

配电网暂时过电压奇异值分解结合支持向量机的识别方法

付 华 赵天一

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要 针对配电网暂时过电压的辨识分类问题,提出一种结合时频矩阵奇异值分解和多级支持向量机的配电网暂时过电压辨识方法。利用变分模态分解、Hilbert 变换及带通滤波构造配电网暂时过电压零序电压波形的时频矩阵描述其时频特征。通过对时频矩阵进行奇异值分解,提取所获得波形奇异谱的分布参数作为特征向量,结合时域特征量输入多级支持向量机,对配电网暂时过电压进行自动辨识。通过仿真实验和测试,结果表明该识别方法具备训练时间短、识别率高和防干扰能力强的优势,可实现对配电网暂时过电压故障的有效辨识。

关键词 配电网故障 暂时过电压 变分模态分解 奇异值分解 多级支持向量机 自动辨识

中图分类号 TP3 TM93 **文献标识码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2019.04.036

IDENTIFICATION FOR DISTRIBUTION NETWORK BASED ON TEMPORAL OVERVOLTAGE SINGULAR VALUE DECOMPOSITION AND SUPPORT VECTOR MACHINE

Fu Hua Zhao Tianyi

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, Liaoning, China)

Abstract For the identification and classification of temporary overvoltage in distribution networks, we proposed a method of temporary overvoltage identification for distribution network based on singular value decomposition of time-frequency matrix and multi-level support vector machine. The variational modal decomposition, Hilbert transform and band-pass filtering were adopted to construct the time-frequency matrix of temporary overvoltage zero-sequence voltage waveforms in the distribution network to describe the time-frequency characteristics. Through singular value decomposition of time-frequency matrix, the distribution parameters of waveform singular spectrum were extracted as eigenvectors. Combined with time-domain eigenvalues, multi-level support vector machine was input to identify the temporary overvoltage in distribution network automatically. Through simulation experiments and tests, the results show that the recognition method has the advantages of short training time, high recognition rate and strong anti-interference ability. It can realize the effective identification of temporary overvoltage faults in distribution networks.

Keywords Distribution network failure Temporary overvoltage Variational mode decomposition Singular value decomposition Multi-level support vector machine Automatic identification

0 引 言

随着配电网规模逐渐扩大,电力线路增多,结构愈加繁杂,在实际运行中会受到各类故障的影响^[1]。过电压现象是影响系统稳定与电气设备安全工作的重要因素。而根据产生机理的不同,过电压这种非正常工

作现象也分为多个不同种类,其幅值、频率等特征不同,对系统产生的影响也不同。但当前所采用的电力系统过电压监测系统,不具备对过电压信号的分析辨识能力^[2]。因此,研究过电压信号的分析与类型辨识,对配电网稳定运行有重要意义。其中暂时过电压及弧光接地过电压因发生概率大且时间持续较长,对配电网的安全运行影响较为严重。

近年来,针对电力系统暂态过电压做了很多研究,包括故障定位、抑制措施和辨识方法等。文献[2]采用三相电压有效值时频小波能量通过阈值判断结合支持向量机识别,效果好但原理复杂处理相对困难。文献[3]将零序电压与三相电压的幅值和波形进行综合对比,方法简单但可靠性不高。文献[4]采用信号注入法,原理简单易于实施,但实际工程中难以达到。文献[5]采用正弦拟合法,方法简单运算速度快,但对数据质量要求较高,难以达到良好效果。文献[6]计算时域特征量结合小波时频特征量,通过支持向量机逐层识别。文献[7]利用电压波幅值,小波各频带统一化的能量,通过支持向量机分层识别。文献[8]利用小波变换计算峭度值,利用傅里叶变换分析识别。文献[9]结合信号产生的物理因素提取特征量进行分析。但目前大多分析辨识方法易受外界环境干扰,难以准确描述。

