

UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS DESBALANCEADAS

Helton DO NASCIMENTO ALVES (1); Raphaela CARVALHO MACHADO (2)

(1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão(IFMA), 65030-000 Monte Castelo, MA, SÃO LUÍS, helton@ifma.edu.br

(2) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão(IFMA), 65030-000 Monte Castelo, MA, SÃO LUÍS, raphaela.ic@ifma.edu.br

RESUMO

Este artigo descreve uma ferramenta computacional para cálculo de correntes de curto-circuito em alimentadores aéreos radiais de distribuição desbalanceados. Essa ferramenta tem como entrada os dados do alimentador, a barra onde se quer simular o defeito, o tipo de defeito e a resistência de falta. O método de carson (2000) é aplicado para determinação da matriz impedância de acoplamento entre as fases. O cálculo de curto-circuito é realizado através de um fluxo de potência trifásico baseado no método da soma de correntes. Um alimentador real de 103 barras não-transpostas é utilizado para avaliar o algoritmo proposto. Os resultados obtidos mostram que o algoritmo de cálculo das correntes de curto-circuito é eficiente para todos os tipos de faltas.

Palavras-chave: cálculo de corrente de curto-circuito, rede de distribuição desbalanceada, método de Carson, fluxo de potência, método da soma de corrente.

1 INTRODUÇÃO

No sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) a determinação precisa e rápida do fluxo de potência em cada barra ao longo dos alimentadores é de fundamental importância para a operação, controle, projeto e planejamento desse sistema. O propósito de qualquer método de cálculo de fluxo de potência é computar com precisão os fasores de tensão, e as potências ativas e reativas para cada barra do sistema do SDEE conhecidas as cargas ao longo do alimentador e os valores de geração provindos da subestação.

Durante a segunda metade do século XX e depois de um grande desenvolvimento no campo de computadores digitais e linguagens de programação, muitos métodos para solução do problema de fluxo de potência no sistema de transmissão foram desenvolvidos, tais como o método de Gauss-Siedel, método de Newton-Raphson e sua versão desacoplada. Atualmente, muitas melhorias tem sido adicionadas a todos esses métodos considerando suposições e aproximações ligadas à topologia do sistema, levando em conta as condições de operação do sistema real. O método desacoplado rápido (Stott e Alsac, 1974) é um exemplo dessas novas metodologias.

Estes métodos foram desenvolvidos inicialmente para sistemas de transmissão, porém quando aplicados ao SDEE apresentam problemas de convergência, causados pelo mal condicionamento de matrizes, porque os sistemas de distribuição apresentam características específicas, tais como: configuração predominantemente radial e alta relação R/X. Além disso, os alimentadores urbanos, geralmente, não apresentam problemas durante o processo de simulação, devido à utilização de cabos com seção transversal maior, comprimento reduzido e carregamento relativamente elevado. Alguns alimentadores rurais e interurbanos (alimentadores que atendem a várias cidades e/ou outras aglomerações populacionais) apresentam problemas durante o processo de simulação, devido à utilização de cabos com uma seção transversal menor, comprimento demasiadamente elevado e carregamento relativamente baixo.

Como consequência, as empresas de distribuição inicialmente optaram por usar, para estudos de planejamento e operação métodos simples de análise, os quais exigiam entre outras coisas, uma grande simplificação na modelagem da rede (muitas vezes por falta de dados). Um destes estudos empregou como metodologia a redução da rede a um alimentador principal suprindo uma carga (no seu extremo) e um comprimento equivalente (Vempati et al, 1987). Os resultados só permitiam conhecer de forma muito

aproximada a queda de tensão total no extremo do alimentador e as perdas envolvidas. Outros estudos apontavam a distribuir a carga uniformemente numa área retangular e assim mostravam as relações entre a máxima queda de tensão, densidade da carga e tamanho e forma da área alimentada (Schoultz, 1978). Técnicas para o cálculo aproximado de quedas de tensão e perdas em linhas com cargas uniformemente distribuídas ou áreas geométricas com densidades de carga constantes, são muito úteis devido a sua rapidez (Kersting, 2002). Estas abordagens eram utilizadas principalmente em planejamento. No entanto, os resultados de estudos tão generalizados dificilmente podiam ser aplicados diretamente para a resolução de problemas específicos como: fluxos de potência em ramais distintos da rede, tensão num determinado nó, fator de potência analisado desde um certo ponto da rede, etc. Além disso, devido ao erro dos cálculos as decisões a serem tomadas podiam não ser as mais acertadas, produzindo-se assim gastos não necessários para a empresa.

