

Funções de Proteção de Sistemas Elétricos Baseadas na Transformada de Stockwell: Revisão Bibliográfica e Implementação^{*}

Caio Muller S. Ribeiro^{*}, Felipe V. Lopes^{*}

^{*} *Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos (LAPSE),
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF,
(e-mail: caiomullersribeiro@gmail.com; felipevlopes@ene.unb.br).*

Abstract: This paper presents an study of protective functions based on the Stockwell Transform (ST). The ST provides a location of spectrum in the time-frequency domain. It combines elements of the Fourier and Wavelet Transforms. The popularity of this transform has enhanced in recent years, plus several of its protection schemes have been arised. Thus, aiming at bonding the main protection functions via ST, a literature review is conducted, highlighting advantages and disadvantages, strands and research trends. Finally, three algorithms are analyzed using the Alternative Transients Program. Due to this, it gathers in a chronological - objective and succinct way - papers hitherto scattered in throughout literature.

Resumo: Neste artigo, apresenta-se um estudo sobre funções de proteção que se baseiam na Transformada de Stockwell (TS). A TS fornece uma localização do espectro no domínio tempo-frequência, e para tal, combina elementos das Transformadas de Fourier e *Wavelet*. A popularidade dessa transformada tem crescido nos últimos anos e diversos esquemas de proteção usando-a têm sido propostos. Sendo assim, com o objetivo de reunir as principais funções de proteção via TS, realiza-se uma revisão bibliográfica, na qual se destaca as vantagens e desvantagens, vertentes e tendências de pesquisa. Por fim, analisa-se três algoritmos usando o *Alternative Transients Program* (ATP). Destarte, reúne-se em ordem cronológica, de forma objetiva e sucinta trabalhos até então dispostos de modo disperso na literatura.

Keywords: Power system protection; Stockwell Transform; parallel transmission lines; busbar.

Palavras-chaves: Proteção de sistemas elétricos; Transformada de Stockwell; linhas de transmissão paralelas; barramento.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de energia elétrica (SEE) são compostos por linhas de transmissão (LTs), transformadores, geradores, etc. Os quais são conectados de forma a fornecer energia elétrica aos consumidores (Anderson, 1999). Porém, devido a diversos fatores, como por exemplo condições climáticas, tais equipamentos se tornam susceptíveis à ocorrência de curtos-circuitos, o que pode danificá-los, e/ou ainda, provocar desligamentos forçados. Dessa forma, visando proteger os componentes do SEE e manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica, faz-se necessário o uso de funções de proteção (Kindermann, 2014).

No desenvolvimento dos algoritmos de funções de proteção são utilizadas ferramentas matemáticas para a análise dos sinais medidos pelos transformadores para instrumentos instalados nos equipamentos elétricos ao longo do SEE. Dentre essas ferramentas, destacam-se a Transformada de Fourier (TF) e a Transformada *Wavelet* (TWD). A TF é usada em algoritmos de estimação fasorial, como o *Full Cicle Discrete Fourier Transform* (FCDFT), proporcionando uma visão do comportamentos do sinal no domínio

da frequência. Por outro lado, a TWD é, normalmente, empregada na análise de transitórios eletromagnéticos de alta frequência, a qual, em geral, propicia uma análise no domínio do tempo. Entretanto, em algumas funções de proteção, analisa-se as características dos sinais medidos em ambos os domínios, sendo assim, torna-se interessante uma visão no espaço tempo-frequência, porém, nem a TF e nem a TWD são capazes de propiciar tal análise.

Dentre as transformadas no domínio tempo-frequência, pode-se citar a Transformada de Gabor (TG), também conhecida por *Short-Time Fourier Transform* (STFT) e a Transformada de *Wavelet* Contínua (TWC), sendo a primeira a mais frequentemente usada (Dash and Chilukuri, 2004). A TG representa corretamente as características de sinais estacionários, porém não consegue representar corretamente o comportamento de sinais não-estacionários, isso porque a largura da janela gaussiana que compõe essa transformada é fixa (Dash and Chilukuri, 2004). Por outro lado, a TWC consegue representar melhor os transitórios de sinais não-estacionários comparada a TG (Dash and Chilukuri, 2004), todavia, essa transformada tem como principal desvantagem o fato da informação de fase do espectro ser localmente referenciada, ou seja, a fase não tem uma referência fixa e única no tempo inicial.