研究表明,变分模态分解(VMD)具有更优的鲁棒性,收敛快速,能有效地解决 Hilbert-Huang 变换中 EMD 算法存在的模态混叠影响及噪声干扰等问题^[10]。奇异值分解具备优良的不变性和稳定性,对扰动和噪声具有相对稳定性。根据上述分析,本文采用 VMD 对配电网采集的过电压信号进行分解,然后对分解后得到的模态分量进行 Hilbert 变换并构造出零序电压信号的时频矩阵。通过对该矩阵进行奇异值分解以获取用于状态辨识的特征向量的奇异谱参数,同时构建多级向量机用作辨识的分类器。最后向多级 SVM 分类器中输入获得的特征向量,以实行对配电网暂时过电压的辨识。

1 过电压信号分解及时频矩阵构造方法

1.1 过电压信号分解

使用 VMD 算法对变分框架中的约束变分模型求解,将过电压零序电压信号自适应地分解,得到若干个有限带宽的 IMF_s 分量^[11],以实现信号分量的频率分离,其分解过程为变分问题的构造与求解如下:

1.1.1 构造变分问题

(1) 将本征模态函数定设定为一个有限带宽的调幅调频信号:

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\varphi_k(t))$$

式中: $A_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的瞬时幅值, $\omega_k = \varphi'_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的瞬时频率。

(2) 经过解调,构建解析信号:

$$\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t)$$

(3) 预测中心频率 $e^{-j\omega_k t}$ 后,混频,即把每个 IMF 频谱调节到基频带上,得:

$$\left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t}$$

(4) 计算平方 L^2 范数以估计带宽,构造优化变分模型:

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\}$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t)$$

式中: $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_K\}$ 表示得到的 K 个分量; $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\}$ 表示 $u_k(t)$ 的中心频率。

1.1.2 变分模态求解

(1) 引进二次惩罚因子 α 和拉格朗日算子 $\lambda(t)$, 建立增广 lagrange 函数 $L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda)$, 把变分问题从约束性转变成非约束性。其中 α 保证了信号重构后的准确性,而 $\lambda(t)$ 保证了约束条件的严格性。

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \rangle$$

(2) 用乘数交替方向法更新 $\{u_k\}$ 、 $\{\omega_k\}$ 和 λ , 并求取变分模型的最优解:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \lambda \hat{u}(\omega) / 2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2}$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}$$

1.2 时频矩阵构造

为增强不同信号间的可比性,更详细地描绘信号的局部特征,采用 Hilbert 变换和带通滤波的算法构造信号的时频矩阵^[14]。设信号的采集样本点个数为 n , 经过带通滤波进行分解到 m 个子频谱带中,各个子频谱带中的波形数据点为 $a(ij)$, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$, 则得其时频矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{(1,1)} & a_{(1,2)} & \cdots & a_{(1,n)} \\ a_{(2,1)} & a_{(2,2)} & \cdots & a_{(2,n)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{(m,1)} & a_{(m,2)} & \cdots & a_{(m,n)} \end{bmatrix}$$

在对配电网过电压故障波形进行时频矩阵求解的进程中,发现其信号暂态瞬时频率都于 $0 \sim 3$ KHz 范围内集中,故可将此范围作为带通滤波总的频带宽幅度。对于过电压的零序电压信号 $u_0(t)$, 在 10 KHz 的采样频率下,其两周波内采样点数 $n = 400$ 。对瞬时频率进

行等间隔划分,使时频矩阵可以更好地体现出零序电压信号的暂态部分高低频特征。选取 $m = 10$, 则将其平均分为 10 个子频带, 每一个子频带幅度范围为 300 Hz, 各个子频带的波形数据点为 $a_{(ij)}$, $i = 1, 2, \dots, 10$; $j = 1, 2, \dots, 400$, 则零序电压的时频矩阵为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{(1,1)} & a_{(1,2)} & \cdots & a_{(1,400)} \\ a_{(2,1)} & a_{(2,2)} & \cdots & a_{(2,400)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{(10,1)} & a_{(10,2)} & \cdots & a_{(10,400)} \end{bmatrix}$$

