

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802158

基于改进 S 变换-TT 变换的电压暂降特性研究

卢彩霞 王新环 刘志超 王全义

(河南理工大学 电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 针对 S 变换的窗函数固定,以及在检测扰动信号的起止时刻、幅值变化、相位变化时的检测精度不高的问题,在 S 变换中引入两个调谐因子,得到一种改进的 S 变换,并对改进的 S 变换进行傅里叶反变换得到 TT 变换,将改进的 S 变换与 TT 变换相结合应用到主要引起电压暂降的 3 种暂降源中,并在 MATLAB 软件上对这 3 种暂降扰动源信号进行了仿真分析。仿真结果表明,所提的方法比使用 S 变换方法在检测电压暂降信号上具有更高的检测精度和更好的效果,为更好地提取暂降特征信息以及暂降源的识别打下基础。

关键词: S 变换;改进 S 变换-TT 变换;电压暂降;检测精度

中图分类号: TN714.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Research of voltage sag based on improved S-transform-TT transform

Lu Caixia Wang Xinhuan Liu Zhichao Wang Quanyi

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In view of the fixed window function of S-transformation and the problem of detection accuracy when detecting the start and end moments of disturbance signal, amplitude variation, and phase change, this paper introduces two tuning factors in S-transformation to obtain an improved one. S transform, and the inverse transform of the improved S transform to get the TT transform, the improved S transform and the TT transform are applied to the three sources of the disturbance that mainly cause the voltage sag, and on the MATLAB to the three a kind of temporary disturbance source signal was detected and analyzed. The MATLAB simulation results show that the proposed method has better effect and higher detection precision than the S-transform method in detecting voltage sags, which lays the foundation for better extraction of the characteristics of sags and identification of temporary sources.

Keywords: S-transform; improved S transform-TT transform; voltage sag; detection precision

0 引言

电压暂降通常是指在短暂的时间内,电压的幅值快速地下降到其额定值的 90%~10%,并且其暂降的持续时间为 0.5~30 个周波,最后又快速恢复到电压额定值的事件^[1]。近年来,不同程度的电压暂降问题已经给机场、银行、精密电子元器件制造业、计算机网络和服务监控中心等场所造成了重大的经济损失^[2]。因此,找到一个准确、快速的电压暂降检测方法对电压暂降的治理以及改善有着很重要的现实意义。

目前,分析电压暂降信号的方法主要有短时傅里叶变换、小波变换、S 变换(ST)等^[3]。在短时傅里叶变换中,由于它的时频窗口固定,因此在对非平稳信号进行分析时,它的时频分析能力较弱。小波变换有一个变化的时频窗口,它克服了短时傅里叶变换时频分辨率固定的不足,然而,很

难选择一个合适的母小波,而且它对噪声敏感,难以提供可区分的特征。S 变换是将小波变换和短时傅里叶变换两者进行结合而得到的一种变换方法,它在时频分析上有着良好的性能,但由于 S 变换的高斯窗口相对固定,难以胜任其时频分辨率较灵活的场合^[4]。

本文将两个调谐因子引入到 S 变换中,得到改进的 S 变换(IST),该变换提高了其能量聚集度和时频分辨率,而且能够很好地检测扰动信号的幅值变化和相位变化。然后再对改进的 S 变换进行傅里叶反变换得到 TT 变换,TT 变换在时间的定位上很准确^[5]。结合改进 S 变换在分析幅值变化、相位变化以及 TT 变换在时间定位上的优越性,将改进 S 变换和 TT 变换相结合应用到引起电压暂降的 3 种扰动源的仿真分析中。MATLAB 仿真结果表明,所提方法能够有效地检测暂降信号的幅值突变、暂降起止时间以及相位变化,为更好地提取暂降特征以及识别暂降源打下基础。

1 电压暂降源分析

电压暂降的发生可主要分为以下两种,一种是故障类产生的暂降,主要由短路故障造成;另一种是非故障类产生的暂降,是由感应电动机启动、变压器激磁涌流以及其他的大容量负荷投放等原因造成^[6]。

1.1 短路故障引起的电压暂降

在电力系统的运行期间,大风、雷电等的自然因素,以及设备故障、动物、绝缘差等原因会使电力系统发生短路故障^[7]。当短路故障发生时,其系统内的电流就会急剧的增大,进而导致了短路点附近的电压值在急剧地减小,并且其电压恢复的时间取决于短路故障的清除时间^[8]。线路发生短路故障时所引起的电压暂降等值电路模型如图1(a)所示,发生对称短路故障时的电压暂降仿真波形如图1(b)所示,不对称短路故障时的电压暂降仿真波形如图1(c)所示。

