

引入调节因子改进S变换电压暂降源识别

刘海涛^{1,2}, 叶筱怡¹, 吕干云¹, 袁华骏¹, 耿宗璞¹

(1. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 江苏省
配电网智能技术与装备协同创新中心, 江苏 南京 211167)

摘要: 配电网电压暂降的正确分类识别对抑制和缓解电压暂降具有重大意义。分析了分别由三种不同相的接地短路故障、感应电动机启动和变压器投运引起的五种电压暂降现象及其典型特征, 在标准S变换的高斯窗函数上添加幅度调节系数和指数调节系数两个调节因子得到改进的S变换。采用改进S变换的方法得到不同类型电压暂降信号的基频幅值曲线和频率幅值包络线, 提取暂降深度、突变点个数、基频幅值上升和下降斜率、二次谐波含有率和暂降时间比六个特征指标。将这些特征指标数据进行归一化处理后输入支持向量机, 实现对配电网不同类型电压暂降的识别。最后, 仿真结果表明, 将基于引入调节因子得到的改进S变换用于特征指标提取, 对电压暂降进行分类识别的正确率相比标准S变换更高。

关键词: 电压暂降; 改进S变换; 分类识别; 支持向量机

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21608

Modified S-transform Voltage Sag Source Identification by Introducing Regulation Factor

LIU Haitao^{1,2}, YE Xiaoyi¹, LÜ Ganyun¹, YUAN Huajun¹, GENG Zongpu¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167,
Jiangsu, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Smart
Distribution Network, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

Abstract: The correct classification and identification of voltage sags in distribution network is of great significance to suppress and mitigate voltage sags. The five kinds of voltage sags and their typical characteristics caused by three different phases of short-circuit fault, induction motor start-up and transformer operation were analyzed, and an improved S-transform was obtained by adding amplitude adjustment factor and exponential adjustment factor to Gaussian window function of standard S-transform. The basic frequency amplitude curve and frequency amplitude envelope of different types of voltage sag signals were obtained by using the improved S-transform method. Six characteristic indexes were extracted, including sag depth, number of mutation points, rise and fall slope of basic frequency amplitude, second harmonic content and sag time ratio. These characteristic index data were input into support vector machine (SVM) after normalization to realize the recognition of different types of voltage sag in distribution network. Finally, the simulation results show that the improved S-transform based on the adjustment factor is more accurate than the standard S-transform for voltage sag classification.

Key words: voltage sag; modified S-transform; classification and recognition; support vector machine (SVM)

电压暂降是电能质量问题中最严重的问题之一。对电压暂降进行准确的分类识别对抑制和缓解电压暂降具有重大意义, 其中, 选择并提取电压暂降信号的相关特征指标是进行电压暂降识别的前提, 对提高电压暂降分类识别的正确率有较大的影响。

S变换(S-transform)是学者Stockwell^[1]提出的一种时频可逆分析方法, 其变换结果通过时频矩阵和时频图像表达, 既具有和小波变换相似的时频分辨特性, 也具有与频率相关的分辨率。S变换克服了短时傅里叶变换中STFT窗函数不易确定的问题, 且相较于连续小波变换, 在高频部分

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(51577086); 2018江苏省高校重大项目(18KJA470002);

2020江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX20_0721)

作者简介: 刘海涛(1972—), 女, 教授, 博士, Email: 13851424346@163.com

其结果表达更加清晰。因此,近年来S变换成为电能质量扰动分析中一种强有力的分析方法^[2]。

文献[3]基于S变换对不同类型的电压暂降信号进行时域和频域分析,从S变换的结果模矩阵中提取8个特征量作为分类器的输入,对电压暂降源进行识别。文献[4]用S变换提取相关特征量,运用分类树对电压暂降源进行识别。文献[5]通过S变换与多分类支持向量机(support vector machine, SVM)相结合,实现电压暂降源的识别。文献[6]利用S变换提取扰动特征,建立不同扰动信号的标准模板,通过计算扰动信号与标准模板的接近程度实现电能质量扰动的分类识别。

