

Desenvolvimento de um Método para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão não Transpostas com Terminais não Sincronizados

D. N. Barbin, E. F. Kobayashi, B. G. Isolani, E. C. N. Rodrigues, D. A. G. Vieira,
D. B. Oliveira, A. C. Lisboa

Resumo – O artigo apresenta um novo método de localização de faltas que pode ser aplicado de forma generalizada em linhas de transmissão (LT) não transpostas. O método utiliza informações das medições de tensão nos terminais da LT. Na formulação apresentada, os terminais da LT podem estar não sincronizados. Outra vantagem do método proposto é que toda a solução é obtida de forma analítica não necessitando de qualquer algoritmo iterativo. Por se tratar de um método no domínio das fases e não é necessária a identificação da natureza elétrica da falta, sendo este aplicável para faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas. O método é testado em casos simulados e em casos reais e esse apresenta boa exatidão e robustez.

Palavras-chave – Análise Automática de Faltas, Localização de faltas, Linhas de Transmissão não Transpostas, Terminais não sincronizados, Matriz de Impedância de Fases.

I. INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão são partes muito sensíveis do sistema elétrico de potência devido as suas grandes extensões e pelo fato que, em geral, estas estão expostas a diversos eventos ambientais como raios, rajadas de vento e queimadas.

A CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica é responsável pela transmissão de cerca de 30% da energia transmitida pelo Sistema Interligado Nacional (SIN). Para tal mantém uma infraestrutura formada por uma rede com 12.993 quilômetros de linhas de transmissão e 18.782 quilômetros de circuitos.

Desta forma, para garantir agilidade e segurança na restauração de sistemas após eventos anômalos, a análise de faltas com base em oscilografias é fundamental.

O atual trabalho se insere nesse esforço através do projeto

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL), realizado na cidade do Rio de Janeiro/RJ, no período de 05 a 07 de agosto de 2013.

Este trabalho foi apoiado parcialmente pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

D. N. Barbin, E. F. Kobayashi, B. G. Isolani, E. C. N. Rodrigues J. M. Silva e M. C. Souza trabalham na CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (e-mails: dbarbin@ctEEP.com.br, ekobayashi@ctEEP.com.br, bisolani@ctEEP.com.br).

D. A. G. Vieira, D. B. Oliveira e A. C. Lisboa trabalham na ENACOM Handcrafted Technologies (e-mail: douglas.vieira@enacom.com.br; diogo.oliveira@enacom.com.br; adriano.lisboa@enacom.com.br).

de P&D ANEEL “Desenvolvimento de Metodologia e Ferramentas Computacionais para Análise Automática de Ocorrências”, código 0068_0003_2010, proposto pela CTEEP. As parceiras executoras são a ENACOM Handcrafted Technologies (www.enacom.com.br) e a ASOTech – Advanced System Optimization Technologies, com a colaboração da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Trata-se de um projeto concluído dentro do prazo de 24 meses definido no planejamento inicial.

O objetivo é desenvolver uma ferramenta computacional capaz de fazer uma análise preliminar das faltas gerando um relatório de forma automática. Esta análise possibilita maior agilidade e auxilia nas análises mais detalhadas posteriores.

Para desenvolver uma análise automática dos registros de oscilografias alguns problemas são encontrados: incerteza nos dados, natureza elétrica da falta, transposição imperfeita das linhas, e, principalmente, falta de sincronismo entre os terminais.

Este trabalho gerou um programa com diversas funcionalidades para a análise de oscilografias, com destaque para técnicas capazes de estimar de maneira robusta a localização de faltas mesmo em situações onde não há sincronismo entre os terminais.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A. Estado da arte da técnica proposta

Desde a década de 50 diversos estudos veem sendo realizados para melhorar a localização de faltas em linhas de transmissão [1].

Vários métodos de localização de faltas cada um com sua especificidade foram propostos. Em [2] foi proposto um método levando em conta um único terminal de medição considerando uma linha com baixas perdas. Ainda considerando dados de somente um terminal, um método baseado em tensões modais de alta frequência é descrito em [3], enquanto um estudo considerando linhas paralelas não transpostas é apresentado em [4].

Um das ferramentas mais comuns para desenvolver métodos de localização de falta é representá-lo em termos de componentes simétricas [5]. As componentes simétricas transformam o circuito trifásico original acoplado em três circuitos monofásicos desacoplados. O acoplamento se dá devido à indutância mútua que aparece entre as fases da linha de transmissão. Entretanto, isso só acontece se as linhas

forem transpostas e, conseqüentemente, a impedância mútua for igual entre todas as fases.

Utilizando componentes simétricas e modelos de parâmetros distribuídos Johns e Jamali [6] propusera, um método de localização de faltas baseado no fasor em componentes simétricas de dois terminais. Uma abordagem para múltiplos terminais é apresentada em [7]. Em [8] foi proposta uma técnica que utiliza a sequência negativa que é independente do sincronismo dos terminais. Este resultado pode ser alcançado por considerar a magnitude dos fasores ao invés dos fasores completos.

Recentemente, utilizando componentes de sequência positivas e a consideração que a impedância de falta só tem componente real, em [9] foi proposto um método para lidar com terminais não sincronizados. Um método iterativo para parâmetros distribuídos e fasores não sincronizados é apresentado em [10]. Uma fórmula fechada utilizando a magnitude dos fasores e componentes simétricas é apresentada em [11].

Circuitos duplos com compensação série e terminais não sincronizados são considerados em [12]. Em [13] foi proposto um método de sincronização considerando a utilização de duas componentes simétricas simultâneas. Uma solução para linhas antiparalelas é considerada em [14]. Ainda considerando componentes simétricas, em [15-16] foram propostos novos métodos para calcular a distância de falta sem utilizar os parâmetros da linha.

Girgis et al. [17] propôs uma técnica que considera dois ou três terminais e a representação no domínio das fases ao invés de componentes simétricas. Uma das vantagens desta representação é que o tipo de falta não precisa ser conhecido, e é aplicável em linhas não transpostas, pois uma matriz de impedância Z geral é considerada. Uma fórmula iterativa é considerada para resolver o problema do sincronismo sem prova de convergência. Em [18] é proposta uma fórmula iterativa para terminais não sincronizados.

Este trabalho propõe uma modificação de [17] que mantém suas propriedades interessantes e resolve a questão de terminais não sincronizados. Ao invés de uma fórmula iterativa, que em certas situações pode não convergir para o valor da localização da falta, uma fórmula analítica é escrita. A formulação é feita no domínio das fases, logo, o método pode ser aplicado a linhas de transmissão não transpostas já que as impedâncias mútuas podem ter valores diferentes entre si.