A utilização de métodos desenvolvidos considerando as características específicas do SDEE, resultou em programas de fluxo de potência que apresentam um excelente desempenho quando utilizados para simulação destes sistemas. Atualmente os principais métodos existentes para simulação dos SDEE são: o método da Soma de Correntes, o método da Soma de Potências e o método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixo.

Uma possível aplicação do calculo de fluxo de potencia em SDEE é a determinação das correntes pós-falta (componente simétrica da corrente de curto) oriundas de curtos circuitos ao longo do alimentador. A simulação numérica de curto-circuitos em determinados pontos da rede tem enorme importância no planejamento, projeto e exploração das instalações e redes, ao permitir antever as consequências dos defeitos simulados. Esse conhecimento possibilita a tomada das medidas necessárias para minimizar essas consequências, com a mínima perturbação possível no sistema. Isto inclui, não só a colocação e regulação de dispositivos que promovam a interrupção dos circuitos defeituosos, mas também garantir que todos os componentes da rede percorridos pelas correntes de defeito podem suportar os seus efeitos enquanto elas persistem e que as consequências da falta no sistema sejam rapidamente mitigadas.

Neste trabalho é apresentado uma ferramenta que realiza as seguintes funções:

- Cadastra alimentadores trifásicos do SDDE e transforma os valores topológicos e geométricos de cada seção em matrizes impedâncias através do método de Carson (2000) e;
- Com base nas matrizes impedâncias, na tensão da subestação e nas cargas instaladas ao longo do alimentador calcula os valores de corrente de curto-circuito (fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra, trifásico e trifásico-terra) através de um fluxo de potencia trifásico baseado no método de soma de corrente.

O trabalho é organizado da seguinte forma: seção 2 formula o problema de calculo de curto-circuito e do fluxo de potência trifásico no SDEE; na seção 3 é apresentado uma ferramenta de calculo de curto-circuito em SDEE; na seção 4 são apresentados os resultados da aplicação dessa metodologia em um alimentador real através de simulações computacionais e na seção 5 é feita a conclusão do trabalho.

2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O cálculo de curto-circuito é um dos estudos mais realizados nos sistemas elétricos de potência. Seus resultados e suas análises são aplicados na especificação de equipamentos, em estudos de coordenação e seletividade da proteção, em projetos de malhas de aterramento e linhas de transmissão, no cálculo da energia incidente devido ao arco elétrico, na avaliação da saturação de transformadores de corrente, dentre outros.

Constantemente são desenvolvidos e discutidos diversos algoritmos para análise de defeitos em sistemas elétricos de potência. A maior parte dos métodos de solução é baseado na teoria de componentes simétricas (Fortescue, 1919) que foi largamente difundida nas décadas de 70 e 80, devido principalmente às limitações dos recursos computacionais da época, sendo muito utilizada até os dias de hoje. Os curtos-circuitos em derivação (trifásico, bifásico, bifásico-terra e fase-terra) em sistemas equilibrados podem ser facilmente calculados através das metodologias clássicas de solução em componentes simétricas apresentado por Stevenson e Wiliiam (1986). No entanto, quando o método das componentes simétricas é aplicado a sistemas desbalanceados, como linhas monofásicas, bifásicas ou mesmo trifásicas que não sejam perfeitamente transpostas, são introduzidos acoplamentos entre as componentes de sequência, diminuindo substancialmente as vantagens deste método. Dessa forma, outros métodos foram desenvolvidos para análise de faltas em

regime permanente utilizando a representação do sistema trifásico em coordenadas de fase e sua aplicação envolve o cálculo de fluxos de potência no SDEE.

Diante da necessidade de métodos de solução de fluxo de potência que aliem uma alta velocidade, simplicidade e confiabilidade, surgiram os métodos que levam em conta as características específicas do SDEE, e portanto, apresentam um excelente desempenho quando utilizados para simulação destes sistemas. Entre esses estão, o método da Escada ("Ladder"), o método de Soma de Correntes e o método de Soma de Potências. Esses métodos têm como fundamento comum a varredura direta e inversa do alimentador para cálculo das suas variáveis.

Os métodos de varredura direta e inversa são mais recomendados para sistemas radiais, podendo também ser utilizados em redes com poucas malhas (Falcão, 2003). Nestes métodos podemos representar a rede de distribuição como sendo uma árvore orientada, onde a subestação é a raiz, o ramal principal (alimentador) da rede é o tronco e os ramais laterais são os galhos da árvore.