S变换具有良好的时频分析能力,可以提取任意频率分量特征,但传统的S变换可能存在对暂降的误判、对噪声敏感等缺点^[7],因此有文献提出对标准S变换进行改进,提高电压暂降的分类准确率。文献[8]应用广义S变换得到电压暂降信号的基频幅值曲线和最大频谱曲线,提取四个特征值,最后通过分类规则树实现扰动信号的分类。文献[9]通过粗糙集理论确定改进S变换的形式和最优波形,对最优波形进行特征提取实现电能质量扰动的精确识别。文献[10]由改进S变换得到均值、标准差等八个特征指标,进行复合电压暂降源的识别分析。

文章对标准S变换引入两个调节因子,得到改进后的S变换。利用改进的S变换得到电压暂降信号的基频幅值曲线和频率幅值包络线,进而提取暂降深度、突变点个数、基频幅值上升和下降斜率、二次谐波含有率和暂降时间比六个特征指标,将这些指标数据进行归一化处理作为分类器的输入量,最终实现对配电网不同电压暂降源的精确识别。

1 电压暂降的类型

1.1 短路故障

电力系统发生故障,会导致配电网中发生电压暂降现象,其通常由雷电等恶劣天气因素造成。发生短路故障时,输配电系统的电流升高,短路故障点附近的电压下降,导致电压暂降的发生。

1.2 感应电动机启动

感应电动机启动时,其转差率约为1,启动电流达到平时额定工作电流的5~6倍。电机在启动过程中,一般大约过几s到1min之后其转速上升达到额定值。而在这期间,电机的电流一直处于

一个较大的值,造成其附近母线电压大幅度下降,从而引起电压暂降现象。

1.3 变压器投运

配电网中由于有变压器接入,当变压器运作时,导致线路末端的电压变化较大。电源的阻抗分压受到变压器激磁涌流的影响,其值增大,从而引起公共连接点发生电压暂降。

不同原因导致的电压暂降,有不同的典型特征。主要的电压暂降典型特征如表1所示。

表1 电压暂降典型特征
Tab.1 Typical characteristics of voltage sag

故障类型	典型特征			
	幅值(标么值)	波形	相位跳变	谐波分量
短路故障	一般低于0.7	发生和恢复的波形较陡	可能发生相位跳变	无谐波分量
感应电机启动	一般不低于0.85	发生波形较陡,恢复波形较平缓	可能发生相位跳变	无谐波分量
变压器投运	一般不低于0.85	发生波形较陡,恢复波形较平缓	可能发生相位跳变	有谐波分量,以二次谐波为主

2 引入调节因子的改进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,本文在标准S变换高斯窗函数的基础上,引入调节因子 a 和 b ,使得高斯窗中的时窗宽度随信号频率变化的速度更加灵活^[11-12]。改进的S变换表达式如下:

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \frac{a|f|^b}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{a^2(t-\tau)^2 f^{2b}}{2}} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

式中: $h(\tau)$ 为信号函数; t 为时间; f 为频率; j 为虚数; τ 为高斯窗函数的中心位置; a 为高斯窗幅度调节系数; b 为高斯窗指数调节系数。

不同的 a, b 对应不同的时频分辨率^[6]。由于导致电压暂降的原因不同,其引发的电压暂降典型特征也不相同。根据不同的典型特征,调整改进S变换的高斯窗调节因子 a, b ,可提高时频、频域分辨率,使电压暂降的特征提取效果达到最佳。

设置 T 为采样间隔, N 为总采样点数, $f = n/(NT), \tau = jT$,最终信号 $X(t)$ 的改进S变换离散形式如下^[11]:

$$\begin{cases} S^{a,b}\left[iT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{n+m}{NT}\right] \cdot \exp\left(-\frac{2\pi^2 m^2}{an^{2b}} + j\frac{2\pi mi}{N}\right) & n \neq 0 \\ S^{a,b}\left[iT, 0\right] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m}{NT}\right] & n = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $i, m, n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