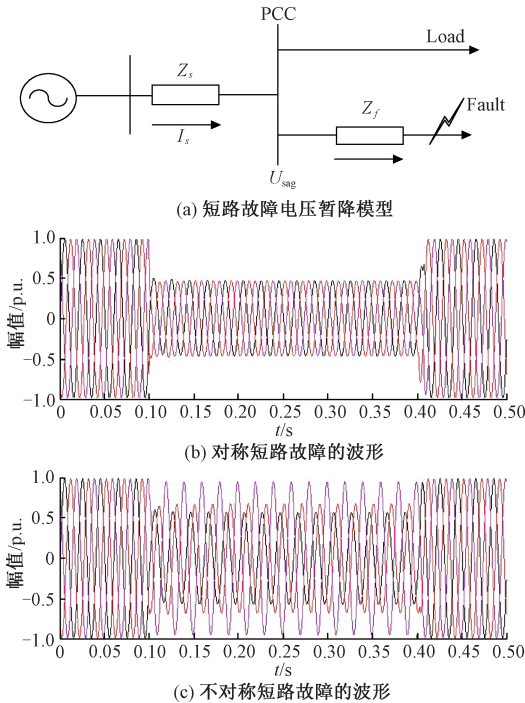


图1 短路故障引起的电压暂降

1.2 大容量电动机启动引起的电压暂降

大容量感应电动机的启动是引起电压暂降的另一个重要因素^[9]。当电机开始启动时,定子电流增加为额定工作电流的5~6倍,这样的大电流会使得系统阻抗上的分压增大,从而引起了电压暂降的发生。当发生暂降时,电压先是快速下降然后再逐渐恢复到正常,并且在此过程中没有突变,且三相基本对称。大容量感应电动机启动时的等值电路模型如图2(a)所示,其大容量感应电动机启动时所导致的电压暂降仿真波形如图2(b)所示。

1.3 空投变压器引起的电压暂降

当在空投变压器时,初相角为0,变压器的终端电压会

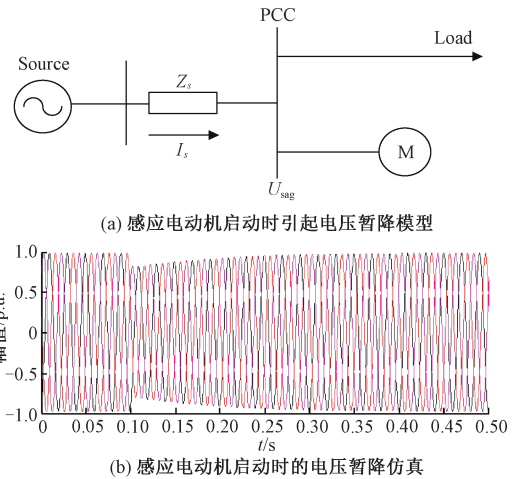


图2 感应电动机启动引起的电压暂降

发生剧烈变化,这时变压器的铁芯由于其饱和效应,在送电端会产生比额定电流大至8~10倍的励磁涌流,致使附近节点电压下降。当将变压器在投放的过程中时,它会引起电压暂降的产生,并且该暂降总是三相不平衡,而且该暂降的电压中还有谐波分量的存在。另外,由于线圈中有铜损的存在,这使得电压的幅值在逐渐的恢复,并且在这个过程中没有突变点的产生。空投变压器时所导致的电压暂降等值电路模型如图3(a)所示,其产生的电压暂降仿真波形如图3(b)所示。

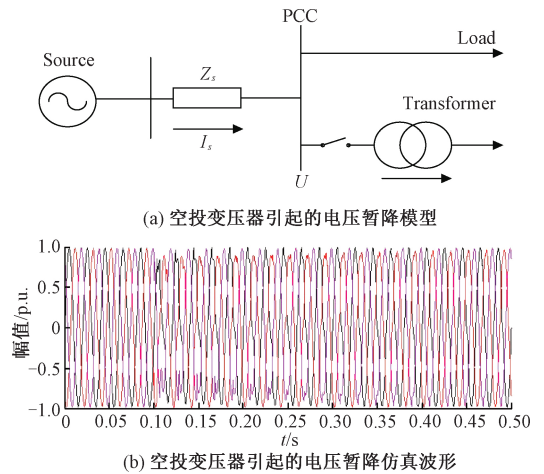


图3 空投变压器时的电压暂降

2 改进S变换-TT变换

2.1 S变换理论

S变换是将短时傅里叶变换和小波变换进行结合发展而得到的一种方法,它由 Stockwell 等人于1996年提出^[10]。

信号 $x(t)$ 的一维连续S变换定义为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\omega(\tau - t, \sigma)\exp(-i2\pi ft)dt \quad (1)$$