O método proposto é testado em diversos dados reais fornecidos e verificados pela CTEEP. O método é também testado em casos simulados e em todos eles a formulação apresentada mostra um bom desempenho.

B. Metodologia

Essa seção descreve a metodologia para a localização de faltas. Inicialmente, a figura 1 apresenta um modelo simplificado de uma linha de transmissão.

Os conjuntos de tensão e corrente medidos nos terminais da linha, terminais denominados de S e R, são $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}, V_{ar}, V_{br}, V_{cr}, I_{as}, I_{bs}, I_{cs}, I_{ar}, I_{br}$ e I_{cr} (tensões e correntes para as três fases a, b e c). Além disso, no ponto da falta F as tensões são nomeadas de V_a^F, V_b^F e V_c^F .

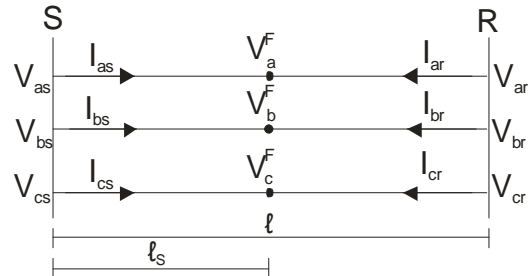


Figura 1. Diagrama da linha de transmissão trifásica.

Na linha de transmissão em falta, a tensão trifásica no ponto da falta F pode ser escrita em termos da matriz de impedância da LT, Z_{abc} , e das tensões e correntes dos terminais S e R:

$$V_{abc}^F = V_{abcs} - \ell_s Z_{abc} I_{abcs} \quad (1-a)$$

$$V_{abc}^F = V_{abcr} - (\ell - \ell_s) Z_{abc} I_{abcr} \quad (1-b)$$

onde ℓ é o comprimento total da linha e ℓ_s é a distância da falta com relação à S.

A tensão V_{abc}^F é um vetor contendo as três tensões de cada fase no ponto da falta. O mesmo raciocínio vale para as outras notações condensadas $V_{abcs}, V_{abcr}, I_{abcs}$ e I_{abcr} .

A primeira equação de (1-a) é obtida usando a lei de Kirchhoff das tensões considerando a malha à esquerda do ponto de falta e a segunda equação de (1-b) é obtida usando a mesma lei das tensões só que considerando a malha à direita do ponto de falta.

Baseado no fato de que as tensões nas três fases da LT são iguais no ponto da falta o método proposto resolve o seguinte problema de otimização:

$$\min_{\ell_s} \left(\left(\sum_{i=a,b,c} V_{is}^F V_{is}^{*F} \right) - \left(\sum_{i=a,b,c} V_{ir}^F V_{ir}^{*F} \right) \right)^2 \quad (2)$$

Como a expressão acima depende somente da magnitude dos fasores de tensão ela se torna imune a problemas de sincronia nas medições dos terminais S e R, portanto, erros desse tipo não alteram o desempenho do método. Já que os erros na sincronia das medições aparecem na fase dos fasores.

Outra característica importante dessa formulação é que como ela trabalha com grandezas fasoriais e com a matriz de impedâncias de fase da linha, não com a matriz de impedância diagonal vinda da transformação de componentes simétricas e que considerada as impedâncias mútuas todas iguais, portanto, ela pode ser aplicada a linhas não transpostas. Muitas linhas de transmissão hoje não contam com dispositivos de transposição.

Resolver o problema de otimização proposto em (2) é equivalente simplesmente a resolver uma equação do segundo grau. Tal equivalência é conseguida igualando a expressão apresentada em (2) a zero já que essa expressão assume seu mínimo nesse ponto. Então, resolver (2) é equivalente a resolver a equação abaixo:

$$\ell_s^2 E + \ell_s F + G = 0 \quad (3)$$

onde

$$\begin{aligned} E &= BB^* - DD^* \\ F &= AB^* + A^*B - CD^* - C^*D \\ G &= AA^* - CC^* \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} A &= V_{as} + V_{bs} + V_{cs} \\ B &= -M_{as} - M_{bs} - M_{cs} \\ C &= \sum_{i=a,b,c} (V_{ir} - \ell M_{ir}) \\ D &= +M_{ar} + M_{br} + M_{cr} \\ M_i &= z_{ia}I_a + z_{ib}I_b + z_{ic}I_c \end{aligned} \quad (5)$$

A solução da expressão (3) é simples, obtida de forma fechada e ainda fornece dois valores para a distância da falta.

Porém, somente um desses valores está no intervalo factível da linha, $0 \leq \ell_s \leq \ell$, e é o valor a ser escolhido. Com isso, foge-se de resolver equações não lineares que necessitam de métodos iterativos de solução o que levar o método a não convergir.

III. RESULTADOS DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A. Casos Simulados:

Nessa seção, os resultados simulados foram obtidos usando o software ATP-EMTP. O programa permite que possam ser feitas simulações de eventos que representam a uma falta real.

No programa, foi considerada uma linha de transmissão de 60 Hz com 100 km de extensão. Na tabela I, estão apresentados os parâmetros da rede equivalente que representa o sistema elétrico a esquerda do terminal S (rede A) e o sistema a direita do terminal R (rede B) conforme as figuras 2-a e 2-b.

Os subscritos p e 0 (zero) na tabela I se referem aos circuitos de sequência positiva e zero providos da transformação de componentes simétricas. A matriz de impedâncias de fases da linha está expressa em (6) e é dada em Ω/km .

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0.738 + j5.710 & 0.045 + j2.648 & 0.045 + j2.622 \\ 0.045 + j2.648 & 0.738 + j5.710 & 0.045 + j2.216 \\ 0.045 + j2.216 & 0.045 + j2.622 & 0.738 + j5.710 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para essa situação apresentada, duas faltas monofásicas (AT) são consideradas: uma a 10 km e outra a 50 km do terminal S. Depois da montagem do problema no programa, conforme figura 2-b, e da simulação realizada as medições de corrente e tensões nos terminais S e R são obtidas. E após um processamento dos dados, conhecido como estimação fasorial, os fasores das tensões são obtidos.

