

C&I Controle & Instrumentação

ENERGIA
ELÉTRICA
ELETROTECNIA

Publicações



Ano 5 - nº 48 - Julho de 2000



**MES: solução
para um "gap"**

**Indústria automobilística:
a vanguarda e o futuro
da automação**



**O que esperar das
termelétricas?**

processo de localização da faltas com informação de apenas um dos terminais da linha pode ser sensivelmente melhorado (Erikson et al., 1985).

Quando são utilizados dados dos dois terminais, torna-se possível superar alguns problemas comuns associados com a localização de faltas. Apesar destas técnicas precisarem de um meio de comunicação para transmissão de dados para o terminal onde será realizado o processamento, estas necessidades de comunicação são bastante simples (e descontínuas), uma vez que o algoritmo opera de forma *off-line*. Schweitzer (1982), Jeayasurya e Rahman (1989); Girgis et al. (1992) e Aggarwal et al. (1993) propuseram técnicas usando corrente e tensão em regime permanente provenientes dos dois terminais da linha em conjunção com equações da linha, onde a distância de falta passa a ser a única incógnita a ser calculada. Deve ainda ser ressaltado que a localização da falta só poderá ser determinada precisamente se as medições em ambos os terminais forem sincronizadas ou se este parâmetro for levado em conta no equacionamento. Assim, a referida sincronização pode ser alcançada através de *software* especializado ou ainda através de métodos que utilizam GPS (*Global Positioning Satellites* - Phadke, 1993). Coury (1992) propôs a extensão da teoria de localização de faltas para linhas de transmissão com três terminais.

Este trabalho apresenta um estudo comparativo da técnica desenvolvida por Takagi (1981), hoje bastante utilizada na prática e do princípio que utiliza dados de ambos os terminais, manipulando equações de linha. As teorias fundamentais de ambas as técnicas serão estudadas e simulações computacionais de um modelo de linha de transmissão faltosa são utilizadas para seus testes. Efeito de parâmetros tais como distância e tipo de falta, resistência de falta, capacidade das fontes, taxa amostral e comprimento da linha são analisados. Deve ser ressaltado que os métodos em questão fazem uso de dados provenientes de registradores digitais de falta instalados nas subestações. Tais registradores apresentam, por vezes, as ondas faltosas com elevado grau de ruído. Assim, para implementação das referidas técnicas, algumas subrotinas essenciais são necessárias, tais como filtragem digital, estimação dos instantes de ocorrência de falta, sincronização dos dados (para o caso de utilização de dados dos dois terminais), etc., antes da aplicação da teoria fundamental de localização de faltas propriamente dita.

Os estudos descritos neste trabalho foram desenvolvidos no LSEE (*Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica*), pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

2 - LOCALIZADOR DIGITAL DE FALTAS COM DADOS PROVENIENTES DE UM ÚNICO TERMINAL DA LINHA

Este tópico descreve a implementação prática de um algoritmo para localização de faltas baseado no método de Newton-Raphson para uma linha de transmissão de alta tensão. O método faz uso das ondas de tensão e corrente apenas de um terminal local, as quais são posteriormente filtradas através da técnica da *Transformada Discreta de Fourier* (TDF), a fim de se obter as medidas dos fasores de corrente e tensão em regime permanente. A técnica também utiliza componentes superpostos e modais de tensão e corrente, ao invés de valores de fase para o cálculo da distância da falta. O estágio inicial do algoritmo é a obtenção dos dados digitalizados de tensão e corrente do terminal local onde os procedimentos terão lugar. Alguns dos passos principais do algoritmo serão descritos a seguir.

2.1 - Detecção da Falta

As amostras usadas pelo método, provenientes de um registrador digital de faltas, normalmente incluem dados de pré-falta e pós-falta. Portanto, é necessário que se determine o ponto amostral onde a falta tem início (através de comparação com o ciclo de pré-falta), de modo a se obter dois conjuntos de dados: um formado por um ciclo de valores pré-falta e outro por um ciclo de valores pós-falta.

2.2 - Extração dos fasores fundamentais

Os valores de corrente e tensão das ondas pós-falta podem apresentar transitórios variando de altas frequências até níveis CC e, embora os mesmos sejam atenuados por transdutores e filtros passa-baixa, estas ondas ainda podem conter componentes significativos.

Com a finalidade de executar a filtragem digital, foi utilizada a teoria da *Transformada Discreta de Fourier* (Oppenheim, 1975) que produz a magnitude e o ângulo de fase dos fasores fundamentais de tensão e corrente. Tal método é bastante eficaz para a rejeição

de componentes de alta frequência e providencia uma boa filtragem dos componentes de baixa frequência, especialmente o componente CC.

2.3 - Obtenção dos componentes superpostos

Uma ocorrência de falta em uma linha de transmissão pode ser considerada como sendo equivalente à superposição de uma tensão no ponto de falta, a qual é igual e oposta à tensão pré-falta em regime permanente. As componentes de tensão e corrente pós-falta podem ser então consideradas como compostas por componentes pré-falta em regime permanente e componentes introduzidas pela falta.

