



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

**GRUPO VIII
GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE**

**APERFEIÇOAMENTO DE PROGRAMA DIGITAL PARA ANALISAR A INFLUÊNCIA ELETROMAGNÉTICA
SIMULTÂNEA DE DIVERSAS LT'S SOBRE UM DUTO RAMIFICADO**

Sérgio Toledo Sobral *

**ST&SC
Serviços Técnicos Ltda**

**Jorge Amom Filho
Marcos Izycki**

**FURNAS
Centrais Elétricas**

**Geraldo Martins Tavares
Alexandre dos Santos Rigueira**

**UFFE
Universidade Federal Fluminense**

RESUMO

O IT apresenta as características do programa digital DECOP, depois de totalmente revisto. O programa DECOP original está em operação há mais de 20 anos. Calcula os acoplamentos indutivos e resistivos entre uma LT e um duto, durante curto-circuitos à terra.

O IT discute também problemas metodológicos, tais como:

- O problema da propagação dos erros relativos;
- Vantagens do uso do Método Desacoplado ao invés da representação matricial direta;
- Representação do solo em camadas ;
- Vantagens do uso da teoria de circuito ao invés da teoria eletromagnética;
- Trechos de "paralelismo virtual";
- Discussão se os efeitos indutivo e resistivo sobre o duto são aditivos ou subtrativos ; e
- Reexame da determinação da posição dos curto-circuitos que produzem efeitos mais severos sobre o duto.

O IT discute ainda a efetividade de medidas mitigadoras, tais como:

- Modificação da forma dos contrapesos;
- Uso de descarregadores em apenas um terminal do duto;
- Seccionamento de um duto longo por meio de juntas de isolamento – vantagens e desvantagens;
- Utilização de diversos descarregadores ao longo do duto - vantagens e riscos;
- Uso de filtros de aterramento ao longo do duto - vantagens e riscos;e
- Cabos de equalização subterrâneos.

PALAVRAS-CHAVE

Indução, acoplamento resistivo, Teoria de Circuitos, Método Desacoplado, "ladder", representação de solos, contrapesos, descarregadores e filtros.

1.0- INTRODUÇÃO

O programa DECOP, em operação há cerca de 20 anos, está sendo revisto dentro de um programa P&D de FURNAS. Nessa primeira fase, o programa original está sendo atualizado com as modificações de arquitetura que permitirão chegar ao produto final, descrito neste IT, por meio de extensões do trabalho em curso. O programa DECOP destina-se ao cálculo da diferença de potencial (d.d.p) aplicada no isolamento de uma ou diversas tubulações, instaladas numa faixa de dutos, devido a acoplamentos indutivos e resistivos decorrentes de curto-circuitos em uma LT próxima, ou de diversas LT's que conduzem simultaneamente correntes de defeito. Destina-se também ao cálculo dos potenciais de passo e de toque que surgem na faixa dos dutos.

2.0 – CARACTERÍSTICAS FINAIS DE REPRESENTAÇÃO DO PROGRAMA DECOP

Em sua configuração final, o programa DECOP será capaz de representar como um caso único as seguintes situações:

- Duto que alimenta um Pólo Industrial e cruza ou se aproxima de diversas LT que convergem para uma

(*) ST&SC -Rua Vice Governador Rubens Berardo 175 B1 grupo 1002 - Gávea - Rio de Janeiro - RJ
CEP 22 451-070 – Tel/Fax 21-2294-6456 email: stsobral@terra.com.br

subestação que alimenta o Pólo. Nesse caso, um curto-circuito à terra num dos barramentos da SE mencionada, produz circulação de corrente de seqüência zero simultânea em diversas LT's que influenciam o duto mencionado (ver Parte 1 da Figura 1);

- b) Uma LT de circuito duplo que cruza ou se aproxima de um duto. Dependendo da posição do curto-circuito, há trechos da LT onde a corrente de seqüência zero percorre os dois circuitos no mesmo sentido, e há trechos onde as correntes possuem sentidos opostos (ver Parte 2 da Figura 1);
- c) Caso idêntico ao anterior agravado pelo fato do circuito duplo receber uma outra LT de circuito duplo, ligada em "tap" em um trecho intermediário da LT (ver Parte 3 da Figura 1);
- d) Existem vários exemplos de gasdutos com vários quilômetros de extensão que seguem por vias urbanas mantendo-se a curta distância, ou cruzado corredores de passagem de diversas LT's com diferentes níveis de tensão. Em alguns casos essas LT's seguem para SE's terminais comuns, podendo conduzir todas elas, simultaneamente, correntes de seqüência zero que influenciam o gasduto. Esse geralmente ramifica-se a partir do tronco, podendo cruzar o corredor de passagem das LT's. Esses ramais do gasduto geralmente alimentam indústrias, hospitais, hotéis, instalações comerciais etc, o que cria sérios riscos que tem que ser quantificados e mitigados (ver Parte 4 da Figura 1); e
- e) Existem casos em que é possível e conveniente aterrar as tubulações de uma faixa de dutos nas duas SE's terminais por meio de descarregadores ou por meio de filtros. Neste caso, circula pelo metal do duto uma corrente que pode chegar a centenas de amperes. Neste caso, a impedância mútua entre os dutos, situada na faixa, tem que ser representada, pois a mesma influencia o valor da corrente que circula pelo metal do duto. Influencia também a elevação do potencial de terra das SE's terminais e a curva de d.d.p aplicada no isolamento do duto ao longo de seu trajeto; (ver Parte 5 da Figura 1).