^{*} O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Tendo em vista as desvantagens da TG e TWC citadas anteriormente, surgiu a necessidade de uma outra transformada, a TS. Proposta por Stockwell et al. (1996), essa transformada mantém a informação de fase absolutamente referenciada e possui uma janela gaussiana que varia em função da frequência. Sendo assim, a TS apresenta uma boa representação de sinais não-estacionários. Diante disso, surgiram diversos trabalhos em que se destaca a aplicabilidade da TS, tal como em análises de dados atmosféricos, biológicos, na engenharia elétrica, entre outros.

Em análises de SEE, Dash et al. (2003) foram um dos primeiros a utilizarem a TS, inicialmente em análises de qualidade da energia elétrica. Após alguns anos, surgiram as primeiras funções de proteção via TS. Atualmente, a popularidade dessa transformada vem crescendo e diversos esquemas de proteção usando-a têm sido propostos. Porém, observou-se que tais trabalhos estão dispersos na literatura. Deste modo, reúne-se aqui as principais funções, e se discute vantagens e desvantagens, vertentes e tendências de pesquisa por meio de uma revisão bibliográfica descrita em ordem cronológica, objetiva e sucinta. Por fim, analisa-se o desempenho de três algoritmos, destacando as potencialidades das funções de proteção baseadas na TS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na Tabela 1, apresenta-se um resumo dos principais trabalhos sobre funções de proteção baseadas na TS, na qual, destacam-se os tipos de proteção: de distância (21), direcional (32), diferencial (87), método de detecção de faltas (DF) e método de detecção de faltas de alta impedância (FAI). Em seguida, apresenta-se a frequência de amostragem f_S em que os sinais de cada função são analisados. Por fim, identificam-se os conteúdos abordados em cada trabalho: componentes fundamentais, ondas viajantes, LTs, *High-Voltage Direct Current* (HVDC), compensação série, transformador, barramento, capacitor série controlado por tiristor (CCT), sistema fotovoltaico e micro-rede.

Acredita-se que as primeiras funções de proteção de sistemas elétricos baseadas na TS foram apresentadas por Dash et al. (2007), que propuseram um método de detecção de faltas e duas funções para LTs paralelas, sendo uma 87 e outra 21. Alguns anos depois, Dash et al. (2015) adaptaram a função 21 proposta para LTs com compensação série. Em ambos os trabalhos, os autores utilizam o método *cumulative sum* (CUSUM) (Mohanty et al., 2008) para a detecção de distúrbios e, em seguida, analisam uma parte do sinal com a TS. Dos resultados, as funções demonstraram não serem sensíveis a ruídos, e atuaram na ordem de 1 ciclo fundamental.

Samantaray et al. (2007) e Samantaray et al. (2008) propuseram esquemas de proteção de transformador e barramento, respectivamente. A proteção de transformador tem como princípio a relação entre a soma das energias de todas as frequências e da frequência fundamental do espectro via TS, sendo que, ultrapassando um limiar pré-determinado, uma falta interna é detectada. Por outro lado, a proteção de barramento tem como base a análise via TS da diferença dos ângulos das correntes de sequência positiva dos períodos de pré-falta e de falta. As proteções de transformador e barramento apresentaram tempos de atuação de $\approx 1, 5$ e $\approx 0, 75$ ciclo fundamental, respectivamente.

Ashrafian et al. (2012) também propuseram uma proteção de transformador, porém, os autores utilizaram um fator dado pelo produto da energia e do desvio padrão do espectro calculado com a TS. Ainda sobre proteção de transformador, Shah et al. (2016) propuseram o uso do valor máximo da amplitude do espectro dado pela TS e o desvio padrão do ângulo, associado ao uso de *Support Vector Machine*. Ainda assim, ambos os métodos apresentaram tempos de atuação na ordem de 1 ciclo fundamental.

Krishnanand and Dash (2013) propuseram uma implementação em tempo real da TS apresentada por Dash et al. (2007), possibilitando assim, uma melhor aplicação prática da ferramenta com menor esforço computacional.