式中: i 为虚数单位; $\omega(\tau - t, \sigma)$ 是一个高斯窗函数, 它能够直接影响 S 变换的时频分辨率, 该高斯窗函数如式(2)。

$$\omega(\tau - t, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tau - t)^2}{2\sigma^2}\right), \sigma = \frac{1}{|f|} \quad (2)$$

式中: τ 为时移因子, 它能够控制高斯窗口在 t 轴位置上的参数; σ 为时宽尺度因子, 能够调节 ST 的时频分辨率的大小; f 为频率。

从式(2)可以得出, 在 S 变换中, 它的高斯窗口的宽度和高度总是在随着 f 的变化而发生着改变。S 变换虽然具有良好的时频特性, 但通过式(2)可知, 其高斯窗口函数形态固定, 不容易控制, 这使得 S 变换就不能满足各种干扰信号的要求, 在实际应用中也受到了限制^[11]。

2.2 改进 S 变换

为了更好地控制窗口的形状, 以及达到更好的时-频分辨率, 为此, 在 S 变换高斯窗函数的基础上, 引入了两个调谐因子 λ 和 q , 得到一种改进的 S 变换, 它使得时窗宽度随信号频率变化的速度更加灵活^[12]。该改进 S 变换的 σ 的表达式如下:

$$\sigma(f, \lambda, q) = \frac{1}{\lambda |f|^q} \quad (3)$$

因而该变换的高斯窗函数的表达式为:

$$\omega(\tau - t, f, \lambda, q) = \frac{\lambda |f|^q}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tau - t)^2 |f|^{2q} \lambda^2}{2}\right) \quad (4)$$

则该改进 S 变换定义为:

$$IST^{\lambda, q}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{\lambda |f|^q}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tau - t)^2 |f|^{2q} \lambda^2}{2} - i2\pi ft\right) dt \quad (5)$$

式中: λ 定义为窗宽度变化模式 ($\lambda > 0$), q 决定窗宽度变化的速率 ($q > 0$), λ, q 和 f 共同控制了高斯窗函数的形状。

为了得到改进 S 变换的离散形式, 利用快速傅里叶变换和卷积定理, 将改进 S 变换写为:

$$IST^{\lambda, q}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\varphi + f) \exp\left(-\frac{2\pi^2 \varphi^2}{\lambda^2 |f|^{2q}} + i2\pi\varphi\tau\right) d\varphi, f \neq 0 \quad (6)$$

式中: $X(f)$ 表示的是信号 $x(t)$ 的傅里叶谱; φ 则代表的是平移的频率因子。对式(6)进行离散化处理, 令 $f \rightarrow n/(NT), \tau \rightarrow jT, \varphi \rightarrow m/(NT), T$ 代表的是采样的时间间隔, N 代表的是采样的点数。信号 $x(t)$ 的改进 S 变换的离散形式表示为如下:

$$\begin{cases} IST^{\lambda, q}\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{n+m}{NT}\right] \cdot \\ \exp\left(-\frac{2\pi^2 m^2}{\lambda n^{2q}} + i\frac{2\pi m j}{N}\right), n \neq 0 \\ IST^{\lambda, q}\left[jT, 0\right] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m}{NT}\right], n = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: j, m 表示的是离散时间变量, 且 $j = 0, 1, \dots, N-1$,

$m = 0, 1, \dots, N-1; n$ 则表示为离散的频率变量, 且 $n = 0, 1, \dots, N-1$ 。

对改进 S 变换中的 λ, q 参数选取时, 会受到测不准原理的影响, 不可避免地会使扰动信号的检测产生一定的误差。本文在改进 S 变换的基础上, 将表征信号时频聚焦性度量准则引入到高斯窗口函数调节参数的选取中, 通过对改进 S 变换窗函数中的两个参数的优化, 可以减少利用经验值时选取参数时造成的误差^[13], 其优化参数的步骤如下。

1) 对不同的 λ 和 $q \in (0, 1]$, 取各 λ 和 q 计算信号 $x(t)$ 的改进 S 变换结果 $IST^{\lambda, q}(\tau, f)$ 。

2) 把频率平均分成 N 段 $[f_{i-1}, f_i], i = 1, 2, \dots, N$, 对每一个 λ 和 q , 进行时频聚焦性度量准则计算:

$$M_{JP}(f, \lambda, q) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |S_x^{\lambda, q}(t, f)|^4 dt}{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} |S_x^{\lambda, q}(t, f)|^2 dt\right)^2} \quad (8)$$

