

# 基于主元分析的牵引变电所互感器二次量异常故障在线识别方法

李朝阳,杨健维,王 玘,何正友

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

**摘要:** 在分析牵引变电所内各互感器测量有效值之间存在的相关关系的基础上,提出了基于主元分析(PCA)方法的互感器二次量异常故障在线识别方法。定义了 SPE 均值及 SPE 贡献均值分别作为故障检测和识别的指标,在一定程度上消除了利用单个有效值样本得到的识别结果的不确定性。以某实际自耦变压器(AT)牵引变电所作为算例进行仿真验证,仿真结果表明所提方法不需要额外增加测量设备,能够准确地识别出牵引变电所中发生二次量异常故障的互感器,且能够方便地应用于具有不同主接线拓扑结构的牵引变电所。

**关键词:** 牵引; 牵引变电所; 互感器; 故障检测; 二次量; 测量; 主元分析

**中图分类号:** TM 45

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.016

## 0 引言

互感器是牵引变电所内重要的设备,它们将一次系统的高电压、大电流转变为低电压、小电流,供计量、监控及继电保护使用,对其准确性要求很高。二次电流、电压异常分别是电流互感器和电压互感器的常见故障,通常原因有接线错误、连接接触不良、误差超标、绝缘故障、电流互感器铁芯稳态饱和等<sup>[1-4]</sup>,如绝缘薄膜局部劣质或老化等将导致电流互感器二次绕组匝间短路,使得二次电流偏大,严重影响测量的准确性甚至是继电保护动作的正确性,为牵引供电系统留下安全隐患<sup>[5-6]</sup>。目前针对互感器二次量异常故障的在线识别方法主要是基于信号处理的方法和基于模型的方法。基于信号处理的方法<sup>[7-8]</sup>主要是通过检测互感器二次侧信号突变情况,结合线路电气量之间的关联性识别发生二次量异常故障的互感器。但是当互感器发生渐变型故障时,故障信号在时域表现为跨度大且局部特征不明显,很难直接用于故障判断,且易受互感器测量误差的影响。为了克服基于信号处理的方法的这些缺点,有学者提出用基于模型的方法进行电流互感器二次量异常故障的在线识别,包括电流观测器模型<sup>[9]</sup>、基于基尔霍夫电流定律的互感器解析冗余模型<sup>[10]</sup>等。但是,基于电流观测器模型的方法依赖于所建模型的精确性,而基于基尔霍夫电流定律得到的互感器解析冗余关系存在误差较大的问题,影响诊断结果的准确性。另一方面,以上基于信号处理和基于模型的方法均需要采集互感器二次侧波形,而目前大多数牵引变电所并不具备该条件,所使用的数据采集与监视控

制(SCADA)系统只采集各互感器测量电流或电压有效值数据。且对于牵引变电所的互感器,除了存在一定的测量误差外,还存在牵引负荷快速波动且幅度大、工况变化快、环境恶劣等特点,使得这些方法更难以实用。

牵引供电系统各处互感器所反映的电气量之间不是彼此孤立的,而是存在着由系统拓扑结构、电路原理、能量守恒原理等决定的约束关系<sup>[10]</sup>,即存在一定的相关关系。当某互感器发生二次量异常故障不能准确反映相应电气量时,会导致当前各互感器测量值之间的相关关系发生改变。主元分析 PCA (Principal Component Analysis)是一种多元统计分析方法模型<sup>[11-16]</sup>,广泛应用于过程监控、过程故障诊断等领域。本文针对互感器二次量异常故障,在分析牵引变电所内各互感器测量有效值之间存在的相关关系的基础上,基于牵引变电所空载时的各互感器测量有效值数据,引入主元分析方法,并对传统故障检测和识别指标进行改进,给出了具体的在线识别发生二次量异常故障的互感器的方法。最后,依据某实际自耦变压器(AT)供电方式牵引变电所进行仿真建模和实验,来验证和分析本文方法的效果。

## 1 互感器测量有效值之间的相关关系分析

以一个典型的 AT 供电方式牵引变电所为例,分析各互感器所反映的电气量之间的相关关系。该牵引变电所的主接线(不考虑备用并适当简化)如图 1 所示。牵引变电所由 220 kV 电源供电,采用由 2 台单相三绕组变压器组成的 V/X 接线型式牵引变压器。该牵引变电所内的电流互感器有 7 组,电压互感器有 5 组,即:TA<sub>1</sub>、TA<sub>2</sub>、TA<sub>3</sub>、TA<sub>4</sub>、TA<sub>5</sub>、TA<sub>6</sub>、TA<sub>7</sub>、TV<sub>1</sub>、TV<sub>2</sub>、TV<sub>3</sub>、TV<sub>4</sub>、TV<sub>5</sub>。

这样可以得到系统的 22 个电流或电压瞬时值

收稿日期:2015-01-04;修回日期:2015-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1234203,U1134104)  
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U1234203,U1134104)