由于短路故障和感应电动机启动时引起的电压暂降无谐波分量,因此以时域分辨率为主,而由于变压器投运引起的电压暂降含有大量的谐波分量,在考虑时频分辨率的基础上,还要考虑频域分辨率。在大量实验和仿真的基础上,对由短路故障和感应电动机启动引起的电压暂降波形进行特征提取时调节因子取值为 $a=5, b=0.87$;对变压器投运引起的电压暂降波形进行特征提取时调节因子取值为 $a=1, b=0.87$ 。

3 暂降特征提取

3.1 暂降深度

利用改进S变换的模矩阵中基频行向量幅值曲线和时间幅值包络曲线计算电压暂降深度^[13]:

$$MF = U_{\text{sag}} / U_{\text{ref}} \quad (3)$$

式中: $U_{\text{ref}}, U_{\text{sag}}$ 分别为电压暂降前、暂降时的有效值。

3.2 突变点个数

短路故障引起的电压暂降的突变点个数为两个或两个以上;而感应电动机启动引起的电压暂降只存在一个突变点;变压器投运时由于存在大量谐波分量,不能精确提取其突变点个数,统一设为0。通过改进S变换结果模矩阵的十一倍基频行向量确定突变点个数。图1为发生短路故障和感应电动机启动时的突变点个数。

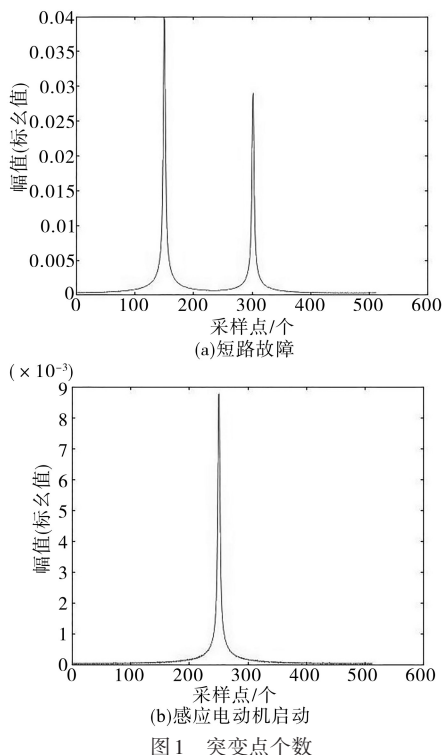


图1 突变点个数

3.3 基频幅值上升和下降斜率

不同的电压暂降类型其基频幅值曲线的上升和下降斜率不同。短路故障引起的电压暂降,其基频幅值曲线的上升、下降波形均较陡;感应电动机和变压器投运引起的电压暂降,其基频幅值曲线的下降波形较陡、上升波形较平缓。图2分别为短路故障、感应电动机启动和变压器投运时改进S变换所提取到的基频幅值曲线。