Os componentes superpostos representam a diferença entre os valores de pós-falta e os valores de pré-falta em regime permanente.

2.4 - Transformação Modal

Como mencionado anteriormente, o método de localização de faltas com dados provenientes de um terminal faz uso de componentes modais de tensão e corrente ao invés de valores totais. Isto permite que o sistema trifásico seja tratado como três sistemas monofásicos independentes, simplificando assim consideravelmente os cálculos necessários. Os valores de fase são transformados em três modos desacoplados: um modo Terra e dois modos Aéreos, pela teoria dos modos naturais (Wedephol, 1963)

2.5 - Teoria Fundamental e Equacionamentos do Localizador

A teoria fundamental para localização de faltas é descrita primeiramente para uma linha monofásica (Takagi et al, 1981). Toma-se como exemplo uma falta no ponto F que está distante d km do terminal S da linha de transmissão SR representada na Figura 1(a).

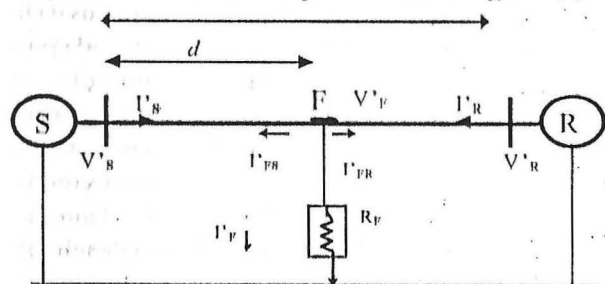


Figura 1(a) - Rede faltosa

Aplicando-se a teoria da superposição em redes lineares, separa-se uma rede faltosa em duas redes de-

rivadas: uma rede pré-falta e uma rede em que a falta foi isolada, representadas respectivamente pelas Figuras 1(b) e 1(c).

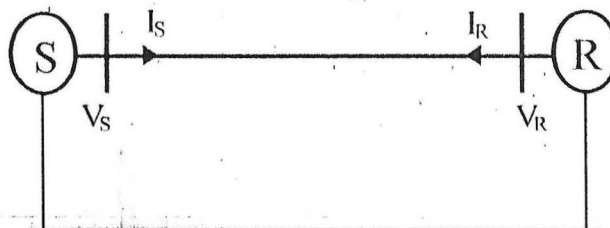


Figura 1(b) - Rede pré-falta

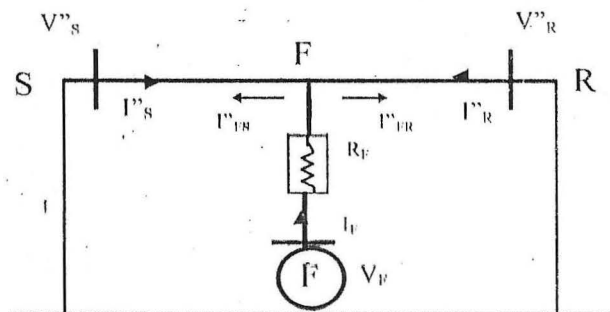


Figura 1(c) - Rede com a falta isolada

Seja V'_F o vetor de tensão em F, e seja I'_F o vetor de corrente na resistência de falta R_F na rede faltosa. Temos então,

$$\begin{aligned} V' &= R \cdot I' \\ &= -R (I''_{FS} + I''_{FR}) \end{aligned} \quad (1)$$

sendo V'_F o fasor de tensão pós-falta no ponto F, I'_F o fasor de corrente pós-falta no ponto F, I''_{FS} igual a corrente da linha de F para S e I''_{FR} igual a corrente de F para R, ambas definidas na rede com a falta isolada.

Uma nova variável $K(d)$ é definida como

$$K(d) \cong \frac{I''_{FR}}{I''_{FS}}$$

Pode ser observado que a razão $K(d)$ é uma função da distância d à falta. A substituição da equação (2) na equação (1) produz:

$$V'_F = -R_F I''_{FS} (1 + K(d)) \quad (3)$$

V'_F e I''_{FS} podem ser estimados pelos vetores medidos localmente, utilizando a Teoria dos Quadripólos,

$$V'_F = A(d) V'_S - B(d) I'_S \quad (4)$$

$$I''_{FS} = C(d) V'_S - D(d) I'_S \quad (5)$$

onde $A(d)$, $B(d)$, $C(d)$ e $D(d)$ são as quatro constantes para a porção SF da linha, definidas para um sistema distribuído como:

$$\begin{aligned} A(d) &= D(d) = \cosh(ld) \quad (6) \\ B(d) &= Z_0 \sinh(ld) \quad (7) \\ C(d) &= \sinh(ld)/Z_0 \quad (8) \end{aligned}$$

onde l é a constante de propagação e Z_0 é a impedância característica da linha.