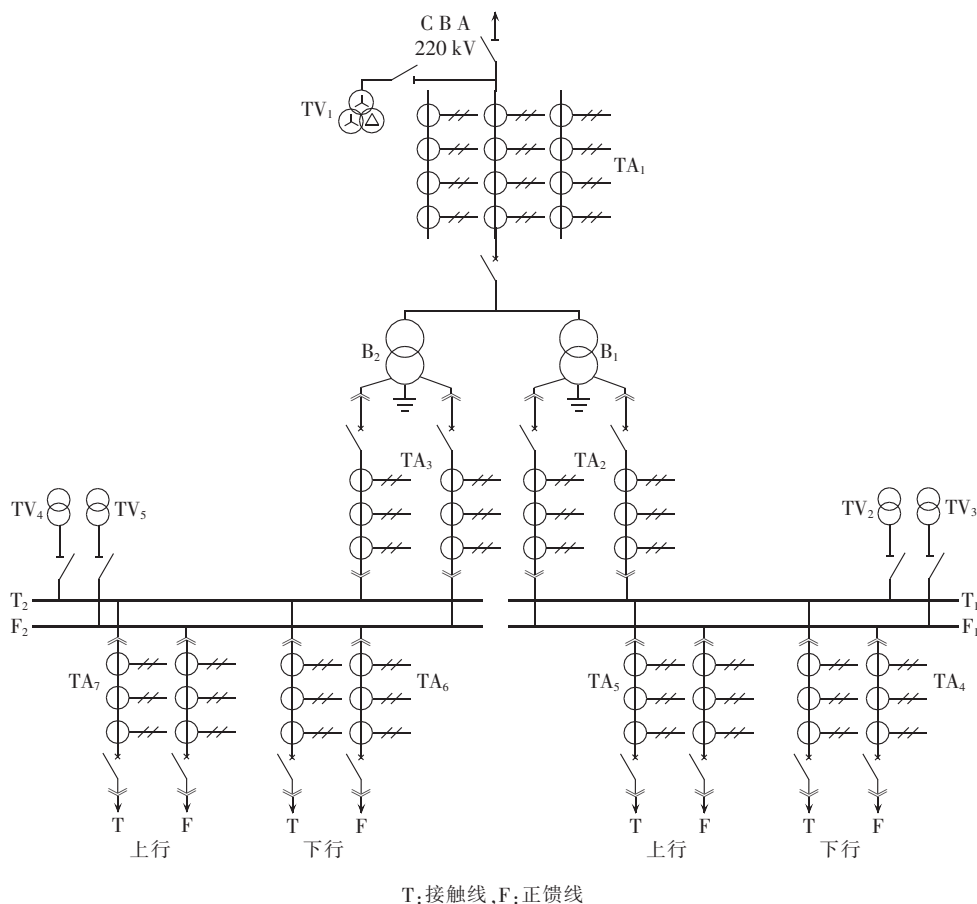


图 1 典型 AT 牵引变电所主接线简化图

Fig.1 Simplified primary wiring diagram of typical AT traction substation

测量变量:  $i_{TA1A}, i_{TA1B}, i_{TA1C}, i_{TA2T}, i_{TA2F}, i_{TA3T}, i_{TA3F}, i_{TA4T}, i_{TA4F}, i_{TA5T}, i_{TA5F}, i_{TA6T}, i_{TA6F}, i_{TA7T}, i_{TA7F}, u_{TV1A}, u_{TV1B}, u_{TV1C}, u_{TV2}, u_{TV3}, u_{TV4}, u_{TV5}$ , 其中, 变量的下标分别表示互感器或相应连接线, 如:  $i_{TA1A}$  表示电流互感器  $TA_1$  的 A 相电流瞬时值,  $u_{TV2}$  表示电压互感器  $TV_2$  的电压瞬时值。

各互感器所反映的电气量之间的相关关系如下。

**a.** 基于基尔霍夫电流定律可以构造能够反映牵引变电所内各电流互感器之间连接关系的关联矩阵<sup>[10]</sup>。根据该关联矩阵, 每个互感器所反映的电流大小都可以与之关联的其他互感器的电流近似表示, 如  $i_{TA3T} \approx i_{TA6T} + i_{TA7T}$ , 据此得到不同位置的电流互感器所反映的电气量之间主要的相关关系。

**b.** 电压互感器所反映的电压量除了满足基尔霍夫电压定律之外, 和电流互感器所反映的电流之间还满足欧姆定律。另外, 处于相同位置的电压瞬时值测量变量幅值大小相同且存在一个基本固定的相位差, 如  $u_{TV1A}, u_{TV1B}$  和  $u_{TV1C}$  幅值大小相同, 相位相差  $120^\circ$ ;  $u_{TV4}$  和  $u_{TV5}$  幅值大小相同, 相位相差  $180^\circ$ 。