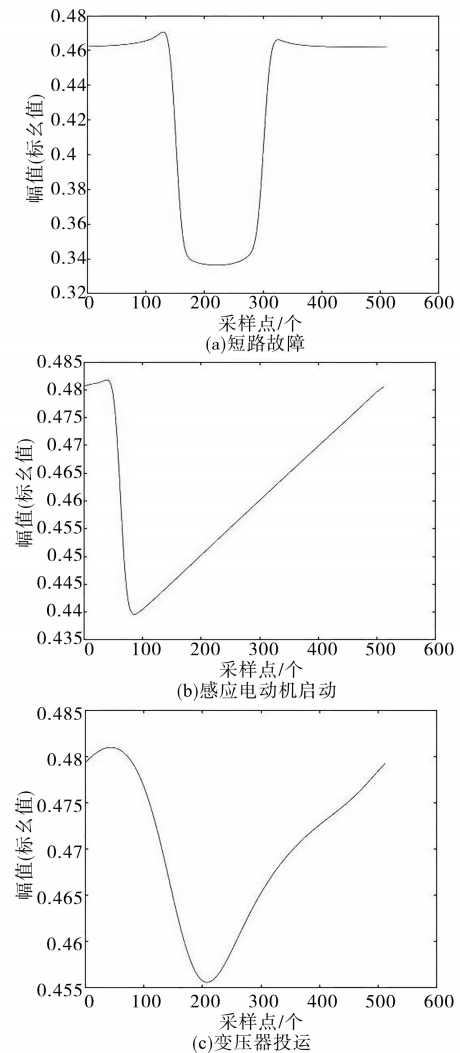


图2 基频幅值曲线

Fig.2 The fundamental-frequency amplitude curves

3.4 二次谐波含有率

变压器投运时引起的电压暂降会产生大量谐波,其中以二次谐波为主,因此二次谐波含有率是一个重要的特征指标。文章通过频率幅值包络线计算二次谐波含有率,定义为

$$HRf_2 = \frac{f_2}{f_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中: f_2 为频率幅值包络曲线中第32个采样点处

频率值; f_i 为频率幅值包络曲线中第17个采样点处频率值。

图3分别为短路故障、感应电动机启动和变压器投运时的频率幅值包络线。

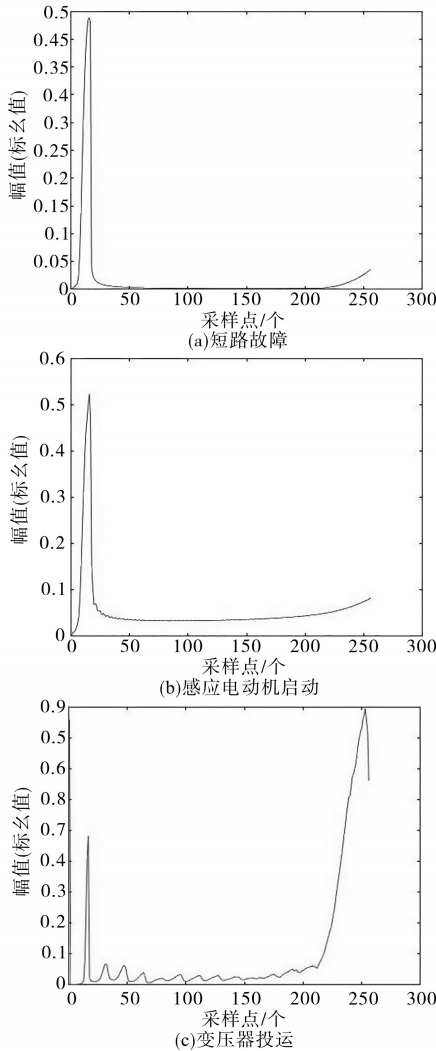


图3 频率幅值包络线

Fig.3 Frequency amplitude envelope

3.5 暂降时间比

暂降平稳时间是指电压暂降基频幅值下降到最低点后停留的时间。该指标的表达式为

$$t = \frac{T_1}{T_2} \quad (5)$$

式中: T_1 为暂降发生至结束的时间; T_2 为暂降平稳时间。

每相可提取到六个特征指标,三相总计得到 3×6 个特征指标。由于最后只需要一个可代表三相电压特点的综合特征指标^[11],所以采用式(6)的方法对提取到的所有指标数据进行处理:

$$F_k = \frac{|F_{kA}| + |F_{kB}| + |F_{kC}|}{3} \quad (6)$$

式中: $k=1, 2, \dots, 6$,表示6个特征指标; A, B, C 为三相。

在输入支持向量机前,对所有的数据进行归一化预处理,将原始数据归整到 $[0, 1]$ 范围内,归一化公式为

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

式中: X 为原始数据; X_{\min} 为原始数据中的最小值; X_{\max} 为原始数据中的最大值。

4 仿真验证和标准模型分析

4.1 仿真验证

基于 Matlab/Simulink 分别建立单相短路故障等5种电压暂降的仿真模型并进行仿真实验。

仿真时采样频率设定为1 600 Hz,采样点数设定为512点,基频频率取工频50 Hz。对于短路故障,改变断路器的开断时间、故障点距离母线的距离以及线路负荷;对于感应电动机启动,改变电动机的容量和电动机的启动时间;对于变压器投运,改变其变压器的容量、联接方式、投切时间以及线路负荷。