3) 对同一段频率, 比较各 $M_{JP}(f, \lambda, q)$ 的大小, 与最大 $M_{JP}(f, \lambda, q)$ 相应的 λ, q 值即为该段频率的最优参量 $\{\lambda, q\}^{opt}$, 即:

$$\{\lambda, q\}^{opt} = \underset{(\lambda, q)}{\operatorname{argmax}} [M_{JP}(f, \lambda, q)] \quad (9)$$

4) 重复步骤 2) 和 3), 计算每个频率段的最优参量 $\{\lambda, q\}^{opt}$, 然后比较各 $M_{JP}(f, \lambda, q)$ 的大小, 使 $M_{JP}(f, \lambda, q)$ 达到最大的 λ 和 q 值即作为对应于频率 f 的优化参数。

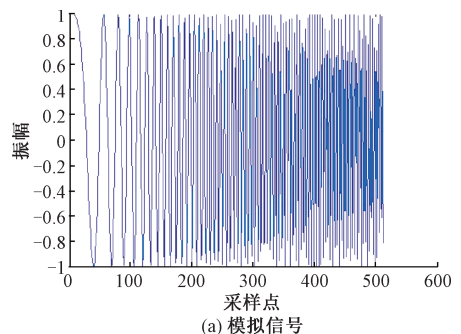
5) 将信号 $x(t)$ 按照式(10)计算其改进 S 变换。

$$IST^{\lambda, q}(\tau, f) = IST(\tau, f, \lambda, q) = IST\{\tau, f, \underset{(\lambda, q)}{\operatorname{argmax}} [M_{JP}(f, \lambda, q)]\} \quad (10)$$

选取一段模拟信号, 设置该信号的采样点数为 512, 对信号分别进行 S 变换, 改进 S 变换, 并将这两种变换的时频谱图进行比较分析。该模拟信号如图 4(a) 所示, 信号在进行 S 变换、改进 S 变换后的时频谱图分别如图 4(b) 和 (c) 所示。从这两种变换的时频谱图可知, S 变换和改进 S 变换在低频部分虽然都发生轻微的发散, 但改进 S 变换在低频段的时频谱要更加的清晰。通过对比, 改进 S 变换的效果更好, 其时频聚集性要强于 S 变换且能较好地展示低频段的信号。

2.3 TT 变换

TT 变换最早是由 Pinngar 等人在 2003 年提出^[14]。传



(a) 模拟信号

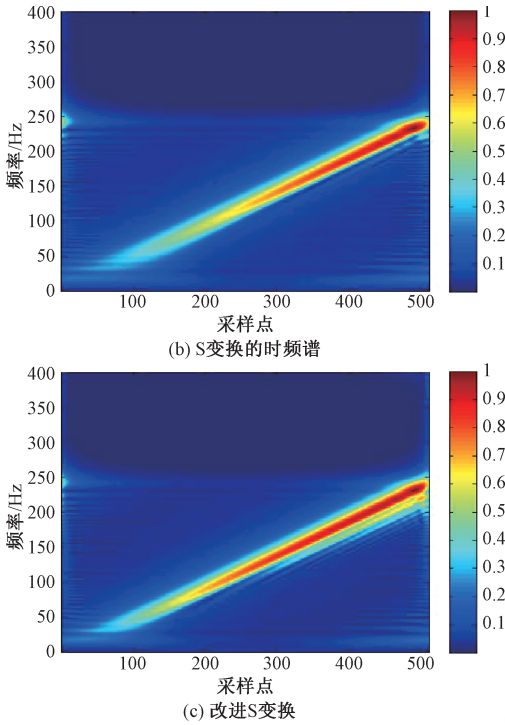


图4 时频分析方法对比

统意义上的 TT 变换是对 S 变换进行傅里叶反变换,进而得到该 TT 变换,而本文所提的 TT 变换是在改进 S 变换的基础上,对其进行傅里叶反变换得到,通过调整改进 S 变换中的调谐因子,该 TT 变换比传统的 TT 变换的分辨率要更高,其时间定位要更精确。则该 TT 变换表示为:

$$TT[\tau, t] = \int_{-\infty}^{+\infty} IST^{\lambda, q}(\tau, f) e^{i2\pi ft} df \quad (11)$$

式中: $e^{i2\pi ft}$ 为旋转因子; $IST^{\lambda, q}(\tau, f)$ 是信号 $x(t)$ 的改进

S 变换。信号 $x(t)$ 在进行 TT 变换后得到的是一个复数矩阵的形式,该复数矩阵的行和列对应的均是时间采样点,即矩阵的行和列均是 TT 序列。

在对信号进行数据处理时,需将信号进行离散化处理。取 $\tau \rightarrow jT$ 和 $f \rightarrow n/(NT)$, 其中, T 代表的是采样时间间隔, N 代表的是采样的点数,则该 TT 变换的离散式为:

$$TT[jT, kT] = \sum_{n=0}^{N-1} IST^{\lambda, q}\left(jT, \frac{n}{NT}\right) \exp\left(i \frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (12)$$