O método consiste em realizar duas varreduras uma reversa e outra direta, onde na varredura reversa parte-se dos pontos mais extremos e com uma estimativa inicial das tensões nodais, vem calculando as correntes ou os fluxos até a subestação.

Baseado neste resultado e com o valor conhecido da tensão na subestação, inicia-se a varredura direta, onde se recalculam os valores de tensão dos nós até os pontos mais extremos. Este processo se repete até que a diferença do valor de tensão em duas iterações sucessivas não seja maior do que uma tolerância pré-determinada (FALCÃO, 2003).

Nesse trabalho foi utilizado o método da soma de correntes para o cálculo de correntes de curto-circuitos em SDEE.

3 MÉTODO PROPOSTO

Esta seção descreve o fluxo trifásico baseado no método da soma de corrente, o método de Carson e a ferramenta desenvolvida que determina as correntes de curto-circuitos em alimentadores aéreos radiais.

3.1 Fluxo de Potência baseado no método da soma de Correntes

Esta metodologia está baseada no cálculo das correntes. Este método foi inicialmente proposto para redes monofásicas por Shirmohammadi et al (1988) e adaptado para redes trifásicas por Cheng e Shirmohammadi (1995). O algoritmo assume um perfil de tensões, calculando logo as injeções de correntes para tal condição. Posteriormente, são obtidos os fluxos de corrente nas linhas começando pelas mais distantes da subestação até as mais próximas dela (backward sweep). Usando as correntes nas linhas, é iniciado o processo à jusante onde são calculadas tensões em todos os nós começando pela subestação em direção aos nós mais distantes (forward sweep). Estes três últimos passos deverão ser repetidos até que a convergência seja atingida. A metodologia inclui também uma proposta de renumeração para melhorar o desempenho computacional do algoritmo.

3.2 Método de Carson

O modelo de Carson apesar de ter sido publicado em 1926 é ainda hoje o método standard para o cálculo da impedância série dependente da frequência de linhas aéreas considerando o retorno pela terra. Carson supõe que a terra é uma superfície uniforme, plana, sólida e infinita com uma resistividade constante. A modelagem trifásica da rede de distribuição aérea é apresentada por Pizzali (2003) e as equações são apresentadas abaixo:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde a matriz impedância contém as impedâncias próprias de fase (Z_{aa} , Z_{bb} e Z_{cc}) e as impedâncias de acoplamentos entre as fases ($Z_{ab}=Z_{ba}$, $Z_{bc}=Z_{cb}$, $Z_{ca}=Z_{ac}$) considerando o efeito do retorno pela terra. A matriz impedância é calculada para cada seção do alimentador.

$$\begin{aligned}
Z_{aa} &= z_{aa} + z_{gg} - 2z_{ag} \\
Z_{bb} &= z_{bb} + z_{gg} - 2z_{bg} \\
Z_{cc} &= z_{cc} + z_{gg} - 2z_{cg} \\
Z_{ab} &= z_{ab} - z_{ag} - z_{bg} + z_{gg} \\
Z_{ac} &= z_{ac} - z_{ag} - z_{cg} + z_{gg} \\
Z_{bc} &= z_{bc} - z_{bg} - z_{cg} + z_{gg}
\end{aligned} \tag{Eq. 02}$$

Onde z_{aa} , z_{bb} , e z_{cc} são as impedâncias próprias das fases, z_{ab} , z_{bc} , e z_{ac} são as impedâncias mútuas das fases, z_{gg} é a impedância própria da terra e z_{ag} , z_{bg} e z_{cg} são as impedâncias mútuas entre as fases e a terra.

$$z_{gg} = \frac{\pi}{2} \omega + j11.595\omega \quad [10^{-4} \Omega / km] \tag{Eq. 03}$$

$$z_{ag} = j\omega \ln \left(\frac{h_a}{\sqrt{\rho/f}} \right) \quad [10^{-4} \Omega / km] \tag{Eq. 04}$$

$$z_{aa} = R_a + j2\omega \ln \left(\frac{2h_a}{re_a} \right) \quad [10^{-4} \Omega / km] \tag{Eq. 05}$$

$$z_{ab} = j2\omega \ln \left(\frac{\sqrt{d_{ab}^2 + (h_a + h_b)^2}}{\sqrt{d_{ab}^2 + (h_a - h_b)^2}} \right) \quad [10^{-4} \Omega / km] \tag{Eq. 06}$$

Onde $\omega=2\pi f$;

$h_{(a, b \text{ ou } c)}$ é a altura da respectiva fase em relação ao solo;

ρ é a resistividade do material condutor que constitui a linha;

$R_{(a, b \text{ ou } c)}$ é a resistência por seção da respectiva fase em Ω/km ;

$re_{(a, b \text{ ou } c)}$ é o raio externo do condutor da respectiva fase;

$d_{(ab, bc \text{ ou } ac)}$ é a distancia geométrica entre as respectivas fases;

Com base nessas equações forma calculadas as matrizes impedâncias para cada seção do alimentador.