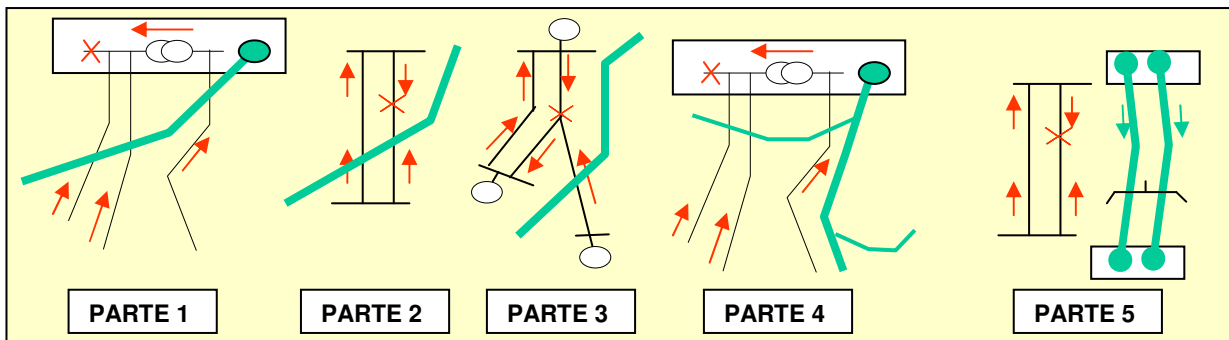


Figura 1 - Situações especiais a serem representadas pelo programa DECOP

3.0 – A VANTAGEM DO PROGRAMA USAR A TEORIA DE CIRCUITOS AO INVÉS DE TEORIA ELETROMAGNÉTICA

As referências [13,14] descrevem uma medição feita no laboratório do Lactec, na cidade de Curitiba, envolvendo um indutor um condutor de blindagem e um induzido. As medições foram feitas com o condutor de blindagem isolado, monoaterrado ou bi-aterrado. Em todas as condições mencionadas a Teoria de Circuitos permitiu calcular quase exatamente o valor da tensão induzida. Não é do nosso conhecimento que se tenha conseguido até o momento, algo semelhante, utilizando a Teoria Eletromagnética.

Como no acoplamento de LT's com dutos os cabos pára-raios operam como uma blindagem multi-aterrada, a conveniência de utilizar a Teoria de Circuitos nos cálculos é evidente.

Em item mais a frente descreve-se a técnica de Paralelismo Virtual, que é uma técnica da Teoria de Circuitos que permite representar acoplamentos magnéticos entre fases, cabos pára-raios e dutos paralelos e não paralelos.

4.0 – O FENÔMENO DE PROPAGAÇÃO DE ERROS RELATIVOS

Um modelo muito complexo de cálculo, cuja solução envolva bilhões de operações numéricas, só apresenta resultados parecidos com os valores medidos quando os dados utilizados pelo modelo são obtidos com precisão laboratorial. Isso ocorre pois cada grandeza medida tem duas componentes: o valor correto, que seria medido em um laboratório, e o erro de medição. Quando se opera duas grandezas, opera-se o valor correto e também o erro, que tende a crescer a medida que o número de operações aumenta.

Nas aplicações práticas de engenharia, os dados são obtidos geralmente com erros relativamente grandes, principalmente os que envolvem resistividade do solo, valores de corrente de curto-circuito, extensões de circuitos etc. A própria solução matricial direta de um circuito extenso, envolvendo acoplamentos eletromagnéticos exige bilhões de operações numéricas para sua solução.

Usando dados típicos de engenharia em um modelo de cálculo muito complexo, pode-se obter resultados onde muitos ou todos os algarismos significativos são perdidos e o valor calculado não tem mais relação com o valor medido.

A propagação de erros relativos é uma degradação da informação devido a um número elevado de operações realizadas com a mesma, e nada tem a ver com erros de arredondamento. Os erros de arredondamento podem ser

sanados aumentando o número de dígitos utilizados no cálculo, mas não os erros relativos.

5.0 – EVITANDO O PROBLEMA DOS ERROS RELATIVOS EM CIRCUITOS COMPLEXOS USANDO O MÉTODO DESACOPLADO

Para evitar o problema da propagação dos erros relativos em circuitos complexos, o programa DECOP utiliza o Método Desacoplado, que tem sólido embasamento teórico [1,2,3,4,5,6,7,8] e experimental [9,10,11,12].

O programa evita uma representação matricial direta do circuito acoplado original.

O sistema original pode ter milhares de elementos de circuitos correspondentes a centenas de vãos de pára-raios, acoplamentos mútuos com as fases, representação de trechos dos dutos, acoplamentos indutivo entre fases e pára-raios com os dutos e acoplamentos resistivo entre cada torre e o duto.

A solução matricial direta de um circuito com essas características exigiria bilhões de operações numéricas. Por esse motivo, os resultados obtidos só seriam próximos aos valores medidos se os dados fossem obtidos com precisão laboratorial.

O Método Desacoplado faz automaticamente uma redução drástica do número de elementos do circuito, sem modificar sua topologia, substituindo os acoplamentos das fases, cabos pára-raios e torres com o duto por fontes de corrente, aplicadas no circuito "ladder" que representa o duto. O processo mencionado é uma simples aplicação do Teorema de Norton.

O circuito exato resultante é geralmente milhares de vezes menor que o circuito original e sua solução matricial ou usando técnicas de circuito "ladder" envolve um número drasticamente menor de operações. Assim sendo mesmo utilizando os dados usuais de engenharia, obtém-se resultados próximos aos medidos [1,2,5,7,9].

6.0 – ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO EM CAMADAS

Alguns artigos técnicos mostram que existem modelos digitais de solo estratificados em camadas horizontais com resistividade homogênea que conseguem reproduzir adequadamente os potenciais produzidos em laboratório por eletrodos instalados em um modelo reduzido de solo, com geometria semelhante. A nosso ver o assunto tem interesse basicamente teórico, pois o solo real geralmente não é estratificado em camadas horizontais com resistividade uniforme, nem as superfícies de separação, quando existem, são horizontais.

