

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

NELSON G. R. TAQUIRE, JÔNATAS B. LEITE, JOSÉ R.S. MANTOVANI

Laboratório de Planejamento de Sistemas Elétricos, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Caixa Postal 061, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

E-mails: romero.taquire.nelson@gmail.com, jonatasboasleite@gmail.com,
mant@dee.feis.unesp.br

Abstract— This paper proposes a methodology for locating faults in transmission lines with thyristor-controlled series compensation (TCSC) that are protected by numerical differential relays. The proposed methodology aims to overcome problems of fault location, improving the accuracy of algorithms that use voltage and current measurement signals from a transmission line termination. The calculation of the distance between the transmission line termination and the fault incidence point employs two procedures: one for faults in the transmission line section limited by the local termination and TCSC; and other for faults in the section limited by the TCSC and remote termination. The detection of the fault incidence section is achieved using measurements of angular deviation for both transmission line terminations and the measurement of fault resistance in the local termination, which varies during the interval from the beginning to one cycle after the fault occurrence. The use of fuzzy logic for comparing these measurements permits the accurate detection of the fault incidence section. The proposed method is tested using a test system from literature system where multiple fault cases in different positions of the transmission line are simulated. The results show the algorithm capability to locate accurately the position of fault occurrence.

Keywords— Fault location, transmission system, digital signal processing, differential protection.

Resumo - Neste trabalho propõe-se um método para a localização de faltas que, em conjunto com a lógica de um relé diferencial numérico, deve ser usado para proteção de linhas de transmissão com compensação série controlada por tiristores (TCSC). Este método visa solucionar o problema de localização de faltas melhorando a precisão dos algoritmos que utilizam medições de sinais de tensão e corrente numa terminação da linha de transmissão. O cálculo da distância entre a terminação da linha de transmissão e o ponto de incidência da falta é realizado utilizando dois procedimentos: um para faltas produzida no trecho entre a terminação local da linha de transmissão e o TCSC; e o outro para faltas no trecho entre o TCSC e a terminação remota. A detecção do trecho de incidência da falta é obtido usando as medições de escorregamento angular dos sinais de corrente em ambos os extremos da linha de transmissão e a medição da resistência de falta no extremo local, que é variável durante o intervalo de início até um ciclo depois da ocorrência da falta. A aplicação da lógica difusa na comparação destas medições permite detectar com precisão o trecho com falta. O método proposto foi testado usando um sistema teste da literatura onde múltiplos casos de faltas em diferentes pontos da linha de transmissão foram simulados. Os resultados mostram a capacidade do algoritmo em localizar precisamente a posição de ocorrência da falta.

Palavras-chave - Localização de faltas, sistemas de transmissão, processamento digital de sinais, proteção diferencial.

1 Introdução

A localização de falta é um processo que visa encontrar com a maior precisão possível o local na linha de transmissão onde a mesma ocorreu. A função de localização da faltas pode ser implantada no software dos seguintes equipamentos (Izykowski, 2008):

- Relés de proteção microprocessados;
- Registradores digitais de perturbações;
- Detectores portáteis de defeito.

A função de localização de faltas, geralmente, é incluída como uma função adicional nos relés de proteção microprocessados. Neste caso, a alta capacidade computacional, comunicação e sincronização entre relés microprocessados em extremos remotos das linhas de transmissão possibilitam que os localizadores de faltas sejam implantados com pouco ou quase nenhum custo adicional. No caso dos registradores digitais de perturbações, a incorporação da função de localização de faltas é fácil e econômica. Os detectores portáteis de defeito exigem o uso de sofisticados algoritmos de localização de falta, mas com maiores custos de implementação. Outra possi-

bilidade está relacionada com programas para análise pós-falta que, frequentemente, possuem o algoritmo de localização de faltas implementado. Estes programas são usados principalmente para a verificação da operação dos relés de proteção (Izykowski, Rosolowski, & Saha, 2007).