式中: \mathbf{A} 的行表示滤波后的各个子频带的重构波形, 列表示采集样本对应的时间点。

2 过电压信号特征量提取方法与选择

2.1 时频矩阵奇异值分解

根据 SVD 理论, 对于上述的零序电压时频矩阵 $\mathbf{A}_{10 \times 400}$, 秩为 $r = 10$, 则可以找到两个正交酉矩阵 $\mathbf{P}_{10 \times 10}$ 和 $\mathbf{Q}_{400 \times 400}$ 和一个对角矩阵 $\mathbf{\Lambda}$, 使下列等式成立:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}\mathbf{Q}^T \\ \mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{10}, 0, \dots, 0) \\ r = \text{rank}(\mathbf{A}) = \min(m, n) = 10 \\ \mathbf{A} = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}\mathbf{Q}^T = \sum_{i=1}^{10} \lambda_i p_i q_i^T = \sum_{i=1}^{10} \lambda_i \mathbf{A}_i \end{cases}$$

式中: λ_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) 为矩阵 $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$ 的特征值, 即 \mathbf{A} 的奇异值; $r = 10$ 为奇异值阶数; $\text{rank}(\mathbf{A})$ 表示求 \mathbf{A} 的秩。

p_i, q_i 分别为 \mathbf{P}, \mathbf{Q} 的第 i 列向量, \mathbf{A}_i 为 \mathbf{A} 的子矩阵。矩阵 \mathbf{A} 经过 SVD 后被分解为一序列子矩阵 \mathbf{A}_i 和与其映射的特征值 (即奇异值) λ_i , 二者可展现该子矩阵所涵盖的时频信息的量, 在一定水平上可代表此矩阵的特征模式^[12]。

当矩阵 \mathbf{A} 受到干扰时, 奇异值受影响的变化量较小, 是较为稳定的特征参量, 能够适应配电网较为复杂的运行环境。

2.2 过电压信号的特征提取

暂时过电压形式虽然较多, 但不同类型过电压所出现的概率和位置也有所不同。其中线性谐振在系统设计中即可避免, 故发生概率很低, 而空载线路容升效应和由于甩负荷引起的过电压, 则与系统的整体调度有关, 所以并不常见。参数谐振一般在发电厂出现, 线路和变电站一般不会发生。故在配电网中, 主要考虑辨识的暂时过电压即为铁磁谐振和单相接地故障。而弧光接地故障虽归类于操作过电压, 但由于其持续时间与暂时过电压为同一数量级, 通常放在一起研究分析。其中铁磁谐振又有分频谐振、基频 (工频) 谐振和

高频谐振三种, 由于分频和高频谐振的频率差异因素, 对它们的零序电压做频谱分析就很容易辨识, 而工频铁磁谐振的频率与接地故障同为工频, 难以准确区分。故本文主要针对配电网的工频铁磁谐振、单相金属性接地与弧光接地这三种过电压状况的辨识。

当这三种过电压发生后, 虽然三相电压的波形变化可能不尽然相同, 但它们的整体外在表现特征基本近似, 均呈现为两相电压升高而一相电压降低, 且在分析时需要分相进行判断。而在安全正常的运行状态下, 零序电压为 0, 而当出现过电压现象时, 在零序电压波形中会有三相电压波形变化的体现, 故可以采用零序电压为研究对象进行分析和处理。

不同故障信号的时频特征能够在时频矩阵奇异谱中呈现, 且不同过电压波形的不同阶次的相应奇异值的值和分列也存在一定差异, 故奇异值可用于配电网过电压识别的特征量。但随着奇异阶次上升, 对应的奇异值会衰减, 且高阶次的奇异值模值较小, 则需根据奇异值累计贡献率 K (一般选取 $K \geq 85\%$) 来选取前 M 阶奇异值作为主奇异值构造特征量。其中:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i}{\sum_{i=1}^r \lambda_i}$$

通过计算, 不同情况下的 M 值不同, 分布在 3 ~ 7 之间, 本文选取 $M = 6$ 。

为了减弱奇异值存有的列分散性的影响, 提高识别的准确率, 联合统计理论^[15], 采纳以下分布参数作为特征量。

零序电压时频矩阵奇异谱均值:

$$\lambda_{\text{ave}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \lambda_i$$

零序电压时频矩阵奇异谱标准差为:

$$S_{\text{std}} = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (\lambda_i - \lambda_{\text{ave}})^2}$$

零序电压时频矩阵奇异熵为:

$$\begin{cases} P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i} \\ S = \sum_{i=1}^6 (-P_i \lg P_i) \end{cases}$$

