
2	3			

CARTÃO EM "BRANCO"

b. Dados específicos de cada falta

Exemplos de aplicação

LIN1	LIN2	NBI(1)	KODI(1)	NBI(2)	KODI(2)	Z(I)
1		2	A	4	A	0.
1		4	C		T	0.
2		3	B		T	0.

CARTÃO EM "BRANCO".

A listagem dos resultados, fica como se segue.

20.07.1978

FOKA N D.

240975

HV09(70)

TR 86 FORTRAN COMPILER

UP FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 25780 ZELLEN OHNE COMMON

UP DASSU? FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 285 ZELLEN OHNE COMMON

UP PADREF FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 74 ZELLEN OHNE COMMON

UP RADMOV FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 219 ZELLEN OHNE COMMON

UP LUMP FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 627 ZELLEN OHNE COMMON

UP CHARGE FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 197 ZELLEN OHNE COMMON

UP AUX1 FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 619 ZELLEN OHNE COMMON

UP PA1C4C FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 878 ZELLEN OHNE COMMON

UP LOOPAC FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 1052 ZELLEN OHNE COMMON

UP SM1PL FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 340 ZELLEN OHNE COMMON

UP SM1PLC FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 349 ZELLEN OHNE COMMON

UP FALTAI FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF 9658 ZELLEN OHNE COMMON

TR 86 FORTRAN COMPILER HV09(70) 240975 07.09.74 UHR STARTE DI

PROGRAMPLANGE 47044

ENDE OCP COMPILATION

20.07.1978

CARACTERISTICAS POS-FALTA DAS BARRAS EM FALTA

NO. DA BARRA	TENSOES				CORRENTES PARA A FALTA							
	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. NULA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. NULA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA				
4	0.587	0.138	0.383	-0.293	0.611	-0.008	-0.292	-0.210	-0.814	0.529	0.088	0.611
2	1.059	-0.051	-0.047	-0.051	-0.016	-0.017	0.339	-0.310	0.339	-0.310	0.339	-0.310
3	0.666	0.123	0.369	-0.360	0.099	0.140	-0.228	-2.390	2.184	0.998	-1.956	1.353

CONTRIBUICOES DE CORRENTES DE SEQUENCIA POSITIVA E NEGATIVA DAS LINHAS ADJACENTES AS FALTAS

CONTRIBUICOES PARA A BARRA 4											
NO. DA BARRA	NO. DO CONTRIBUINTE	CIRCUITO	TENSOES				CORRENTES DE CONTRIBUICAO				
			SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	
3	1	1	0.666	0.123	0.369	-0.360	-0.154	-0.797	-1.067	0.146	
0	1	1	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.128	0.587	0.253	0.383	

CONTRIBUICOES PARA A BARRA 2											
NO. DA BARRA	NO. DO CONTRIBUINTE	CIRCUITO	TENSOES				CORRENTES DE CONTRIBUICAO				
			SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	
0	1	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.170	-0.732	0.170	-0.155	
0	1	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.170	0.422	0.170	-0.155	

CONTRIBUICOES PARA A BARRA 3											
NO. DA BARRA	NO. DO CONTRIBUINTE	CIRCUITO	TENSOES				CORRENTES DE CONTRIBUICAO				
			SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	
4	1	1	0.587	0.138	0.383	-0.293	-0.293	0.154	0.797	1.067	-0.146
1	1	1	0.985	0.085	0.253	-0.248	-0.302	-2.187	1.117	1.144	

CONTRIBUICOES DE CORRENTE DE SEQUENCIA NULA DAS LINHAS ADJACENTES AS FALTAS

CONTRIBUICOES PARA A BARRA 4

NO. DA BARRA	NO. DO CIRCUITO	TENSAD DE SEQ, NULA	CORRENTE DE SEQ, NULA
0	1	0,000	0,088
		0,000	0,611

CONTRIBUICOES PARA A BARRA 2

NO. DA BARRA	NO. DO CIRCUITO	TENSAD DE SEQ, NULA	CORRENTE DE SEQ, NULA
0	1	0,000	0,170
		0,000	-0,155
0	2	0,000	0,170
		0,000	-0,155

CONTRIBUICOES PARA A BARRA 3

NO. DA BARRA	NO. DO CIRCUITO	TENSAD DE SEQ NULA	CORRENTE DE SEQ, NULA
0	1	0,000	-1,395
		0,000	0,993
1	1	0,019	-0,561
		0,027	0,399

STOP : 19.07.1978 01.46.37 UHR

6.2 - EXEMPLO NÚMERO 2

Seja o sistema da figura 6.1 e a falta simultânea mostrada na figura 6.2.