Tabela 1. Resumo da revisão bibliográfica sobre funções de proteção baseadas na TS.

| Referência | Conteúdo Abordado | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|-------------|----|----|----|------|----|---|------------|-----|----|----|
| | Tipo | f_S (kHz) | CF | OV | LT | HVDC | CS | T | Barramento | CCT | FV | MR |
| Dash et al. (2007) | DF/87/21 | 1,00 | ✓ | – | ✓ | – | – | – | – | – | – | – |
| Dash et al. (2015) | DF/21 | 3,84 | ✓ | – | ✓ | – | ✓ | – | – | – | – | – |
| Samantaray et al. (2007) | 87 | 1,00 | ✓ | – | – | – | – | ✓ | – | – | – | – |
| Samantaray et al. (2008) | 32 | 1,00 | ✓ | – | – | – | – | – | ✓ | – | – | – |
| Ashrafian et al. (2012) | 87 | – | ✓ | – | – | – | – | ✓ | – | – | – | – |
| Shah et al. (2016) | 87 | 2,00 | ✓ | – | – | – | – | ✓ | – | – | – | – |
| Krishnanand and Dash (2013) | 87 | 3,84 | ✓ | – | ✓ | – | – | – | – | – | – | – |
| Kar and Samantaray (2014) | DF | – | ✓ | – | – | – | – | – | – | – | – | ✓ |
| Thukral et al. (2016) | DF | 3,20 | ✓ | – | ✓ | – | – | – | – | – | ✓ | – |
| Mahela et al. (2018) | DF | 1,92 | ✓ | – | ✓ | – | – | – | – | ✓ | – | – |
| Lima et al. (2018) | FAI | 15,36 | ✓ | – | ✓ | – | – | – | – | – | – | – |
| Li et al. (2015) | 87 | 100,00 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | – | – | – | – | – | – |
| Wu et al. (2019) | 87 | 200,00 | – | ✓ | – | – | – | – | – | ✓ | – | – |

Legenda:

21 = Proteção de Distância;

DF = Detector de Faltas;

CF = Componentes Fundamentais;

HVDC = *High-Voltage Direct Current*;

CCT = Capacitor Série Controlado por Tiristor;

32 = Proteção Direcional;

FAI = Falta de Alta Impedância;

OV = Ondas Viajantes;

CS = Compensação *Shunt*;

FV = Sistema Fotovoltaico;

87 = Proteção Diferencial;

f_S = Frequência de Amostragem;

LT = Linhas de Transmissão;

T = Transformador;

MR = Micro-rede.

Kar and Samantaray (2014), Thukral et al. (2016) e Mahela et al. (2018) propuseram métodos de detecção de faltas baseados na análise do comportamento da média ou variância de todo espectro de frequência calculado com a TS a cada instante de tempo. Em cada trabalho, os autores adicionaram condições especiais nas análises do espectro para identificar particularidades como a presença de CCT, sistema fotovoltaico e micro-rede.

Lima et al. (2018) utilizaram o ângulo da terceira harmônica obtida via TS para identificar FAI. Com base no valor do desvio padrão de uma janela deslizante de um ciclo do sinal, identifica-se a falta comparando com um limiar adaptativo. Os tempos de operação apresentados são da ordem de 10 ciclos fundamentais.

Li et al. (2015) apresentaram uma função de proteção para LTs do tipo HVDC, e para tal, os autores usam a soma dos ângulos de todo o espectro de frequências a cada instante, sendo considerada uma $f_S = 100$ kHz. A função apresenta tempos de atuação na ordem de 1 ciclo fundamental.

Diferentemente dos métodos avaliados até então, Wu et al. (2019) apresentaram uma função que analisa via espectro da TS apenas ondas viajantes, e assim propuseram um esquema de proteção diferencial de barramento que alcança tempo de operação da ordem de 0,1 ms. Porém, essa função tem como desvantagem o fato de usar sinais de tensão e, sabe-se que, os transformadores de potencial capacitivo (TPCs) não apresentam uma boa resposta em altas frequências (Fischer et al., 2012), o que pode prejudicar o desempenho da função.

Portanto, observa-se que, as primeiras e a maioria das funções de proteção via TS se baseiam na análise de componentes fundamentais, as quais atuam na ordem de 0,5 a 1,5 ciclos fundamentais (Schweitzer et al., 2014). Porém, devido ao crescimento dos SEEs, as LTs estão operando cada vez mais próximas dos seus limites de estabilidade, e isso tem se tornado um motivo de preocupação para as concessionárias (Schweitzer et al., 2014). Dessa forma, visando manter a estabilidade do SEE, os pesquisadores têm envidado esforços para reduzir o tempo de operação da proteção, e isso se reflete também nos estudos com a TS, como visto no trabalho apresentado por Wu et al. (2019), destacando tal fato como uma tendência de pesquisa para aplicações de proteção no domínio do tempo.