零序电压时频矩阵奇异脉冲因子为:

$$I = \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{ave}}}$$

为了更好地对过电压进行辨识, 从零序电压的时域特征量中选取零序电压的有效值和峭度值作为特征

量^[13],其中:

零序电压的有效值为:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_0^2(n)}$$

零序电压的峭度值为:

$$K_{ur} = \frac{N \sum_{n=1}^N U_0^4(n)}{[\sum_{n=1}^N U_0^2(n)]^2}$$

3 配电网暂时过电压识别的 SVM 识别模型构建

构建基于二叉树的多级 SVM 分类器对配电网暂时过电压特征向量进行逐级识别。设线性样本集为 (x_i, y_i) , 其中 $x_i \in R^n$ 为输入样本特征向量; $y_i \in \{1, -1\}$ 为对应的样本类别。若样本集可分, 则存在超平面: $(\omega \cdot x) + b = 0$ 使样本中两类输入分散坐落在超平面的两边。其中 ω 为超平面法向量, b 为偏置。即有参数偶 (ω, b) , 使得 $y_i = \text{sgn}((\omega \cdot x_i) + b)$ 。

可将寻求超平面的任务等价于如下的最优化二次规划模型:

$$J = \min \Phi(\omega, \varepsilon) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + c \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$$

约束条件为:

$$y_i(\omega \phi(x_i) + b) + \varepsilon_i \geq 1 \quad (\varepsilon_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n)$$

式中: c 是惩罚参数, ε_i 是松弛因子, 用以对错分样本惩罚轻重的权衡, ϕ 是把样本 x_i 映射到高维线性空间的函数。

引进 Lagrange 乘法法对该模型求解, 得到最终的分类准则为:

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i^* K(x_i, x) + b^*\right)$$

式中: α_i^* 为最优 Lagrange 算子, $K(x_i, x)$ 为核函数。选择核函数时, 结合实际情况, 采用选择径向基函数作为核函数, 即:

$$K(x_i, x) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x\|^2}{\gamma^2}\right)$$

辨识分类分为训练和测试两个阶段, 训练阶段输入特征量与相应的标识符, 测试阶段输入特征量, 得到标识符结果对应各个过电压类型。

在用径向基函数作核函数时, 需要对核参数 γ 以及惩罚因子 c 进行选定。这两个参数能够直接影响 SVM 的分类性能, 故而需要通过参数寻优选择出这两个参数。采用不同的参数寻优方法, 由于算法的差异, 所选择出的参数也不同, 产生的支持向量也不相同, 从

而直接影响 SVM 的辨识效果。

分别选取遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)和网格搜索法(GS)对 γ 和 c 实行寻优, 取得的各项识别结果及对比如表 1 所示。

表 1 寻优方法仿真结果对比

寻优方法	寻优时间 /s	训练集准确率/%	测试集准确率/%
GA	861.26	98	94
PSO	2 443.42	89	89
GS	293.36	100	96

通过对比, 发现网格搜索法(GS)在时间上和准确率上均存在明显的优势, 更适合对此方法进行参数寻优。故通过网格搜索(GS)法对 SVM 参数实行寻优, 最终选取 $c = 22, \gamma = 0.01$ 。

4 实验仿真

4.1 仿真模型与辨识流程

针对配电网的上述三种过电压现象, 利用 ATP-EMTP 构建如图 1 所示的仿真模型, 通过对其仿真得到数据。并利用 MATLAB 对数据进行仿真分析, 辨识流程如图 2 所示。

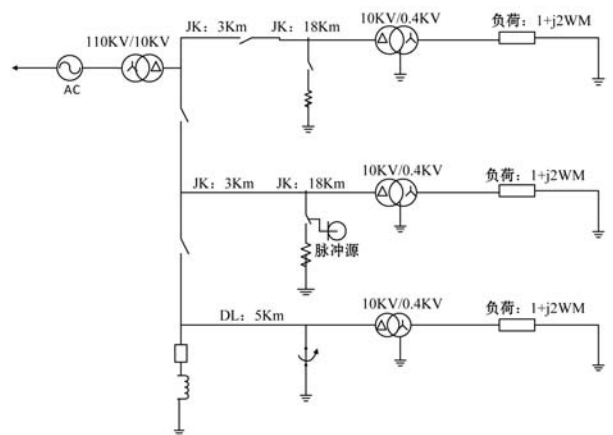


图 1 配电网暂时过电压仿真模型



图 2 辨识方法流程

图 1 中,对于 JK 表示的架空线路,线路参数如下:

(1) 正序参数: $R_1 = 0.17 \Omega/\text{km}, L_1 = 1.21 \text{ mH}/\text{km},$

$C_1 = 9.7 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km};$

(2) 零序参数: $R_0 = 0.23 \Omega/\text{km}, L_0 = 5.5 \text{ mH}/\text{km},$

$C_0 = 8 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}。$

对于 DL 表示的电缆线路,线路参数如下:

(1) 正序参数: $R_1 = 0.27 \Omega/\text{km}, L_1 = 0.26 \text{ mH}/\text{km},$

$C_1 = 3.4 \times 10^{-7} \text{ F}/\text{km};$

(2) 零序参数: $R_0 = 2.7 \Omega/\text{km}, L_0 = 1.02 \text{ mH}/\text{km},$

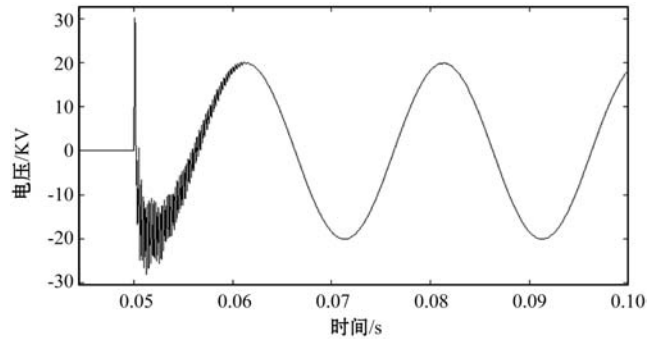
$C_0 = 2.8 \times 10^{-7} \text{ F}/\text{km}。$

4.2 过电压信号仿真及分析

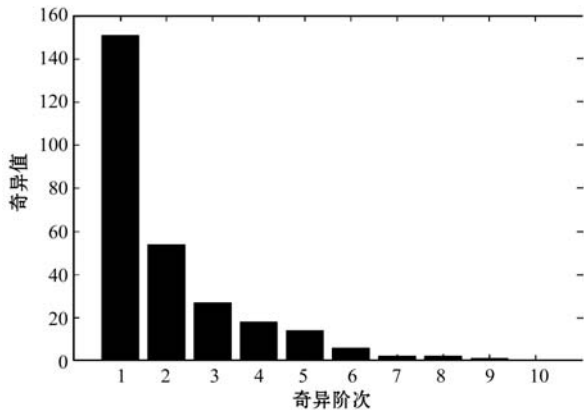
通过 ATP-EMTP 对三种过电压故障进行仿真,得到其零序电压信号,对数据进行分析处理后得到其奇异谱。