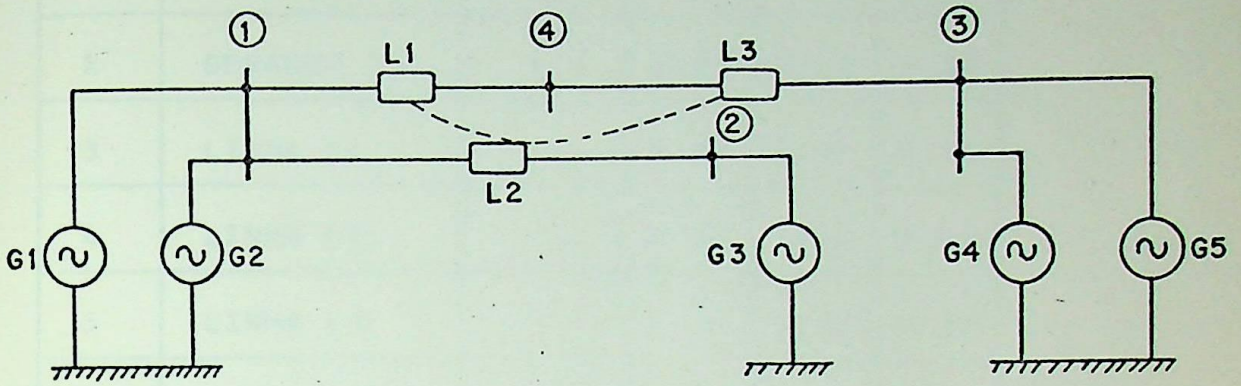


Fig. 6.1

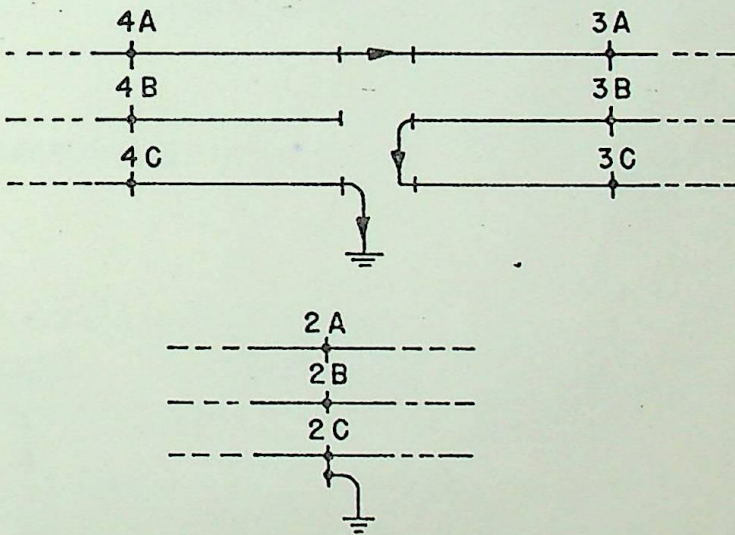


Fig. 6.2

Exemplos de aplicação

Dados de linha em valores pu, para uma potência base comum :

ITEM	ESPECIFICAÇÃO	F.E.M.	X0	X1	X2
1	GERADOR G1	1.1	0.20	0.20	0.20
2	GERADOR G2	1.1	0.20	0.20	0.20
3	LINHA L1	-	0.20	0.20	0.20
4	LINHA L2	-	0.40	0.40	0.40
5	LINHA L3	-	0.30	0.30	0.30
6	GERADOR G3	1.1	0.50	0.50	0.50
7	GERADOR G4	1.1	1.00	1.00	1.00
8	GERADOR G5	1.1	1.00	1.00	1.00

Tabela 6.1

Dados de acoplamento em valores pu , para uma potência base comum :