3. TRANSFORMADA DE STOCKWELL (TS)

3.1 Definição

Dado um sinal contínuo $h(t)$, a TS desse sinal é definida por:

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)g(\tau - t, f)e^{-i2\pi f t} dt, \quad (1)$$

sendo f a frequência, t o tempo e τ a translação da janela gaussiana $g(\tau - t, f)$ no tempo, a qual é dada por:

$$g(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2}{f^2}}, \quad (2)$$

e é utilizada para multiplicar o sinal $h(t)$. Ressalta-se que a função gaussiana possui centro no tempo t e largura que varia com o módulo do inverso da frequência.

A TF de $h(t)$ denominada $H(f)$ pode ser calculada por:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t, f) dt. \quad (3)$$

3.2 Implementação Computacional

Sendo o sinal discreto de $h(t)$ definido como $h[kT]$ sendo ($k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$), no qual T é o intervalo de amostragem. Pode-se calcular a TF discreta de $h[kT]$ como:

$$H\left(\frac{n}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[kT] e^{-\frac{i2\pi nk}{N}}, \quad (4)$$

Na qual, $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Assim, a TS discreta é:

$$S\left(kT, \frac{n}{NT}\right) = \sum_{m=0}^{N-1} H\left(\frac{m+n}{NT}\right) e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{i\frac{2\pi mk}{N}}, \quad (5)$$

para $n \neq 0$, e:

$$S(kT, 0) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} H\left(\frac{m}{NT}\right), \quad (6)$$

para $n = 0$.

Dessa forma, obtém-se de (5) e (6) a matriz S do sinal $h(t)$, sendo que tal sinal pode ser uma corrente ou tensão, por exemplo, para as análises de SEE. A matriz S reflete as características no tempo e na frequência do sinal, sendo as linhas da matriz referentes ao tempo e as colunas correspondentes a frequência do espectro.

4. FUNÇÕES DE PROTEÇÃO BASEADAS NA TS

Com o intuito de analisar algumas soluções encontradas na literatura, escolheram-se três funções, sendo dois métodos de detecção de faltas e um esquema de proteção. Para a realização de análises da formulação dos algoritmos e desempenho, foram simuladas faltas no ATP. As formulações matemáticas de cada função são detalhadas a seguir.

4.1 Função TS1: Proposta por Thukral et al. (2016)

O primeiro algoritmo é um método de detecção de faltas para LTs que se baseia na análise de sinais de tensão e corrente via TS, ou seja, os sinais são decompostos usando a TS, obtendo assim a matriz S. Dos resultados apresentados por Thukral et al. (2016), concluiu-se ser melhor o uso de sinais de corrente, e portanto, neste trabalho, restringir-se-á à análise apenas desse tipo de sinal. Dessa forma, calcula-se a média do espectro $M(t)$ para cada instante de tempo, da seguinte forma:

$$M(t) = \sum_{f_0}^{f_S/2} |S(t, f)|, \quad (7)$$

em que, f_0 é a primeira coluna da matriz S, ou seja, a correspondente à frequência zero, e $f_S/2$ é a última coluna da matriz S, a qual corresponde à metade da frequência de amostragem. Sendo assim, com base na média $M(t)$ do espectro da matriz S para a corrente de cada fase, detecta-se a presença de uma falta e identifica-se a fase faltosa.

4.2 Função TS2: Proposta por Dash et al. (2007)

Trata-se de um método de DF para LTs paralelas. Para tal, o princípio de operação se baseia na análise da diferença entre a energia do espectro da matriz S para um ciclo imediatamente posterior e anterior a ocorrência da falta. Para identificar os períodos de pré-falta e falta, os autores sugerem a utilização do método de detecção de distúrbios CUSUM (Mohanty et al., 2008), o qual é calculado como:

$$CS_{\phi}(k) = |i\phi L(k) - i\phi L(k - N)|, \quad (8)$$

em que, $CS_{\phi}(k)$ é o sinal CUSUM, sendo que ϕ são as fases a, b e c; e N o período fundamental em amostras. Sendo assim, se:

$$CS_a(k) > lim \text{ ou } CS_b(k) > lim \text{ ou } CS_c(k) > lim, \quad (9)$$

detecta-se um distúrbio na amostra denominada k_{DET} , sendo lim um limiar de detecção.

Então, define-se a energia E do espectro da matriz S :

$$E = (|S(t, f)|)^2. \quad (10)$$

Portanto, a energia na frequência fundamental $f_{fundamental}$ do SEE equivale a coluna da matriz S correspondente a $f = f_{fundamental}$.

$$E_{fundamental} = (|S(t, f_{fundamental})|)^2. \quad (11)$$

Dessa forma, define-se a mudança na energia ME do espectro devido à falta para k_{DET} , como:

$$ME_{\phi}^{LT} = E_{fundamental}^{falta} - E_{fundamental}^{pré-falta} \quad (12)$$

Sendo que, ϕ são as fases a, b e c; e LT são as LTs 1 e 2 monitoradas. Dessa forma, a função calcula seis valores de ME e compara com limiares pré-determinados, que quando ultrapassados, detecta-se uma falta.