Os vetores faltosos V'_s e I'_s são obtidos diretamente no terminal local S, enquanto que os vetores para a rede de falta isolada V''_s e I''_s são obtidos através da diferença entre os vetores pós-falta e os vetores pré-falta, como descrito anteriormente;

$$\begin{aligned} V''_s &\equiv V'_s - V_s \quad (9) \\ I''_s &\equiv I'_s - I_s \quad (10) \end{aligned}$$

Portanto, a equação (3) pode ser reescrita apenas com vetores obtidos localmente, como:

$$A(d)V' - B(d)I' = -R[1 + K(d)][C(d)V'' + D(d)I''] \quad (11)$$

o que leva a

$$R_F[1 + K(d)] = -\frac{A(d)V'_s - B(d)I'_s}{C(d)V''_s - D(d)I''_s} \quad (12)$$

Como a impedância de falta é puramente resistiva, isto implica que R_F é uma variável real. A razão $K(d)$ também será real com a condição de que a linha de transmissão seja sem perdas, e as impedâncias das fontes nos dois terminais da linha sejam puramente indutivas. Tudo isto implica que o lado esquerdo da equação (12) será real. Portanto, o lado direito da equação (12) também deverá ser real para que sentença seja verdadeira.

A equação básica do localizador é então definida como:

$$\text{Imag} \left[\frac{A(d)V'_s - B(d)I'_s}{C(d)V''_s - D(d)I''_s} \right] = 0 \quad (13)$$

onde $\text{Imag}[\cdot]$ representa a parte imaginária de uma variável complexa. A solução d da equação (13) é a distância do ponto da falta ao terminal local. Como a equação (13) não é uma equação linear, é necessário uma técnica de solução iterativa. É então utilizada a técnica Newton-Raphson aplicada ao problema da

localização da falta.

A equação básica obtida contém a distância (d) desconhecida, fasores filtrados de tensão e corrente obtidos localmente e parâmetros da linha. Assim, o processo de localização da falta pode ser realizado sem nenhum dado de terminal remoto. Não são necessários canais de comunicação entre os terminais. A equação básica não inclui a resistência de falta R_F .

As características do localizador de falta para uma linha monofásica são obviamente aplicáveis para uma linha trifásica. A equação básica pode então ser estendida para uma linha trifásica. Seja $(\cdot)^{(w)}$ uma quantidade modal. Então para uma falta fase-terra a equação fica,

$$\text{Imag} \left[\frac{V_F^{(1)} + V_F^{(2)} + V_F^{(3)}}{C^{(1)}(d)V_s^{(1)} - D^{(1)}(d)I_s^{(1)}} \right] = 0 \quad (14)$$

$j=1,2,3$

e para uma falta fase-fase,

$$\text{Imag} \left[\frac{V_F^{(2)} - V_F^{(3)}}{C^{(1)}(d)V_s^{(1)} - D^{(1)}(d)I_s^{(1)}} \right] = 0 \quad (15)$$

$j=1,2$

As tensões modais em F são estimadas pela equação (16).

$$V_F^{(w)} = \Lambda^{(w)}(d)V'_s - B^{(w)}(d)I'_s \quad (16)$$

$w=1,2,3$

3 - LOCALIZADOR DIGITAL DE FALTAS COM DADOS PROVENIENTES DOS DOIS TERMINAIS DA LINHA

Será descrito a seguir um algoritmo para localização de faltas utilizando dados dos dois terminais da linha de transmissão de alta tensão, representada pela Figura 1(a). O algoritmo baseia-se na utilização dos fasores fundamentais trifásicos de corrente e tensão de ambos os terminais. Portanto, a existência de um mecanismo de comunicação de dados entre os terminais e o processador se faz necessária.

Deve ser ressaltado que a abordagem desenvolvida utiliza os fasores fundamentais obtidos de ambos os terminais, assim, estes valores devem ser sincronizados em relação a uma referência de tempo comum.

3.1 - Detecção do instante de ocorrência da falta

Aqui a detecção da falta é introduzida com o mesmo propósito do método utilizando dados de um terminal, com a diferença de que são determinados os pontos iniciais da ocorrência da falta em ambos os terminais. São então obtidos dois conjuntos com um ciclo de dados de pré e pós-falta relativos a cada terminal.

3.2 - Extração dos fasores fundamentais

O processo é idêntico ao descrito na seção 2.2, sendo a filtragem efetuada em ambos os terminais.

3.3 - Sincronização dos dados

Como o algoritmo envolve utilização de dados dos dois terminais da linha de transmissão, é de extrema importância que os fasores de tensão e corrente em ambos os terminais estejam relacionados por uma referência de tempo comum. Uma sincronização para a referência de tempo nos dois terminais pode ser conseguida através de um canal de ligação contínuo entre os terminais, mas esta solução seria muito dispendiosa. Na prática, os dados de pré-falta de corrente e tensão em um dos terminais podem ser usados para providenciar uma referência comum (sincronização) com relação aos dados gravados no outro terminal. Por exemplo, a tensão pré-falta no terminal remoto pode ser calculada pelo equipamento localizado no terminal local através de equações de linha dada por (17). Esta abordagem elimina a necessidade de sincronização dos dados através de uma linha de comunicação exclusiva, podendo esta sincronização ser efetuada através do *software* do próprio localizador (Coury e Aggarwal, 1991).

$$V_R = \cosh(\lambda L) V_L - Z_0 \sinh(\lambda L) I_R \quad (17)$$

onde L = comprimento da linha

A avaliação da equação (17) fornece o ângulo de fase entre as tensões dos terminais local e remoto para os dados de pré-falta. Este ângulo, por sua vez, é usado para providenciar uma referência de tempo comum para os dados de tensão amostrados em cada terminal. Através dele, uma sincronização perfeita dos dados pode ser obtida.