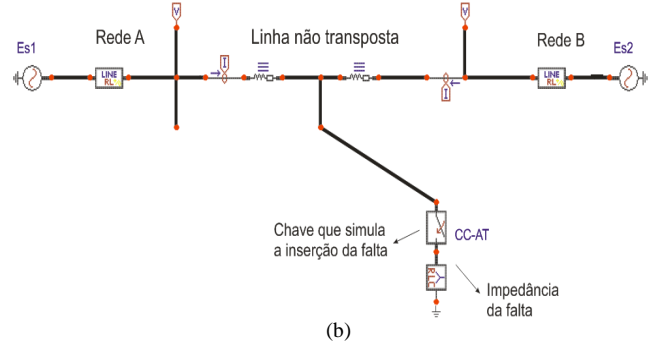
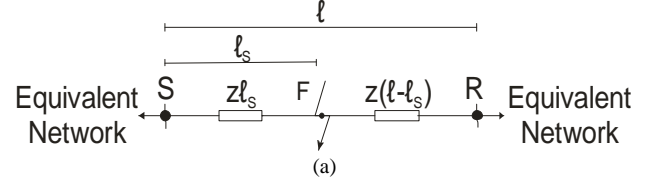


Figura 2. (a) Diagrama de conexão da linha de transmissão e (b) esquemático usado para simulação no ATP-EMTP.

Tabela I – Parâmetros das redes equivalentes.

Parâmetros	Rede A	Rede B
V_{pico} (kV)	339.66	326.59
Ângulo da tensão ($^\circ$)	0	-20
R_p (Ω)	1.0185	0.6366
L_p (mH)	50.925	31.830
R_0 (Ω)	2.0371	1.2732
L_0 (mH)	101.85	63.66

Para simular um possível erro na sincronia das medições, foi inserido um defasamento entre os fasores dos terminais S e R. Alguns resultados para a falta descrita considerando três métodos de localização de faltas diferentes são apresentados nas figuras 3 e 4. A resistência de falta para esse caso foi de $R_f = 0 \Omega$.

Além do método apresentado nesse trabalho, os métodos desenvolvidos em [17] e [8] são usados nos para calcular a distância da falta. Em [17], Tziouvaras apresenta um método que é imune a erros de sincronia, porém não considera a LT transposta. Já Girgis [8], considera um modelo de LT transposta, mas erros de sincronia introduzem erros elevados no método. Já o método apresentado nesse trabalho considera tanto que a LT é transposta quanto é imune a erros de sincronia.

Com isso pode-se interpretar os gráficos da figura 3 e da figura 4. O método de Tziouvaras mantém igual o valor calculado para a distância da falta mesmo quando o erro inserido devido a não sincronia dos dados é aumentado. Contudo, o método apresenta um erro no valor computado devido à linha de transmissão não ser transposta o que o método não leva em consideração.

Já o método de Girgis, considera a transposição da linha e não trata o problema da sincronia dos dados de medição. Por isso, quando não existe erro de sincronia o método de Girgis calcula a distância da falta corretamente. Mas, à medida que o erro de sincronia entre os dados aumenta o desempenho do método piora prejudicando sua exatidão.

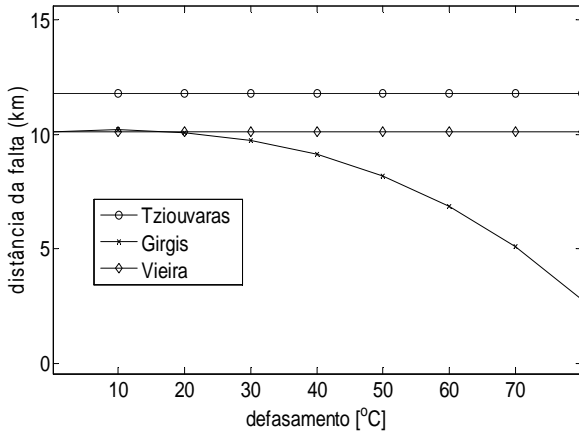


Figura 3. Falta localizada a 10 km do terminal S.

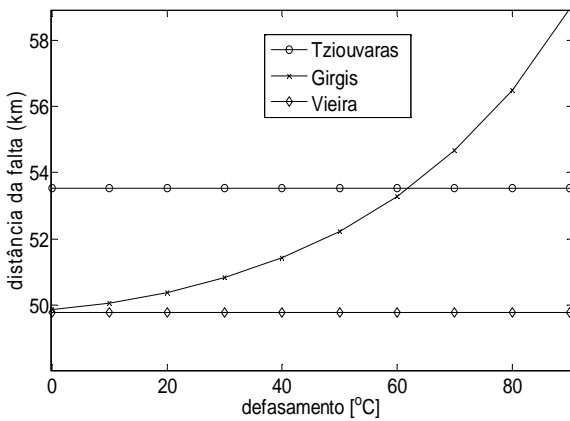


Figura 4. Falta localizada a 50 km do terminal S.

Outro caso simulado no ATP-EMTP considerou um modelo LCC da linha de transmissão. A configuração da torre simulada é apresentada na figura 5. Os condutores das fases e o retorno são nomeados de 1, 2, 3 e 0, respectivamente. A distância entre os condutores de uma fase é 40 cm e o número de condutores de uma fase é 4. A altura de meio de vão é a altura do cabo no meio de vão entre torres.

No modelo do ATP-EMTP, a linha de transmissão é considerada não transposta e o efeito pelicular nos cabos é incluído. A tabela II mostra alguns parâmetros dos cabos como R_{in} raio interno do condutor, R_{out} raio externo do condutor (tal parâmetro deve ser incluído devido ao efeito pelicular) e R_{esis} é a resistência de corrente contínua. A resistividade do solo é $600 \Omega \cdot m$ e o comprimento total da linha é 74.64 km. A matriz de impedância de fases da linha é apresentada em (7) em Ω/km .

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0.0515 + j0.4918 & 0.0269 + j0.1738 & 0.0266 + j0.1456 \\ 0.0269 + j0.1738 & 0.0516 + j0.4599 & 0.0269 + j0.1738 \\ 0.0266 + j0.1456 & 0.0269 + j0.1738 & 0.0515 + j0.4918 \end{bmatrix} \quad (7)$$

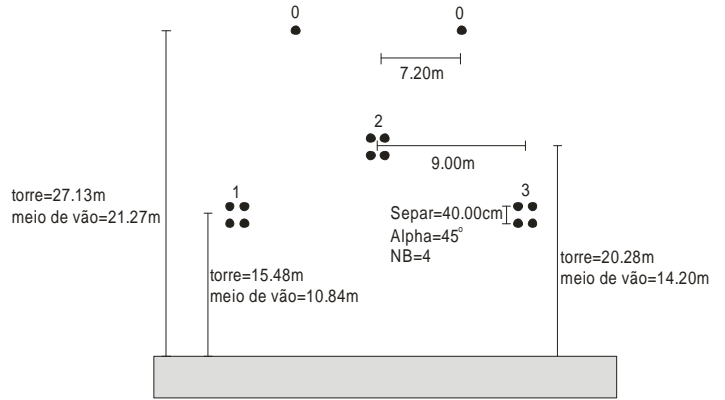


Figura 5. Configuração da torre.