4.3 Função TS3: Proposta por Wu et al. (2019)

Esta é uma proteção diferencial de barramento com base na integral da potência ativa da primeira onda viajante incidente. Tal algoritmo tem como entradas a tensão trifásica no barramento a ser protegido e as correntes trifásicas das LTs conectadas a esse barramento, sendo amostradas a $f_S = 200$ kHz. Em seguida, aplica-se a Transformada de Clarke (Clarke, 1950) a todos os sinais, e a partir de então, apenas o modo α é analisado. Dessa forma, calcula-se a TS dos sinais modais de tensão e corrente. Da matriz S , seleciona-se a coluna correspondente à frequência de 60 kHz. Em seguida, captura-se as 20 primeiras amostras após a falta para cada sinal sintonizado a essa frequência, ou seja, o equivalente a 0,1 ms do sinal, e assim, multiplica-se a parcela de tensão pelas parcelas de correntes de cada LT. Por fim, calcula-se a integral das curvas obtidas através dessa multiplicação, ou seja, sendo um produto de tensão e corrente, a potência complexa integrada, e enfim, seleciona-se a parte real, a qual corresponde à potência ativa integrada. Assim sendo, define-se:

$$P_{cd} = |P_1 + P_2 + \dots + P_n|, \quad (13)$$

$$P_{cz} = |\max(P_1, P_2, \dots, P_n) - \min(P_1, P_2, \dots, P_n)|, \quad (14)$$

sendo P_1, P_2, \dots, P_n as potências ativas integradas das ondas viajantes iniciais para as LTs 1, 2, ..., n, respectivamente. Então, define-se o critério da proteção λ :

$$\lambda = \frac{P_{cd}}{P_{cz}} \therefore \text{Se } \lambda > K \implies \text{Falta Interna} \quad (15)$$

Sendo K um limiar fixo. Sugere-se configurar $K = 4$, de acordo com as análises realizadas por Wu et al. (2019).

5. SISTEMA TESTE E SIMULAÇÕES

Na Figura 1, apresentam-se os sistemas testes 230 kV/60 Hz utilizados. O sistema teste 1 é composto por uma LT, o sistema teste 2 é formado por duas LTs paralelas e uma LT adjacente, e o sistema teste 3 é formado por um barramento, ao qual são conectadas cinco LTs. Todas as LTs foram modeladas como perfeitamente transpostas com parâmetros distribuídos e constantes na frequência, os quais foram obtidos de um SEE real brasileiro. Os valores dos parâmetros são apresentados na Tabela 2. Por fim, os equivalentes de Thévenin são apresentados na Tabela 3.

Os testes foram realizados com base em registros de falta simulados no ATP, sendo todas as faltas aplicadas com ângulo de incidência = 90° . Por fim, para eliminar a influência dos transformadores para instrumentos dos resultados, utilizaram-se dados primários dos sinais avaliados.

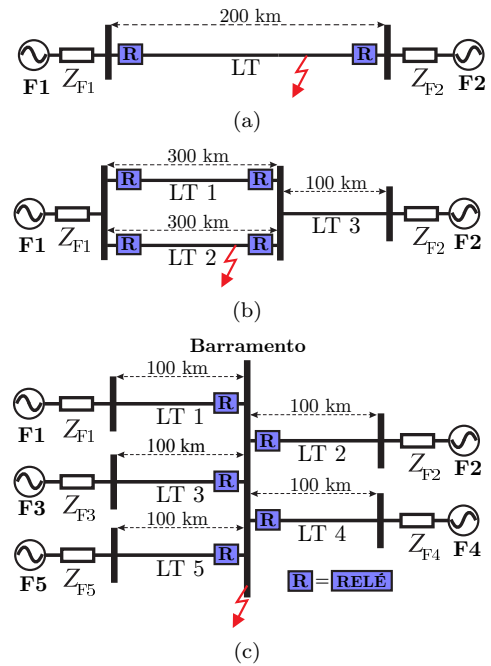


Figura 1. Sistema Teste: (a) 1 (b) 2 e (c) 3.