上述相关关系主要由系统拓扑结构和元件参数决定, 一旦系统的拓扑结构和元件参数在设计阶段确定, 该相关关系也就确定。各互感器测得电流或电

压有效值能够反映牵引变电所内各处电气量的大小, 因此, 它们之间也存在着主要由系统的拓扑结构和元件参数决定的相关关系。

## 2 基于 PCA 的互感器二次量异常故障识别模型

利用 PCA 方法进行互感器二次量异常故障在线识别的基本思想是利用无互感器故障条件下的各互感器测量有效值历史数据离线建立能够反映各互感器测量有效值之间相关关系的主元模型, 然后通过检验实时采集的各互感器测量有效值数据相对于主元模型的背离程度, 即相关关系的改变, 来判断是否有互感器发生故障, 进而通过衡量各个互感器对相关关系改变的贡献大小识别发生故障的互感器。

### 2.1 相关关系的离线提取

假设  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^m$  代表某时刻采集的牵引变电所  $m$  个电压或电流互感器的测量有效值样本, 每个互感器各同步上传  $w$  次有效值, 构造矩阵  $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_w]^T \in \mathbf{R}^{w \times m}$ , 其中  $\mathbf{X}$  的每列代表 1 个互感器测量有效值序列, 每行代表 1 个有效值样本向量。为了消除量纲的影响, 通过将  $\mathbf{X}$  的每列减去该列的均值并除以该列的标准差, 将  $\mathbf{X}$  的各列处理成单位方差且零均值的变

量。这里标准化后的矩阵仍用  $\mathbf{X}$  表示。对标准化后的矩阵  $\mathbf{X}$  的协方差矩阵  $\mathbf{S}$  进行特征值分解,并按照特征值的大小对相应的特征向量进行降序排列。PCA 模型对  $\mathbf{X}$  进行如下分解<sup>[17]</sup>:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\mathbf{P}^T + \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{X}\mathbf{P} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{T} \in \mathbf{R}^{n \times A}$  为得分矩阵( $A$  为主元的个数),  $\mathbf{T}$  的各列称为主元变量;  $\mathbf{P} \in \mathbf{R}^{m \times A}$  为负载矩阵,由  $\mathbf{S}$  的前  $A$  个特征向量构成。负载矩阵  $\mathbf{P}$  表达了互感器测量有效值的变异方向,可以反映各互感器测量有效值之间的相关关系<sup>[18]</sup>。

## 2.2 在线识别的指标

### 2.2.1 传统指标

利用负载矩阵  $\mathbf{P}$  将待测的实时有效值样本向量  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^m$  分解为在主元子空间和残差子空间上的投影<sup>[19]</sup>:

$$\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{x}} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{P}\mathbf{P}^T\mathbf{x} \in \mathbf{R}_p \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{x}} = (\mathbf{I}_m - \mathbf{P}\mathbf{P}^T)\mathbf{x} \in \mathbf{R}_r \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{I}_m$  为大小为  $m$  的单位矩阵;  $\hat{\mathbf{x}}$  为样本在主元空间中的投影;  $\tilde{\mathbf{x}}$  为样本在残差空间中的投影;  $\mathbf{R}_p$ 、 $\mathbf{R}_r$  分别为主元子空间和残差空间。可以通过在残差空间中建立统计量衡量样本向量在残差空间投影的变化来衡量相关关系的改变程度,常用的统计量为平方预测误差 SPE(Squared Prediction Error),定义如下:

$$\text{SPE} = \|(\mathbf{I}_m - \mathbf{P}\mathbf{P}^T)\mathbf{x}\|^2 \leq \delta_\alpha^2 \quad (6)$$

其中,  $\delta_\alpha^2$  为置信水平为  $\alpha$  时的控制限<sup>[20]</sup>。若 SPE 超出控制限,则相关关系发生改变,然后通过衡量各个互感器对 SPE 的贡献大小来识别发生故障的互感器,即对 SPE 贡献最大的互感器为最可能发生故障的互感器。SPE 贡献定义如下:

$$C_i^{\text{SPE}} = (\xi_i^T \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{x})^2 \quad (7)$$

$$\text{SPE} = \|\tilde{\mathbf{C}}\mathbf{x}\|^2 = \sum_{i=1}^m C_i^{\text{SPE}} \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{I}_m - \mathbf{P}\mathbf{P}^T$$

其中,  $C_i^{\text{SPE}}$  为第  $i$  个互感器对 SPE 统计量的贡献值;  $\xi_i$  为单位矩阵  $\mathbf{I}_m$  的第  $i$  列。

可以证明,当选择了合适的主元数后,所有残差的数学期望表达式都是互感器测量误差方差  $\sigma_v^2$  和故障方差  $\delta^2$  的函数<sup>[21]</sup>。在互感器故障的特征较微弱、故障方差相对太小时,故障将会被淹没。对于某个互感器,其在一段时间内的测量误差主要与其运行状态有关,同时受到多种随机因素的影响,在一定范围内波动且具有一定的随机性,这使得根据单一有效值样本向量求得的 SPE 及各互感器对应的 SPE 贡献值具有一定的随机性,可能导致误报。

### 2.2.2 基于滑动平均的改进指标

滑动平均滤波是一种常用的数字低通滤波方

法,可以滤除动态数据中的随机成分,得到较为平滑的确定成分<sup>[22]</sup>,其模型如下:

$$y[n] = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} x[n-k] \quad (9)$$