Neste trabalho propõe-se uma metodologia para melhorar a precisão dos algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série (TCSC), que pode ser usada de forma independente ou em conjunto com relés de proteção diferencial. Este tipo de algoritmo numérico é de grande interesse para as empresas concessionárias de linhas de transmissão, pois reduz significativamente o custo de aquisição de novos equipamentos, tais como os registradores digitais de perturbações. Além disso, recursos já existentes e disponíveis no sistema de transmissão, como o canal de comunicação com o terminal remoto e a sincronização temporal através o sistema de posicionamento global (GPS), podem ser utilizados para informar em tempo real ao centro de operações o local onde ocorreu a falta, agilizando assim o trabalho das equipes de manutenção e o retorno rápido à operação da linha de transmissão contingenciada. Este artigo está organizado da se-

guinte forma: Na seção 2 apresentam-se a arquitetura e formulação matemática do localizar de faltas proposto. Na seção 3 estão os resultados dos testes com a implementação computacional e avaliação da metodologia proposta. Finalmente, apresentam-se na seção 4 as conclusões.

2 Localizador de Falta

A estrutura e etapas envolvidas na metodologia de localização de falta proposta são ilustradas no diagrama de blocos da Figura 1.

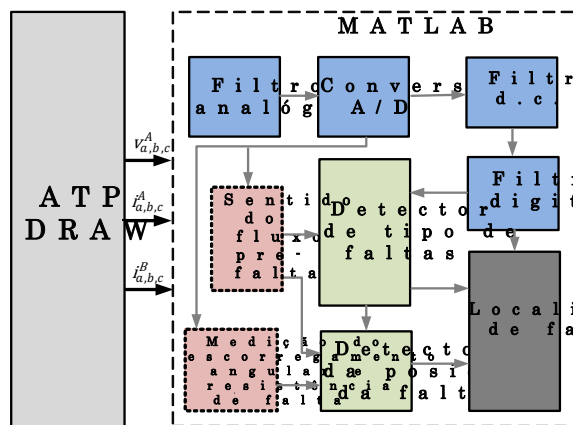


Figura 1. Arquitetura do localizador de faltas.

No primeiro módulo, os sinais de medição de tensão e corrente são condicionados através do filtro analógico, conversor analógico-digital (A/D) e filtros DC e digital. Paralelamente, os sinais medidos são pré-processados para extrair informações como o sentido do fluxo pré-falta, escorregamento angular e resistência de falta. As informações do módulo de pré-processamento são utilizadas pelos detectores do tipo de falta e da posição da falta que simplificam a localização da falta e o cálculo da distância do terminal onde se encontra instalado o relé até ponto de incidência da falta.

A detecção do tipo de falta é um dos pontos críticos para localizar o ponto de incidência da falta. Uma maior robustez na determinação do tipo de falta

pode ser obtida usando o algoritmo de Kasztenny, Mazereeuw e Campbell (2000), que consegue detectar corretamente as faltas fase-terra e fase-fase-terra, e o algoritmo de Das e Reddy (2005) que consegue detectar corretamente faltas fase-fase e faltas trifásicas. Ambos algoritmos utilizam a comparação das relações angulares das componentes de sequência das correntes de falta de cada fase para detectar o tipo de falta. A informação do tipo de falta é enviada à rotina de detecção de posição da falta e ao localizador de falta.

Na detecção da posição da falta relativa ao TCSC, a linha de transmissão é dividida em dois trechos: um denominado FA e correspondente ao segmento da linha de transmissão delimitado pela terminação local A e ponto de instalação do TCSC; e o outro denominado FB é o segmento de linha entre TCSC e a terminação remota B, conforme ilustrado na Figura 2. A detecção do trecho da linha onde ocorre a falta é realizada usando os escorregamentos angulares das correntes de falta que apresentam uma diferença para faltas nos trechos FA e FB da linha. Quando a falta ocorre no trecho FB, o capacitor do TCSC diminui a reatância indutiva da linha. Consequentemente, o ângulo da impedância equivalente entre o ponto A e o ponto onde ocorreu a falta diminui, provocando uma redução do ângulo da corrente de falta. Por outro lado, quando a falta ocorre no trecho da linha FA, a reatância capacitiva do TCSC não afeta a impedância equivalente da linha entre o ponto A e o ponto de incidência da falta. Em ambos os casos, os escorregamentos são diferentes para cada fase e apenas as fases envolvidas na falta apresentam a diferença no escorregamento angular, o que evidencia a necessidade de obter com precisão a informação do tipo de falta. Além disso, há uma descontinuidade no comportamento dos escorregamentos angulares, devido ao sentido do fluxo de potência pré-falta.