LINHAS		IMPEDÂNCIA MÚTUA
LINHA L2	LINHA L1	0.10
LINHA L2	LINHA L3	0.20

Tabela 6.2

Então a codificação dos dados deve ser feita do seguinte modo :

a. Dados de linha

ICOD(I)	NB1(I)	NB2(I)	ZPOS(I)	ZZER(I)	ZTER(I)	NCIRC(I)
0	0	1	0.20	0.20	0.	1
0	0	1	0.20	0.20	0.	2
0	1	4	0.20	0.20	0.	1
0	1	2	0.40	0.40	0.	1
0	4	3	0.30	0.30	0.	1
0	0	2	0.50	0.50	0.	1
0	0	3	1.00	1.00	0.	1
0	0	3	1.00	1.00	0.	2

CARTÃO EM "BRANCO"

b. Dados de acoplamento

NGR(I)	NBAC(I,1)	NBAC(I,2)	NCIRC1(I,1)	NBAC(I,3)
1	1	2	1	1
1	1	2	1	4

NBAC(I,4)	NCIRC1(I,2)	ZM(I)
4	1	0.10
3	1	0.20

CARTÃO EM "BRANCO"

c. Dados de geração

NBG(I)	ZZP(I)	Re UGP(I)	Im UGP(I)	NCIRC2(I)
1	0.20	1.10	0.	1
1	0.20	1.10	0.	2

Exemplos de aplicação

NBG(I)	ZZP(I)	Re UGP(I)	Im UGP(I)	NCIRC2(I)
2	0.50	1.10	0.	1
3	1.00	1.10	0.	1
3	1.00	1.10	0.	2

CARTÃO EM "BRANCO"

d. Dados dos elementos em falta

KLF(I)	NBFC(1,I)	NBFC(2,I)	NCIR(I)	PERC(I)
1	4	3	1	0.50
2	2			

CARTÃO EM "BRANCO"

e. Dados específicos de cada fila

LIN(1)	LIN(2)	NBI(1)	KODI(1)	NBI(2)	KODI(2)	Z(I)
1		4	A	3	A	0.
1		3	B	3	C	0.
1		4	C		T	0.
2		2	C		T	0.

CARTÃO EM "BRANCO"

A listagem dos resultados fica como se segue.

CARACTERISTICAS POS-FAITA DAS BARRAS EM FALTA

NO. DA BARRA	TENSÕES				CORRENTES PARA A FALTA							
	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. NULA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA	SEQ. NULA	SEQ. POSITIVA	SEQ. NEGATIVA				
4	1.469	0.019	0.202	0.388	0.237	-0.402	-0.065	-1.127	-1.009	0.507	0.878	0.507
3	1.191	-0.033	0.752	-0.033	0.019	-0.033	0.065	-1.428	0.065	1.503	0.065	0.038
2	1.301	0.003	0.299	0.525	0.341	-0.603	-0.000	-3.192	-1.899	1.096	1.899	1.096

CONTRIBUICOES DE CORRENTES DE SEQUENCIA POSITIVA E NEGATIVA DAS LINHAS ADJACENTES AS FALTAS

CONTRIBUICOES PARA A BARRA			TENSÕES			CORRENTES DE CONTRIBUICAO				
NO. DA BARRA	NO. DO CIRCUITO	SEQ.	POSITIVA	NEGATIVA	SEQ.	POSITIVA	NEGATIVA	SEQ.		
1	1	1	1.694	0.006	0.130	0.186	-0.065	-1.127	-1.009	0.507

CONTRIBUICOES PARA A BARRA			TENSÕES			CORRENTES DE CONTRIBUICAO				
NO. DA BARRA	NO. DO CIRCUITO	SEQ.	POSITIVA	NEGATIVA	SEQ.	POSITIVA	NEGATIVA	SEQ.		
0	1	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023	-0.714	0.033	0.752
0	1	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	-0.714	0.033	0.752

CONTRIBUICOES PARA A BARRA			TENSÕES			CORRENTES DE CONTRIBUICAO				
NO. DA BARRA	NO. DO CIRCUITO	SEQ.	POSITIVA	NEGATIVA	SEQ.	POSITIVA	NEGATIVA	SEQ.		
0	1	1	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.007	-1.209	-1.050	0.599
1	1	1	1.694	0.006	0.100	0.186	0.007	-0.983	-0.848	0.497