其中,  $x$  和  $y$  分别为原始数据序列和经过滑动平均处理后得到的序列;  $L$  为滑动窗口的宽度。因此可以通过对在单个样本向量上得到的 SPE 及各互感器对应的 SPE 贡献进行滑动平均处理,得到相对平稳的 SPE 及 SPE 贡献序列,分别称之为 SPE 均值及 SPE 贡献均值。定义 SPE 均值及 SPE 贡献均值分别如下:

$$\overline{\text{SPE}}[n] = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \text{SPE}[n-k] \quad (10)$$

$$\overline{C}_i^{\text{SPE}}[n] = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} C_i^{\text{SPE}}[n-k] \quad (11)$$

其中,  $\overline{\text{SPE}}$  为 SPE 均值;  $\overline{C}_i^{\text{SPE}}$  为第  $i$  个互感器对应的 SPE 贡献均值。经过滑动平均滤波处理得到的 SPE 均值及 SPE 贡献均值能够在一定程度上滤除由互感器测量误差及多种随机因素导致的随机成分,减小互感器测量误差的影响,提高对早期的二次量异常故障的识别灵敏度,以尽早识别出存在二次量异常故障的互感器。

## 3 牵引变电所互感器二次量异常故障在线识别方案

为了提取出一个较稳定的各互感器测量有效值之间的相关关系,采用间歇出现的牵引变电所空载时间段的各互感器测量有效值数据离线建立 PCA 模型,用于在该牵引变电所空载时对发生二次量异常故障的互感器进行在线识别。具体步骤如下。

a. 从牵引变电所空载且各互感器均无二次量异常故障时的历史数据中选取合适长度的测量有效值数据离线建立 PCA 模型,得到能够反映各互感器测量有效值之间相关关系的负载矩阵  $\mathbf{P}$ ,并计算 SPE 均值的控制限  $\delta_\alpha^2$ 。

b. 对于实时采集到的各互感器测量有效值样本,利用由步骤 a 中建模数据估计的均值和方差进行标准化处理,然后利用负载矩阵  $\mathbf{P}$  计算该样本对应的 SPE。

c. 采用长度为  $L_0$  的滑动窗对连续计算得到的 SPE 序列进行滑动平均处理,得到各样本点对应的 SPE 均值。

d. 将各样本点对应的 SPE 均值与其控制限作比较。如果连续  $N$  个样本点超限(这里认为互感器二次量异常故障为永久性故障),则启动报警程序。计算超限样本点处各互感器对应的 SPE 贡献,同时采用长度为  $L_0$  的滑动窗对 SPE 贡献序列进行滑动平均处理,得到各样本点对应的各互感器 SPE 贡献均

值,判断 SPE 贡献均值最大的互感器发生故障。否则,转至步骤 b。

牵引变电所互感器二次量异常故障在线识别的流程如图 2 所示。

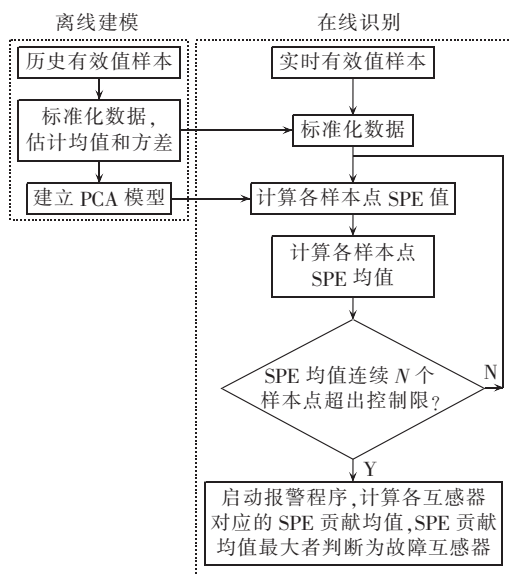


图 2 互感器二次量异常故障在线识别的流程

Fig.2 Flowchart of online secondary measurement abnormality identification for instrument transformers

## 4 算例分析

### 4.1 仿真系统

某客运专线上典型的全并联 AT 供电方式牵引变电所的主接线(不考虑备用并适当简化)如图 1 所示。在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了其牵引供电系统仿真模型<sup>[23]</sup>,其中牵引网悬挂系统根据对称等效为相互平行的 3 条导体:接触线(T)、正馈线(F)、钢轨(R),AT 由单相双绕组变压器原次边绕组串联抽出另一次边形成,具体参数参见文献[24]。利用实际 AT 牵引变电所在 1 d 内测得的接触线上的电流有效值数据构造功率负荷模型,用于替代电力机车模型,以此模拟实际牵引变电所在 1 d 内的运行情况。