4.2.1 单相金属性接地过电压

故障发生于 0.05 s,断开全部线路后,闭合 L1 线路。得到单相金属性接地零序电压及其奇异谱如图 3 所示。



(a) 零序电压波形

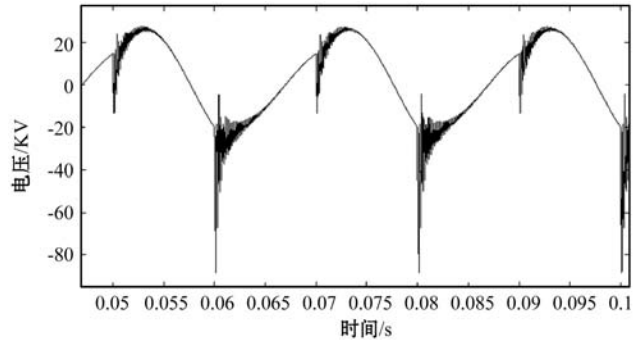


(b) 奇异值谱图

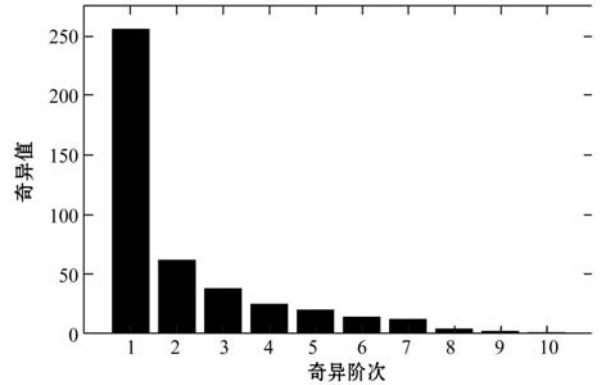
图 3 单相金属性接地零序电压波形及其奇异谱

4.2.2 弧光接地过电压

故障发生于 0.05 s,断开全部线路后,闭合 L2 线路。得到弧光接地零序电压及其奇异谱如图 4 所示。



(a) 零序电压波形

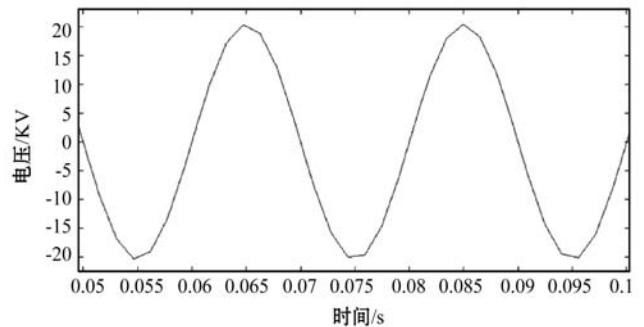


(b) 奇异值谱图

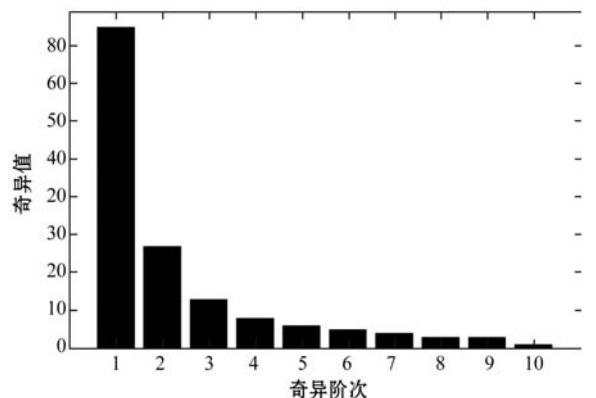
图 4 弧光接地零序电压波形及其奇异谱

4.2.3 工频铁磁谐振

断开全部线路后,闭合 L3 线路,线路于 -1 s 时发生单相金属性接地故障,0.05 s 断开故障点,激发线路工频铁磁谐振,其零序电压及其奇异谱如图 5 所示。



(a) 零序电压波形



(b) 奇异值谱图

图 5 工频铁磁谐振零序电压波形及其奇异谱

4.3 识别结果及适应性

4.3.1 测试识别结果

通过仿真获取三种过电压数据 200 组,其中 100 组用于对 SVM 进行训练的训练样本,另外 100 组作为测试样本,分别在 SVM 和 BP 神经网络中输入进行判别并比较。得到识别结果如表 2 所示。

表 2 测试识别结果对比

训练次数		SVM	BP 神经网络
		1	12
训练时间/s		5.2	73.6
识别率	弧光接地	100%	88%
	单相金属性接地	98%	95%
	工频铁磁谐振	96%	79%
平均准确率		98%	87.3%

从表 2 中可以看出,相比较 BP 神经网络,SVM 在训练样本和次数、训练时间、识别准确率以及收敛性上均有着明显优势,且对样本数量的依赖较小,更适合数据较少时的过电压辨识。

4.3.2 抗干扰能力

考虑到实际工程中配电网在录波数据时存在的噪声分量的干扰,会对识别结果产生影响。为研究辨识方法在噪声环境下的适应性,在过电压零序电压信号中先后加入 20、30 和 40 dB 的高斯白噪声,测试不同噪声环境下的识别准确性,分析其抗干扰能力。测试结果如表 3 所示。