Tabela 2. Parâmetros Elétricos da LTs.

| Sequência | R (Ω/km) | X (Ω/km) | ωC (Ω/km) |
|-----------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Zero | 0,3864 | 1,4262 | 2,3057 |
| Positiva | 0,1011 | 0,5238 | 3,2509 |

Tabela 3. Dados dos Equivalentes de Thévenin.

| Tensão (p.u.) | Impedâncias | |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|
| | Seq. Zero (Ω) | Seq. Positiva (Ω) |
| Fontes F1, F3 e F5 | | |
| $1,00 \angle 0^\circ$ | $15,4552 + j57,0492$ | $4,0452 + j20,9524$ |
| Fontes F2 e F4 | | |
| $0,96 \angle -25^\circ$ | $15,4552 + j57,0492$ | $4,0452 + j20,9524$ |

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Função TS1

Para o sistema teste 1 apresentado na Figura 1(a), realizou-se uma falta AT a uma distância $d = 0,7$ p.u. da fonte F1 ao 17° ciclo fundamental, conforme ilustrado na Figura 2(a). Sendo a frequência de amostragem $f_S = 1920$ Hz, conforme sugerido por Thukral et al. (2016), ao aplicar a TS ao sinal de corrente da fase A (iaL), obtém-se a matriz S , a qual está ilustrada em módulo $|S(t, f)|$ na Figura 2(b). Percebe-se que há uma maior densidade em torno da frequência fundamental $f = 60$ Hz, o que é esperado. Além disso, no instante da ocorrência da falta, há uma dispersão em todo o espectro de frequências que representa os transitórios induzidos pela falta. Por fim, com base no módulo do espectro $|S(t, f)|$, calcula-se a média $M(t)$ por meio de (7). Da Figura 2(c), observa-se que em torno da ocorrência da falta, $M(t)$ aumenta consideravelmente e dessa forma, torna-se possível detectar a falta.

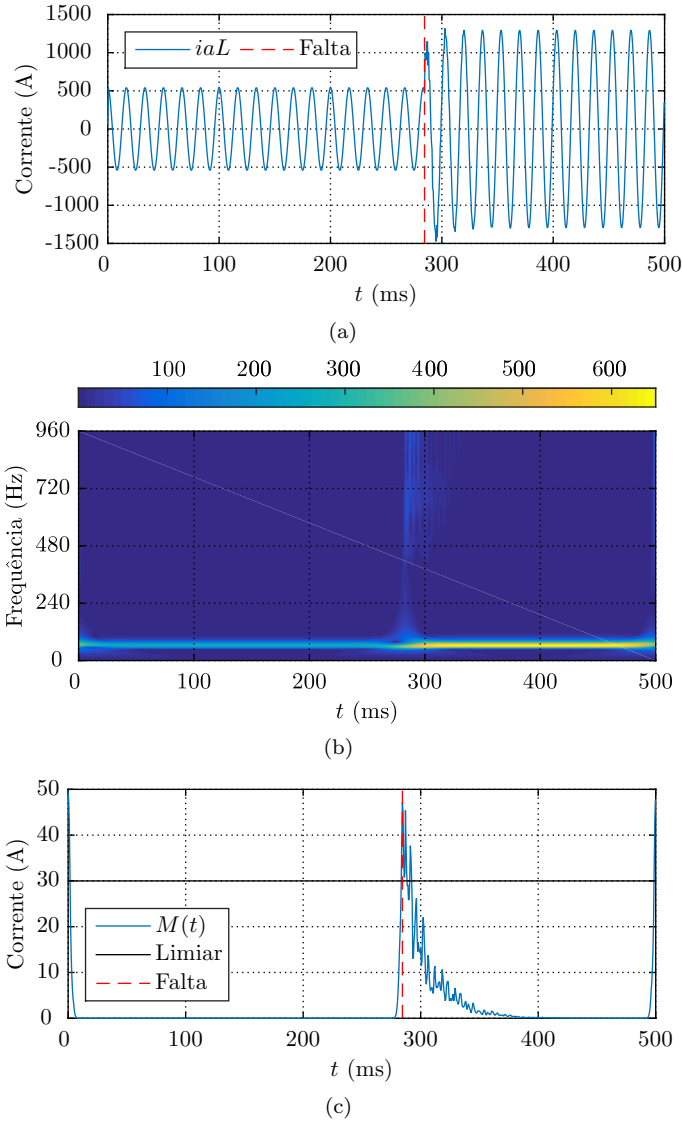


Figura 2. Função TS1 para uma falta interna em $d = 0,7$ da LT: (a) Corrente na fase A (b) Módulo do espectro da matriz S para iaL (c) Média $M(t)$ do espectro.

