



# 基于多方法融合和多级支持向量机的电力系统过电压辨识技术研究

喻 宙<sup>1</sup>, 张育善<sup>2</sup>, 赵庆杰<sup>2</sup>

(1. 郑州电力高等专科学校 发展质量部, 河南 郑州 450000;  
2. 郑州电力高等专科学校 教务处, 河南 郑州 450000)

**摘 要:**提出了一种多方法融合和多级支持向量机的电力系统过电压辨识方案,对铁磁谐振、不对称短路及弧光接地等5种过电压进行辨识,通过多尺度时频矩阵奇异值分解、中性点运行方式、时域、频域和小波分析多角度构造出特征量,并将特征量输入多级支持向量机,进行过电压的辨识。对变电站实测的5种过电压信号辨识结果表明:所提取的特征量具有较高区分度,辨识准确率高。

**关键词:**过电压;模式辨识;奇异值分解;小波变换;支持向量机

中图分类号: F276.5

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2021) 03-0106-06

DOI: 10.19899/j.cnki.42-1669/Z.2021.04.020

## 一、背景分析

过电压造成的绝缘事故,是电力系统主要故障类型之一,随着电压等级和输送容量的提高,电力系统过电压造成的危害愈发严重,尤其对特高压骨干网架的影响越来越大,因此,电力系统过电压辨识研究是发展坚强智能电网的重要课题。

目前,国内外学者普遍采用机器学习的方式进行研究,包括了:神经网络<sup>[1][2]</sup>,支持向量机<sup>[3][4]</sup>,聚类<sup>[5]</sup>,模糊推理<sup>[6]</sup>等方法。在特征量提取方面,文献<sup>[7]</sup>采用经验模态分解提取反映电弧故障信号局部特性的本征模态函数分量,通过分析本征模态函数分量的方差贡献率,确定表征各类负载电弧故障主要特征信息,提取前5阶本征模态函数分量能量比为特征

向量,但分解时会出现模态混叠、端点效应等问题,除此之外,分解包含不同时间尺度的过电压信号后的本征模态函数分量并不唯一。文献<sup>[8]</sup>通过傅里叶变换及小波变换提取3类比值特征量,其能够反映铁磁谐振过电压,但傅里叶变换对信号的时域分析能力不足,无法反应信号的瞬时幅频特性,且存在解析分辨率不足、频谱泄漏等问题,不适用于非平稳信号的研究。文献<sup>[2]</sup>利用希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)得到瞬时幅值谱、边际谱和时频谱3类特征量,同样,分解时也会出现模态混叠、端点效应等问题。文献<sup>[2]</sup>采用分形理论,利用过电压波形与其类型的联系,通过各种类别过电压波形形态的差异化,进行盒子维度数的区分,来获得过电压

收稿日期:2020-10-16

基金项目:2021年度河南省高等学校重点科研项目“多点布局电池储能系统中虚拟同步发电机技术的应用研究”(项目编号:21B470010)。

作者简介:喻宙(1985-),男,河南郑州人,郑州电力高等专科学校发展质量部副主任,研究方向:电力系统自动化技术;张育善(1985-),男,河南郑州人,郑州电力高等专科学校教务处教师,研究方向:电气工程;赵庆杰(1982-),男,河南郑州人,郑州电力高等专科学校教务处教师,研究方向:电气工程。

辨识特征,然而,分形理论分析的是信号波形的几何特征,所反映的特征与信号成因及内在机理的联系不够紧密。

基于以上分析,本文从多尺度时频矩阵奇异值分解、中性点运行方式、时域、频域和小波分析多角度提取并构造出区分度较高的特征量,同时,利用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)来解决小样本分类,构建多级支持向量机的分类器,并将特征向量输入多级 SVM 分类器进行过电压的辨识。仿真结

果验证了所提辨识方案、特征提取手段和分类算法的有效性。

## 二、过电压分类

在电力系统中存在着不同类型的过电压,不同过电压具有不同幅值、频率和持续时间等特点,有必要将它们进行区分。过电压根据能量来源,分为外部过电压(或雷电过电压)和内部过电压两大类,如图 1 所示。