Como citado anteriormente, a sincronização de dados pode ainda ser feita através de *GPS (Global Positioning Systems)*. Este sistema foi projetado inicialmente para propósitos de navegação, proporcionando

uma referência de tempo com precisão dentro de 1 microsegundo em qualquer localidade da terra.

3.4 - Teoria fundamental e equacionamentos do localizador

Esta seção descreve os princípios fundamentais da técnica de localização de faltas utilizando fasores de tensão e corrente trifásicos dos dois terminais da linha (Girgis et al., 1992), considerando-se o sistema descrito pela Figura 1(a).

Admitindo-se que os fasores trifásicos de tensão e corrente nos barramentos S e R estão sincronizados, então os vetores trifásicos de tensão nos barramentos S e R podem ser representados em função dos vetores trifásicos de corrente, pelas equações (18) e (19).

$$V'_S = V'_R + d Z_{abc} I'_S \quad (18)$$

$$V'_R = V'_R + (1-d) Z_{abc} I'_R \quad (19)$$

onde: Z_{abc} = matriz impedância da linha trifásica.

Subtraindo-se equação (19) de (18) fica:

$$V'_S - V'_R + L Z_{abc} I'_R = d Z_{abc} [I'_S + I'_R] \quad (20)$$

A equação (20) pode ser reescrita, considerando o sistema trifásico, da forma:

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} d \quad \text{ou} \quad Y = M d \quad (21)$$

onde:

$$Y_{sj} = V'_{sj} - V'_{Rj} + L \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} I'_{Ri} \quad (22)$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} (I'_{Si} + I'_{Ri}) \quad (23)$$

p/ $j=a,b,c$

com Z_{ji} = matriz 3x3 da impedância série

A equação (21) representa três equações complexas ou seis equações reais para uma incógnita (d), que é a distância da falta em relação a um terminal da linha.

Deve ser ressaltado que para o caso prático as equações (18) e (19) devem levar em consideração as equações de linha longa e a transformação modal para desacoplamento descrita anteriormente deve ser utilizada (Coury, 1992).

O algoritmo proposto independe do tipo de falta e da resistência de falta para seus equacionamentos.

4 - TESTES REALIZADOS PARA OS LOCALIZADORES DE FALTAS ESTUDADOS

O modelo do sistema de potência estudado é mostrado na Figura 2.

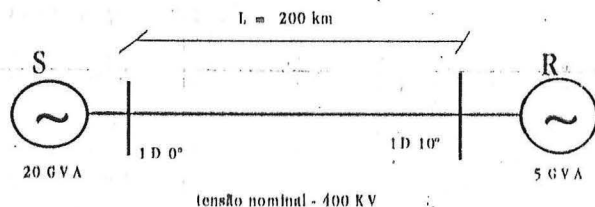


Figura 2 - Modelo do sistema de potência estudado

O sistema corresponde a uma linha de transmissão de 400 kV e 200 km de extensão, interligando duas estações geradoras de 20 GVA e 5 GVA, respectivamente. Os dados para teste dos algoritmos foram obtidos através do *software* TEER, que simula os sinais de uma linha de transmissão sob condição de curto-circuito (Johns e Aggarwal, 1976). A resposta do algoritmo para uma falta a-terra é ilustrado na Figura 3.

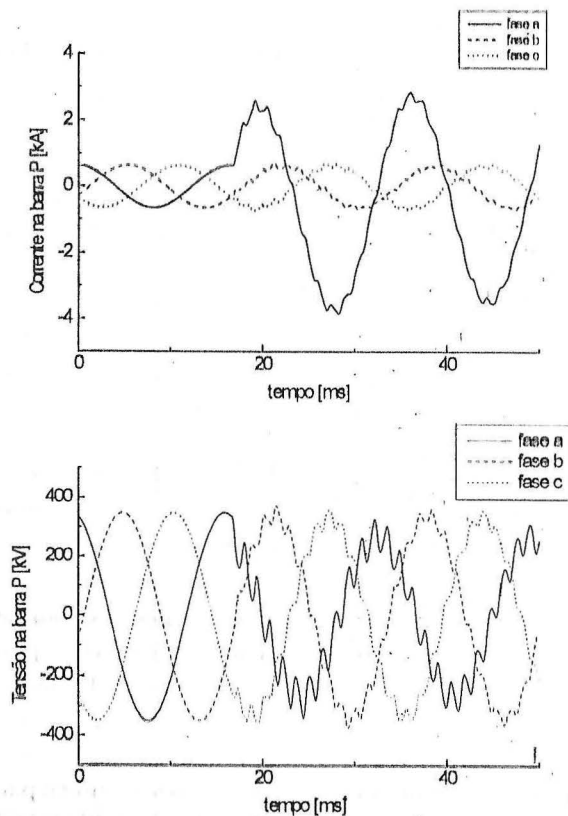


Figura 3 - Ondas típicas de corrente e tensão para uma falta fase-terra com um ciclo de dados pré-falta