Tabela II – Parâmetros dos cabos.

R_{in} (cm)	0.4605
R_{out} (cm)	1.2573
R_{esis} (Ω/km)	0.096934

Um falta monofásica com resistência de falta nula ($R_f=0 \Omega$) foi inserida a 37.32 km dos terminais. Nessa situação, a falta iniciou-se no instante 275 ms. Baseado nas tensões e corrente das figuras 6, 7 e 8 o método proposto calculou a distância da falta e apresentou um erro de 0.0003%.

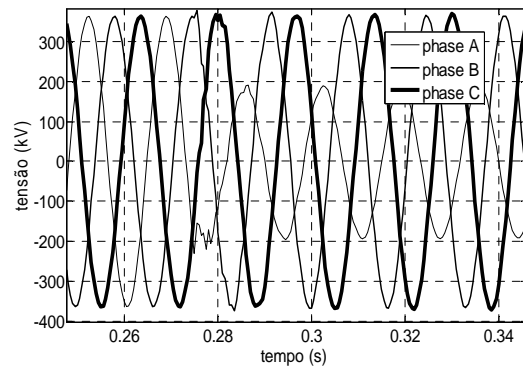


Figura 6. Tensão de fase no terminal S.

B. Casos Reais:

Os casos utilizados para testar o método de localização de faltas são mostrados na tabela I. O método apresentou boa exatidão para vários tipos de faltas e para diversas causas. As oscilografias foram lidas a partir dos relés através de arquivos COMTRADE. Os casos relatados foram inspecionados pela equipe de reparo da concessionária de energia e relatado a distância e a causa da falta. Os casos relatados nessa seção foram obtidos com o sistema desenvolvido e em uso pela CTEEP.

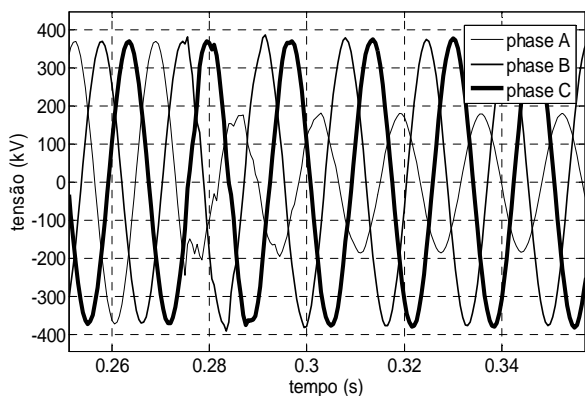


Figura 7. Tensão de fase no terminal R.

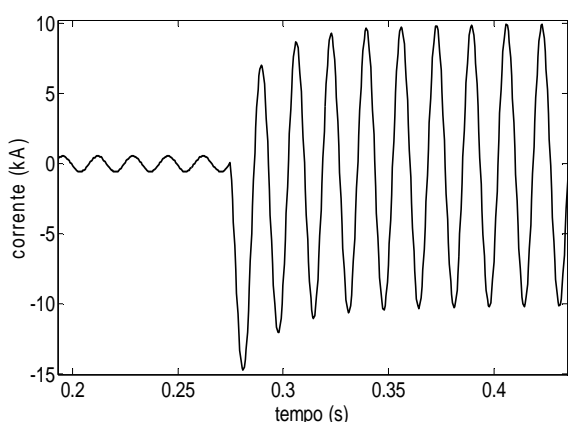


Figura 8 – Corrente na fase em falta.

Tabela III – Resultados do método de localização para casos reais (Q = queimada e DA = descarga atmosférica).

Comprimento	Tipo	Causa	Resultado Inspeção	Resultado método	Erro (%)
235.00km	BT	Q	97.00km	98.13km	1.17
227.80km	AT	DA	69.83km	70.73km	1.29
375.94km	AT	Q	195.50km	196.30km	0.41
49.26km	CT	DA	26.77km	27.46km	2.58

C. Algoritmos clássicos de localização implementados no sistema

Além do método proposto neste trabalho e descrito acima, diversos outros métodos de localização também foram considerados.

Para faltas com leituras de somente um terminal disponível, foram desenvolvidos diversos métodos, sendo que o método de Takagi et al. [2] sendo o que apresentou melhores resultados nos dados reais.

Como base de desenvolvimento do método proposto, o sistema conta com uma versão do método de Girgis et al. [18]. Partindo da implementação deste método que os pesquisadores envolvidos no projeto derivaram o método detalhado nesta seção. Este método foi publicado por Vieira et al. [19].

Para lidar com ausência de dados das linhas foram implementados os métodos descritos em [16] e [17]. Embora muito interessante teoricamente estes métodos apresentaram

dificuldades devido a falta de sincronismo entre os terminais.

IV. OUTROS MÓDULOS IMPLEMENTADOS NO SISTEMA

A. Definição automática do período de falta.

Um dos pontos importantes para a correta localização de faltas e outras funcionalidades é a definição do período de falta. Este trabalho considerou a utilização de uma janela no tempo ao invés de uma única amostra, como é tradicionalmente realizado. A escolha desta janela garante robustez aos métodos implementados.

A corrente de falta $i(t)$ pode ser reconstruída a partir da reconstrução fasorial da seguinte maneira:

$$\tilde{i}(t) = I(t)\cos(\omega t + \phi(t)) + I_3(t)\cos(3\omega t + \phi_3(t)) + a(t)t + b(t) \quad (8)$$

onde $\tilde{i}(t)$ é a reconstrução da corrente no tempo t baseada nas amplitudes da fundamental w e terceiro harmônicos $I(t)$ e $I_3(t)$, suas respectivas fases $\phi(t)$ e $\phi_3(t)$ e os termos de decaimento $a(t)$ e $b(t)$.

Para definir a janela foi utilizada a minimização da média móvel do erro de reconstrução dividido pela amplitude da corrente fundamental:

$$\varepsilon(t_i) = \sum_{\tau=t_i-k/2}^{t_i+k/2} \frac{(i(\tau) - \tilde{i}(\tau))^2}{i(\tau)} \quad (9)$$

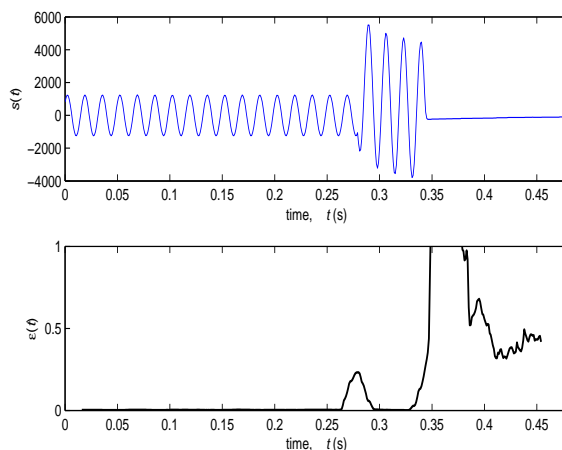


Figura 9. Falta localizada a 10 km do terminal S.