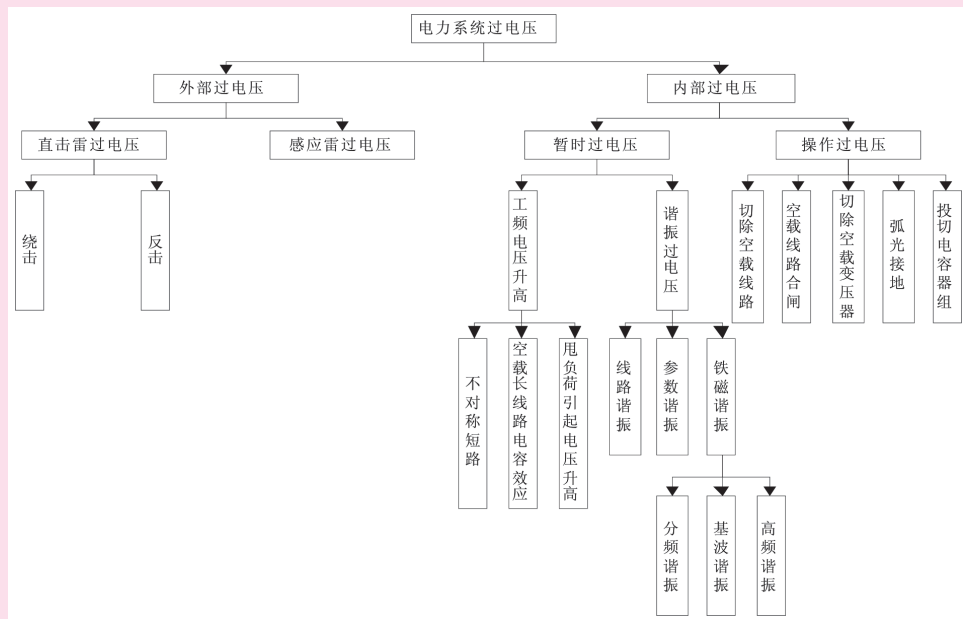


图 1 电力系统过电压分类图

电力系统过电压的机理各不相同,相互之间存在从属关系。目前,电力系统过电压分析和辨识算法大多用单一的算法和特征来区分多种过电压<sup>[9]</sup>。这样做有三大缺陷:其一,特征量有混叠的过电压辨识难度大;其二,程序拓展性小;其三,实时性低。

实际工程中要求实时性和准确性,因此,本文提出采取提取多种特征量,分层分步辨识的思路。其

中,分层指对于待辨识的对象进行层次结构划分,如图 1;分步是指辨识逻辑自上而下进行,每一层分类器的对象是上一层分类器辨识的结果。

采取这种方法,可使各个待区分对象通过不同分类器逐步被区分开,由于每个分类器需要区分对象数量和区分种类较少,辨识算法实时性较高。

所以,本文建立的过电压分类树,如图 2 所示。

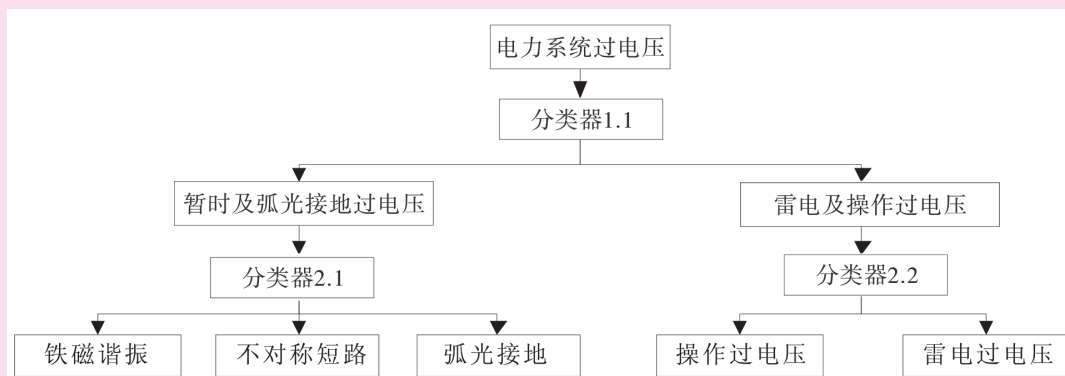


图 2 过电压分层辨识结构图

## 三、多方法融合的过电压特征量

## (一)多尺度时频矩阵奇异值分解特征量

矩阵的奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD),是通过将矩阵分解映射到奇异向量和奇异值对应的不同子空间中,以深度挖掘矩阵的代数特征,并降低维数<sup>[10][11]</sup>。

时频矩阵的奇异值可反映过电压信号的时频特征,因此,可作为外部过电压和操作过电压辨识的特征量。

所以,本文选用的特征量如下:

1. 奇异谱均值  $\lambda_{ave}$ 

$$\lambda_{ave} = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} \lambda_i \quad \text{式 1}$$

式中  $\lambda_i$  反映的是过电压能量的大小;  $\lambda_{ave}$  为各奇异阶次在不同子空间能量的平均分布程度;

2. 奇异谱脉冲因子  $I_\lambda$ 

$$I_\lambda = \lambda_{max} / \lambda_{ave} \quad \text{式 2}$$

式中  $I_\lambda$  表征奇异值的脉冲特性;

3. 奇异熵  $S_{sum}$ 

$$\begin{cases} S_{sum} = -\sum_{i=1}^{13} p_i \lg p_i \\ p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{13} \lambda_i} \end{cases} \quad \text{式 3}$$

式中  $S_{sum}$  反映的是过电压信号经奇异值分解到不同子空间的混乱程度;

4. 奇异谱标准差  $S_{td}$ 

$$S_{td} = \sqrt{\frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} (\lambda_i - \lambda_{ave})^2} \quad \text{式 4}$$

式中  $S_{td}$  反映各阶次奇异值的离散程度。

## (二)电力系统中性点运行方式特征量

电力系统中不同类型的过电压发生概率,和中性点运行方式有关,对于中性点非直接地的系统,发生短路故障时,可能会出现不对称短路和弧光接地。而对于中性点直接地的系统,则不会出现以上两种过电压,所以,中性点接地方式  $G$  可作为特征量。

$$\begin{cases} \sqrt{N \max} & \text{中性点非直接接地} \\ & \text{中性点直接接地} \end{cases} \quad \text{式 5}$$

## (三)时域特征量

时域特征量,是对过电压采样序列  $U(n)$  的时域特征计算,获得过电压的特征指标。提取的时域特征量有:

## 1. 三相电压时域特征

(1)最大过电压倍数  $K_{max}$ 

$$K_{max} = \frac{\max(U_A(n), U_B(n), U_C(n))}{U_m} \quad \text{式 6}$$

式中  $U_m$  是系统的最高运行相电压,  $K_{max}$  是过电压发生时的严重程度。

(2)最大波形陡度  $\alpha_{max}$ 

$$\alpha_{max} = \frac{\max(\Delta U_A(n), \Delta U_B(n), \Delta U_C(n))}{\Delta n} \quad \text{式 7}$$

式中  $\alpha_{max}$  表征的是过电压波形的波头上升速度的快慢。

(3)波形最小相似度  $S_{min}$ 

$$\begin{cases} S_{min} = \min(S_{AB}, S_{BC}, S_{AC}) \\ S = \left| \frac{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)y(n)}{\sqrt{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x(n)|^2 \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |y(n)|^2}} \right| \end{cases} \quad \text{式 8}$$

式中  $S_{min}$  是过电压三相波形的相似程度,  $S_{min}$  越大,则三相波形越相似,计算区间为过电压峰值前后的 0.5ms。

(4)过电压发生前后最小有效值  $U_{fmin}$  和  $U_{tmin}$ 

$$\begin{cases} U_{rms} = \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U(n)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ U_{fmin} = \min(U_{Afrms}, U_{Bfrms}, U_{Cfrms}) \\ U_{tmin} = \min(U_{Atrms}, U_{Btrms}, U_{Ctrms}) \end{cases} \quad \text{式 9}$$

式中  $U_{fmin}$  和  $U_{tmin}$  分别为过电压发生前后的三相电压最小有效值,计算区间为过电压发生前后的 10ms 和 80ms。

(5)相间峰值比值  $k_{pm}$ 

$$k_{pm} = \frac{\max(U_A(n), U_B(n), U_C(n))}{\min(U_A(n), U_B(n), U_C(n))} \quad \text{式 10}$$

式中  $k_{pm}$  为过电压三相最大峰值和最小峰值的比,表征的是过电压时三相电压的不平衡度。

(6)三相电压最小有效值  $U_{phm}$ 

$$U_{phm} = \min(U_{Arms}, U_{Brms}, U_{Crms}) \quad \text{式 11}$$

式中  $U_{Arms}$ ,  $U_{Brms}$ ,  $U_{Crms}$  分别为 100ms 内三相电压的有效值,当系统接地时,  $U_{phm}$  表征系统运行状态。

2. 零序电压  $U_0(n)$  时域特征(1)有效值  $U_{orms}$ 

$$U_{orms} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_0(n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 12}$$