表 3 不同等级信噪比下测试识别准确率

信噪比/dB	测试样本容量	识别准确率/%
20	50	94
30	50	96
40	50	92

由表 2 可知,在不同程度的噪声影响下,该方法依然可以保证较好的辨识准确率,说明其具备较强的抗干扰能力,能够适应不同的工况环境。

5 结语

本文提出了一种时频矩阵 SVD 与多级支持向量机结合的暂时过电压识别方法。通过对利用 VMD、Hilbert 变换及带通滤波算法构造的时频矩阵进行奇异值分解,结合统计理论和过电压时域特征提取特征量,输入到多级 SVM 中以完成对暂时过电压的辨识。

通过仿真实验分析,并在不同程度噪声影响下进行测试,结果表明该方法可以实现对暂时过电压的快速准确辨识,并且具备较强的抗干扰能力,能够很好地适应不同工况环境,具备良好的实用性。

参 考 文 献

- [1] Zhang J, He Z Y, Lin S, et al. An ANFIS-based fault classification approach in power distribution system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 49(1): 243-252.
- [2] 杨庆,赵洪彬,司马文霞,等.基于阈值判断和支持向量机的电网实测过电压识别[J].高电压技术,2016,42(10): 3188-3198.
- [3] 齐郑,董迪,杨以涵.中性点不接地系统铁磁谐振与单相接地辨识技术[J].电力系统自动化,2010,34(1): 55-58,83.
- [4] 姜杰,赵广泉,孙小江,等.基于信号注入法的铁磁谐振与单相接地故障辨识[J].电测与仪表,2012,49(3): 46-49.
- [5] 姜杰,赵广泉,张肖,等.利用正弦拟合法的铁磁谐振与单相接地辨识[J].重庆大学学报,2014,37(8): 34-37.
- [6] 杜林,李欣,王丽蓉,等.电力系统暂时过电压多级支持向量机分层识别[J].电力系统保护与控制,2012, 40(4): 26-31.
- [7] 黄艳玲,司马文霞,杨庆,等.基于实测数据的电力系统过电压分类识别[J].电力系统自动化,2012, 36(4): 85-90.
- [8] 杜林,李欣,吴高林,等.采用 3 类特征参量比值法的铁磁谐振过电压识别[J].高电压技术,2011,37(9): 2241-2249.
- [9] 黄艳玲,司马文霞,杨庆,等.电力系统实测过电压信号的特征量提取与验证[J].高电压技术,2013, 39(1): 60-66.
- [10] 贾亚飞,朱永利,王刘旺.基于 VMD 和 Wigner-Ville 分布的局放信号时频分析[J].系统仿真学报,2018, 30(2): 569-578.
- [11] 朱永利,贾亚飞,王刘旺,等.基于改进变分模态分解和 Hilbert 变换的变压器局部放电信号特征提取及分类[J].电工技术学报,2017,32(9): 221-235.
- [12] 郭谋发,徐丽兰,缪希仁,等.采用时频矩阵奇异值分解的配电开关振动信号特征量提取方法[J].中国电机工程学报,2014,34(28): 4990-4997.
- [13] 杨勇,李立涅,杜林,等.采用时频矩阵奇异值分解和多级支持向量机的雷电及操作过电压识别[J].电网技术, 2012,36(8): 31-37.
- [14] 郭谋发,游林旭,洪翠,等.基于 LCD-Hilbert 谱奇异值和多级支持向量机的配电网故障识别方法[J].高电压技术,2017,43(4): 1239-1247.