6.2 Função TS2

Com base no sistema teste 2, realizaram-se faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas em ambas as LTs paralelas (LT 1 e LT 2) em $d = 0,7$ p.u. da fonte F1. Sendo que, Dash et al. (2007) sugerem o uso de $f_S = 1$ kHz, porém a frequência fundamental f do sistema analisado naquele trabalho era igual a 50 Hz, então, para adaptar ao sistema teste utilizado neste trabalho no qual $f = 60$ Hz, utilizou-se $f_S = 960$ Hz. Além disso, embora os autores sugiram o uso de meio ciclo antes e pós-falta para o cálculo da mudança de energia, optou-se aqui por analisar a diferença entre um ciclo antes e depois. Dito isso, apresentam-se na Tabela 4 os resultados da mudança de energia ME para os diferentes tipos e locais de falta.

Da Tabela 4, observa-se que os valores de ME para as fases faltosas das correspondentes LTs em que ocorreu o distúrbio são consideravelmente maiores que das fases sãs. Dessa forma, torna-se possível identificar em qual LT e quais são as fases envolvidas na falta.

6.3 Função TS3

Para o sistema teste 3, realizaram-se duas faltas AT, sendo uma interna (no barramento) e outra externa (na LT 3) em $d = 0,7$ p.u. da fonte F3. Da Figura 3, percebe-se que, para uma falta interna, as potências ativas são praticamente iguais, porém para uma falta externa, a potência ativa da LT faltosa é diferente das demais. Sendo assim, pode-se identificar a falta como será apresentado a seguir.

Na Tabela 5, apresentam-se os valores de P_{cd} e P_{cz} , e do critério da proteção λ . Nota-se que, para faltas internas, λ é consideravelmente maior que o limiar $K = 4$. Assim como, para faltas externas, λ é bem menor que K . Dessa forma, identifica-se quando uma falta é interna ou externa.

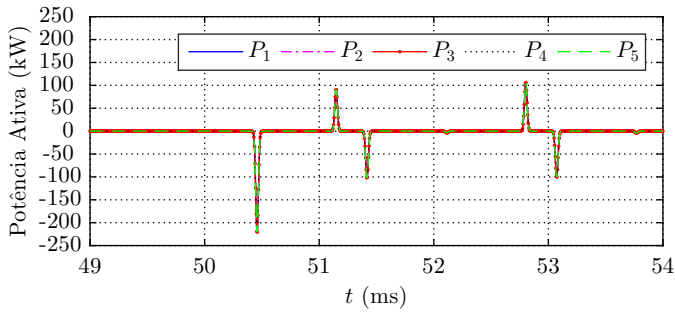
7. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma revisão bibliográfica sobre funções de proteção baseada na TS. Percebeu-se que, na maioria dos trabalhos propostos, as análises via TS são da componente fundamental. Porém, observou-se uma tendência nas pesquisas em analisar componentes de alta frequência. Por fim, ilustrou-se o desempenho de três algoritmos de proteção baseados na TS. Dos resultados, observou-se que a TS aparece como uma ferramenta matemática versátil para aplicações de proteção de sistemas elétricos nos domínios do tempo e frequência.

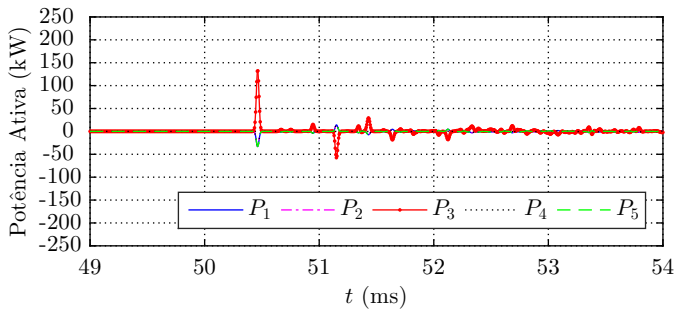
Tabela 4. Resultados da Função TS2.

| Tipo | LT | ME_a^1 | ME_b^1 | ME_c^1 | ME_a^2 | ME_b^2 | ME_c^2 |
|------|----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| AT | 1 | 214 | 3 | -1 | -2 | 3 | -1 |
| BT | 2 | -1 | -8 | 4 | -1 | 202 | 4 |
| AB | 1 | 411 | 275 | 0 | 11 | -10 | 0 |
| BC | 2 | 0 | 5 | -14 | 0 | 399 | 264 |
| ABC | 1 | 439 | 511 | 527 | 0 | -3 | -2 |
| ABC | 2 | 0 | -3 | -2 | 439 | 511 | 527 |

*Valores divididos por 10^3 .