式中  $U_{orms}$  表征的是零序电压在一段时间内的能量的大小。

(2) 绝对平均值  $U_{oave}$

$$U_{oave} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_o(n) \quad \text{式 13}$$

式中  $U_{oave}$  为零序电压幅值的平均分布情况。

(3) 裕度系数  $L_o$

$$L_o = \frac{1 \times 10^8 \cdot \max(|U_o(n)|)}{[\sum_{n=1}^N |U_o(n)|^2]^{\frac{1}{2}}} \quad \text{式 14}$$

式中  $L_o$  为极性中点到零序电压最大幅值的距离,  $L_o$  越大, 则极性中点距信号最大幅值越远。

(4) 峰值因子  $C_o$

$$C_o = \frac{(\max(U_o(n)) - \min(U_o(n)))}{2U_{orms}} \quad \text{式 15}$$

式中  $C_o$  为零序电压的振荡程度,  $C_o$  越大, 则零序电压振荡幅值距能量中心越远。

(5) 脉冲因子  $I_o$

$$I_o = \frac{(\max(U_o(n)) - \min(U_o(n)))}{2|U_{oave}|} \quad \text{式 16}$$

式中  $I_o$  为零序电压距幅值均值的远近,  $I_o$  越大, 则信号幅值距离均值越远, 振荡越剧烈。

(6) 波形系数  $P_o$

$$P_o = \frac{U_{orms}}{U_{oave}} \quad \text{式 17}$$

式中  $P_o$  为零序电压的能量强度与幅值均值的关系,  $P_o$  越大, 则能量分布越集中。

(7) Kurtosis 系数  $K_{our}$

$$K_{our} = \frac{N \sum_{n=1}^N (U_o(n))^4}{[\sum_{n=1}^N (U_o(n))^2]^2} \quad \text{式 18}$$

表 1 频带划分及特征量提取

	频带范围	特征量
高频部分 $U_H(n)$	1.5625k ~ Hz100k Hz	$U_{Horms}, U_{Hoave}, L_{Ho}, C_{Ho}, I_{Ho}, P_{Ho}, K_{Hour}$
中频部分 $U_M(n)$	48.83Hz ~ 1.5625k Hz	$U_{Morms}, U_{Moave}, L_{Mo}, C_{Mo}, I_{Mo}, P_{Mo}, K_{Mour}$
低频部分 $U_L(n)$	0 ~ 48.83Hz	$U_{Lorms}, U_{Loave}, L_{Lo}, C_{Lo}, I_{Lo}, P_{Lo}, K_{Lour}$

2. 采样频率为 5MHz, 计算区间为发生过电压前后 10ms

雷电及操作过电压的频率较高, 为描述其高、低频的时频特征, 在采样频率为 5MHz 下, 同样通过 sym4 小波, 对零序电压信号分解到 13 个不同的高、低频带上。根据式(21)计算各子频带的小波能量  $E_i$ , 作为其特征量:

式中  $K_{our}$  为零序电压的频数分布曲线顶端尖或平的指标,  $K_{our}$  越大, 表明信号顶端越尖。

(四) 频域特征量提取

若一个周期信号满足 Dirichlet 条件, 则可分解为傅里叶级数, 通过各次谐波幅值和相位与频率的关系可得出信号的幅值和相位的频谱特性。本文提出构造能量最小比值  $\lambda_{Emin}$  和频率比值  $\lambda_f$ 。

$$\begin{cases} \lambda_E = \frac{E_{f_1}}{E_{max}} \\ \lambda_{Emin} = \text{Min}(\lambda_{EA}, \lambda_{EB}, \lambda_{EC}) \end{cases} \quad \text{式 19}$$

$$\lambda_f = \frac{f_{max}}{f_1} \quad \text{式 20}$$

式中  $\lambda_{Emin}$  为谐波能量的比重,  $\lambda_f$  为主要谐波的次数,  $E_{f_1}$  为基频成分相对的能量;  $E_{max}$  为各次谐波成分最大值, 即  $E_{max} = \max(E_{f_n})$ ,  $n$  为谐波次数。