O que se faz é tentar representar um solo real com geometria bastante aleatória, por um modelo idealizado, acreditando que com isso se consegue maior precisão. Pode ocorrer justamente o oposto, pois se aumenta o número de operações numéricas necessárias para resolver o modelo, agravando o problema de propagação de erros relativos.

Na verdade, obter dados confiáveis de resistividade do solo, tais como os necessários para utilizar em um modelo complexo, é muito raro na prática. Os dados podem ser facilmente modificados por condições climáticas, altura do lençol freático e proximidade de malhas de terra de instalações existentes.

O programa DECOP, tem uma alternativa que permite representar os solos em camadas, para o caso de se pretender fazer pesquisa laboratorial usando o programa (ver item 18.0 deste IT).

7.0 – NECESSIDADE DE TESTAR OS PROGRAMAS E MODELOS DIGITAIS

Infelizmente, instalou-se numa pequena parte do meio acadêmico nacional o perigoso hábito de criar modelos digitais e programas, utilizá-los sem comparar seus resultados com medições de laboratório, de campo ou com experiência operacional, tirar conclusões sobre práticas de engenharia, e ensinar o modelo a uma legião de alunos como uma verdade comprovada.

Um modelo ou programa digital pode ser considerado confiável para pesquisa se ele obtém resultados próximos a um caso medido em laboratório. O uso do programa para resolver casos semelhantes produz geralmente resultados confiáveis. Se o programa consegue replicar os resultados medidos no campo ou confirmados pela experiência operacional, ele pode ser considerado válido para aplicações de engenharia que não se afastem muito do caso certificado pela medição de campo ou pela experiência operacional [13,14].

8.0 - CONDUTORES DE EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAL ENTERRADOS NAS PROXIMIDADES DO DUTO

Essa medida geralmente é utilizada para reduzir o valor do potencial aplicado na superfície externa do isolamento do duto, pelas correntes injetadas no solo pelas torres e suportes das LT's, o que caracteriza o acoplamento resistivo.

Pode ser utilizado também para reduzir o valor do potencial de passo na faixa do duto.

A sua utilização eficaz como blindagem auxiliar contra a tensão induzida, exige que sejam de cobre e freqüentemente tem que ser terminados em aterramentos de baixa resistência, instalados em poços artesianos.

O cálculo da eficácia dessa medida fica prejudicado pelos problemas de representação do solo, citados no item (6.0) anterior. Mas, seu principal problema é a vandalização dos condutores de cobre que perdem grande parte de sua eficácia corretiva se um trecho de condutor for roubado.

9.0 - IMPEDÂNCIAS MÚTUAS ENTRE TRECHOS PARALELOS

Quando um trecho do duto é paralelo a um trecho da LT, a impedância mútua entre as fases e o duto pode ser determinada com muita boa precisão, de uma maneira unívoca, usando-se a Teoria de Circuito, sem necessidade de arbitrar caminhos de integração, conforme mostrado no teste do Lactec [13,14].

O cálculo da impedância mútua (Z_{FD}) entre eles é feito pela expressão $Z_{FD} = 0,0592+j 0,1736 \log (De / L)$, em Ω/km .

Onde a distância (L), em metros, é a D.M.G (distância média geométrica) entre as fases e o duto. O parâmetro (De) é a distância das fases ao condutor equivalente de retorno, situado a uma profundidade (De), segundo R. Rüdemberg:

$De = 658,4 \cdot \sqrt{\rho / f}$, sendo (ρ) a resistividade do solo em ohm.m e (f) a frequência, em Hz.

Da mesma forma a impedância mútua ($Z_{GW,D}$) entre o trecho correspondente de cabos pára-raios e o duto é calculada pela expressão $Z_{GW,D} = 0,0592 + j 0,1736 \log (De / L')$, em Ω/km , (L'), é a (D.M.G) entre os pára-raios da LT e o duto.

10.0 - IMPEDÂNCIAS MÚTUAS ENTRE TRECHO NÃO PARELELOS

Suponha-se um trecho (a-b) dos cabos pára-raios de uma LT e o trecho correspondente do duto (r-p) (ver Partes 1 e 2 da Figura 2). A (D.M.G) entre os pontos (a) e (r) é (L_{ar}). A (D.M.G) entre os pontos (b) e (p) é (L_{bp}). Segundo as Referencias [1,2,4], se uma dessas distâncias (L_{ar}) ou (L_{bp}) for no máximo 3 vezes maior que a outra, pode-se supor para efeito do cálculo da impedância mútua que os dois trechos (a-b) e (r-p) são "paralelos virtuais" e estão situados a uma distância equivalente (L''), tal que (ver Partes 1 e 2 da Figura 2):

$L'' = \sqrt{(L_{ar}) \cdot (L_{bp})}$. A impedância mútua entre os trechos é $Z_{GW,D} = 0,0592 + j 0,1736 \log (De / L'')$, em Ω/km .

Com procedimento semelhante calcula-se a impedância mútua entre o trecho de fases (a'-b') e o mesmo trecho de dutos (r-p):

$L''' = \sqrt{(L_{a'r}) \cdot (L_{b'p})}$. A impedância mútua entre os trechos é $Z_{F,D} = 0,0592 + j 0,1736 \log (De / L''')$, em Ω/km .

11.0 - DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO PELOS CABOS PÁRA-RAIOS

O cabo pára-raios de cada LT que interfere no duto é representado por um circuito "ladder", terminado pela impedância de aterramento das SE's terminais. A impedância de aterramento de cada SE corresponde a resistência de sua malha em paralelo com as impedâncias terminais dos cabos pára-raios das outras LT's que chegam a SE.