如图 1 所示,由该牵引变电所内测量用的 7 组电流互感器和 5 组电压互感器可以得到系统的如下 22 个电流或电压有效值测量变量: $I_{TA1A}$ 、 $I_{TA1B}$ 、 $I_{TA1C}$ 、 $I_{TA2T}$ 、 $I_{TA2F}$ 、 $I_{TA3T}$ 、 $I_{TA3F}$ 、 $I_{TA4T}$ 、 $I_{TA4F}$ 、 $I_{TA5T}$ 、 $I_{TA5F}$ 、 $I_{TA6T}$ 、 $I_{TA6F}$ 、 $I_{TA7T}$ 、 $I_{TA7F}$ 、 $U_{TV1A}$ 、 $U_{TV1B}$ 、 $U_{TV1C}$ 、 $U_{TV2}$ 、 $U_{TV3}$ 、 $U_{TV4}$ 、 $U_{TV5}$ ,其中,变量的下标分别表示互感器或相应连接线,如  $I_{TA1A}$  为电流互感器 TA<sub>1</sub> 的 A 相电流有效值,  $U_{TV2}$  为电压互感器 TV<sub>2</sub> 的电压有效值。

### 4.2 离线建立 PCA 模型

采用仿真得到的某空载时间段一定长度的各互感器测量有效值数据构造矩阵  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{R}^{n \times m}$ ,

其中  $X$  的每列代表 1 个互感器测量有效值序列,每行代表 1 个有效值样本向量,并与样本的采集时刻一一对应。利用该矩阵建立 PCA 模型,获取可以表征各互感器测量有效值数据之间相关关系的负载矩阵  $P$ ,并计算 SPE 均值控制限。

### 4.3 算例 1:某互感器发生二次量异常故障

互感器二次量异常故障往往会经历一个逐渐发展的过程,当识别出某互感器存在故障时,应及时采取措施。2 个或 2 个以上的互感器同时出现二次量异常故障的概率很小,因此算例首先考虑系统至多有 1 个互感器发生二次量异常故障的情况。

以电压互感器 TV<sub>4</sub> 发生二次量偏低故障为例,设定从某时刻开始该互感器测得电压有效值较正常数据偏低 10%。采用该牵引变电所在某天 16:23:12—16:33:12 空载时间段的连续 300 个样本向量进行测试。

考虑 2 种情况,第 1 种是该故障在该时间段内发生,设定故障发生时刻为 16:27:12,对应第 121 个样本点,得到利用 SPE 均值进行检测的结果如图 3 所示,其中滑动窗宽度选为 5 个样本点,设置连续 5 个样本点对应的 SPE 均值超出控制限时启动报警程序。

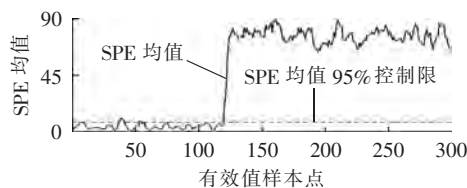


图 3 TV<sub>4</sub> 在某空载时间段内故障时的故障检测结果

Fig.3 Result of fault detection for TV<sub>4</sub> during a no-load period

由图 3 可知,在时刻 16:27:12 之前的 120 个样本点中,最多有连续 2 个样本点对应的 SPE 均值超出其在置信度为 95% 时的控制限,其余均小于控制限,不会引起模型误判;从时刻 16:27:12 对应的第 121 个样本点开始, SPE 均值连续超出 95% 控制限,说明有互感器发生故障。

计算各互感器测量变量对应的 SPE 贡献均值,如图 4 所示。作为对照,图 4 同时给出了 TV<sub>4</sub> 故障前各互感器测量变量对应的 SPE 贡献均值。

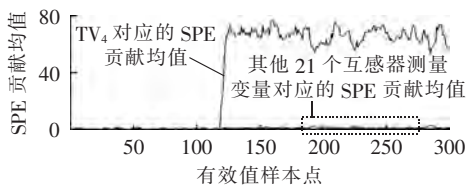


图 4 TV<sub>4</sub> 在某空载时间段内故障时 SPE 贡献均值

Fig.4 Average SPE contribution of TV<sub>4</sub> during a no-load period

由图 4 可知,从第 121 个样本点开始,TV<sub>4</sub> 对应的 SPE 贡献均值远大于其他 21 个互感器测量变量对应的 SPE 贡献均值,可以判断是该互感器发生故障。

第 2 种情况是 TV<sub>4</sub> 二次量偏低故障发生在该空载时间段之前,得到利用 SPE 均值进行检测的结果如图 5 所示,进而计算各互感器测量变量对应的 SPE 贡献均值,如图 6 所示。同样可以准确地判断是该互感器发生故障。

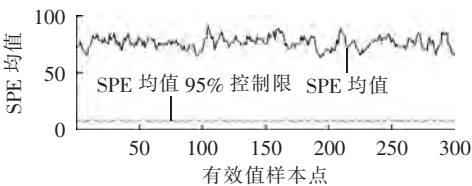


图 5 TV<sub>4</sub> 在某空载时间段前故障时的故障检测结果

Fig.5 Result of fault detection for TV<sub>4</sub> before a no-load period

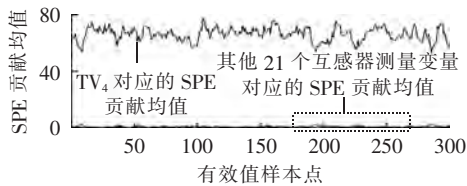


图 6 TV<sub>4</sub> 在某空载时间段前故障时 SPE 贡献均值

Fig.6 Average SPE contribution of TV<sub>4</sub> before a no-load period

4.4 算例 2:2 个互感器相继发生二次量异常故障

该算例分析本文方法对 2 个互感器相继发生二次量异常故障情况的有效性。采用该牵引变电所在某天 17:35:10—17:45:10 空载时间段的数据进行测试。设定在时刻 17:39:10,对应第 121 个样本点,电流互感器 TA<sub>6,T</sub> 的测量有效值较正常数据偏高 10%;然后在时刻 17:41:10,对应第 181 个样本点,电压互感器 TV<sub>3</sub> 测量有效值较正常数据偏低 10%。得到利用 SPE 均值进行检测的结果如图 7 所示。