(五) 基于小波时频理论的过电压特征提取

小波变换是将信号变换到多个不同尺度的子空间中, 目的是将弱信号分布的特征突显在变换后子空间中<sup>[12]</sup>。

本文利用小波时频理论来提取过电压信号的时频特征。由于各种过电压的幅值、频率及持续时间各不相同, 故选取发生过电压前后的计算区间进行尺度分解。

1. 采样频率为 200kHz, 计算区间为发生过电压前后 100ms

弧光接地过电压由于电弧反复熄灭和重燃, 其有效信息多集中在 1kHz 以上, 而谐振过电压的频带范围在 0~1kHz。

由于过电压信号小波分解频带减半, 在采样频率为 200kHz 的情况下, 选取 sym4 小波对零序电压信号进行分解, 将频带划分为三部分, 分别进行特征量提取。

$$E_i = \sqrt{\sum_{n=0}^N U_i^2(n)} \quad \text{式 21}$$

式中  $i$  为小波分解尺度。

### 三、分类器特征量的选择

(一) 分类器 1.1 的特征量选择



分类器 1.1 主要解决雷电及操作过电压与暂时及弧光接地过电压的分类辨识。雷电及操作过电压的暂态过程相对较小,一般在 5ms 以内;而暂时及弧光接地过电压持续时间相对较长,一般大于 10ms。

另外,由于故障时信息将会体现在零序电压上,故可将零序电压的时域特征量作为特征量,计算区间为 100ms。

## (二)分类器 2.1 的特征量选择

分类器 2.1 是解决弧光接地、铁磁谐振不与对称短路过电压的分类辨识问题。

对于弧光接地过电压,其等效频率大于 1k Hz,而暂时过电压的频带在 1k Hz 以内,故可将高频范围为内零序电压的时域特征作为特征量;

铁磁谐振过电压的频带区间在 800k Hz 以内,包含多种主要频率成分,其谐波能量比值  $\lambda_{Emin}$ 、谐波次数比值  $\lambda_f$  以及中频区间的零序电压时域特征可作为特征量。

而不对称短路过电压,由于故障后,某一相或两相电压的降低,故可将三相电压最小有效值  $U_{phm}$ ,以及中性点运行方式  $G$  作为特征量。

## (三)分类器 2.2 特征量

分类器 2.2 是实现雷电与操作过电压的区分,对于操作过电压,可将奇异值分解的特征值作为特征量;同时考虑到某些过电压操作前后,电压将从零增大到额定值或从额定值减小到零,故将过电压操作前后的三相最小有效值  $U_{fmin}$  和  $U_{imin}$  作为特征量。

雷电过电压发生时,因感应雷电发生时三相波形相似度较高,所以,将三相波形的相间峰值比值  $k_{pm}$  和最小相似度  $S_{min}$  作为特征量。另外,由于雷电与操作过电压的特征分布能被小波变换后的各层能量反映,故也可作为特征量。

综上,本文各分类器的输入特征量如表 2 所示。

表 2 各分类器过电压特征量

分类器	特征量
分类器 1.1	$U_{orms}, U_{oave}, L_o, C_o, I_o, P_o, K_{our}$
分类器 2.1	$U_{Horms}, U_{Hoave}, L_{Ho}, C_{Ho}, I_{Ho}, P_{Ho}, K_{Hour}, \lambda_f, \lambda_{Emin}, U_{Morms}, U_{Moave}, L_{Mo}, C_{Mo}, I_{Mo}, P_{Mo}, K_{Mour}, U_{phm}, G$
分类器 2.2	$\lambda_I, \lambda_{ave}, I_\lambda, S_{sum}, S_{id}, U_{fmin}, U_{imin}, S_{min}, k_{pm}, E_I \sim E_{13}$

## 五、实验结果及分析

支持向量机是基于统计学的机器学习方法<sup>[13]</sup>。SVM 将输入空间通过内积函数定义的非线性变换到一个高维空间,并在这个高维空间中求最优分类面。

本文 SVM 选择径向基函数作为核函数,其表达

式如下:

$$K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - x_k\|^2 / 2\sigma^2) \quad \text{式 22}$$

根据过电压分类的原理,采取了自上而下的分层辨识的思路,每一层的 SVM 都由相应的辨识算法实现。最小二乘支持向量机(LS-SVM)主要解决的是二分类问题,而对于多种过电压类型的辨识研究,则需建多个 LS-SVM,将其扩展到多分类问题的研究,并多分类的问题依次转化为二分类的问题。

本文算法分为三个主要步骤:

步骤一:提取特征量;

步骤二:训练分类器;