Deve ser ressaltado que a saída do referido *software* simula os registradores digitais de falta anteriormente citados. Os algoritmos foram testados para uma variedade de condições da linha de transmissão considerada, com o objetivo de cobrir grande parte das situações comuns à uma linha de transmissão de alta tensão. Primeiramente, foram testados diferentes tipos de faltas em diversas localizações da linha. Posteriormente, o mesmo foi testado para variações na resistência de falta, capacidade das fontes, taxa amostral utilizada e comprimento total da linha. A maior parte dos testes foi realizada a uma taxa amostral de 4 kHz.

4.1 - Testes da técnica baseada em dados provenientes de um único terminal

Os resultados obtidos são apresentados a seguir, de acordo com os grupos apresentados anteriormente para as duas técnicas de localização de falta.

A margem de erro dos cálculos é expressa como uma porcentagem do comprimento total da linha e é dada pela expressão:

$$\% \text{ erro} = \frac{| \text{distância estimada} - \text{distância real} |}{\text{comprimento da linha}} \times 100\% \quad (24)$$

E a faixa de busca é dada por:

$$F = | \text{distância estimada} - \text{distância real} | \quad (25)$$

4.1.1 - Determinação do instante de ocorrência da falta

Conforme explicitado na seção 2.1, a determinação do ponto de ocorrência da falta é baseada na comparação das amostras de cada fase da linha com as amostras correspondentes, um ciclo anterior. Após a ocorrência de três amostras consecutivas com variações significativas, a ocorrência da falta é identificada. Nos testes realizados, o atraso máximo ocorrido para a detecção desse instante foi de 3 amostras. Este atraso não exerce nenhuma consequência, direta ou indireta, sobre a precisão do algoritmo.

4.1.2 - Extração dos fasores fundamentais das ondas de tensão e corrente através da TDF

A TDF extrai as componentes fundamentais das ondas ruidosas de tensão e corrente dos dados pós-falta. Através dos testes realizados pode-se afirmar que a técnica de filtragem proposta é bastante

eficaz para a finalidade a que foi incorporada ao algoritmo.

4.1.3 - Cálculo da distância da falta em relação ao terminal local

O passo final foi a aplicação do Método Newton-Raphson para a obtenção da distância da falta em relação ao terminal local. O método foi aplicado utilizando-se as equações (14) e (15) descritas anteriormente. Para a maioria dos casos, as soluções convergiram em 3 iterações. Um processo iterativo é mostrado na Figura 4 para uma falta AT a 122 km do terminal emissor, para a linha considerada.

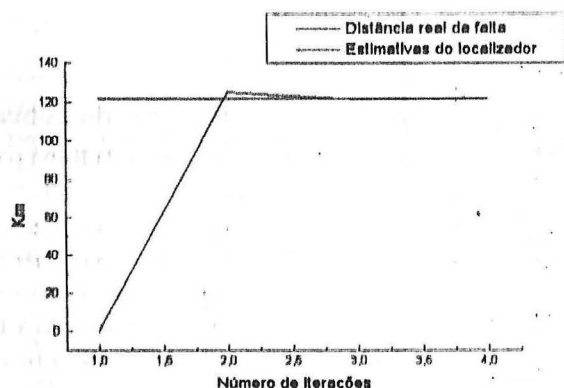


Figura 4 - Processo iterativo de solução de uma falta fase terra a 122 Km do terminal local S ($R=0W$)

Tabela 1 - Efeito do tipo de falta (T-terra, A,B,C-fases envolvidas na falta, $R=0W$)

Distância Real km	Dist. Estim.-km (%erro)	Faixa de Busca-km	Tipo de Falta
05	5.205 (0.10)	0.20	AT
05	4.922 (0.04)	0.08	ABC
20	20.998 (0.50)	0.99	BT
20	20.278 (0.14)	0.27	AB
40	38.946 (0.53)	1.05	CT
40	38.802 (0.60)	1.19	BCT
85	85.510 (0.26)	0.51	ABT
85	85.521 (0.26)	0.52	BC
99	95.234 (1.88)	3.76	BCT
99	101.00 (1.00)	2.00	AT
135	136.64 (0.82)	1.64	ACT
135	142.24 (3.62)	7.24	BT
160	161.90 (0.95)	1.90	BC
160	153.25 (3.37)	6.74	CT
180	173.29 (3.35)	6.70	AC
180	184.71 (2.36)	4.71	AB

4.1.4 - Efeito dos Diferentes Tipos de faltas

A Tabela 1 apresenta uma série de estimativas de localizações de vários tipos de faltas para a linha de transmissão considerada (Figura 2), com uma resistência de falta de $0W$. Pode ser observado que o erro máximo ocorre para faltas próximas ao terminal remoto de linha.