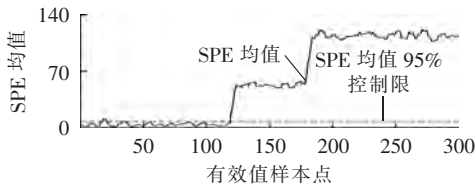


图 7 2 个互感器相继故障时的故障检测结果

Fig.7 Result of fault detection when two transformers have fault one after another

由图 7 可知,在时刻 17:39:10 之前的 120 个样本点中,最多有连续 3 个样本点对应的 SPE 均值超出其在置信度为 95% 时的控制限,其余均小于控制限,不会引起模型误判;从时刻 17:39:10 对应的第 121 个样本点开始,SPE 均值连续超出 95% 控制限,说明有互感器发生故障,而从时刻 17:41:10 对应的

第 181 个样本点开始,SPE 均值进一步增大,说明该互感器故障程度增大或又有其他互感器发生故障。

计算各互感器测量变量对应的 SPE 贡献均值,如图 8 所示,其中,虚线框内为其他 20 个互感器测量变量对应的 SPE 贡献均值。作为对照,图 8 同时给出了 SPE 均值连续超出控制限前各互感器测量变量对应的 SPE 贡献均值。

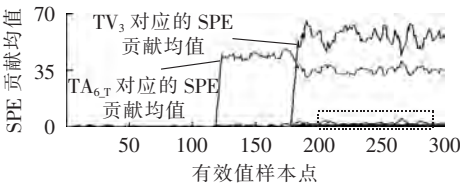


图 8 2 个互感器相继故障时 SPE 贡献均值

Fig.8 Average SPE contribution of two faulty transformers

由图 8 可知,从第 121 个样本点开始,TA<sub>6,T</sub> 对应的 SPE 贡献均值远大于其他 21 个互感器测量变量对应的 SPE 贡献均值,可以判断是该互感器发生故障。而从第 181 个样本点开始,TV<sub>3</sub> 对应的 SPE 贡献均值增大并接近 TA<sub>6,T</sub>,同样远大于其他 20 个互感器测量变量对应的 SPE 贡献均值,说明电压互感器 TV<sub>3</sub> 亦发生故障。因此,本文方法对 2 个互感器相继发生二次量异常故障的情况同样有效。

针对  $\delta_{\alpha}^2=8.14$  时,单个或 2 个互感器发生测量有效值不同程度偏差故障的情况进行了测试,部分测试结果如表 1 所示。由表 1 可知,只有部分互感器在发生 5% 偏差故障时会引起报警,而其他互感器在发生 5% 偏差故障时不会引起报警。而对于任何一个互感器测量有效值偏差在 10% 及以上时均会引

表 1 不同程度有效值偏差故障时的测试结果

| Table 1 Test results of different measurement deviations |        |                                   |      |
|----------------------------------------------------------|--------|-----------------------------------|------|
| 互感器                                                      | 测量偏差/% | 自故障起始 5 个样本点对应的 SPE 均值            | 检测结果 |
| TV <sub>1A</sub>                                         | 5      | 12.95, 17.59, 20.85, 23.79, 26.46 | 报警   |
|                                                          | 10     | 35.34, 53.33, 69.47, 83.49, 88.08 | 报警   |
| TV <sub>2</sub>                                          | 5      | 8.48, 10.08, 10.17, 10.90, 13.06  | 报警   |
|                                                          | 10     | 16.05, 22.79, 27.43, 31.86, 35.43 | 报警   |
| TA <sub>1B</sub>                                         | 5      | 13.87, 17.43, 19.30, 22.63, 24.45 | 报警   |
|                                                          | 10     | 36.28, 51.40, 64.45, 78.84, 81.31 | 报警   |
| TA <sub>3F</sub>                                         | 5      | 8.61, 8.96, 7.97, 9.25, 10.62     | 漏报   |
|                                                          | 10     | 15.25, 18.97, 21.10, 26.04, 27.90 | 报警   |
| TA <sub>3T</sub>                                         | 5      | 8.37, 8.51, 7.56, 8.16, 8.82      | 漏报   |
|                                                          | 10     | 13.23, 15.76, 17.16, 20.04, 20.56 | 报警   |
| TA <sub>5F</sub>                                         | 5      | 8.54, 8.88, 7.88, 9.13, 10.53     | 漏报   |
|                                                          | 10     | 15.02, 18.69, 20.74, 25.60, 27.52 | 报警   |
| TA <sub>5T</sub>                                         | 5      | 8.35, 8.49, 7.54, 8.13, 8.81      | 漏报   |
|                                                          | 10     | 13.18, 15.70, 17.09, 19.96, 20.49 | 报警   |
| TV <sub>3</sub> 、TA <sub>6F</sub>                        | 5      | 9.98, 12.22, 12.79, 14.11, 16.13  | 报警   |
|                                                          | 10     | 21.43, 30.63, 37.56, 44.35, 47.59 | 报警   |
| TA <sub>4F</sub> 、TA <sub>6T</sub>                       | 5      | 9.36, 11.14, 11.36, 12.44, 14.53  | 报警   |
|                                                          | 10     | 19.10, 26.54, 31.98, 37.77, 40.83 | 报警   |