步骤三:分类器判决。

SVM 实现工具选用 LibSVM2.86。分类结果 ROC 曲线如图 3 所示。

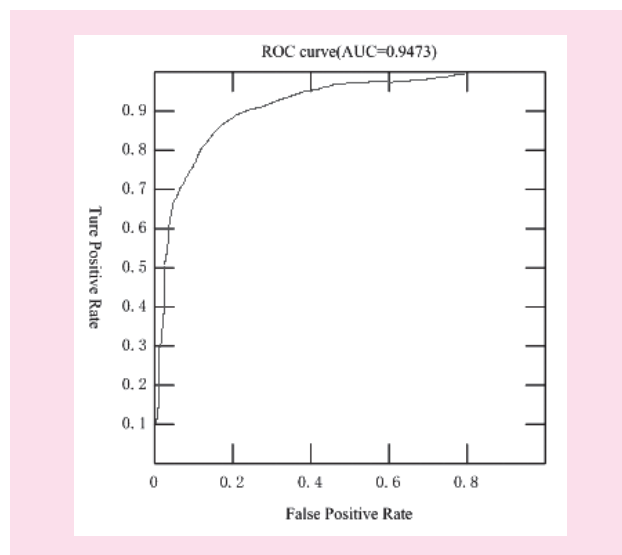


图 3 分类结果 ROC 曲线

表 3 分类结果统计

统计量	ANN 分类器
Accuracy(%)	0.8643
AUC	0.9473

表 3 中, Accuracy 表示模型预测的准确率, AUC (Area Under the ROC, AUC) 是曲线以下区域与单位面积的比值, AUC 越大平均性能越好。采用本文所提出的模型和算法来进行过电压分类辨识, 准确率为 86.43%, AUC 为 94.73%。

## 六、结语

本文提出了一种基于支持向量机的过电压分层步辨识方法,对过电压进行了分类辨识,达到了预期的实验结果。但由于特征信息冗余,还需对特征量的有效性进行评估,另外,由于实测样本种类有限,

过电压分类辨识方法还需进一步完善,这也是下一步的研究方向。

#### 参考文献:

- [1] 张士文,张峰,王子骏,等.一种基于小波变换能量与神经网络结合的串联型故障电弧辨识方法[J].电工技术学报,2014,(6):290-295+302.
- [2] 司马文霞,王荆,杨庆,等.Hilbert-Huang变换在电力系统过电压辨识中的应用[J].高电压技术,2010,(6):1480-1486.
- [3] 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辨识[J].高电压技术,2016,(10):3188-3198.
- [4] 罗忠远.基于希尔伯特-黄变换和模糊支持向量机的输电线路故障分类方法研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [5] 司马文霞,谢博,杨庆,等.特高压输电线路雷电过电压的分类识别方法[J].高电压技术,2010,(2):306-312.
- [6] Zhu T X, Tso S K, Lo K L. Wavelet-based fuzzy reasoning approach to power-quality disturbance recognition[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, (4): 1928-1935.
- [7] 张丽萍,缪希仁,石敦义.基于EMD和ELM的低压电弧故障辨识方法的研究[J].电机与控制学报,2016,(9):54-60.
- [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辨识[J].高电压技术,2011,(9):2241-2249.
- [9] 连丽珍,曹建玲,苏小芳,等.基于分形理论的内部过电压辨识技术[J].武汉大学学报(工学版),2012,(2):225-228.
- [10] Wang J., Yang Q., Sima W., et al. A smart over-voltage online monitoring and identification system[J]. Energies, 2011, (4): 599-615.
- [11] 郭良峰.基于遗传算法的电力系统过电压分层模糊聚类辨识[D].重庆:重庆大学,2009.
- [12] 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辨识[J].电力系统自动化,2012,(4):85-90.
- [13] 张学工.统计学习理论的本质[M].北京:清华大学出版社,1999.

[责任编辑:刘 骋]

## Research on Excessive Voltage Identification Technology Based on Multi-method Fusion and Multi-level Support Vector Machine

YU Zhou<sup>1</sup>, ZHANG Yu-shan<sup>2</sup>, ZHAO Qing-jie<sup>3</sup>

(1. Development of Quality Department, Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450000, China;  
2. Office of Academic, Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** This paper proposes a multi-method fusion and multi-stage support vector machine for overvoltage identification protocol, 5 kinds of overvoltage such as ferromagnetic resonance, asymmetrical short circuit, and arc grounding, by multi-scale time frequency matrix odd value decomposition, Neutral point operation, time domain, frequency domain, and wavelet analysis multi-angle construct the feature amount, and input the feature amount input multi-stage support vector machine, and the identification of overvoltage. The identification results of five kinds of overvoltage signals measured in substation show that the extracted characteristic measure has high discrimination and identification accuracy.

**Key words:** overvoltage; pattern identification; singular value decomposition; wavelet transform; support vector machine