同步。引入尺度空间理论,并稳定特征点为中心,建立局部特征不变区域,增强其对尺度变换的稳健性;通过选择鲁棒特征区域,基于水印嵌入方法,将加密后的二值水印隐藏到鲁棒区域对应重要的 *Bandelet* 系数中,完成水印嵌入。测试数据显示了所提技术具备较高的不可感知性与抗几何攻击能力。

由于所提算法是选择部分鲁棒区域作为水印嵌入位置,限制了水印容量,而且采用了 SIFT 变换,增加了算法的时耗。后续将对所提算法进行优化,在兼顾不可感知性与鲁棒性的同时,尽可能降低算法的时耗,以提高效率。

参 考 文 献

- [1] Zong T R, Xiang Y, Natgunanathan I. Robust Histogram Shape-Based Method for Image Watermarking [J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Visual*, 2015, 25(5): 717-729.
- [2] 李红日,方遼. 基于误差扩展与像素容量评估的图像水印算法[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(10): 109-118.
- [3] 王胜,解辉,张福泉. 利用边缘检测与 Zernike 矩的半脆弱图像水印算法[J]. *计算机科学与探索*, 2018, 12(4): 629-641.
- [4] 齐向明,徐嫚,李玥. 一种尺度空间特征区域的强鲁棒性水印算法[J]. *计算机应用研究*, 2018, 36(7): 1-9.
- [5] Munib S, Khan A. Robust image watermarking technique using triangular regions and Zernike moments for quantization based embedding[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76(6): 8695-8710.
- [6] Niu P P, Wang X Y, Liu Y N. A robust color image watermarking using local invariant significant bitplane histogram [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76(3): 3403-3433.
- [7] Zhang Y P, Wang C Y, Zhou X. RST Resilient Watermarking Scheme Based on DWT-SVD and Scale-Invariant Feature Transform [J]. *Algorithms*, 2017, 10(2): 1-21.
- [8] Wang X Y, Liu Y N, Han M M. Local Quaternion PHT Based Robust Color Image Watermarking Algorithm [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, 38(10): 678-694.
- [9] Chen Y. Improved SIFT image registration algorithm on characteristic statistical distributions and consistency constraint[J]. *Optik—International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(2): 900-911.
- [10] Tsai J, Huang W, Kuo Y. Joint Robustness and Security Enhancement for Feature-Based Image Watermarking Using Invariant Feature Regions [J]. *Signal Process*, 2012, 92(6): 1431-1445.
- [11] Du X P, Chen H, Liu Z J. Hyperspectral and high-resolution image fusion based on second generation *Bandelet* transform [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(6): 1-9.
- [12] Nag A, Singh J P, Khan S. Image encryption using affine transform and XOR operation[C]//*Proceedings of International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies (ICSCCN)*, 2011, 309-312.
- [13] 陈青,孙彦飞,郭功勋. 基于 Harris 角点的抗几何攻击数字水印算法研究[J]. *包装工程*, 2018, 39(13): 188-193.
- [14] Wang C Y, Zhang Y P, Zhou X. Robust Image Watermarking Algorithm Based on ASIFT against Geometric Attacks [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(3): 410-429.
- [15] Birajdar G K, Mankar V H. Blind method for rescaling detection and rescale factor estimation in digital images using periodic properties of interpolation [J]. *AEU: International Journal of Electronics and Communications*, 2014, 68(7): 644-652.
- [16] 陈琳,王建鹏. 最优像素调整耦合基因算法的高容量图像隐写研究[J]. *计算机应用研究*, 2015, 32(8): 2429-2432.
- [17] 姚军财. 基于小波变换和奇异值分解的图像水印算法研究[J]. *光学技术*, 2017, 43(5): 439-444.

(上接第 235 页)

- [15] 高伟,陈伟凡,杨耿杰,等. 基于奇异值分解和多级支持向量机的配电网故障类型识别[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(2): 62-71.
- [16] Mokryani G, Siano P, Piccolo A. Identification of ferroresonance based on S-transform and support vector machine [J]. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2010, 18(9): 1412-1424.
- [17] 周艳真,吴俊勇,冀鲁豫,等. 基于两阶段支持向量机的电力系统暂态稳定预测及预防控制[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 137-147.
- [18] Gopakumar P, Reddy M J B, Mohanta D K. Adaptive fault identification and classification methodology for smart power grids using synchronous phasor angle measurements [J]. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 2015, 9(2): 133-145.
- [19] Saber A, Emam A, Amer R. Discrete wavelet transform and support vector machine-based parallel transmission line faults classification [J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2016, 11(1): 43-48.
- [20] 杨川,杨耿杰,高伟,等. 10kV 配电网内部过电压录波启动判据分析[J]. *电气技术*, 2017(10): 36-45.