A janela com o ponto central em t_i com menor erro de reconstrução é a escolhida processamento das faltas. Na figura 9 é mostrado um caso real considerando o erro de reconstrução. Claramente os maiores erros estão nas bordas do instante de faltas, parte disso devido à dificuldade natural de se realizar uma estimação fasorial nestes pontos.

B. Direcionalidade da falta

Uma das funcionalidades mais comuns no esquema de proteção de linhas de transmissão é a proteção direcional. Os relés direcionais em geral utilizam sequências negativas ou

zero das faltas ou sequência negativa puro de falta. Uma alternativa é a utilização do puro de falta da componente positiva. O cálculo da direcionalidade utilizado neste trabalho foi baseado no artigo recente de Gao e Crossley [20].

De acordo com [20] a utilização do puro de falta tem as seguintes características: existe para qualquer tipo de falta; é independente da carga; a tensão mais alta é vista no ponto de falta; a relação de fase entre corrente e tensão no relé é determinada utilizando.

O princípio de componentes é aplicado na falta. As impedâncias Z_{M1} , Z_{L1} , Z_{N1} e ΔZ_1 são as impedâncias de sequência positiva da fonte M, da linha e da fonte N, e de falta, respectivamente.

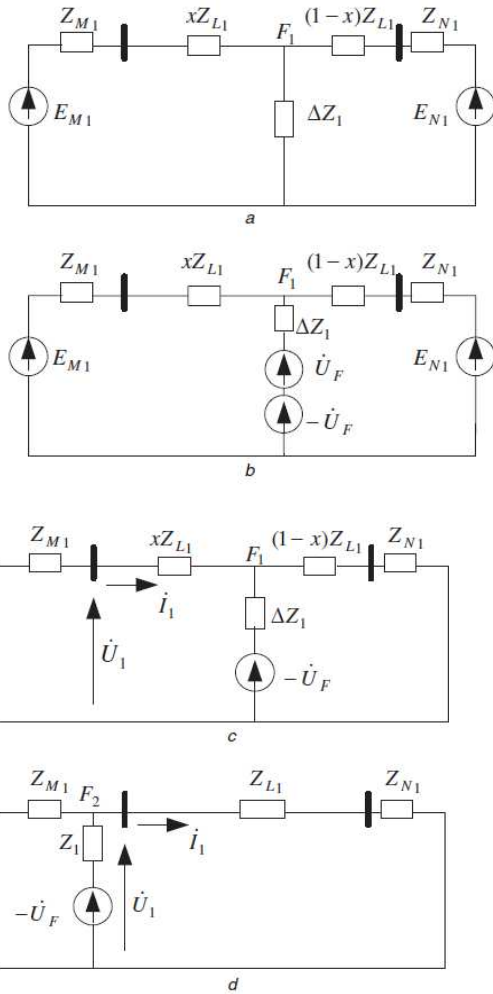


Figura 10. (a) circuito de falta, (b) circuito de falta considerando a tensão U_F (c) circuito puro de falta considerando uma falta para frente, e, (d) circuito puro de falta considerando uma falta para trás.

O circuito mostrado na figura 10 mostra: (a) circuito de falta, (b) circuito de falta considerando a tensão U_F (c) circuito puro de falta considerando uma falta para frente, e, (d) circuito puro de falta considerando uma falta para trás.

1) O método clássico

Para falta para frente, como mostrado na figura 10-c, a tensão medida é de:

$$U_1 = -I_1 Z_{M1} \quad (10)$$

Para faltas para trás a tensão é

$$U_1 = I_1(Z_{L1} + Z_{N1}) \quad (11)$$

Como a impedância de sequência positiva é predominantemente reativa, as relações de fase entre tensão e corrente são:

$$\text{angulo}(U_1, I_1) = \begin{cases} -90^\circ, & \text{faltas para frente} \\ +90^\circ, & \text{faltas para trás} \end{cases} \quad (12)$$

Considerando os possíveis erros de medida, em geral, o critério de direcionalidade é dado, para faltas para frente

$$180^\circ + \theta < \text{angulo}(U_1, I_1) < 360^\circ - \theta \quad (13)$$

e para faltas para trás

$$\theta < \text{angulo}(U_1, I_1) < 180^\circ - \theta \quad (14)$$

onde θ é o ângulo de bloqueio. Este comportamento está descrito graficamente na figura 11.

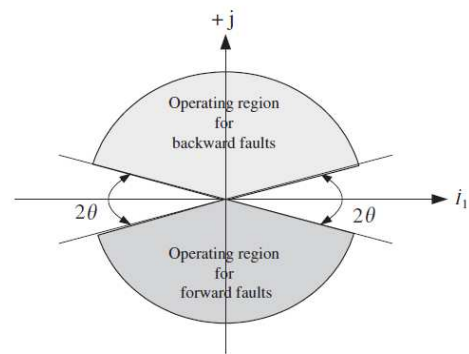


Figura 11. Características operativas da direcionalidade.

2) Esquema para melhoria do método

Algumas dificuldades podem ser encontradas no cálculo da direcionalidade. Entre elas: se a fonte M é de baixa impedância, a falta é para frente e localizada perto do terminal remoto, a tensão U_1 será muito pequena para ser utilizada; se a fonte M é de alta impedância, a falta para frente a corrente I_1 será muito pequena para comparação de fases; se a impedância de falta é muito alta.

Pode-se compensar a tensão U_1 da seguinte forma:

$$U_1' = U_1 - 0.5I_1 Z_{L1} \quad (15)$$

Para os problemas referentes a fontes fortes e fracas pode-se compensar U_1 da seguinte forma:

$$U_1'' = U_1 - I_1 Z_{L1} \quad (16)$$

Com estas alterações um método mais robusto pode ser implementado para a direcionalidade da falta.

C. Estimativa fasorial

Para estimação dos fasores partindo das leituras das oscilografias foi realizada uma estimação fasorial baseada no estimador de mínimos quadrados, considerando a fundamental, terceiro harmônico, taxa de decaimento e offset. A estrutura utilizada é similar à apresentada em [21].