CONTRIBUICOES DE CORRENTE DE SEQUENCIA NULA DAS LINHAS ADJACENTES AS FALTAS

CONTRIBUICOES PARA A BARRA 4

NO. DA BARRA	NO. DO	TENSAD DE	CORRENTE DE
CONTRIBUINTE	CIRCUITO	SEQ. NULA	SEQ. NULA
1	1	0.091	0.1178
		=0.157	0.507

CONTRIBUICOES PARA A BARRA 3

NO. DA BARRA	NO. DO	TENSAD DE	CORRENTE DE
CONTRIBUINTE	CIRCUITO	SEQ. NULA	SEQ. NULA
0	1	0.000	0.023
0	2	0.000	0.023

CONTRIBUICOES PARA A BARRA 2

NO. DA BARRA	NO. DO	TENSAD DE	CORRENTE DE
CONTRIBUINTE	CIRCUITO	SEQ. NULA	SEQ. NULA
0	1	0.000	1.206
1	1	0.091	0.692

STOP 20.07.1978

07.10.28 UHR

6.3 - OBSERVAÇÕES

Nos exemplos mostrados nota-se algumas características do programa ainda não mencionados. Dentre elas destacamos, na saída dos resultados, os fluxos de corrente calculados apenas para as linhas diretamente ligadas as faltas bem como a separação entre os fluxos de corrente de sequência positiva e negativa dos fluxos de sequência nula, nas linhas em questão. O primeiro aspecto se deve ao fato da grande dificuldade que apareceria na análise dos resultados de faltas, em grandes sistemas, se fossem calculados os fluxos em todas as linhas. O segundo é devido a consideração de topologia distinta para o circuito de sequência nula, o que dá origem a uma lista de linhas particular para esta sequência, que convém seja pesquisada em separado, para melhor eficiência do cálculo dos fluxos de corrente.

Outro aspecto, que não ficou evidente e portanto deve ser citado é que, devido a capacidade de memória do computador utilizado para os testes do programa, para que fosse possível dimensioná-lo para sistemas de até 100 barras e 150 linhas, foi necessário que apenas as reatâncias dos elementos levadas em consideração, sendo suas resistências desprezadas. Porém o programa fica perfeitamente válido para casos em que esta simplificação não for possível, desde que algumas variáveis passem a ser declaradas em "COMPLEX" e que o dimensionamento geral seja reestudado.

7 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS

Foi apresentado, neste trabalho, um algoritmo geral para estudo de faltas em sistemas elétricos a partir de seu equacionamento matemático até as técnicas computacionais envolvidas em sua implementação.

Relativamente ao equacionamento, partiu-se já das características elétricas dos elementos do sistema em valores por unidade, o que evidentemente levou a resultados também dessa natureza. Como geralmente os valores base de tensão ao longo do sistema devem ser adotados como quantidades complexas adequadas, os defasamentos possíveis entre as tensões terminais dos transformadores não aparecem na sua representação, ficando cada um deles reduzido a simples associações de impedância. Portanto, quando do cálculo das correntes de falta, bem como dos correspondentes fluxos nas linhas, seus módulos são corretos, não o sendo, porém, de um modo geral, suas fases. Se for necessário, por alguma razão, o conhecimento dos valores reais, em coordenadas de fase, daquelas correntes os procedimentos não são triviais, devendo-se levar em consideração todas as defasagens entre as tensões e correntes nos terminais de todos os transformadores do sistema, a partir de uma barra, preferivelmente de geração, escolhida para tal fim, havendo ainda a necessidade de separar as defasagens em termos de sequência positiva e negativa. O referido cálculo, para que fosse feito automaticamente, envolveria a construção de matrizes de irradiação ("path matrix") do sistema, a partir da barra escolhida, levando em conta todas as defasagens existentes em cada sequência.

Com relação as técnicas computacionais empre-

gadas, podemos dizer que em alguns aspectos poderiam ser aprimoradas, principalmente no que diz respeito a memória necessária ao programa. Seria possível por exemplo a introdução de técnicas tal como o "packing" de vários tipos de informações, descarte de barras, equivalentes, etc., que naturalmente trariam complicações adicionais, aumentando os tempos de processamento, trazendo, porém, a vantagem do aumento das dimensões máximas dos sistemas possíveis de serem estudados. A análise de diversas contingências, poderia ser feita através da extração e modificação apenas das informações contidas em "ZETA" relacionadas diretamente com as partes do sistema envolvidas em cada caso, o que proporcionaria muita flexibilidade do programa, bem como rapidez de processamento.