通过仿真得到五种电压暂降类型各100组样本数据,其中每种电压暂降类型的50组数据作为SVM的训练样本,另外50组数据作为测试样本。

SVM采用对非线性问题具有良好处理能力的径向基核函数:

$$K(x, x_i) = \exp(-\gamma \|x - x_i\|^2) \quad \gamma > 0$$

设置SVM的惩罚因子 $C=2$;核函数参数 $\gamma=1$ 。

由改进S变换提取到的训练样本通过SVM进行训练,测试样本的分类识别正确率如表2所示。

表2 基于改进S变换的SVM正确识别率

Tab.2 SVM recognition accuracy based on improved S-transform

电压暂降类型	测试样本量/组	正确识别量/组	正确识别率/%
单相短路故障	50	50	100
两相短路故障	50	50	100
三相短路故障	50	50	100
感应电动机启动	50	50	100
变压器投运	50	50	100

由标准S变换提取到的训练样本通过支持向量机(SVM)进行训练,测试样本的分类识别结果如表3所示。表4为标准S变换和改进S变换两种不同方法下的SVM正确识别率对比表。

表3 基于标准S变换的SVM正确识别率

Tab.3 SVM recognition accuracy based on standard S-transform

电压暂降类型	测试样本量/组	正确识别量/组	正确识别率/%
单相短路故障	50	50	100
两相短路故障	50	27	54
三相短路故障	50	32	64
感应电动机启动	50	50	100
变压器投运	50	50	100

表4 不同方法下的SVM正确识别率

Tab.4 Correct recognition rate of SVM under different methods

方法	测试样本量/组	正确识别量/组	正确识别率/%
标准S变换	250	209	83.6
改进S变换	250	250	100

由表4可知,基于改进S变换的电压暂降识别正确率可达到100%,而基于标准S变换的电压暂降识别正确率只有83.6%,改进S变换能更加精确地提取相关特征量,对配电网的不同电压暂降源具有更好的识别效果。

在此基础上分别添加30 dB,40 dB,50 dB的信噪比,对本文改进S变换-SVM方法进行测试,其电压暂降正确识别率结果如表5所示。

表5 改进S变换-SVM方法不同信噪比下的正确识别率

Tab.5 Correct recognition rate under different SNR based on improved S-transform

识别方法	信噪比(SNR)/dB	正确识别率/%
改进S变换-SVM	30	84.4
	40	84.8
	50	84.4

由此可见,本文方法在含噪声情况下识别正确率低于无噪声环境,且对于不同信噪比其敏感度较低,不具备较强的鲁棒性。因此本文方法在无噪声条件下的识别能力更强。

4.2 标准模型分析

采用标准模型对该方法进行验证分析,应用IEEE5节点系统为例验证本文算法,由于IEEE5节点系统中无感应电动机接入,因此分别选取单相短路故障、两相短路故障、三相短路故障和变压器投运共400组数据。

在标准模型下分别利用标准S变换-SVM和改进S变换-SVM方法对暂降源进行识别,其结果如表6所示。分类识别正确率对比情况如表7所示。

表6 分类识别正确率

Tab.6 Classification recognition accuracy

电压暂降类型	标准S变换-SVM正确识别率/%	改进S变换-SVM正确识别率/%
单相短路故障	42	100
两相短路故障	26	100
三相短路故障	100	100
变压器投运	100	100

表7 分类识别正确率对比

Tab.7 Comparison of classification and recognition accuracy

方法	测试样本量/组	正确识别量/组	正确识别率/%
标准S变换	200	134	67
改进S变换	200	200	100

由表7可知,在IEEE标准模型中,基于改进S变换的电压暂降识别正确率可达到100%,而基于标准S变换的电压暂降识别正确率为67%。

标准S变换-SVM方法不能正确识别单相短路故障和两相短路故障,因此表8和表9分别列出了IEEE5节点系统中某一点发生上述两种故障时,由标准S变换和改进S变换提取得到的暂降深度、基频幅值上升和下降斜率及暂降时间比四个特征指标的部分数据(该数据经式(6)处理),由于短路故障时突变点个数为2且无二次谐波,此表格中不再赘述。