O problema da descontinuidade é resolvido usando o fluxo direto (correntes pré-falta e de falta no mesmo sentido) como referência para a comparação dos escorregamentos angulares. A viabilidade dessa solução depende do canal de comunicação, que permite a medição do escorregamento angular na termi-

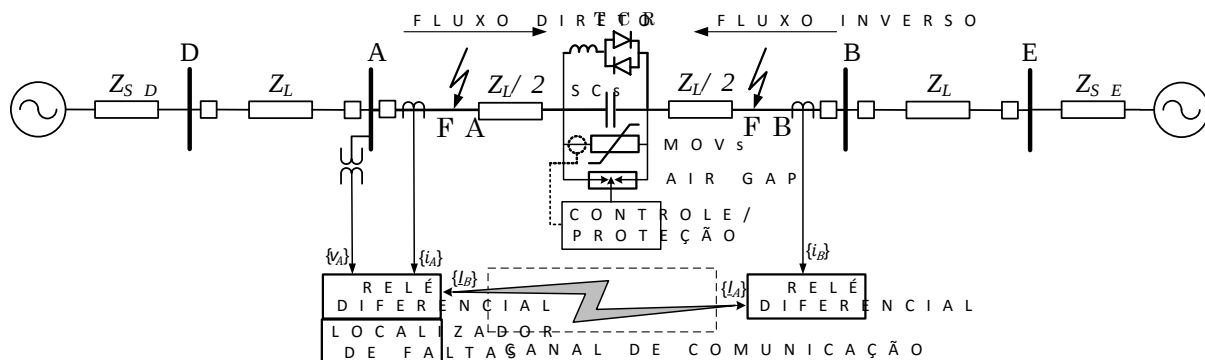


Figura 2. Sistema de teste geral.

nação remota na condição de fluxo inverso (correntes pré-falta e falta em sentidos opostos). Desta forma, o comportamento do escorregamento angular é utilizado pelo comparador *fuzzy*, capaz de detectar a posição da falta com relação à posição relativa do TCSC, conforme o diagrama da Figura 3.

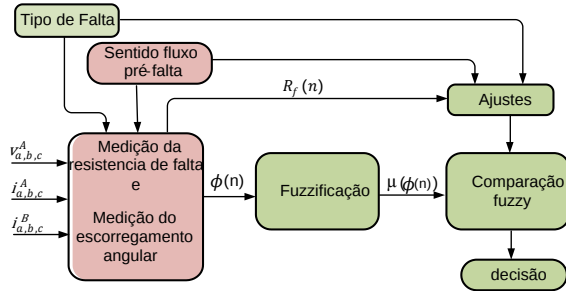


Figura 3. Diagrama esquemático da metodologia através de lógica difusa para obter a posição da falta com relação à posição relativa do TCSC.

A localização da falta é a etapa final do algoritmo, que consiste no cálculo, a partir do terminal em que está localizado o relé, do local da linha onde ocorreu a falta, usando as informações previamente determinadas, tais como o tipo de falta e o trecho da linha sob falta. A detecção deste ponto é baseada no cálculo da impedância da linha no laço de falta, uma vez que a impedância da linha de transmissão é proporcional à distância. Este cálculo depende do trecho da linha em que incidiu a falta, exigindo, assim, a utilização de procedimentos de cálculo distintos para cada caso, um para o trecho da linha FA e outro para FB. A configuração do sistema com a compensação série, e a instalação dos dispositivos de medição utilizados para desenvolver o localizador de faltas, estão ilustradas na Figura 2.