Nos testes realizados em diferentes localizações da linha de transmissão, observou-se que as estimativas mais precisas foram encontradas para faltas localizadas entre o terminal local e o meio da linha, com um erro ao redor de 2,5%.

4.1.5 - Efeito da resistência de falta

Para avaliar o efeito da resistência de falta no modelo proposto, foram realizados testes com resistência de $30W$ e de $10W$, mostrados na Tabela 2.

Nestes casos, houve um aumento generalizado na margem de erro do algoritmo, principalmente para uma resistência de $30W$. No entanto, a margem de erro até o meio da linha para alguns tipos de faltas ainda está em um nível aceitável. Testes também foram feitos para resistências altas, de 100 a 150W. Para estes valores, o algoritmo apresentou um desempenho altamente comprometido, o que o invalidou. Esta dependência com a presença da resistência de falta é esperada em métodos utilizando dados de um único terminal, como já explicitado anteriormente.

4.1.6 - Efeito da capacidade da fonte

A Tabela 3 ilustra algumas estimativas para diferentes valores de capacidade da fonte local (50, 10 e 5 GVA). Como pode ser observado a precisão do método não é afetada pela variação de tal parâmetro.

Tabela 2 - Efeito de resistências de falta de 30 e de 10 W

R - ohms.	Dist. Real km	Dist. Estim.-km (%erro)	Faixa de Busca- km	Tipo de Falta
30 Ω	20	30.98 (5.49)	10.98	AT
30 Ω	65	99.88 (17.44)	34.88	BC
30 Ω	115	120.34 (2.67)	5.34	CT
30 Ω	160	209.91 (24.9)	49.91	ABC
10 Ω	208	26.575 (3.29)	6.57	AT
10 Ω	65	52.931 (6.03)	12.06	BC
10 Ω	115	133.11 (9.02)	18.11	CT
10 Ω	160	204.23 (22.1)	44.23	ABC

4.1.7 - Efeito da taxa amostral utilizada

Testes foram realizados para taxas amostrais de 1 kHz e 2 kHz, mantendo-se a mesma margem de erros registrados para a taxa amostral de 4 kHz.

Tabela 3 Efeito da variação da capacidade da fonte S ($R_f=0\text{ W}$)

Capacidade Ponte S(GVA)	Dist. Real km	Dist. Estim.-km (%erro)	Faixa de Busca-km	Tipo de Falta
50	05	5.136 (0.07)	0.13	AT
10	05	5.329 (0.16)	0.32	AT
5	05	5.569 (0.28)	0.56	AT
50	99	94.57 (2.21)	4.42	ABC
10	99	94.24 (2.38)	4.75	ABC
5	99	94.50 (2.25)	4.5	ABC
50	195	193.91 (0.5)	1.09	ACT
10	195	193.6 (0.70)	1.4	ACT
5	195	193.12 (0.9)	1.88	ACT

4.1.8 - Efeito do comprimento da linha de transmissão

Foram realizados testes para uma linha idêntica à da Figura 2, mas com comprimento de 100 km e 400 km respectivamente.

Em ambos os casos, a margem de erro foi praticamente a mesma do caso com a linha de 200 km descrita nos itens anteriores.

4.2 - Testes da técnica baseada em dados provenientes dos dois terminais

Testes realizados para esta técnica também utilizam dados de entrada gerados pelo pacote TEER e se referem ao mesmo sistema descrito anteriormente pela Figura 2.

Os resultados obtidos nas etapas de detecção do instante de falta e extração dos fasores fundamentais foram similares aos conseguidos para o algoritmo com dados de um terminal, descritos nas seções 2.1 e 2.2, respectivamente, não sendo necessário mencioná-los novamente.

4.2.1 - Sincronização de dados

Para sincronização foram testados casos em que o instante de detecção em um terminal diferenciava-se de 2 até 5 amostras com relação ao do outro terminal. Através da teoria empregada no procedimento descrito anteriormente, foi possível a estimação desta variação no tempo e a sincronização de dados foi efetuada. Para todos os casos simulados, conseguiu-se uma sincronização perfeita em relação a um eixo de referência comum.

4.2.2 - Cálculo da distância da falta em relação ao terminal S

A distância d é obtida através da solução da equação (21). Novamente, para este caso, a margem de erro será expressa como uma porcentagem do comprimento total da linha, dado pela expressão representada na equação (24) e a faixa de busca dada pela equação (25).

A avaliação do algoritmo obedecerá os mesmos critérios adotados para o algoritmo anterior, ou seja, serão avaliadas diferentes condições de falta, capacidade das fontes, taxa amostral e configurações de linha. Ambos os algoritmos foram submetidos a um mesmo conjunto de testes, permitindo uma melhor comparação entre seus desempenhos.