A tensão induzida pelas fases sobre os trechos do circuito "ladder" é transformada em fontes de corrente utilizando o Teorema de Norton [1,2,10] (ver parte 2 da Figura 3).

Essas fontes de corrente são aplicados nos terminais dos trechos correspondentes do circuito "ladder". O valor da corrente que circula em cada pi do circuito "ladder" corresponde a corrente que circula em cada vão do cabo pára-raios e em cada torre. O cálculo pode ser feito matricialmente, mas isso pode demandar um grande número de operações e uma propagação de erros relativos significativa.

Para evitar isso o programa DECOP corre o circuito "ladder" em apreço do início até o fim, calculando a impedância vista de cada nó até o início do circuito. Depois corre o mesmo circuito "ladder" do fim até o início calculando a impedância vista de cada nó até o fim do circuito. Com base nesse par de impedâncias associadas a cada nó do circuito "ladder", as diversas fontes de corrente aplicadas no circuito podem ser superpostas, resultando nos valores de corrente de seqüência zero que circula pelos trechos de cabos pára-raios e pelas torres. O número de operações necessárias para efetuar esses cálculos geralmente é bem menor do que seria necessário para inverter a matriz admitância do circuito "ladder".

12.0- REPRESENTAÇÃO DAS LT'S E DUTOS

O usuário do DECOP indica as coordenadas (X,Y,Z) referentes ao ponto do solo onde está o centro de cada torre (ou estrutura de apoio) das LT's. Para cada torre o usuário indica também um número código referente ao tipo de torre, que consta de um arquivo geral de tipos de estrutura. Para cada tipo de torre está indicada a posição das fases e dos pára-raios na silhueta típica, uma descrição dos contrapesos, bem como as características elétricas dos cabos pára-raios utilizados.

Os dutos são representados pelas coordenadas (X,Y, Z) de cada ponto de inflexão da tubulação. É indicado também pelo usuário um número código referente ao tipo de duto que consta de uma arquivo geral, que indica o diâmetro, a espessura do isolamento, o tipo de isolamento e a profundidade a que esta o centro do tubo em relação à coordenada Z do solo.

Assim sendo, o usuário descreve um arquivo inicial de trechos de LT's e de trechos de dutos. Esses trechos serão subdivididos automaticamente pelo programa para formar os trechos de "paralelismo virtual" necessários para calcular as impedâncias mútuas fases/duto e pára-raios/duto.

13.0 - ALGORÍTMO BÁSICO DE SUBDIVISÃO DA LT EM TRECHOS DE "PARALELISMO VIRTUAL"

O ponto inicial e final de cada trecho de pára-raios, fases e dutos são representados por coordenadas (X,Y,Z).

- O programa toma cada trecho tal como (a-b), do arquivo de cabos pára-raios, e passa dois planos (A) e (B) perpendiculares ao trecho (a-b), passando pelos pontos (a) e (b) (ver Parte 3 da Figura 2). Corre então cada seguimento, tal como (r-s), do arquivo de dutos, verificando se o plano (A) e/ou o plano (B) cortam o seguimento (r-s).
- Para cada corte no segmento (r-s), cria-se o novo ponto (p), numerado automaticamente, e o trecho original (r-s) é substituído por dois trechos (r-p) e (p-s), com todas as características do trecho substituído.
- O programa toma então cada trecho, tal como (v-f), do arquivo de trechos de dutos, já modificado, e corre o arquivo de trechos de pára-raios, tomando cada trecho, tal como (c-d), por vez. Passa, então, planos (V) e (F), perpendiculares à direção (c-d), pelos pontos (v) e (f) do arquivo de trechos de dutos. Verifica se o plano (V) e/ou o

plano (F) cortam o seguimento (c-d). Para cada corte no seguimento (c-d), cria-se um novo ponto (w), numerado automaticamente. O trecho original (c-d) é substituído pelos trechos (c-w) e (w-d), que tem o mesmo valor de corrente no cabo pára-raios calculado pelo programa para o trecho (c-d).

- d) Repete-se o item (a) acima encontrando para cada trecho (a-b) do arquivo de trechos de pára-raios o trecho correspondente (r-p) do arquivo de dutos. Calcula-se a distancia (La), que é a D.M.G entre o ponto (r) do duto e as posições do cabos pára-raios correspondentes ao ponto (a). Calcula-se a distancia (Lb), que é a D.M.G entre o ponto (p) do duto e as posições do cabos pára-raios correspondentes ao ponto (b).
- e) Se uma das distancias (La) e (Lb) não for 3 vêzes maior que a outra, trata-se de um par de trechos que podem ser considerados de "paralelismo virtual" e a impedância mútua entre eles é calculada como no item (10.0) anterior. Caso contrário, o trecho de pára-raios e o trecho de duto são subdivididos para que as D.M.G atendam a relação menor que 3:1.
- f) Repete-se o mesmo processo para os trechos de "paralelismo virtual" envolvendo fases e dutos.

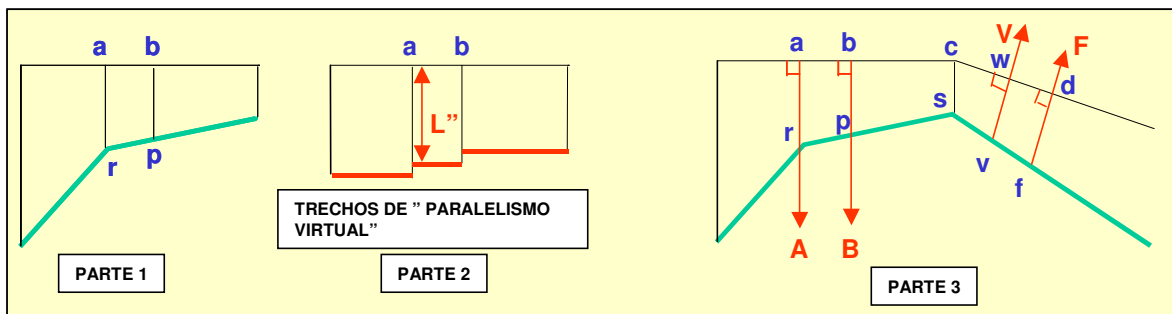


Figura 2 - Trechos de paralelismo virtual e algoritmo de subdivisão de trechos

14.0 - CÁLCULO DAS TENSÕES INDUZIDAS EM CADA TRECHO DE PARALELISMO VIRTUAL

Ao fim do processo estarão determinadas todas as impedâncias mútuas entre os trechos de duto e o(s) trecho(s) correspondente(s) das fases e dos cabos pára-raios.