Vale notar que o estimador de mínimos quadrados com esta formulação é um filtro passa-faixas, o que ajuda na melhoria da relação sinal ruído.

D. Avaliação da natureza elétrica da falta

Um dos pontos de interesse da análise de falta é a determinação da natureza elétrica. Os tipos de falta são codificados pelas fases ou terra envolvidos na falta. Sendo as fases codificadas como A (azul), B (branca) e V (vermelha) e o terra como N, podemos ter os tipos: AN, BN, VN, AB, BV, AV, ABN, BVN, AVN, ABVN.

1) O limiar de corrente

Em operação normal, o sistema de transmissão de energia elétrica é quase balanceado. Já em situação de falta por curto-circuito, as fases envolvidas apresentam uma elevação no nível de corrente vista dos terminais da linha de transmissão, conforme mostrado. Caso o curto seja das fases para o terra, aparecerá uma corrente de terra, dada pelo somatório das correntes de fase. Sendo assim, surge naturalmente um método de classificação do tipo de falta dado pela definição de um limiar de até onde seria uma operação normal do sistema.

Seja $I_{av,i}$, $i = a, b, v, n$, a corrente média em uma fase a, b ou v ou terra n dentro do período de falta medida em um terminal da linha de transmissão. Definimos a corrente máxima para normalização

$$I_{\max} = \max\{I_{av,a}, I_{av,b}, I_{av,v}\} \quad (17)$$

O limiar de corrente para classificar envolvimento de uma fase ou do terra pode ser definido então como

$$\begin{cases} \frac{I_{av,a}}{I_{\max}} > \eta_{\phi}, & \text{fase a envolvida} \\ \frac{I_{av,b}}{I_{\max}} > \eta_{\phi}, & \text{fase b envolvida} \\ \frac{I_{av,v}}{I_{\max}} > \eta_{\phi}, & \text{fase v envolvida} \\ \frac{I_{av,n}}{I_{\max}} > \eta_{\eta}, & \text{terra envolvido} \end{cases} \quad (18)$$

onde η_{ϕ} é o limiar de fase (tipicamente 0,8) e η_{η} é o limiar de terra (tipicamente 0,3). Note que essa definição depende da existência de uma falta por curto-circuito, classificando corretamente quando a falta for ABV ou ABVN. Note também que a falta ABVN sempre será classificada como ABV, uma vez que estamos em um sistema balanceado, o que não deve ser problema por se tratar de uma falta muito rara.

2) Fasores das componentes simétricas

Em um sistema perfeitamente balanceado, só existe a corrente simétrica de sequência positiva. Em uma falta de curto-circuito não trifásico, isso não é verdade uma vez que a corrente será relativamente maior nas faltas envolvidas no curto-circuito. Curiosamente, os ângulos das componentes simétricas podem ser usados para identificar o tipo de falta [22].

Sejam γ_m os fasores das componentes simétricas $m = 0, 1, 2$ da corrente de falta. Definimos então os ângulos

$$\begin{aligned} \alpha &= \gamma_2 - \gamma_1 \\ \beta &= \gamma_2 - \gamma_0 \end{aligned} \quad (19)$$

A partir de α e β é possível identificar o tipo da falta a partir do gráfico da figura 12. Apesar de simples e elegante,

esse método é pouco prático por se basear na corrente de falta.

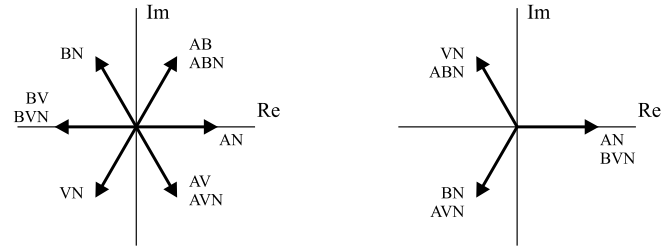


Figura 12. Relação entre os ângulos com os tipos de falta

3) Reconstrução de fasores

O método baseado na reconstrução de fasores é baseado em [21]. Durante um regime permanente, a corrente apresenta um comportamento senoidal em 60 Hz com fases bem definidas. Já durante um regime de falta, a corrente apresenta um comportamento transitório bem distinto de um comportamento senoidal. Nesse sentido, nasce naturalmente outro método de identificação do tipo de falta baseado no erro de reconstrução das componentes de fase [21].

Seja ϵ_i , $i = a, b, v, n$, o erro de reconstrução da componente da fase a, b, v ou do terra n. Defina então o ponto máximo como

$$P_{\max,i} = \max_t \epsilon_i(t) \quad (20)$$

O limiar de erro de reconstrução para classificar envolvimento de uma fase ou do terra pode ser definido então como

$$\begin{cases} \frac{P_{\max,a}}{P_{\max,v}} > \alpha \text{ e } \frac{P_{\max,a}}{P_{\max,b}} > \alpha, & \text{fase a envolvida} \\ \frac{P_{\max,b}}{P_{\max,a}} > \alpha \text{ e } \frac{P_{\max,b}}{P_{\max,v}} > \alpha, & \text{fase b envolvida} \\ \frac{P_{\max,v}}{P_{\max,a}} > \alpha \text{ e } \frac{P_{\max,v}}{P_{\max,b}} > \alpha, & \text{fase v envolvida} \\ \frac{P_{\max,n}}{P_{\max,a}} > \alpha \text{ ou } \frac{P_{\max,n}}{P_{\max,b}} > \alpha \text{ ou } \frac{P_{\max,n}}{P_{\max,v}} > \alpha, & \text{terra envolvido} \end{cases} \quad (21)$$

onde α é o limiar de envolvimento de uma fase ou do terra (tipicamente 0,8).

V. O SISTEMA GERADO

Foi gerado um sistema com interface gráfica e geração de relatórios no formato Word para auxílio das atividades que atualmente se encontra em uso na CTEEP. A entrada de dados das oscilografias aceita todos os padrões COMTRADE definidos até o final do projeto, ano de 2012. Na seção VI são mostradas algumas telas do sistema gerado.

A. Benefícios Auferidos

O produto final contemplou diversos aspectos técnicos e de usabilidade para que o produto final pudesse ser utilizado e expandido pela concessionária. As leituras de dados seguem padrões internacionais e padrões definidos internamente pela CTEEP.

Fundamentalmente, o programa gerado é capaz de locali-

zar de forma mais eficiente e com grande precisão faltas em linhas de transmissão. O processamento automático é robusto e pode ser utilizado em conjunto com ajustes manuais de interesse do operador.