4.2.3 - Efeito dos diferentes tipos de faltas

Estimações de localizações ao longo da linha para diferentes tipos de faltas podem ser vistas na Tabela 4. Estes cálculos foram obtidos para a linha de transmissão representada na Figura 2, com uma resistência de falta de 0W. Deve ser notado que a porcentagem de erro ficou em torno de 0,5 %, chegando à 1,2 % para casos isolados. Estes casos não são significativos.

Os piores casos obtidos foram para faltas não envolvendo terra. Para os demais casos, a margem de erro manteve-se bastante baixa, com os menores erros relativos às faltas fase-terra, onde foram registrados erros de 0,01 %.

Diferentemente do algoritmo para dados de um terminal, o algoritmo para dados de dois terminais não apresentou piores resultados a medida que a posição da falta se desloca em direção ao terminal remoto.

4.2.3 - Efeito da resistência de falta

Os testes realizados até aqui consideraram uma resistência de falta nula. Foram realizados testes com resistência de falta de 30W e 10W, vistos na Tabela 5, para a configuração da Figura 2.

Em ambos as situações houve um aumento nas margens de erro, chegando a extremos de 8 % em alguns casos. No entanto, estas margens ainda são aceitáveis e não invalidam o algoritmo. As porcentagens de erro mantiveram-se em um limite de 2,5 % para a grande maioria dos testes. Mesmo para testes com resistências mais altas, de 100 a 150 W, o algoritmo produziu um resultado satisfatório.

Tabela 4 - Efeito do tipo de falta (T-terra, A,B,C-fases envolvidas na falta, $R_f=0W$)

Distância Real (km)	Dist. Estim.-km (%erro)	Faixa de Busca-km	Tipo de Falta
05	4,83 (0,08)	0,17	AT
05	5,87 (0,44)	0,87	ABC
20	20,60 (0,30)	0,60	BT
20	19,11 (0,44)	0,89	AB
40	40,93 (0,47)	0,93	CT
40	40,86 (0,43)	0,86	BC
85	85,52 (0,26)	0,52	ABT
85	84,61 (0,20)	0,39	BC
99	99,31 (0,16)	0,31	BC
99	99,12 (0,06)	0,12	AT
135	134,90 (0,05)	0,10	ACT
135	134,63 (0,18)	0,37	BT
160	159,17 (0,41)	0,83	BC
160	159,06 (0,47)	0,94	CT
180	178,81 (0,59)	1,19	AC
180	180,88 (0,44)	0,88	AB

Tabela 5 - Efeito de resistências de falta de 30 e de 10 W

R ohms	Dist. Real km	Dist.Estim.-km (%erro)	Faixa de Busca-km	Tipo de Falta
30 W	20	15,38 (2,31)	4,62	AT
30 W	65	56,53 (4,23)	8,47	BC
30 W	115	117,97 (1,48)	2,97	CT
30 W	160	176,11 (8,06)	16,11	ABC
10 W	20	18,02 (0,99)	1,98	AT
10 W	65	62,23 (1,38)	2,77	BC
10 W	115	114,39 (0,31)	0,61	CT
10 W	160	164,89 (2,44)	4,89	ABC

4.2.4 - Efeito da capacidade da fonte

A Tabela 6 mostra estimações também para diferentes valores de capacidade da fonte local (50, 10 e 5 GVA). Como no caso do algoritmo anterior, a precisão do método não é afetada pela variação deste parâmetro.

Tabela 6 - Efeito da variação da capacidade da fonte S ($R_f=0W$)

Capacidade Fonte S-GVA	Dist. Real km	Dist.Estim.-km (%erro)	Faixa de Busca-km	Tipo de Falta
50	05	4,84 (0,08)	0,16	AT
10	05	4,88 (0,06)	0,12	AT
5	05	4,36 (0,32)	0,64	AT
50	99	101,82 (1,4)	2,82	ABC
10	99	97,89 (0,55)	1,11	ABC
5	99	95,9 (1,53)	3,07	ABC
50	195	194,7 (0,15)	0,3	ACT
10	195	194,25 (0,4)	0,75	ACT
5	195	194,12 (0,4)	0,88	ACT

4.2.5 - Efeito da taxa amostral utilizada

Novamente testes foram realizados para as taxas amostrais de 1kHz e 2kHz. Nestes casos também foram mantidas as margens de precisão se comparadas ao desempenho utilizando a taxa amostral de 4 kHz.

4.2.6 - Efeito do comprimento da linha de transmissão

Foram simulados casos para a linha da Figura 2 com comprimento de 100 e 400 km, como no caso do algoritmo utilizando dados de um terminal.

De uma forma geral, este método também é insensível aos comprimentos de linha de transmissão testados.

5 - CONCLUSÃO

A correta estimativa da localização de faltas nas linhas de transmissão é importante para auxiliar na rápida restauração do sistema e análise de faltas, resultando na melhoria da qualidade na continuidade da potência fornecida.

O artigo em questão apresenta um estudo comparativo de dois métodos distintos de localização de faltas, tendo como diferenciação a procedência dos dados: de apenas um terminal e de ambos os terminais da linha de transmissão.