表8 标准S变换提取的部分数据

Tab.8 Partial data extracted by standard S-transform

故障类型	暂降深度	上升斜率	下降斜率	暂降时间比	
1	单相短路	0.888 8	0.000 6	0.000 6	11.94
	两相短路	0.899 7	0.000 5	0.000 6	11.87
2	单相短路	0.892 4	0.000 5	0.000 6	14.27
	两相短路	0.897 0	0.000 5	0.000 6	14.03

表9 改进S变换提取的部分数据

Tab.9 Partial data extracted by improved S-transform

故障类型	暂降深度	上升斜率	下降斜率	暂降时间比	
1	单相短路	0.912 9	0.001 4	0.001 2	4.67
	两相短路	0.887 0	0.001 7	0.002 0	6.59
2	单相短路	0.911 8	0.001 4	0.001 4	7.00
	两相短路	0.913 2	0.001 3	0.001 5	3.39

分析表8和表9可得,改进S变换和标准S变换在相同故障点提取到的特征指标数据有较大差异。对比单相短路故障和两相短路故障的四个特征指标数据发现,经标准S变换提取到的数据较为接近,导致其后期识别正确率较低,而由改进S变换提取到的数据区分度较高,在数值上有明显差异,因此后期识别能力较好。

5 结论

文章分别分析了由三种不同相的接地短路故障、感应电动机启动和变压器投运引起的五种不同类型的电压暂降波形及其典型特征。在标准S变换的基础上引入两个调节因子,得到改进后的S变换,通过改进S变换的结果模矩阵得到五种电压暂降的基频幅值曲线和频率幅值包络线,提取暂降深度、突变点个数、基频幅值上升和下降斜率、二次谐波含有率和暂降时间比六个特征指标,将由改进S变换提取到的特征指标数据进行归一化处理作为支持向量机的输入量,实现对五种类别的电压暂降的精确识别。最后,经过仿真和标准测试数据验证,本文所提出的方法,在无噪声环境下对配电网不同电压暂降源类型的识别正确率达100%,远远高于标准S变换后的电压暂降识别正确率。

由此表明,改进S变换相比标准S变换,能够更加精确地提取电压暂降信号的特征量,其所提取到的特征指标数据更有辨识性,有效提高了支持向量机对不同电压暂降类型的识别正确率,是一种更加有效的电压暂降识别方法。

参考文献

[1] Stockwell R G, Mansina L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum; the S transform[J]. IEEE Trans on Signal Process, 1996, 44: 998-1001.

- [2] 程春和. 电力工程信号处理应用[D]. 昆明:昆明理工大学, 2008.
- [3] 赵洛印,李忠诚,王丹,等. 基于GWO-SVM的电压暂降扰动源识别[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 76-85.
- [4] 岳明道. 基于S变换和分类树的电网暂态电能质量扰动分类辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 32-37.
- [5] 吕干云,方奇品,蔡秀珊. 基于多分类支持向量机的电压暂降源识别[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 151-155.
- [6] 孙楚平,杨旭. 基于S变换模时频矩阵的电能质量扰动检测与识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 69-72.
- [7] 张静,白士贤,刁晓虹,等. 一种基于改进S变换的三相不平衡检测方法[J]. 电气传动, 2019, 49(1): 87-90.
- [8] 刘奇,周维维,卢伟国. 基于广义S变换的暂态电能质量扰动定位与识别[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 60-65.
- [9] 李冉. 基于改进S变换与支持向量机的电能质量扰动识别[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
- [10] 陈丽,王硕,孔维功. 于改进S变换的复合电压暂降源识别特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 27-33.
- [11] 卢彩霞,王新环,刘志超,等. 基于改进S变换-TT变换的电压暂降特性研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(4): 58-64.
- [12] Sabarimalai Manikandan M, Samantaray S R, Innocent Kamwa. Detection and classification of power quality disturbances using sparse signal decomposition on hybrid dictionaries[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(1): 27-37.
- [13] 徐健,王磊. 基于S变换模矩阵的电网扰动信号检测[J]. 电子测量技术, 2018, 41(21): 20-24.
- [14] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46-61.

收稿日期:2020-03-10

修改稿日期:2020-04-21