3.3 Ferramenta Proposta

A ferramenta proposta tem como entrada os dados do alimentador, a barra em que haverá a inserção do curto, o tipo de curto-circuito (A-T, B-T, C-T, AB, BC, CA, AB-T, BC-T, CA-T, ABC e ABC-T) e a resistência de falta ($R \geq 1\Omega$.)

Os dados do alimentador são inseridos através de uma rotina computacional construída na linguagem DELPHI e a sua tela principal é mostrada na figura 1.

Figura 1 – Tela da ferramenta de cadastro de alimentadores

Após o cadastro do alimentador a ferramenta proposta calcula automaticamente as matrizes impedâncias de cada seção pelo método de Carson.

Com base nos dados relativos à barra em que haverá o curto_circuito, o tipo de curto-circuito e a resistência de falta, realiza-se o cálculo do fluxo de potência trifásico baseado no método de soma de correntes.

O curto-circuito é inserido no fluxo de potência como se fosse uma carga na barra onde está ocorrendo o defeito. O seu valor é calculado de acordo com a Eq. 07 se for entre fase e terra e com a Eq. 08 se for entre fases. Representa-se o curto-circuito franco através de uma resistência de 1Ω , visto que no sistema real dificilmente se tem curtos-circuitos que não esteja envolvida algum tipo de resistência, limitando a corrente de curto.

$$I_{cc_i} = \frac{V_{a_i} \angle \delta_{a_i}}{R_{cc}} \quad [\text{Eq. 07}]$$

$$I_{cc_i} = \frac{V_{a_i} \angle \delta_{a_i} - V_{b_i} \angle \delta_{b_i}}{R_{cc}} \quad [\text{Eq. 08}]$$

onde I_{cc_i} é a corrente de curto inserida na barra I ;

$V_{(a, b \text{ ou } c)}$ é a tensão de fase onde é inserido o curto circuito;

R_{cc} é a resistência de curto-circuito.

4 RESULTADOS OBTIDOS

A ferramenta proposta foi aplicada ao alimentador primário de 103 barras, cujos dados de linha e de carga são encontrados em Alves et al (2005). A topologia do alimentador é mostrada na Figura 2.

Devido à indisponibilidade de obtenção de dados de curto-circuitos medidos no sistema real, foram realizadas simulações a partir do ATP (Alternative Transient Program). Nestas simulações, os alimentadores foram modelados pelo bloco LCC (Line Cable Constant) e considerados não-transpostos. As cargas foram ligadas em delta e modeladas como impedância constante. Os valoresw de pós-falta vistos no ATP foram utilizados para comparação com os resultados obtidos pela ferramenta proposta. Foram simulados no ATP casos de falta de curto-circuito monofásico (A-T, B-T, C-T), bifásico (AB, BC, CA), fase-fase-terra (AB-T, BC-T, CA-T) e trifásico em várias barras ao longo do alimentador. Foram utilizadas chaves normalmente abertas que fecharam em diferentes tempos e em diferentes barras para cada falta. A resistência de falta assumiu valores entre 1 e 20 Ω .