2.1 Falta Incidente no Trecho FA

A localização de faltas para trechos da linha de transmissão localizados à montante do dispositivo FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) consiste em encontrar a impedância da linha compreendida no laço de falta, ou seja, impedância entre a barra A e o ponto F onde existe a falta. A equação (1) fornece a queda de tensão no laço de falta e pode ser dividida em uma parte real e outra imaginária com duas incógnitas, R_F e d .

$$\dot{V}_A - d\bar{Z}_L^{FA}\dot{I}_A - R_F\dot{I}_F = 0 \quad (1)$$

sendo:

- d distância por unidade do terminal A até o ponto de incidência da falta;
- $\bar{Z}_L^{FA}$ impedância entre o terminal A e o ponto de de instalação do TCSC (trecho FA);
- $\dot{I}_F$ corrente de falta;
- R_F resistência de falta.

A distância, por unidade, da barra A até o ponto de incidência da falta no trecho de linha a montante do TCSC, pode ser encontrada resolvendo o sistema de equações formado pelas partes real e imaginária da equação (1). Uma vez que d é definida apenas para o trecho a montante do TCSC que está instalado a uma distância p por unidade do comprimento da linha, utiliza-se (2) para obter a distância por unidade da linha inteira AB para localizar o local de incidência da falta.

$$d_{FA} = d.p \quad (2)$$

A equação (3) permite analisar o comportamento da impedância da linha no laço de falta no plano de impedâncias R-X.

$$\bar{Z}_{Adap} = d_{FA}\bar{Z}_{L1} \quad (3)$$

sendo:

- $\bar{Z}_{L1}$ impedância de sequência positiva da linha de transmissão;
- d_{FA} distância por unidade até o local da falta.

2.2 Faltas Incidentes no Trecho FB

Para a localização de faltas no trecho FB o cálculo da impedância da linha no laço de falta é mais complexo que no caso anterior. Neste laço de falta encontra-se o TCSC, cuja impedância varia conforme o ângulo de disparo dos tiristores que depende da estratégia de controle utilizada. A igualdade entre as quedas de tensão no laço formado pelo terminal A e o ponto F onde ocorre a falta à jusante do TCSC no circuito equivalente da linha de transmissão é representada matematicamente pela equação (4).

$$\dot{V}_A - \bar{Z}_L^{FA}\dot{I}_A - m\bar{Z}_L^{FB}\dot{I}_A - \dot{V}_{TCSC} - R_F\dot{I}_F = 0 \quad (4)$$

sendo:

- m distância por unidade, para faltas a jusante do TCSC, medida a partir do terminal do TCSC localizado no trecho FB e o ponto em falta;
- $\bar{Z}_L^{FB}$ impedância entre o ponto de instalação do TCSC e o terminal B (trecho FB);
- $\dot{V}_{TCSC}$ queda de tensão no TCSC.

A equação (4) pode ser dividida em uma parte real e outra imaginária com incógnitas reais, que são R_F e m , e com uma variável complexa, que é a queda de tensão $\dot{V}_{TCSC}$. Uma alternativa de simplificação do sistema de equações pode ser obtida pela determinação da relação entre a queda de tensão no TCSC e as incógnitas R_F e/ou m . Desta forma, o circuito equivalente da Figura 2 é decomposto em redes de sequência (positiva, negativa e zero). Desde

que os estados pré-falta e pós-falta sejam representados no circuito de sequência positiva, obtêm-se as equações (5) – (8).

$$\dot{V}_{TCSC1}^{pre} = \dot{V}_{A1}^{pre} - i_{A1}^{pre} (\bar{Z}_{L1}^{FA} + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{SB1}) - \dot{E}_{B1} \quad (5)$$

$$\Delta \dot{V}_{TCSC1} = \Delta \dot{V}_{A1} - m(\Delta \dot{I}_{A1} + \Delta \dot{I}_{B1}) \bar{Z}_{L1}^{FB} + \Delta \dot{I}_{B1} (\bar{Z}_{L1}^{FB} + \bar{Z}_{SB1}) - \Delta \dot{I}_{A1} \bar{Z}_{L1}^{FA} \quad (6)$$

$$\dot{V}_{TCSC2} = \dot{V}_{A2} - m(\dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2}) \bar{Z}_{L1}^{FB} + \dot{I}_{B2} (\bar{Z}_{L1}^{CB} + \bar{Z}_{SB1}) - \dot{I}_{A2} \bar{Z}_{L1}^{FA} \quad (7)$$

$$\dot{V}_{TCSC0} = \dot{V}_{A0} - m(\dot{I}_{A0} + \dot{I}_{B0}) \bar{Z}_{L0}^{CB} + \dot{I}_{B0} (\bar{Z}_{L0}^{FB} + \bar{Z}_{SB0}) - \dot{I}_{A0} \bar{Z}_{L0}^{FA} \quad (8)$$

sendo:

$\bar{Z}_{SB1}$ impedância de sequência positiva entre o terminal B e a fonte S ($Z_L + Z_{SE}$);
 $\dot{E}_{B1}$ tensão de sequência positiva em B.

Estas relações definem a queda de tensão em função de m , e reduzem o número de incógnitas da equação (4) para duas incógnitas com auxílio da equação (9).

$$\dot{V}_{TCSC} = \dot{V}_{TCSC1}^{pre} + \Delta \dot{V}_{TCSC1} + \dot{V}_{TCSC2} + \dot{V}_{TCSC0} \quad (9)$$

A equação (10) expressa um modelo geral do laço de falta válido para todos os tipos de faltas no sistema trifásico. Os valores dos coeficientes de generalização são apresentados na Tabela 1.

$$\dot{V}_{A-p}^A - \bar{Z}_{L1}^{FA} \dot{I}_{A-p}^A - m \bar{Z}_{L1}^{FB} \dot{I}_{A-p}^A - \dot{V}_{TCSC}^A - R_F \dot{I}_F^A = 0 \quad (10)$$

em que:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{A-p}^A &= \dot{a}_1 \dot{V}_{AA1} + \dot{a}_2 \dot{V}_{AA2} + \dot{a}_0 \dot{V}_{AA0} \\ \dot{I}_{A-p}^A &= \dot{a}_1 \dot{I}_{AA1} + \dot{a}_2 \dot{I}_{AA2} + \dot{a}_0 (\bar{Z}_{L0}^{FB} / \bar{Z}_{L1}^{FB}) \dot{I}_{AA0} \\ \dot{V}_{TCSC}^A &= \dot{a}_1 \dot{V}_{TCSC.A1} + \dot{a}_2 \dot{V}_{TCSC.A2} + \dot{a}_0 \dot{V}_{TCSC.A0} \\ \dot{I}_F^A &= \dot{I}_{F1}^A + \dot{I}_{F2}^A + \dot{I}_{F0}^A \\ \dot{I}_{F1}^A &= \Delta \dot{I}_{A1} + \Delta \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{F2}^A &= \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} \\ \dot{I}_{F0}^A &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{B0} \end{aligned}$$

sendo:

$\dot{V}_{AAi}$ componentes simétricas da tensão da fase A medida na barra A;
 $\dot{V}_{TCSC.Ai}$ componentes simétricas da queda de tensão do TCSC da fase A;
 $\dot{I}_{AAi}$ componentes simétricas da corrente da fase A medida na barra A.

Uma vez resolvida a equação geral do laço de falta, a distância m por unidade do ponto de instalação do TCSC ao local da falta pode ser obtida. Com a equação (12) encontra-se a distância do terminal A até o ponto de incidência da falta.

$$d_{FB} = m(1-p) + p \quad (12)$$

Tabela 1. Coeficientes da tensão e corrente para todos os tipos de faltas.

Falta	$\dot{a}_1$	$\dot{a}_2$	$\dot{a}_0$
A-T	1	1	1
B-T	$-0,5 - j0,5\sqrt{3}$	$-0,5 + j0,5\sqrt{3}$	1
C-T	$-0,5 + j0,5\sqrt{3}$	$-0,5 - j0,5\sqrt{3}$	1
A-B	$1,5 + j0,5\sqrt{3}$	$1,5 - j0,5\sqrt{3}$	0
B-C	$-j\sqrt{3}$	$j\sqrt{3}$	0
C-A	$-1,5 + j0,5\sqrt{3}$	$-1,5 - j0,5\sqrt{3}$	0
A-B-T	$1,5 + j0,5\sqrt{3}$	$-0,5 - j0,5\sqrt{3}$	0
B-C-T	$-j\sqrt{3}$	$j\sqrt{3}$	0
C-A-T	$-1,5 + j0,5\sqrt{3}$	$-1,5 - j0,5\sqrt{3}$	0
A-B-C-T	$1,5 + j0,5\sqrt{3}$	$1,5 - j0,5\sqrt{3}$	0