式中: $j, n, k = 0, 1, \dots, N-1$ 。

从式(12)可看出,信号在 TT 变换后,得到了一个二维复时间-时间矩阵,该复数矩阵的行相量表示是在某频率处信号的幅度随时间的变化,其列向量则表示信号的幅度在某时刻随时间的变化^[15]。通过 TT 变换后所得结果矩阵的对角线附近,信号的高频部分比低频部分具有更大的幅值,当信号中有扰动发生时,因为突变点的频率成分比较丰富,而且这些频率以高频成分为主,这使得 TT 变换的对角线元素序列会在扰动的起止时刻发生较大的幅值突变,根据 TT 变换幅值突变点所对应的时间信息,可以准确检测到扰动发生的起始和结束时刻。

3 基于改进 S 变换-TT 变换的电压暂降检测仿真分析

用 MATLAB/Simulink 分别产生由短路故障、感应电动机启动以及空投变压器所引起的电压暂降信号,然后将改进 S 变换-TT 变换的方法应用到电压暂降的 3 种扰动源中,并选取其中的一相进行检测分析,如图 5 所示。改进 S 变换用来检测电压暂降信号的幅值和相位信息,TT 变换用来检测电压暂降开始和结束的时刻。

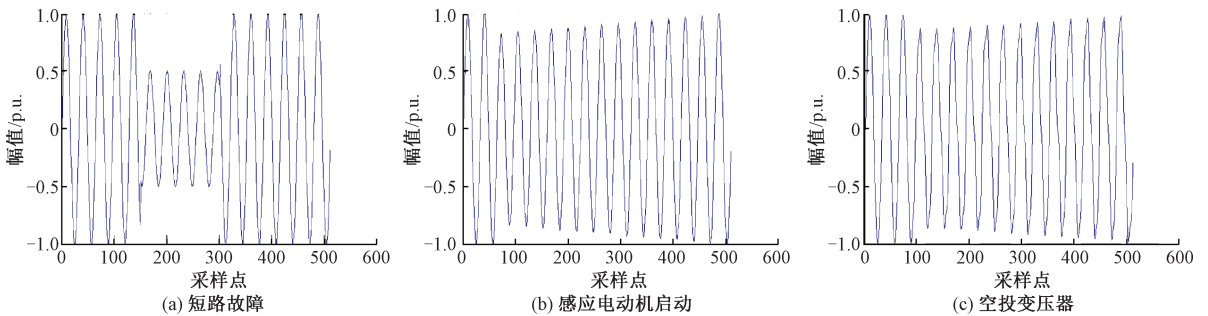


图5 3种主要的电压暂降波形

实验仿真时其参数的设定为:信号的采样频率为 1 600 Hz,总的采样点数为 512 个,标准信号的基频为 50 Hz,将采样信号的幅值进行归一化的处理,以此来满足不同幅值信号要求。为了更好地体现改进 S 变换-TT 变换方法的优势,本文分别将 S 变换与改进 S 变换-TT 变换应用到对短路故障、电机启动以及空投变压器所引起的

电压暂降信号的检测中,并对两种方法的仿真结果进行比较分析。

3.1 电压暂降幅值检测

对 3 种电压暂降信号分别进行 S 变换和改进 S 变换,从所得出的模时频矩阵中提取出基频幅值曲线,进而可以检测出电压暂降信号的幅值变化情况以及发生暂降时的

凹陷程度。该基频幅值曲线的计算式为：

$$S_0 = S(jT, f_0) \quad (13)$$

式中： $j = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ； $S_0(t)$ 是暂降信号的基频幅值