Suponha-se que o trecho (30-70) do duto forme pares de "paralelismo virtual" com dois trechos (10-200) e (33-220) das fases e as impedâncias mútuas correspondentes sejam (Z_1) e (Z_2), em ohms (ver Parte 1 da Figura 3). Os trechos correspondentes das fases são percorridos por correntes de seqüência zero ($+I_1$) e ($-I_2$). O trecho (30-70) do duto forma também pares de "paralelismo virtual" com os trechos (330-380) e (415-490) dos cabos pára-raios e as impedâncias mútuas correspondentes são (Z_1') e (Z_2') em ohms. Os trechos correspondentes dos cabos pára-raios são percorridos por correntes de seqüência zero ($-I_1'$) e ($+I_2'$).

A tensão induzida no trecho (30-70) do duto será $V_{30-70} = I_1 \cdot Z_1 - I_2 \cdot Z_2 - I_1' \cdot Z_1' + I_2' \cdot Z_2'$.

O mesmo é feito para todos os trechos do duto (ver Parte 1 da Figura 3).

15.0- TRANSFORMAÇÃO DO DUTO EM UM CIRCUITO "LADDER" DESACOPLADO DAS FASES E DOS CABOS PÁRA-RAIOS

Pelo Teorema de Norton, a fonte de tensão (V_{30-70}) em série com a impedância (Z_{30-70}) do trecho (30-70) do duto, é equivalente a uma fonte de corrente ($I_{30-70} = - (V_{30-70}) / (Z_{30-70})$) em paralelo com a impedância do trecho (30-70). Isso corresponde a retirar a corrente (I_{30-70}) do nó (70) e reinjetar o mesmo valor de corrente no nó (30).

No final do processo, todos os pontos dos trechos dos dutos estão submetidos a fontes de corrente, que substituem exatamente os acoplamentos do duto com as fases e os cabos pára-raios.

O usuário estabelece o tamanho do vão de circuito "ladder" que vai representar o duto. Vamos supor 10 metros. Supondo-se que o trecho de duto (30-70) tenha 50m, este trecho do duto será representado por um circuito "ladder" de 5 pis com impedâncias longitudinais (Z_L) e transversais (Z_T). A impedância (Z_L) corresponde à impedância longitudinal de 10 m de duto, em ohms. A impedância (Z_T) corresponde à impedância transversal de 10 m de duto, levando em conta os componentes resistivo e capacitivo do isolamento do duto (ver Partes 2 e 3 da Figura 3).

No final do processo toda a extensão do duto foi substituída por um circuito "ladder" e todos os acoplamentos indutivos foram substituídos por fontes de corrente aplicadas em alguns nós do circuito "ladder".

16.0 SOLUÇÃO MATRICIAL DO DUTO DESACOPLADO

A solução matricial do circuito "ladder" desacoplado que representa o duto é resumida na seguinte expressão:

$[A]^{-1} \cdot (I) = (V)$, onde [A] é a matriz admitância do circuito "ladder" desacoplado que representa o duto, (I) é o vetor de fontes de correntes aplicadas nos nós do circuito "ladder" e (V) é o vetor da d.d.p aplicada no isolamento do duto, devido ao acoplamento indutivo com as fases, reduzido do efeito de blindagem dos cabos pára-raios.

Como a matriz [A] pode ser de grandes dimensões, sua inversão pode necessitar de um número muito elevado de operações o que dispararia a propagação de erros relativos. Por causa disso o programa DECOP utiliza uma solução que emprega técnicas de circuito "ladder", conforme descrito a seguir.

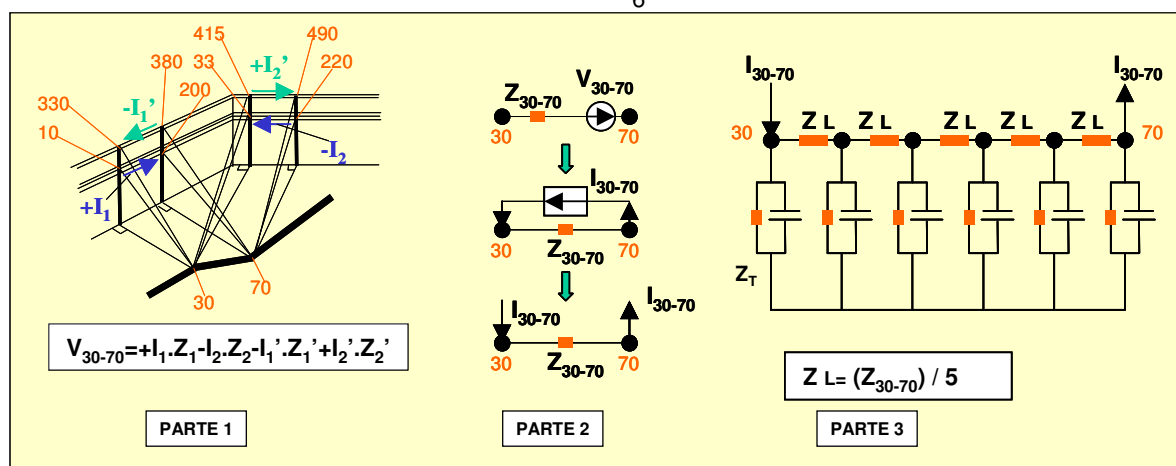


Figura 3 – Desacoplamento de um trecho (30-70) do duto

17.0 - A SOLUÇÃO DO DUTO DESACOPLADO UTILIZANDO TÉCNICAS DE CIRCUITOS “LADDER”