3 Testes e Resultados

O algoritmo de localização de faltas foi implementado no *software* MATLAB e as simulações computacionais foram realizadas usando um sistema teste da literatura com compensador série do tipo TCSC (Sidhu & Khederzadeh, 2005) como ilustrado na Figura 2 e cujos dados necessários para a simulação do sistema são apresentados na Tabela 2. As simulações foram realizadas no ATP-EMTP, onde modela-se os sistemas de potência juntamente com os sistemas de controle existentes. As faltas são simuladas na interface gráfica do ATP-EMTP, conhecida como ATPDraw, e posteriormente os dados das medições de tensões e correntes gerados nas simulações são salvos com a extensão *.mat, que são enviados e processados usando o algoritmo no *software* MATLAB, conforme o diagrama da Figura 1 (Rome-

Tabela 2. Parâmetros do sistema de teste.

SE-terminal D ($\varphi=0^\circ$)	$\bar{Z}_{SD1}$	1,43+j16,21 Ω
	$\bar{Z}_{SD0}$	3,068+j28,746 Ω
SE-terminal E ($\varphi=-15^\circ$)	$\bar{Z}_{SE1}$	1,43+j16,21 Ω
	$\bar{Z}_{SE0}$	3,068+j28,746 Ω
Linhas: DA, AB, BE.	$\bar{Z}_{L1}$	0,0185+j0,3766 Ω/Km
	$\bar{Z}_{L0}$	0,3618+j1,2277 Ω/km
	C_{L1}	0,22789 M Ω/Km
	C_{L0}	0,34513 M Ω/Km
Compensação série	X_C	0,7 X_{L1}
	Posição do TCSC	0,5 pu
	Indutância do TCR	0,9 mH
Característica do MOV	P	10 kA
	V_{REF}	338 kV
$I_{MOV} = P \left(\frac{V_{MOV}}{V_{REF}} \right)^q$	q	24
Comprimento de cada linha		100 Km
Tensão do sistema		500 kV

ro-Taquire, 2016).

Na etapa de condicionamento das medições dos sinais de corrente e tensão, o filtro analógico passa-baixa possui como parâmetros de projeto: frequência de passagem em 80 Hz; frequência de rejeição de 500 Hz; máximo *ripple* na faixa de passagem de 3 dB; máximo *ripple* na faixa de rejeição de 28 dB. Assim, a máxima frequência do sinal, após passar pelo filtro analógico, é de 500 Hz. Uma vez que a frequência de amostragem deve ser múltipla da frequência fundamental e maior que 1000 Hz para evitar o fenômeno de *aliasing*, o filtro digital escolhido possui frequência de amostragem de 3600 Hz, ou seja, 60 amostras por ciclo.

Na etapa seguinte ao condicionamento e pré-processamento das medições, o detector da posição da falta é ajustado através da simulação de diferentes tipos e condições de faltas com fluxos de potência bidirecionais. O detector da posição da falta proposto é composto por um processo de inferência *fuzzy* que compara áreas delimitadas pela função de pertinência do escorregamento angular considerando os diferentes níveis de ajustes definidos pelas características de cada tipo de falta.

3.1 Ajustes do Escorregamento Angular

Na Figura 4 é mostrado um exemplo da medição do escorregamento angular dos sinais de corrente das fases *a*, *b* e *c* durante uma falta monofásica na fase *a*. Os escorregamentos angulares são mostrados em ambas as terminações da linha de transmissão compensada, e na condição em que o sentido de fluxo de potência pré-falta tem o mesmo sentido da corrente de falta. Desta mesma forma, foram efetuados estudos e análises do escorregamento angular para os outros tipos de faltas: três monofásicas (1-F), três bifásicas (F-F), três bifásicas com terra (2F-T) e três trifásicas (3F-T), totalizando 12 ensaios. As características particulares dos escorregamentos angulares de cada tipo de falta definem os ajustes necessários ao processo de inferência do comparador *fuzzy*. Ajustes para o fluxo inverso são desnecessários pois a metodologia proposta utiliza as medições de escorregamento angular da terminação remota nesta condição.