起报警。这对 2 个互感器相继发生有效值偏差 10% 及以上故障的情况亦有效。

由于多数互感器二次量异常故障往往会经历一个逐渐发展的过程,且二次量偏差在 10% 以内的故障一般不会立即对系统产生影响,而采用本文方法对间歇存在的空载时间段的各互感器测量有效值数据进行测试,即可准确地识别出发生二次量偏差 10% 及以上故障的互感器测量变量,并报警给工作人员及时处理,以避免可能造成的保护装置错误动作等情况。

## 5 结论

针对牵引变电所互感器二次量异常故障的在线识别问题,本文引入能够提取各互感器测量有效值之间相关关系的主元分析方法,并定义 SPE 均值及 SPE 贡献均值分别作为检测和识别的指标,给出了一种新的互感器二次量异常故障在线识别方法。

a. 基于主元分析的牵引变电所互感器二次量异常故障在线识别方法是针对数据模型建模,避免了复杂的物理建模过程,能够方便地移植应用于具有不同主接线拓扑结构的牵引变电所。

b. 定义 SPE 均值及 SPE 贡献均值分别作为故障检测和识别的指标,可以在一定程度上消除利用单个各互感器测量有效值样本得到的识别结果的不确定性。该方法能够准确识别出二次量偏差 10% 及以上的互感器测量变量,即对轻微二次量异常故障也很灵敏。

c. 该方法只需使用各互感器测量有效值数据,无需额外增加测量设备。根据实际工程系统进行仿真建模和实验,取得了良好的效果,具有较好的实用性。

## 参考文献:

- [1] 乔立凤,高敬更,温定筠,等. 330 kV 电流互感器电流异常故障分析[J]. 电子测量技术,2013,36(7):125-127.
- QIAO Lifeng,GAO Jinggeng,WEN Dingjun,et al. Analysis on abnormal current faults of 330 kV current transformer[J]. Electronic Measurement Technology,2013,36(7):125-127.
- [2] 杨立璠,常宝波. 电流互感器二次侧短路故障分析及对策[J]. 电力自动化设备,2003,23(12):32-33.
- YANG Lifan,CHANG Baobo. Analysis of CT secondary circuit short-circuit fault and its countermeasure[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(12):32-33.
- [3] 徐剑,华建卫,唐志军. 基于瞬时漏感参数特性识别电流互感器匝间短路故障[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):126-130.
- XU Jian,HUA Jianwei,TANG Zhijun. Identification of CT interturn short circuit fault based on instantaneous leakage[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):126-130.
- [4] 徐长海,王静君. 一起 35 kV 电容式电压互感器二次电压异常升高故障分析[J]. 江苏电机工程,2014(3):10-11,14.
- XU Changhai,WANG Jingjun. Analysis of a fault of 35 kV capacitor voltage transformer's secondary voltage abnormal raising[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2014(3):10-11,14.
- [5] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报,2012,27(8):172-178.
- JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(8):172-178.
- [6] 朱林,段献忠,苏盛,等. 基于证据理论的数字化变电站继电保护容错方法[J]. 电工技术学报,2011,26(1):154-161.
- ZHU Lin,DUAN Xianzhong,SU Sheng,et al. Evidence theory based fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(1):154-161.
- [7] 熊小伏,何宁,于军,等. 基于小波变换的数字化变电站电子式互感器突变性故障诊断方法[J]. 电网技术,2010,34(7):181-185.
- XIONG Xiaofu,HE Ning,YU Jun,et al. Diagnosis of abrupt-changing fault of electronic instrument transformer in digital substation based on wavelet transform[J]. Power System Technology,2010,34(7):181-185.
- [8] 熊小伏,杨雪东,刘年. 基于站间信息的电子式互感器故障协同诊断方法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(21):80-83,89.
- XIONG Xiaofu,YANG Xuedong,LIU Nian. A collaborative diagnosis method of electronic transformer fault based on the inter-substation information[J]. Power System Protection and Control,2012,40(21):80-83,89.
- [9] 王洪彬,唐昆明,徐瑞林,等. 数字化变电站电子式互感器渐变性故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(24):53-58.
- WANG Hongbin,TANG Kunming,XU Ruilin,et al. Diagnosis of soft fault of electronic transformer in digital substation[J]. Power System Protection and Control,2012,40(24):53-58.
- [10] 程宏波,罗杰,王勋,等. 一种基于解析冗余的互感器故障的检测及容错方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):69-73.
- CHENG Hongbo,LUO Jie,WANG Xun,et al. A novel method for instrument transformer's fault detection and tolerant control based on analytical redundancy[J]. Power System Protection and Control,2011,39(23):69-73.
- [11] 于春梅,杨胜波,陈馨,等. 多元统计方法在故障诊断中的应用综述[J]. 计算机工程与应用,2007,43(8):205-208.
- YU Chunmei,YANG Shengbo,CHEN Xin,et al. Survey of multivariate statistical methods for fault diagnosis[J]. Computer Engineering and Applications,2007,43(8):205-208.
- [12] 许力,竺鹏东,顾红杰,等. 基于变尺度 PCA 的电力设备载流故障早期预警[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):147-151.
- XU Li,ZHU Pengdong,GU Hongjie,et al. Early warning of electric equipment current-carrying faults based on variable-scale principal component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):147-151.
- [13] 范津莎,尚海昆. 基于主成分分析和概率神经网络的变压器局部放电模式识别[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):27-31.
- YUAN Jinsha,SHANG Haikun. Pattern recognition based on principal component analysis and probabilistic neural networks for partial discharge of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):27-31.
- [14] 杨廷方,张航,黄立滨,等. 基于改进型主成分分析的电力变压