O programa DECOP corre o circuito “ladder” desacoplado que representa o duto do início até o fim calculando a impedância vista de cada nó até o início do circuito. Depois corre o mesmo circuito “ladder” do fim até o início calculando a impedância vista de cada nó até o fim do circuito. Com base nesse par de impedâncias associadas a cada nó do circuito “ladder”, as diversas fontes de corrente aplicadas no circuito podem ser superpostas, obtendo-se os valores de corrente finais que circulam nos trechos longitudinais e transversais do circuito “ladder”, bem como as tensões entre os nós e a terra, correspondentes ao vetor (V) do item (16.0). O número de operações necessárias geralmente é bem menor do que seria necessário para inverter a matriz admitância do circuito “ladder”..

18.0 - CÁLCULO DA ELEVÇÃO DO POTENCIAL DE TERRA CAUSADA PELAS CORRENTES DE TORRES E MALHAS DE TERRA

Para cada ponto (p) do duto, correspondente a um nó do circuito “ladder” que representa a tubulação, calcula-se a elevação de potencial de terra (V_p), aplicada na superfície externa da camada isolante do duto. O parâmetro (V_p) caracteriza o acoplamento resistivo agindo sobre o ponto (p), causado por todas as torres que injetam corrente no solo e pelas malhas de terra das SE’s terminais. Tem-se que $(V_T) = \sum (r_i) \cdot (I_i)$, onde (I_i) é o valor da corrente injetada no solo em cada torre e malha terminal, e (r_i) é a resistência mútua correspondente, determinada em função da distância, da resistividade do solo e da forma do contrapeso ou malha.

O arquivo de tipos de torre mencionado no item (12.0) anterior indica a geometria do contrapeso ou malha e inclui um gráfico do potencial no solo, na região próxima ao contrapeso ou da malha. As curvas do gráfico são produzidas quando a unidade de corrente é injetada no solo pelos eletrodos. A localização do ponto (p) no gráfico permite determinar o valor de (r_i) correspondente. O gráfico de potencial mencionado é preparado previamente usando programas específicos, para evitar aumentar o número de operações numéricas feitas pelo DECOP.

19.0 – CÁLCULO DO POTENCIAL DE PASSO NAS IMEDIAÇÕES DO DUTO

Fazendo-se o ponto (p) percorrer a região nas proximidades do duto, pode-se determinar as curvas de potencial de terra na região e determinar os potenciais de passo produzidos, usando o mesmo procedimento descrito em (18.0).

Quando o potencial de passo ultrapassa o valor tolerável pelo ser humano, uma das medidas corretivas possíveis é a modificação da geometria dos contrapesos de modo que as extremidades dos rabichos estejam mais afastadas da faixa dos dutos.

20.0 - D.D.P APLICADA NO ISOLAMENTO DO DUTO – POTENCIAL DE TOQUE NA FAIXA DO DUTO

A d.d.p aplicada no isolamento do duto corresponde à elevação de potencial do metal do duto (caracterizada nos itens (16.0) e (17.0) anteriores) subtraída da elevação do potencial de terra aplicada na superfície externa do isolamento do duto, caracterizada no item (19.0). Esse valor não pode ultrapassar um limite, geralmente fixado em 5 kV, para que o isolamento do duto não seja danificado. A d.d.p aplicada no isolamento do duto é também o potencial de toque aplicado nos operadores que toquem nas partes metálicas dos afloramentos e dispositivos de controle do duto. *Quando esse valor é maior que o potencial de toque tolerável o método de mitigação mais usual é britar a região próxima ao afloramento ou instalar plataformas metálicas isoladas do solo e ligadas ao duto. Pisando nesta plataforma e tocando nas partes metálicas do duto o operador está a salvo, pois pés e mãos estão no mesmo potencial.*

21.0- LOCALIZAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO QUE PRODUZ A D.D.P MAIS ELEVADA NO ISOLAMENTO

Quando um curto-circuito ocorre a uma distância de 5 a 10 km do cruzamento, ou da aproximação, de uma LT com um duto, grande parte da corrente dos cabos pára-raios é injetada no solo pelas torres intermediárias entre o ponto de defeito e o cruzamento ou a aproximação. Por esse motivo, é mínimo o valor da corrente de blindagem que

percorre os cabos pára-raios no vão de cruzamento ou de aproximação, o que torna máximo o valor da d.d.p (V), causada pela indução, aplicada entre o metal do duto e a terra, no trecho de cruzamento. Como o ponto de curto-circuito está muito afastado do cruzamento é muito reduzida a elevação de potencial de terra (V_T) aplicada sobre o duto, no trecho de cruzamento ou aproximação.

Por outro lado, no caso de um curto-circuito numa torre de cruzamento, o valor da d.d.p (V), causado por indução, é relativamente pequeno, porque é elevado o valor da corrente de blindagem circulando nos cabos pára-raios no vão de cruzamento. Além disso, o valor da elevação de potencial de terra (V_T) é elevado no cruzamento o que torna pequeno o valor da d.d.p = $V - V_T$.