Outros ajustes do escorregamento angular são necessários para a detecção de faltas a montante e a

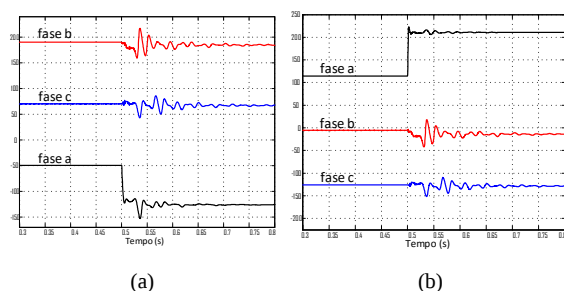


Figura 4. Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente de ambos extremos da linha de transmissão: (a) extremo local; e (b) extremo remoto.

jusante do local de instalação TCSC. Esses ajustes são feitos num intervalo de tempo compreendido do início da falta até um ciclo após a ocorrência da falta, pois nos instantes de tempo posteriores ao intervalo de atuação não se consegue detectar corretamente a posição da falta. Na figura 5 ilustra-se o intervalo de atuação, onde é aplicada a técnica de detecção da posição da falta para linha de transmissão com o TCSC instalado. Neste intervalo de tempo, evidencia-se, claramente, a possibilidade da detecção da posição de faltas. Desta forma, a diferença dos escorregamentos angulares é usada no ajuste do processo de inferência do comparador *fuzzy*.

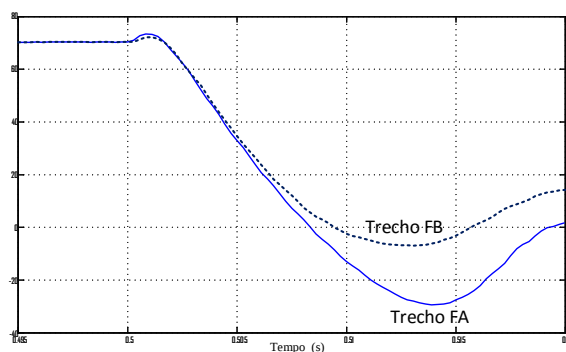


Figura 5. Escorregamento angular de uma fase medido no extremo local em um ciclo após a incidência da falta.

3.2 Avaliação do Localizador de Faltas

O localizador de faltas foi testado para diversos cenários com alterações no tipo de falta, sentido do fluxo de potência pré-falta, resistência de falta e na distância de incidência da falta em relação à terminação local da linha de transmissão com o TCSC. Nas Tabelas 3 e 4 apresentam-se os resultados da localização de faltas nestes cenários para resistências de falta iguais a 2,0 e 50,0 *Ohm*, respectivamente.

A partir dos ajustes do escorregamento angular

Tabela 3. Distâncias obtidas pelo localizador para faltas simuladas com $R_f = 2,0 \text{ Ohm}$.

Tipo da falta	À montante do TCSC			À jusante do TCSC		
	DF* (km)	DM** (km)	Erro (%)	DF (km)	DM (km)	Erro (%)
1-F	5	4,6	0,4	55	50,03	4,97
	25	25,7	0,7	75	65,35	9,65
	45	45,8	0,8	95	83,87	11,1
F-F	5	5,2	0,2	55	59,9	4,9
	25	26,1	1,1	75	62,4	12,6
	45	45,8	0,8	95	83,7	11,3
2F-T	5	5,8	0,8	55	56,0	1,0
	25	26,4	1,4	75	63,1	11,9
	45	45,7	0,7	95	77,6	17,4
3F-T	5	5,9	0,9	55	51,8	3,2
	25	26,2	1,2	75	65,2	9,8
	45	46,0	1,0	95	80,0	15,1

*Distância real entre o terminal inicial da LT e o ponto onde ocorre a falta;

**Distância média obtida pelo localizador de faltas.

Tabela 4. Distâncias obtidas pelo localizador para faltas simuladas com $R_F = 50,0 \text{ Ohm}$.