- 器潜伏性故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 153-157, 169.
- YANG Tingfang, ZHANG Hang, HUANG Libin, et al. Incipient fault diagnosis based on improved principal component analysis for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 153-157, 169.
- [15] 刘宝英, 杨仁刚. 基于主成分分析的最小二乘支持向量机短期负荷预测模型[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 13-17.
- LIU Baoying, YANG Rengang. Short-term load forecasting model based on LS-SVM with PCA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 13-17.
- [16] CHERRY G A, QIN S J. Multiblock principal component analysis based on a combined index for semiconductor fault detection and diagnosis[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2006, 19(2): 159-172.
- [17] JACKSON J E. A user's guide to principal components[M]. New York, USA: Wiley-Interscience, 1991: 63-69.
- [18] 王姝, 常玉清, 杨洁, 等. 时段划分的多向主元分析间歇过程监测及故障变量追溯[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(2): 149-156.
- WANG Shu, CHANG Yuqing, YANG Jie, et al. Multiway principal component analysis monitoring and fault variable detection based on substage separation for batch processes[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(2): 149-156.
- [19] LI Gang, QIN S J, JI Yindong, et al. Reconstruction based fault prognosis for continuous processes[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(10): 1211-1219.
- [20] QIN S J. Statistical process monitoring: basics and beyond[J]. Journal of Chemometrics, 2003, 17(8-9): 480-502.
- [21] 周东华. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 34-35.
- [22] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(1): 21-23.
- PEI Yixuan, GUO Min. The fundamental principle and application of sliding average method[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2001(1): 21-23.
- [23] 陈海涛, 熊列彬. 纵向分段式全并联 AT 牵引供电系统建模与仿真[J]. 电气化铁道, 2014(2): 9-12.
- CHEN Haitao, XIONG Liebin. Modeling and simulation for longitudinal segmented all parallel AT traction power supply system[J]. Electric Railway, 2014(2): 9-12.
- [24] 王奇, 刘志刚, 白玮莉, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的牵引供电系统仿真模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 44-49, 54.
- WANG Qi, LIU Zhigang, BAI Weili, et al. Research on the simulation model of traction power supply system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 44-49, 54.

#### 作者简介:



李朝阳

李朝阳(1991—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为牵引供电系统健康诊断(E-mail: lizy2010swjtu@163.com);

杨健维(1983—),女,辽宁凌源人,讲师,博士,通信作者,研究方向为电力系统故障诊断和城市电网安全预警(E-mail: yangjianwei0910@163.com);

王 玘(1990—),男,四川成都人,博士研究生,研究方向为牵引供电系统健康诊断与维修策略制定(E-mail: wangqi.clark@126.com);

何正友(1970—),男,四川自贡人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为信号处理和信息理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化等(E-mail: hezy@swjtu.edu.cn)。

## Online identification of secondary measurement abnormality based on PCA for instrument transformers of traction substation

LI Zhaoyang, YANG Jianwei, WANG Qi, HE Zhengyou

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The relationship among the measurements of different instrument transformers in traction substation is analyzed and an online identification method based on the principal component analysis is proposed to detect the secondary measurement abnormality of instrument transformer. The average SPE and average SPE contribution are defined and taken as the fault detection index and identification index respectively, which, to a certain degree, eliminates the uncertainty of the results identified only based on the single measurement sample. With an actual AT traction substation as example, the simulative verification is carried out and results show that, without the additional measuring equipment, the faulty transformer with secondary measurement abnormality can be accurately identified and the proposed method applicable to different primary wiring topologies of traction substation.

**Key words:** electric traction; traction substation; electric instrument transformers; fault detection; secondary measurement; measurements; principal component analysis