Assim sendo, um curto-circuito na torre de cruzamento só pode conduzir ao maior valor de d.d.p no isolamento do duto caso o mesmo passe muito próximo de uma torre. Nesse caso o valor de (V_T) pode ser tão elevado que o valor absoluto da d.d.p torna-se maior do que 5 kV: $d.d.p = |V - V_T| > 5 \text{ kV}$.

22.0 - A TECNOLOGIA CLÁSSICA DA UTILIZAÇÃO DE DUTOS

Na tecnologia clássica, um trecho de alguns quilômetros de duto (isolado do solo) é separado da continuação das tubulações por meio de juntas isolantes, que fazem uma separação longitudinal das tubulações.

Cada um desses trechos de duto deve ser aterrado em apenas um ponto, por meio de descarregadores (varistores, etc), ou por meio de filtros.

Durante um curto-circuito à terra numa LT próxima, é praticamente nulo o valor da corrente que circula ao longo do duto, pois o mesmo está isolado. Quando o descarregador ou o filtro operam, a d.d.p aplicada no isolamento, no ponto de aterramento, cai para zero. Isso protege operadores e os dispositivos de proteção catódica e o pára-raios, que geralmente são instalados na proximidade dos descarregadores ou filtros. A d.d.p eleva-se ao longo do trajeto do duto. Esse valor não deve ultrapassar 5 kV, para evitar danos ao isolamento e perfuração do duto por efeito térmico.

23.0 - SUBDIVISÃO DO DUTO EM TRECHOS MENORES

Quando um duto acompanha por dezenas de quilômetros uma, ou diversas LT's, o valor da d.d.p aplicada no isolamento do duto durante um defeito à terra nas LT's mencionadas pode superar de longe o limite de 5 kV.

Uma das soluções é subdividir o duto em trechos menores por meio de novas juntas de isolamento. Essas juntas podem ser interpostas sem tirar o duto de operação, com equipamento nacional e custo razoável.

Neste caso é recomendável instalar o descarregador, bem como o dispositivo de proteção catódica e o pára-raios na parte central do novo trecho do duto, separado pelas juntas de isolamento interpostas.

A vantagem é que uma tensão induzida longitudinal de, por exemplo de 5 kV, aplicada ao longo do duto, resultará em uma d.d.p nula no centro do trecho e +2,5 kV numa extremidade e - 2,5 kV na outra. Cada junta de isolamento tem que suportar 5 kV, ou seja, (+2,5 kV - (-2,5 kV)), o que não é problemático. A utilização de alguns pontos de proteção catódica ao longo de um duto longo não chega a ser problemática em uma cidade. Isso porque na cidade geralmente existe uma rede de distribuição elétrica próxima, que pode ser utilizada para alimentar os retificadores dos dispositivos de proteção catódica.

A localização do descarregador na parte central do trecho pode ser escolhida nas proximidades de onde derivam os ramais mais importantes do gasduto. Isso reduz o valor da elevação de potencial levada para o interior dos postos de abastecimento, hospitais, hotéis etc, servidos pelos ramais.

24.0 – DUTO COM DIVERSOS PONTOS DE ATERRAMENTO POR MEIO DE DESCARREGADORES OU FILTROS

Se o duto mostrado na Parte 3 da Figura 3 for aterrado simultaneamente, por exemplo, nos pontos 30 e 70, a parte transversal do circuito "ladder" é by-passada e a tensão induzida longitudinal é aplicada diretamente na impedância longitudinal (Z_{30-70}).

Como a impedância típica de um duto é da ordem de 0,8 ohm/km, se o mesmo estiver localizado a poucas dezenas de metros de uma LT, durante um curto-circuito, o duto poderá ser percorrido por correntes de várias centenas de amperes. Essa corrente será injetada nos pontos de aterramento do duto.

No caso de gasdutos urbanos, os pontos de aterramento são locais próximos a postos de abastecimento, hotéis, hospitais, lojas, pequenas indústrias, etc. As malhas de aterramento nesses locais não foram geralmente projetadas para injetar no solo correntes desta magnitude. A elevação de potencial de terra pode criar problemas de segurança para pessoas e instalações.

Deve ser lembrado ainda que se um curto-circuito ocorrer em um ponto da LT correspondente a um ponto do duto a meio caminho de dois aterramentos, o duto pode ser submetido à tensão induzida de digamos +6 kV em um trecho e - 6 kV no outro, resultando numa corrente nula pelo duto.. Nesse caso, o bi-aterramento não consegue reduzir a d.d.p aplicada no isolamento. Assim sendo, nos dois trechos, a d.d.p aplicada no isolamento permanece acima de 5 kV, e pode danificar o duto. Há diversas condições menos extremas em que o multi-aterramento não consegue controlar a d.d.p aplicada no isolamento do duto.

Pelo exposto, o multi-aterramento por meio de descarregadores ou filtros é uma medida que deve ser reservada para aplicações não urbanas, onde os riscos podem ser melhor controlados.

25.0 – CONCLUSÕES

O IT mostra que programa DECOP, já em operação há cerca de 20 anos, depois de totalmente revisto, permitirá realizar com facilidade todas as simulações requeridas pela atual indústria de transporte via tubulações.

O IT discute também problemas metodológicos e a efetividade de medidas mitigadoras.