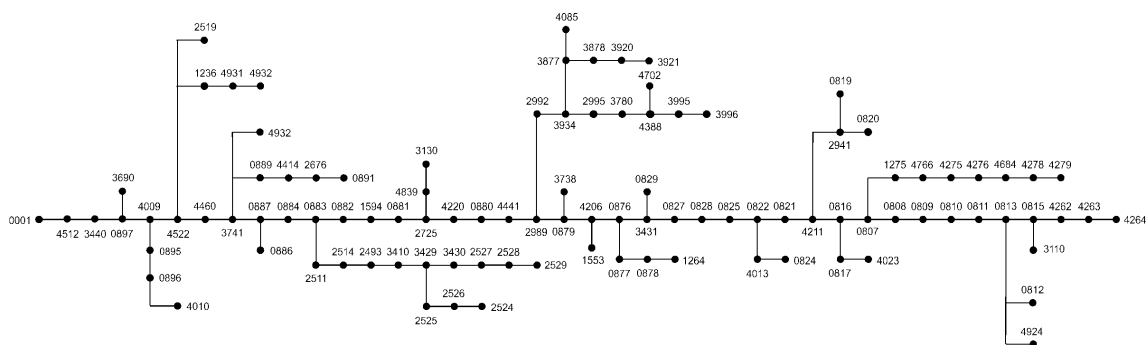


Figura 2 – Alimentador de 103 barras

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos quanto ao cálculo das correntes de curto visto na subestação, onde geralmente se realizam as medições de corrente e tensão do alimentador. É possível observar que o algoritmo proposto determina as correntes de curto-circuito com grande precisão quando comparado com os resultados do ATP, mostrando-se extremamente eficiente na realização da sua proposta.

Tabela 1 – Ferramenta para cálculo de curto-circuito aplicada a um alimentador de 103 barras.

Resistência de falta	Tipo de falta	Erro entre os resultados do ATP e da ferramenta proposta
20 Ω	A-T(Barra 4924)	0,01 %
15 Ω	B-T(Barra 817)	0,005 %
10 Ω	C-T(Barra 825)	0,0012 %
8 Ω	AB-T(Barra 2992)	0,03 %
12 Ω	AC-T(Barra 4414)	0,0015%
14 Ω	AB (Barra 883)	0,01 %
17 Ω	BC (Barra 2511)	0,003%
13 Ω	ABC (Barra 896)	0,015%

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma ferramenta computacional para cálculo de curto-circuito em redes de distribuição radiais aéreas. Esta ferramenta foi constituída por um módulo de cadastro onde os dados topológicos e geométricos do alimentador foram computados. Esses dados determinaram as matrizes impedâncias de cada seção, obtidas pelo método de Carson, que foram utilizadas no calculo de correntes de curtos-circuitos através de um fluxo de potência trifásico baseado no método da soma de corrente. Foram

descritas as principais etapas e características da ferramenta proposta e sua aplicação no SDEE. Simulações para validação do algoritmo foram realizadas. Devido à indisponibilidade de se fazer medições em campo, foi utilizado o software ATP, próprio para simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos. O algoritmo proposto apresentou excelentes resultados obtendo êxito na maioria das simulações.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFMA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio ao desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

STOTT, B e ALSAÇ, O, **Fast Decoupled Load Flow**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, pp. 859-869, May 1974.

VEMPATI, N., SHOULTS, R. R. CHEN, M. S. e SCHWOBEL, L. **Simplified feeder modeling for load flow calculations**, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PWRS-2, no. 1, pp. 168-174, Feb. 1987.

SCHOULTZ, N. R. **Distribution primary feeder I²R losses**, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 2, pp. 603-609, Apr. 1978.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**, USA: CRC Press, 2002.

CARSON J. R., **Wave propagation in overhead wires with ground return**, Bell System Technical Journal, 1926, in Proc. of the 32nd North American Power Symposium, Waterloo – Ontário, Canadá, Out. 23-47, 2000, pp. 65-80.

FORTESCUE, C. L. **Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks**, AIEE Trans, vol. 37, pt. II, pp. 1027-1040, 1919.

STEVENSON Jr., WILLIAM, D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. Tradução e revisão técnica Arlindo Rodrigues Mayer, João Paulo Minussi, Somchai Ansuji. – 2ª. Edição – São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

FALCÃO, D. M. **Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Radiais**. COPPE-UFRJ: [s.n.], 2003.

SHIRMOHAMMADI, D. HONG, H. W. SEMLYEN, A. e LUO, G. X. **A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks**, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 3, no. 2, pp. 753-762, Maio 1988.

CHENG, C. S. e SHIRMOHAMMADI, D. **A three-phase power flow method for realtime distribution system analysis**, IEEE Trans on Power Systems, vol. 10, no. 2, pp. 671-769, Maio 1995.

PIZZALI, L. F. O. **Cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição com modelagem a quatro fios**. Dissertação de mestrado, Curso de pós-graduação em engenharia elétrica - univesidade estadual, 2003.

ALVES, H. N., SOUZA, B. A. & FERREIRA, H. A.. **Banks of automatic capacitors in electrical distribution systems: a hibrid algorithm of control**. Revista Controle & Automação, 2005, Vol. 16 nº 1, p. 93-99.