序列。

对 3 种暂降信号分别进行 S 变换和改进 S 变换后所得的基频幅值曲线如图 6 和 7 所示，检测结果如表 1 所示。

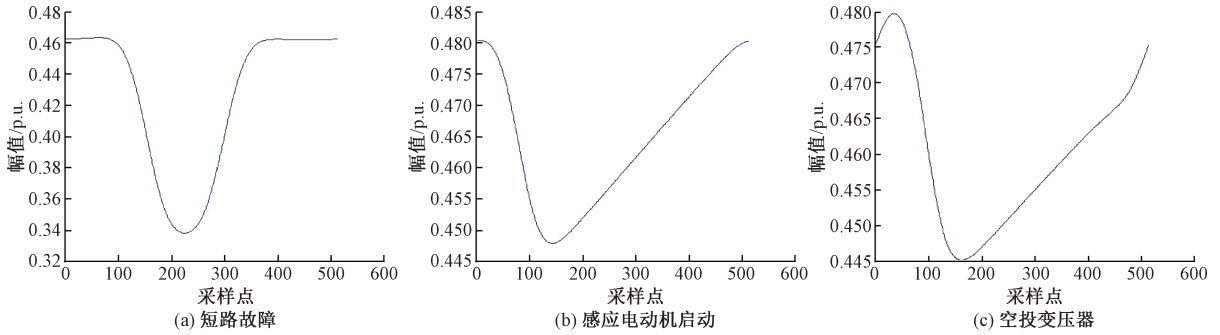


图 6 利用 S 变换所得的 3 种暂降信号的基频幅值曲线

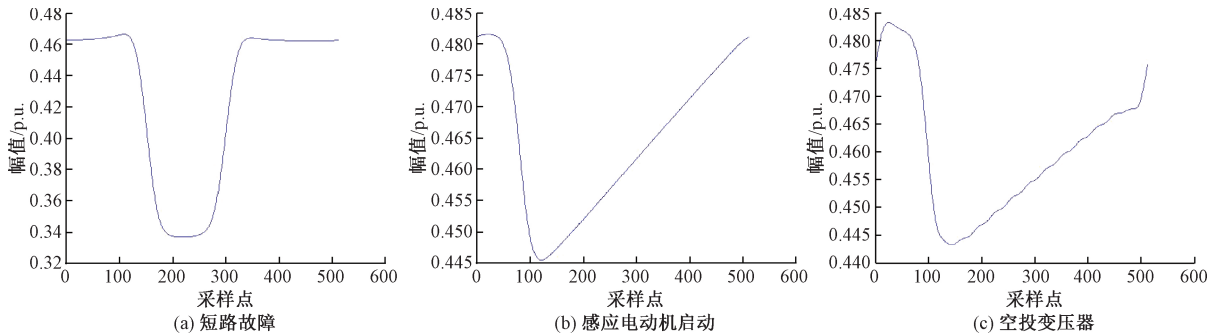


图 7 利用改进 S 变换所得的 3 种暂降信号的基频幅值曲线

表 1 S 变换与改进 S 变换对电压暂降深度的检测结果

暂降源类型	算法	暂降深度/%		
		理论值	实测值	误差
短路故障	ST	27.00	25.83	1.17
	IST	27.00	27.22	0.22
感应电动机启动	ST	7.00	5.25	1.75
	IST	7.00	7.27	0.27
空投变压器	ST	8.00	6.23	1.67
	IST	8.00	8.28	0.28

对比图 6 和 7，以及表 1 的检测结果可看出，改进 S 变换与 S 变换相比较，改进 S 变换加剧了突变的特征，其检测精度更高、误差更小。

3.2 相位检测

由于在电压暂降发生时，其暂降开始与恢复时的相位角会发生变化，为了检测这种相位的变化，采用了相位跳变曲线来反映相位的变化情况。对 3 种暂降信号分别进行 S 变换和改进 S 变换后提取出相应的相位跳变曲线如图 8 和 9 所示，检测结果如表 2 所示。