Adicionalmente, este programa gerado está aumentando a produtividade dos engenheiros de proteção na análise de anomalias. Neste período de uso do programa dados estão sendo coletados para verificar o aumento de efetividade do sistema.

B. Dificuldades Encontradas no Projeto

Entre as principais dificuldades, a falta de sincronismo entre os dados dos terminais disponíveis foi a mais crítica. Este fato levou a desafios consideráveis para a utilização de dados de dois terminais, que era de interesse do projeto. Sistemas automáticos em situações desta natureza são de desenvolvimento complexo.

Para contornar estas dificuldades a equipe do projeto trabalhou nas formulações matemáticas dos localizadores de falta para reduzir o efeito da falta de sincronismo. Como mostrado por Vieira et al. [19], formulações em termos dos módulos ao invés dos fasores completos, são mais interessantes neste contexto.

VI. INTERFACE DO SISTEMA

Nesta seção são apresentadas algumas das telas geradas para o sistema desenvolvido.

Na figura 13 é mostrada a tela inicial do sistema. Foram desenvolvidos modos usuário e administrador. O objetivo do modo administrador é possibilitar que o usuário dê algum retorno e confirmações sobre os fatos apurados de fato pelo sistema. Por exemplo, pode ser colocar a distância real da falta localizada pela equipe de manutenção.

Na figura 14 é mostrada a tela de gerenciamento de falta. No campo (1) estão as faltas carregadas no sistema. No campo (2) são mostradas informações da falta selecionada como a natureza elétrica, distância, localização, duração e direcionalidade. Estes dados são obtidos automaticamente pelos algoritmos implementados.

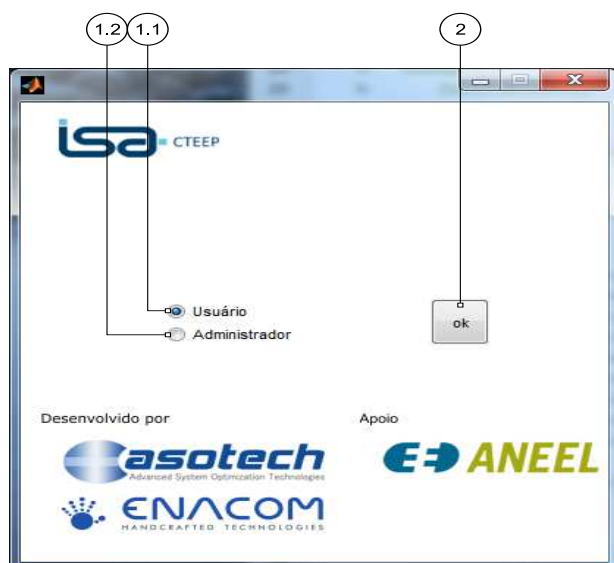


Figura 13. Tela inicial de login.

Dois relatórios em Word podem ser gerados utilizando as teclas (3.1) e (3.2). Estes relatórios foram customizados para contemplarem os padrões e necessidades da CTEEP. Adicionalmente, por serem documentos editáveis, fica uma tarefa mais simples para o analista realizar alterações que julgue necessárias.

O campo (2.2) da figura 14 mostra as oscilografias disponíveis. Para cada oscilografia dados como desequilíbrio entre as fases, fluxo de potência, fator de potência entre outros são disponíveis tanto nos períodos pré-falta e no período de falta. Clicando na oscilografia de interesse esta pode ser visualizada como mostrado na figura 15.

A figura 15 mostra a visualização das oscilografias. Esta visualização pode ser realizada no domínio do tempo, dos fasores e componentes simétricas. Esta visualização também contempla os canais digitais, caso seja de interesse.

Adicionalmente, o item (9.1) possibilita a visualização do caminho da impedância feita, sendo possível carregar detalhes do relé de interesse para o estudo. Também esta disponível uma análise espectral acionando o botão (9.5).

O sincronismo manual entre as faltas está implementado nos botões (7.1) e (7.2).

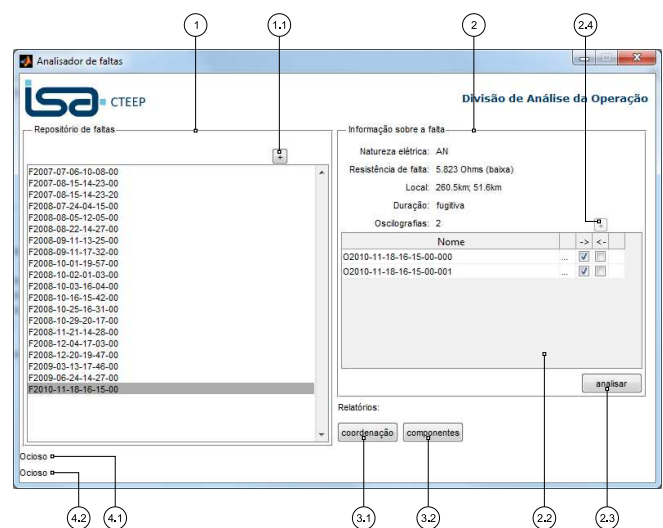


Figura 14. Gerenciador de faltas

Além das funcionalidades descritas, algumas outras foram implementadas para contemplar as exigências de dia a dia da empresa.

Por fim, vale ressaltar que encontra-se em desenvolvimento uma versão do sistema de análise de faltas on-line. Nessa versão, o sistema o usuário carregará informações sobre a falta através de um arquivo comtrade e o sistema analisará a falta automaticamente.

A comercialização do sistema desenvolvido se fará através de um acordo entre os desenvolvedores e a companhia financiadora do trabalho e pode-se ser usado por outras concessionárias de energia elétrica.

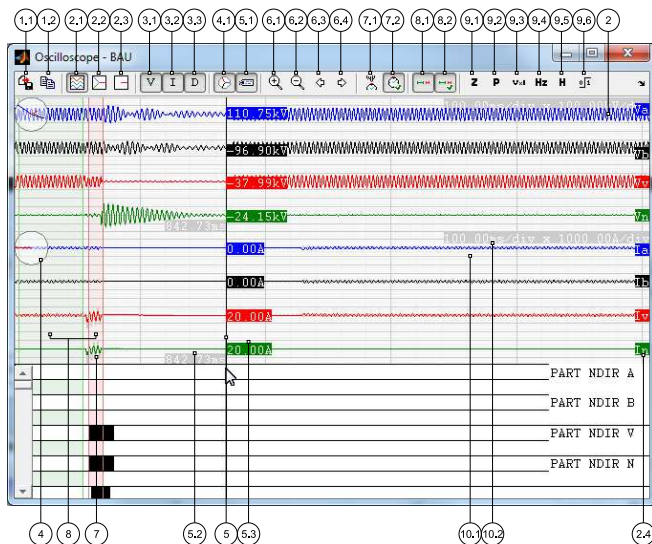


Figura 15. Tela de análise manual de faltas.