(a)



(b)

Figura 3. Potências ativas das LTs conectadas ao barramento: Falta AT (a) interna (b) externa na LT 3.

Tabela 5. Resultados da Função TS3.

| Tipo | P_{cd} (W) | P_{cz} (W) | λ |
|--------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| AT Interna | $6,5 \times 10^6$ | $1,1 \times 10^3$ | $6,2 \times 10^3$ |
| AB Interna | $14,5 \times 10^6$ | $2,3 \times 10^3$ | $6,2 \times 10^3$ |
| AT Externa (LT 3) | 0,7578 | $9,8 \times 10^5$ | $7,7 \times 10^{-7}$ |
| ABC Externa (LT 3) | 3,1618 | $3,8 \times 10^6$ | $8,1 \times 10^{-7}$ |

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

Anderson, P.M. (1999). *Power System Protection*. John Wiley & Sons Inc.

Ashrafiyan, A., Gharehpetian, G.B., and Gholamghasemi, M. (2012). Application of discrete s-transform for differential protection of power transformers. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*.

Clarke, E. (1950). *Circuit Analysis of A-C Power systems*. General Electric, Schenectady, NY.

Dash, P.K. and Chilukuri, M.V. (2004). Hybrid s-transform and kalman filtering approach for detection and measurement of short duration disturbances in power networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.

Dash, P.K., Das, S., and Moirangthem, J. (2015). Distance protection of shunt compensated transmission line using a sparse s-transform. *IET Generation, Transmission Distribution*.

Dash, P.K., Panigrahi, B.K., and Panda, G. (2003). Power quality analysis using s-transform. *IEEE Transactions on Power Delivery*.

Dash, P.K., Samantaray, S.R., Panda, G., and Panigrahi, B.K. (2007). Time-frequency transform approach for protection of parallel transmission lines. *IET Generation, Transmission Distribution*.

Fischer, N., Skendzic, V., Moxley, R., and Needs, J. (2012). Protective relay traveling wave fault location. 11th International Conference on Developments in Power System Protection, Birmingham, UK.

Kar, S. and Samantaray, S.R. (2014). Combined s-transform and data-mining based intelligent micro-grid protection scheme. In *2014 Students Conference on Engineering and Systems*.

Kindermann, G. (2014). *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, volume 2. EEL.

Krishnanand, K.R. and Dash, P.K. (2013). A new real-time fast discrete s-transform for cross-differential protection of shunt-compensated power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*.

Li, Z., Zou, G., Du, T., and Yang, W. (2015). S-transform based pilot protection method for hvdc transmission lines. In *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*.

Lima, E.M., de Almeida Coelho, R., Brito, N.S.D., and Alencar de Souza, B. (2018). High impedance fault detection based on stockwell transform. In *2018 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA)*.

Mahela, O.P., Ahmad, G., and Ola, S.R. (2018). Detection of transmission line faults in the presence of thyristor switched capacitor using stockwell transform. In *2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*.

Mohanty, S.R., Pradhan, A.K., and Routray, A. (2008). A cumulative sum-based fault detector for power system relaying application. *IEEE Transactions on Power Delivery*.

Samantaray, S.R., Panigrahi, B.K., Dash, P.K., and Panda, G. (2007). Power transformer protection using s-transform with complex window and pattern recognition approach. *IET Generation, Transmission Distribution*.

Samantaray, S.R., Tripathy, L.N., Dash, P.K., and Panda, G. (2008). S-transform based directional bus-bar protection. In *TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference*.

Schweitzer, E.O., Kasztenny, B., Guzmán, A., Skendzic, V., and Mynam, M. (2014). Speed of Line Protection - Can We Break Free of Phasor Limitations? 41st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, USA.

Shah, A.M., Bhalja, B.R., and Patel, R.M. (2016). Power transformer differential protection using s-transform and support vector machine. In *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*.

Stockwell, R.G., Mansinha, L., and Lowe, R.P. (1996). Localization of the complex spectrum: the s transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*.

Thukral, S., Mahela, O.P., and Kumar, B. (2016). Detection of transmission line faults in the presence of solar pv system using stockwell's transform. In *2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*.

Wu, H., Dong, X., and Wang, Q. (2019). A new principle for initial traveling wave active power differential busbar protection. *IEEE Access*.