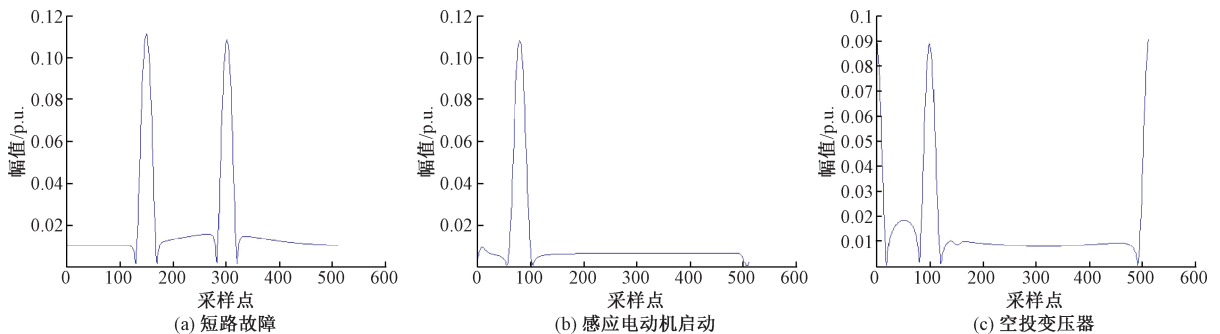


图 8 利用 S 变换所得的 3 种暂降信号的相位跳变曲线

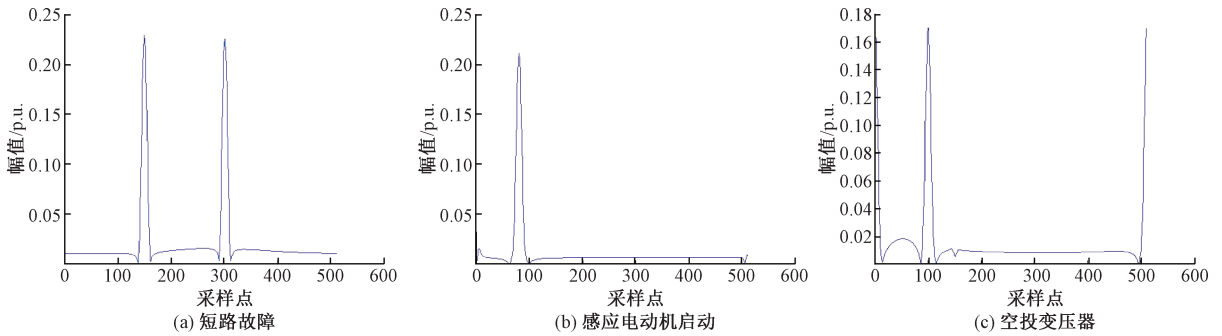


图9 利用改进S变换所得的3种暂降信号的相位跳变曲线

表2 S变换与改进S变换对相位的检测结果

暂降源类型	算法	相位跳变点		
		理论值	实测值	误差
短路故障	ST	150,300	151,297	1,3
	IST	150,300	150,300	0,0
感应电动机启动	ST	80	82	2
	IST	80	80	0
空投变压器	ST	100	97	3
	IST	100	100	0

对比图8和9,利用改进S变换检测的相位跳变要比S变换检测的更加准确,同时由表2的检测结果也可看出,

改进S变换对相位跳变点检测的准确性。

3.3 电压暂降时间的检测

对电压暂降起始和结束时间的检测可通过突变点的位置来进行检测,并标定对应的时间坐标,进而检测出暂降的起止时间。在S变换中,对突变点的检测可通过幅值曲线来确定,而在TT变换中可通过提取对角线元素来检测其突变点的位置。对3种暂降信号分别进行S变换和TT变换的突变点检测曲线如图10和11所示,检测结果如表2所示。