VII. TRABALHOS FUTUROS

Em continuidade aos trabalhos já desenvolvidos e hoje em operação na CTEEP há a pretensão de pesquisar alguns problemas inerentes à análise de faltas.

Primeiramente, uma continuação desse projeto já foi realizada dentro da ENACOM. Foi desenvolvido um novo método de localização de faltas o qual não necessita o conhecimento dos parâmetros da linha de transmissão e também não necessita que os dados das medições nas extremidades da linha estejam sincronizados [23]. Tal método tem características bastante interessantes uma vez que sistemas de sincronização de dados tem um custo alto e o conhecimento dos parâmetros das linhas muitas vezes é de difícil acesso dentro das companhias de energia.

Outro aspecto que desperta interesse para a continuação da pesquisa é o desenvolvimento de métodos de localização para a aplicação em linhas de transmissão consideradas longas. Os primeiros passos nessa direção é estender os métodos apresentados em [23] e [24]. A introdução de uma nova variável nessas metodologias, a constante de propagação da onda na linha, faz surgir a necessidade de buscar uma nova maneira de resolver o problema.

VIII. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma formulação analítica para o problema de localização de faltas em linhas não transpostas com terminais não sincronizados. A formulação foi desenvolvida considerando o modelo de parâmetros concentrados resultando em uma equação de segundo grau.

Uma evolução deste trabalho é considerar um modelo com parâmetros distribuídos. Entretanto, este modelo considera equações de onda que utilizam funções hiperbólicas, dificultando soluções analíticas. As soluções iterativas podem sofrer de problemas numéricos diversos, sendo complicado garantir a estabilidade e convergência dos métodos.

Outro ponto relevante é considerar no modelo matemático a possibilidade que a impedância de falta seja dinâmica com o tempo. Este tipo de fenômeno ainda não foi tratado na literatura e tem várias consequências práticas;

Como mostrado, este trabalho contemplou aspectos técnicos relevantes, como a falta de sincronismo entre os terminais e gerou um programa com interface gráfica que será mostrado com mais detalhes na próxima seção. Inclusive foi considerada a geração de relatório automático. Adicionalmente, estes resultados podem ser de interesse de outras empresas transmissoras de todas as partes do mundo.

IX. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o restante da equipe que esteve integralmente ou parcialmente alocado a este projeto. Em especial ao coordenador Prof. Petr Ekel, e ao Prof. Rodney Saldanha.

X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. F. Fuller, E. F. Fuchs, and K. J. Roesler, "Influence of harmonics on power distribution system protection," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 3, pp. 549-557, Apr. 1988.
- [2] T. Stringfield, D. Marihart, and R. Stevens, "Fault location methods for overhead lines," *AIEE Transactions*, vol. 76, pp. 518-530, 1957.
- [3] K. Takagi, Y. Yomakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsu-shima, "Development of a new type fault locator using the one terminal voltage and current data," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, pp. 2892-2898, 1982.
- [4] R. Mardiana, H. Motairy, and C. Su, "Ground fault location on a transmission line using high-frequency transient voltages," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 2, pp. 1298-1299, april 2011.
- [5] S.-H. Kang, Y.-J. Ahn, Y.-C. Kang, and S.-R. Nam, "A fault location algorithm based on circuit analysis for untransposed parallel transmission lines," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 4, pp. 1850-1856, oct. 2009.
- [6] J. L. Blackburn, *Symmetrical Components for Power Systems Engineering*. CRC Press, 1993.
- [7] A. T. Johns and S. Jamali, "Accurate fault location technique for Power transmission lines," *IEE Proceedings*, vol. 137, pp. 395-402, 1990.
- [8] S. Brahma, "New fault-location method for a single multiterminal transmission line using synchronized phasor measurements," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 3, pp. 1148-1153, July 2006.
- [9] D. A. Tizouvaras, J. Roberts, and G. Benmouyal, "New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines," in *Developments in Power System Protection, 2001, Seventh International Conference on (IEE)*, 2001.
- [10] C.-S. Yu, L.-R. Chang, and J.-R. Cho, "New fault impedance computations for unsynchronized two-terminal fault-location computations," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 4, pp. 2879-2881, oct. 2011.
- [11] A. Dalcastagne, S. Filho, H. Zurn, and R. Seara, "An iterative two terminal fault-location method based on unsynchronized phasors," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 4, pp. 2318-2329, oct. 2008.
- [12] E. G. Silveira and C. Pereira, "Transmission line fault location using two-terminal data without time synchronization," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 1, pp. 498-499, feb. 2007.
- [13] J. Zykowski, E. Rosolowski, P. Balcerak, M. Fulczyk, and M. Saha, "Fault location on double-circuit series-compensated lines using two-end unsynchronized measurements," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 4, pp. 2072-2080, oct. 2011.
- [14] —, "Accurate noniterative fault-location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 2, pp. 547-555, april 2011.
- [15] G. Korres and C. Apostolopoulos, "Precise fault location algorithm for double-circuit transmission lines using unsynchronised measurements from two anti-parallel ends," *Generation, Transmission Distribution, IET*, vol. 4, no. 7, pp. 824-835, july 2010.

- [16] G. Preston, Z. Radojevic and, C. Kim, and V. Terzija, "New settings-free fault location algorithm based on synchronised sampling," *Generation, Transmission Distribution, IET*, vol. 5, no. 3, pp. 376 –383, march 2011.
- [17] Z. M. Radojevic, C. H. Kim, M. Popov, G. Preston, and V. Terzija, "New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, pp. 554–559, 2009.
- [18] A. Girgis, D. Hart, and W. Peterson, "A new fault location technique for two and three-terminal lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, pp. 98–107, 1992.
- [19] C. Apostolopoulos and G. Korres, "A novel algorithm for locating faults on transposed/untransposed transmission lines without utilizing line parameters," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 4, pp. 2328 –2338, Oct. 2010.
- [20] Gao, H. and Crossley, P. A., Design and evaluation of a directional algorithm for transmission-line protection based on positive sequence fault components. *IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution*, 153(6):711–718, 2006.
- [21] Silveira, E. G., Localização de faltas em linhas de transmissão: desenvolvimento de novos algoritmos e implementação de sistema computacional para aplicações práticas. PhD thesis, UFMG, 2007.
- [22] Saha, M. M., Izykowski, J., and Rosolowski, E., *Fault location on power networks*. Springer. 2010.