Tipo da falta	À montante do TCSC			À jusante do TCSC		
	DF* (km)	DM** (km)	Erro (%)	DF (km)	DM (km)	Erro (%)
1-F	05	5,0	0,02	55	64,1	9,1
	25	25,2	0,2	75	89,7	14,7
	45	44,0	1,0	95	103,1	8,1
F-F	05	6,4	1,4	55	63,2	8,2
	25	25,6	0,6	75	81,7	6,7
	45	47,3	2,3	95	102,8	7,8
2F-T	05	7,8	2,8	55	60,2	5,2
	25	30,7	5,7	75	84,4	9,4
	45	49,8	4,8	95	102,8	7,8
3F-T	05	9,6	4,6	55	84,3	29,3
	25	37,0	12,0	75	93,7	18,7
	45	66,2	21,2	95	104,6	9,6

*Distância real entre o terminal inicial da LT e o ponto onde ocorre a falta;

**Distância média obtida pelo localizador de faltas.

efetuado previamente para diferentes tipos de faltas, o algoritmo de detecção da posição da falta consegue determinar com precisão a posição da falta com relação ao ponto de instalação do TCSC (à montante ou à jusante) em 100% dos casos simulados devido à sua seletividade e robustez. Além disso, o localizador de faltas apresenta boa precisão para faltas que ocorrem a montante do TCSC com erro médio de 0,83% para $R_F=2 \text{ Ohm}$ e de 4,71% para $R_F=50 \text{ Ohm}$, porque nesta condição o comportamento dinâmico do TCSC em condições de faltas não interfere significativamente no cálculo da distância à falta. Por outro lado, para as faltas que ocorrem à jusante do TCSC a precisão do localizador é reduzida. Para faltas trifásicas com alta resistência, que tem uma probabilidade muito baixa de ocorrer, o localizador de faltas apresenta a maior perda de precisão (erro médio de 11,21% para $R_F=50 \text{ Ohm}$), já que nestes casos a falta se comporta como uma conexão de uma carga resistiva balanceada ligada na linha de transmissão em um instante predefinido.

4 Conclusões

O método proposto neste trabalho pode compor a função de localização de faltas nos relés de proteção diferencial de corrente aproveitando, assim, toda a infraestrutura de comunicação dos relés diferenciais o que reduz significativamente os custos na aquisição de novos equipamentos que têm essa mesma função, como o registrador digital de perturbações instalado em ambas os terminais da linha de transmissão. A funcionalidade do relé diferencial aumenta consideravelmente com a utilização desta função. Os resultados das simulações em diferentes cenários de falta mostram uma boa precisão do método para localização de faltas nos cenários com baixa resistência de falta que, na prática, são majoritários.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior) através de bolsa de mestrado e do CNPq (processo 305371/2012-6). Os autores agradecem também os revisores pelo cuidadoso trabalho de revisão deste artigo.

Referências Bibliográficas

- Das, B. e Reddy, J. V. (2005). Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2 I; pp. 609–616.
- Izykowski, J., Rosolowski, E. e Saha, M. M. (2007). Postfault analysis of operation of distance protective relays of power transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 1, pp. 74–81.
- Izykowski, J. (2008). Fault location on power transmission lines. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Kasztenny, B., Mazereeuw, J. e Campbell, B. (2000). Phase Selection for Single-Pole Tripping: Weak Infeed Conditions and Cross-Country Faults. 27th Annual Western Protective Relay Conference. Anais, Ontario - Canadá.
- Romero Taquire, N. G. (2016). Proposta de um Algoritmo Eficiente para Localização de Faltas por Relé Diferencial Numérico para Proteção de Linhas de Transmissão com Compensação Série Controlada por Tiristores (TCSC). Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Unesp, Ilha Solteira.
- Sidhu, T. S. e Khederzadeh, M. (2005). TCSC impact on communication-aided distance-protection schemes and its mitigation. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 152, No. 5, pp. 714–728.