Há que se ressaltar, porém, que em termos dos objetivos estabelecidos previamente e a menos dos referidos melhoramentos possíveis, nos encontramos diante de uma ferramenta flexível, implementada através de técnicas eficientes, que possibilita o estudo das mais diversas situações de desequilíbrio em sistemas elétricos, o que permitirá o estudo de configurações críticas, mas viáveis em termos probabilísticos, segundo as quais as solicitações a que ficarão sujeitos os equipamentos sejam mais rigorosas que aquelas até agora previstas para os mesmos. Naturalmente, um estudo desta natureza deve ser exaustivo, baseado em situações de probabilidade aceitáveis e visando estabelecer as condições mais desfavoráveis, principalmente em função das solicitações de correntes de sequência negativa e nula.

B I B L I O G R A F I A

LIVROS

- [1] - Homer E. Brown "Solution of Large Networks by Matrix Methods" John Wiley & Sons, Inc. New York, 1975
- [2] - P.M. Anderson "Analysis of Faulted Power Systems" The Iowa State University Press/AMES, 1973
- [3] - The Electricity Council "Power System Protection - Volume 1" Mcdonald & Co., London, 1969
- [4] - A.T. Bertiziss "Data Structures - Theory and Practice" 2nd Ed. Academic Press, New York, 1975
- [5] - E. Clarke "Circuit Analysis of A.C. Power Systems, Symmetrical and Related Components, Vol. 1" Wiley, 1943
- [6] - John R. Rice "Mathematical Software" Academic Press, New York, 1971

ARTIGOS

- [7] - H.E. Brown, C.E. Person, L.K. Kirchmayer, and G.W. Stagg - "Digital Calculation of three-phase short circuit by matrix method" Trans. AIEE, Vol. 79, Part.III, 1960, p.p. 1277 - 1281.
- [8] - L.W. Coombe and D.G. Lewis "Digital Calculation of Short Circuit Currents in Large Complex-impedance Networks" - Trans. AIEE, Vol. 75, Part. III, 1956, p.p. 1394 - 1397
- [9] - A.H. El Abiad "Digital Calculation of Line to Ground Short Circuit by Matrix Methods" Trans. AIEE, Vol. 79, Part.III, 1960, p. 323.

Bibliografia

- [10] - D.K. Reitan and K.C. Kruempel "Modification of the bus Impedance Matrix for System Changes Involving Mutual Coupling" Proc. IEEE, August 1969, p. 1432.
- [11] - H.E. Brown and C.E. Person "Short Circuit Studies of Large Systems by the Impedance Matrix Method" IEEE, PICA conf. Proc., 1967, Pittsburgh, Pa., p.p. 335 - 342
- [12] - H.E. Brown and J.O. Storry "Improved Method of Incorporating Mutual Couplings in Single-phase Short Circuit Calculation" IEEE, PICA Conference Proc., 1969, pp. 335 - 342
- [13] - P.M. Anderson "Analysis of Simultaneous Faults by Two-Port Network Theory" Trans. IEEE, PAS 90, sept/oct. 1971, p.p. 2199 - 2205
- [14] - T.E. Dy Liacco and K.A. Ramarao "Short Circuit Calculation for Multi-Link Switching and End Faults" Trans. IEEE, PAS-89, July/Aug. 1970, pp. 1226 - 1237
- [15] - A.L. Toalston "Digital Solution of Short Circuit Currents for Networks Including Mutual Impedances. Trans. AIEE 78, pt. 3B, 1959, pp. 1720 - 1723
- [16] - J.R. Mortolock "The Evaluation of Simultaneous Faults on Three Phase Systems", Proc. IEE Vol. 94, part II, N° 39, June 1947
- [17] - R.T. Byerly, R.W. Long, C.J. Baldwin and C.W. King "Digital Calculation of Power System Networks under Faulted Conditions" Trans. AIEE, February 1959
- [18] - R.B. Shipley and D. Coleman "A New Direct matrix inversion Method", Trans. AIEE & E, Vol. 78, november 1959 pp. 568 - 572

Bibliografia

- |19| - O.T. Farry "Tertiary Winding in Auto-Transformers" Trans.
AIEE, April 1961
- |20| - Notas de aula do Prof. Hector Arango - EFEI - 1977