从图10~11以及表3的检测结果中可看出,在电压暂降起止时刻的定位方面,TT变换比S变换更能精确定位到电压暂降发生的起止时刻变化。

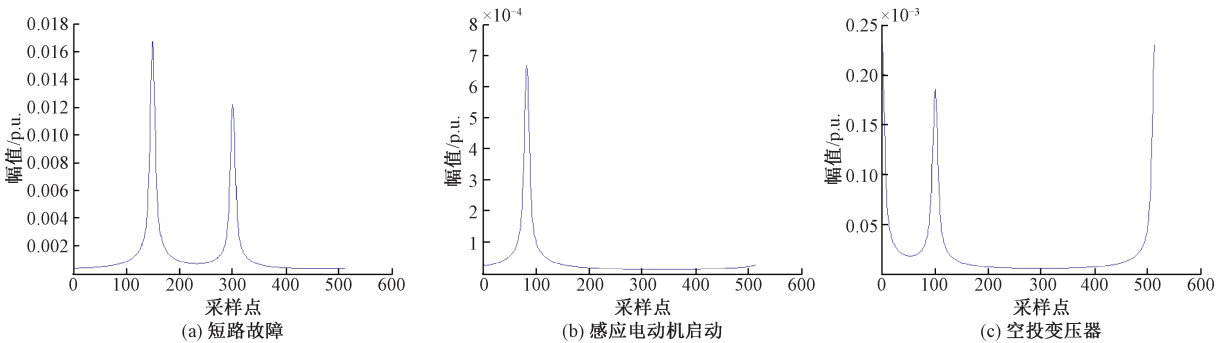


图10 利用S变换突变点的检测

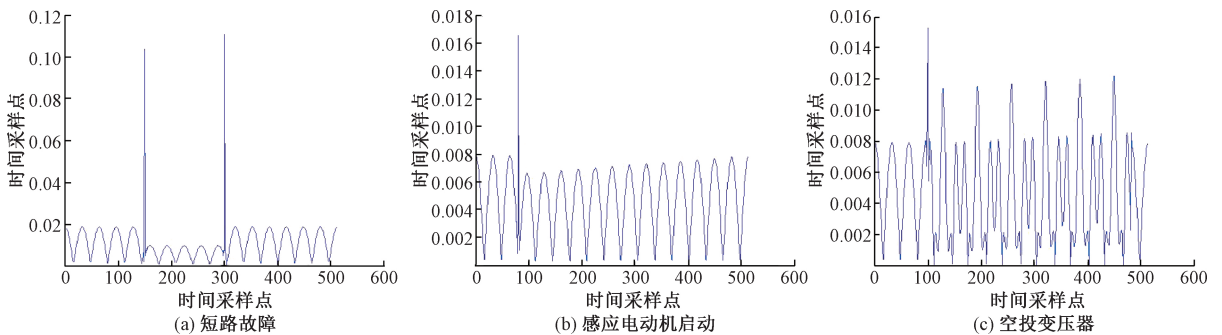


图11 利用TT变换突变点的检测

表 3 S 变换与 TT 变换对扰动起止时间的检测结果

暂降源类型	算法	起始时刻/s			结束时刻/s		
		理论值	实测值	误差	理论值	实测值	误差
短路故障	ST	0.093 7	0.094 3	0.000 6	0.187 5	0.188 7	0.001 2
	TT	0.093 7	0.093 7	0	0.187 5	0.187 5	0
感应电动机启动	ST	0.050 0	0.050 7	0.000 7	—	—	—
	TT	0.050 0	0.050 0	0	—	—	—
空投变压器	ST	0.062 5	0.063 3	0.000 6	—	—	—
	TT	0.062 5	0.062 5	0	—	—	—

4 结 论

本文阐述了 3 种主要的电压暂降源的产生原因及特征,并在 S 变换的基础上引入了两个参数,通过对它们进行适当的优化,得到了改进的 S 变换,有效地提高了 S 变换的时频分辨率,另外,又在改进 S 变换的基础上得到了 TT 变换。通过仿真验证,改进 S 变换比 S 变换能够准确地检测出电压暂降的幅值、相位信息,而 TT 变换能准确确定电压暂降扰动的起止时刻,时间定位精度高。本文所提出的算法虽然能对电压暂降进行准确的检测,但本文在对 TT 变换的应用中,只用到了 TT 变换模矩阵的对角元素序列,如何利用 TT 变换和改进的 S 变换所得到的大量信息对电压暂降的复合扰动源的检测以及暂降源的识别的分析还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 苗竹梅,王冲,刘伟,等. 电子企业的电压暂降分析与对策[J]. 智能电网, 2016, 4(12): 1171-1174.
- [2] 刘旭娜,肖先勇,汪颖. 电压暂降严重程度及其测度、不确定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 644-658.
- [3] 吴丽娜. 电压暂降检测分析及抑制措施研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [4] 张淑清,李盼,师荣艳,等. 基于改进 S 变换的电能质量扰动分类新方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 927-934.
- [5] 梅娟,黄纯,戴栩生,等. 采用 TT 变换的电能质量扰动检测与分类方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(3): 24-29.
- [6] 肖先勇,崔灿,汪洋,等. 电压暂降分类特征可比性、相关性及马氏距离分类法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1299-1305.
- [7] 刘超,黎涛,王华. 静止无功补偿器接入的配网短路故障特征及保护整定策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(6): 113-117.
- [8] 孙丛丛,王致杰,陈丽娟,等. 基于 MATLAB 的电力系

统故障仿真与检测方法研究[J]. 电力学报, 2016, 31(1): 1-7, 62.

- [9] 李夏林,刘雅娟,朱武. 基于配电网的复合电压暂降源分类与识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 131-139.
- [10] 黄南天,袁翀,张卫辉,等. 采用最优多分辨率快速 S 变换的电能质量分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2174-2183.
- [11] 金智,尹柏强. 基于广义 S 变换的高斯领域时频滤波方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 124-131.
- [12] 杨万清,姜学朴,刘冰. 基于广义 S 变换和 PSO-ELM 的电能质量扰动信号识别[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(2): 129-134, 140.
- [13] WANG Q, ZHANG Y S, LIU H W, et al. A novel interference detection method of STAP based on simplified TT transform [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017(2): 1-9.
- [14] 康兵,康逸群,钟鑫. TT 变换及其对角线在暂态电能质量现象识别中的应用[J]. 陕西电力, 2015, 43(12): 43-47, 56.
- [15] JASHFAR S, ESMAEILI S, ZAREIANJAHROMI M. Classification of power quality disturbances using S-transform and TT-transform based on the artificial neural network [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2014, 21(6): 1528-1538.

作者简介

卢彩霞, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析。

E-mail: 2433977927@qq.com

王新环(通信作者), 硕士、副教授, 主要研究方向为工矿自动化、电力电子与电气传动控制、电能质量分析与控制。

E-mail: wang_xh@hpu.edu.cn

刘志超, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量扰动识别。

E-mail: 1515242642@qq.com

王全义, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析。

E-mail: 1056756109@qq.com