No que diz respeito ao método implementado que utiliza dados de apenas um dos terminais da linha, efeito das diferentes localizações, tipos de faltas, resistências de faltas, capacidade das fontes e taxa amostral utilizada foram testados. Nos testes realizados considerando-se faltas sólidas, observou-se que as estimativas mais precisas foram encontradas para faltas entre o terminal local e o meio da linha, com erros ao redor de 2,5%. No entanto, foi também observado que para testes com a existência de resistências de faltas (10 a 30 W), o algoritmo perde esta precisão, culminando em desempenho altamente comprometido para resistências de faltas mais elevadas (100 a 150 W). A maior vantagem associada a este método é que canais de comunicação não são necessários.

O método que utiliza informação de ambos os terminais da linha foi testado para as mesmas situações descritas anteriormente. As porcentagens de erro mantiveram-se em um limite de 2,5% para a grande maioria dos testes, mesmo considerando-se resistências de faltas mais elevadas (100 a 150 W). Diferentemente do algoritmo anterior, este não apresenta piores resultados a medida que a posição da falta se desloca em direção ao

terminal remoto. Estas situações atestam a superioridade de tal método. Assim, quando canais de comunicação estão disponíveis, métodos de localização de faltas em linhas utilizando dados de ambos terminais devem ser utilizados. Estes métodos não necessitam comunicações de alta velocidade e podem ser implementados através de *modem*. Deve ainda ser ressaltado que as técnicas utilizando dados de ambos os terminais apresentam uma melhor estimativa da localização de falta, sem qualquer suposição ou informação concernente a rede externa, tais como impedância das fontes.

BIOGRAFIA DOS AUTORES

O Dr. Denis V. Coury é Professor Livre-Docente do Depto de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo. O Prof. Coury desenvolve ativa pesquisa ligada a Proteção Digital de Sistemas de Potência, bem como aplicação de Sistemas Inteligentes no Controle e Proteção de Sistemas. Email

Luis Reinaldo Gautier concluiu o seu mestrado em *Localizadores de Falta em Linhas de Transmissão* no Depto de Eng. Elétrica EESC/USP em 1996.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGARWAL, R.K.; COURY, D.V.; JOHNS, A.T.; KALAM, A (1993) "A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Feeders".-IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, Nº 3, Julho.
- COOK, V.(1986) "Fundamental Aspects of Fault Location Algorithms Used in Distance Protection", Proceedings IEE, 133, Part C, N 6, Setembro, pp359-368.
- COURY, D.V., AGGARWAL, R.K.(1991) "A New Algorithm for Fault Classification and Fault Location on Three Terminal Lines", The 26th Universities Power Engineering Conference, Brighton Polytechnic, Brighton, UK.
- COURY, D.V.(1992) "A Practical Approach to Accurate Fault Location on EHV Feeders" PhD Thesis University of Bath, UK.
- ERIKSON, L. SAHA, M.M., ROCKEFELLER, G.D (1985) "An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote End Infeed" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol 104, N 1, pp424-436.
- GIRGIS, A.A.; HART, D.G.; PETERSON, W.L.(1992) "A New Fault Location Technique for Two- and Three-Terminal Lines" - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, Nº 1.
- JEAYASURYA, B.; RAHMAN, M.A (1989) "Accurate Fault Location of Transmission Lines Using Microprocessors", IEE Fourth International Conference on Developments in Power System Protection, IEE Pub. N 303, pp 1-5
- JOHNS, A.T.; AGGARWAL, R.K.(1976). "Digital Simulation of Faulted EHV Transmission Lines with Particular Reference to Very-High-Speed Protection" - Proc. IEE, Vol. 123, Nº 4, pp 353-359.
- PHADKE, A.G. (1993) "Synchronized Phasor Measurements in Power Systems" IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, N 2
- OPPENHEIM, A.V.; SCHAFER, R.W.(1975). "Digital Signal Processing" - Prentice-Hall International Editions.
- SAHA, M. M.; ERIKSON, L. (1985) "Microcomputer-Based Accurate Fault Locator with Remote-End Infeed Compensation", IEE Conference Publication N 249, pp 193-198.
- SAINT, M.M., PATTIANKAR, Y.G.(1979) "On Line Digital Fault Locator for Overhead Transmission Lines", Proceedings IEE, 126, N 11, Novembro, pp1181-1185.
- SCHWEITZER, E.O. (1982) "Evaluation and Development of Transmission Line Fault-Locating Techniques which use Sinusoidal Steady-State Information" Ninth Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, USA.
- TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA J.; UEMURA, T.; SAKAGUSHI, T (1981) "A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I - Fourier Transformation Method"- IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-100, Nº 3.
- TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T.(1982), "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data", IEEE Transactions, PAS-101, N 8, pp 2892-2898.
- WEDEPHOL, L.M (1963) "Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling-Wave Phenomena in Poly-Phase Systems"- Proc. IEE, 110, (12), pp 2200-2212.
- WISZNIEWSKI, A.(1983) "Accurate Fault Impedance Locating Algorithm", Proceedings IEE, 130, Part C, 6, pp 311-314