O IT mostra ainda a vantagem de usar a Teoria de Circuitos ao invés da Teoria Eletromagnética.
 O IT discute também problemas metodológicos e a efetividade de medidas mitigadoras.
 O artigo mostra ainda como a utilização do Método Desacoplado evita o problema de propagação de erros relativos.
 O IT lembra a necessidade de comparar os resultados de programas e modelos matemáticos com medições de laboratório, testes de campo e experiência operacional

26.0 - REFERÊNCIAS

- [1] S.T.Sobral, W.G.Castinheiras, M.Nielsen (PETROBRAS), V.S.Costa (ELETROBRAS), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL). "Interferences Between Faulted Power Circuits and Communication Circuits or Pipelines- Simplification Using the Decoupled Method" IEEE paper 91 WM 107-3 PWRD, Winter Meeting, 1991, New York
- [2] S.T.Sobral, J.R.Medeiros (FURNAS). "Interference Among Overhead Transmission Lines and Pipelines – A New Approach" CIGRE-paper 36-83 (SC) 09 IWD, 1983 Copenhagen
- [3] R.Sanz, O.G.Vera (AGUA Y ENERGIA), D.O.C.Brasil, A.M.França (CEPEL), R.Daconti (CHESF), J.R.Medeiros (FURNAS), S.T.Sobral (IESA). "Induced Effects Caused by Overhead Transmission Lines on Metallic Structures" CIGRE paper 36-202, 1990, Paris
- [4] S.T.Sobral, C.A.O.Peixoto (FURNAS), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL) "Ground Potential Distribution on the Neighbourhood of Itaipu Generation Complex" IEEE, Summer Meeting, 1985, Vancouver Vol.PWRD-1 JAN 1986 pp:85-90
- [5] S.T.Sobral (IESA), G.P.Fleury, J.R.Villalba (ITAIPU), Dinkar Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL) "Decoupled Method for studying Large Interconnected Ground Systems Using Microcomputers – Part I – Fundamentals" IEEE Summer Meeting, 1986,Cid. México Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N^o4, OCT 1988 pp 1536-1544
- [6] S.T.Sobral (IESA), G.P.Fleury, J.R.Villalba (ITAIPU), Dinkar Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL). "Decoupled Method for studying Large Interconnected Ground Systems Using Microcomputers – Part II – Utilization on Itaipu Ground System and Complementary Aspects" IEEE Summer Meeting, 1986,Cid. México Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N^o4, OCT 1988 pp 1545-1552
- [7] - S.T.Sobral(lesa), J.O.Barbosa, J.V.C.Nunes, E.Chinelli, A.Ferreira Netto (LIGHT), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL). "Ground Potential Rise Characteristics Of Urban Step-Down Substations Fed By Power Cables- A Practical Example" IEEE S.Meeting, 1987, San Francisco IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N^o4, OCT 1988 pp 1564-1572
- [8] S.T.Sobral, M.S.Campos, B.Goldman (IESA), V.S.Costa (ELETROBRAS), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL) "Dimensioning of Nearby Substations Interconnected Ground System" IEEE- Summer Meeting, 1987, San Francisco. IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N^o4, OCT 1988 pp 1605-1614
- [9] S.T.Sobral, M.S.Campos, B.Goldman (IESA), V.S.Costa (ELETROBRAS), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL) "Análise de Circuitos "ladder" de Parâmetros Concentrados Excitados Por Fontes de Corrente" IX SNPTEE- Belo Horizonte, 1987 IT BH/GSE/15
- [10] -S.T.Sobral (IESA), C.A.O.Peixoto (FURNAS), D.Fernandes (FURNAS), Dinkar Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL). "Grounding Measurements at Itaipu Generation Complex Using the Extended Eleck Method" IEEE Summer Meeting, 1986,Cid. México Trans.On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N^o4, OCT 1988 pp 1553-1563 (Incluído como referência no Standard IEEE-81)
- [11] S.T.Sobral, J.J.H.Santos (IESA), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL). "A Proposal For Ground Measurement Techniques in Substations Fed Exclusively by Power Cables" IEEE-Winter Meeting, 1988, New York IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N^o4, OCT 1988 pp 1403-1409 (Foi incluído como referência no Standard IEEE-81)
- [12] S.T.Sobral, Domar Leite (IESA), M.L.S.Siqueira, J.Ribeiro, C.Celso Brasil Camargo, Duílio D.Figueiredo (ELETROSUL). "Ground Parameter Measurements at Four Brazilian Substations in 500 and 230 kV" IEEE paper 90 SM398-8 S.Meeting 1990.
- [13] Sérgio T. Sobral (ST&SC), A.P.Reis Miranda (Consultor), Sérgio C. Sobral (ONS), Georges Azzam (ST&SC) "Conceitos E Procedimentos De Engenharia Que Estão Sendo Revisados" (XIX SNPTEE- Grupo XIII)
- [14] Sérgio T.Sobral (ST&SC), C.A.O. Peixoto, Jorge Amon F.(FURNAS), M.J.Izzycki (FURNAS), Geraldo Tavares (UFFE), Alexandre Rigueira (UFFE) "Advantages of Steinmetz Circuit Theory Over Schelkunoff Transfer Impedance Theory". IEEE- artigo aprovado em Março de 2009

27.0 – DADOS BIBLIOGRÁFICOS

Sérgio Toledo Sobral Graduado: PUC / RJ - Rio de Janeiro, 1964 – Engenheiro Eletricista
 Companhia: ST & SC Serviços Técnicos Ltda. Cargo: Diretor e proprietário

Jorge Amon Filho Graduado: PUC-Rio de Janeiro, 1975, Engenheiro Eletricista Mestrado PUC (1986)
 Companhia: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1976
 Cargo: Gerente da Divisão de Estudos de Equipamentos do Departamento de Planejamento de Transmissão; Coordenador do Comitê de Estudos A3 do CIGRE

Marcos José Izzycki Graduado: UNIP-S.Paulo 2002 –Engenheiro Eletricista. Companhia FURNAS, desde 2006
 Cargo: engenheiro da Divisão de Estudos de Equipamentos

Geraldo Martins Tavares Graduado UFRJ Eng Eletricista (1970), Mestrado (1975), Doutorado (1998). Professor do Departamento Elétrico da UFFE e Diretor do Laboratório de Energia Eólica

Alexandre dos Santos Rigueira Graduado:UFRJ Engenheiro Eletricista (1970). Consultor da UFFE desde 2002