

# 基于相似性原理的电厂设备故障预警系统研究

陈统钱<sup>1</sup>, 朱继峰<sup>1</sup>, 范海东<sup>2</sup>, 胡伯勇<sup>2</sup>, 戴敏敏<sup>2</sup>, 黄佳林<sup>3</sup>

(1. 浙江浙能中煤舟山煤电有限责任公司, 浙江 舟山 316000; 2. 浙江能源集团有限公司, 杭州 310006;

3. 上海长庚信息技术有限公司, 上海 201209)

[摘要] 为了避免由于发电机组故障而引起的非计划停机带来的不必要的经济损失, 研究故障预警系统变得十分必要。通过分析故障预警系统的建模方法, 提出了利用相似性方法实现设备状态估计, 通过比较设备实时数据与历史正常数据之间的相似关系估计设备可能达到的状态, 并显示故障关联信息, 为分析故障原因提供参考。

关键词 相似性原理 故障预警 电厂设备 建模

中图分类号 TK39

## 0 引言

随着大型发电厂的发电机组单机容量不断增大, 电力系统正朝着超高压、大容量的多机互联系统方向发展, 如何保证系统安全并降低发电成本是目前亟待解决的一个重要问题。故障预警技术使维修从被动反应到主动预防, 再到事先预测和规划管理, 在一定程度上代表了设备故障诊断方法和维修体系的发展方向<sup>[1]</sup>。

现有研究和系统, 大多借助回转设备的振动信号分析, 针对单一设备进行故障预警。文献[2]针对发电机出现的故障, 采用自适应遗传与蚁群算法融合的方法进行诊断。文献[3]通过对故障的振动信号进行小波分解, 对故障进行诊断。文献[4]利用小波分析的方法对系统的状态信息进行消噪预处理与信号特征提取, 并采用经典的 BP 神经网络的方法实现智能诊断。目前, 已有的故障预警方法在性能和准确性方面很难满足火电机组发电设备的故障预警要求, 难以得到大范围应用。为此, 基于运行参数的发电设备状态观测及故障预警方法亟需进一步深入研究。通过机组 DCS 或 SIS 系统提供的机组运行参数, 针对整个系统及辅助设备故障进行故障预警。本文利用相似性原理对电厂相关设备进行建模, 利用电厂历史数据建立模型与实时数据进行比对, 以准确对设备故障实现预警。

## 1 相似性原理建模

### 1.1 理论介绍

在进行数据分析时, 常需要通过样本间差异的程度来评判样本的相似性、给样本分类, 并通过绘制向量间的相似度曲线从而更直观地分析向量间的相近程度<sup>[5]</sup>。

设有向量  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  和向量  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , 构造函数  $\text{sim}(X, Y)$  满足: 正定性  $\text{sim}(X, Y) \geq 0$ , 当且仅当  $x = y$  时,  $\text{sim}(X, Y) = 0$ ; 对称性  $\text{sim}(X, Y) = \text{sim}(Y, X)$ ; 满足三角不等式  $\text{sim}(a, c) \leq \text{sim}(a, b) + \text{sim}(b, c)$ 。当其相似性函数  $\text{sim}(X, Y) < \epsilon$  时( $\epsilon$  为给定的

相似性阈值), 称向量  $X, Y$  在以  $\epsilon$  为界的情况下相似, 记为  $X \approx Y$ 。相似性函数  $\text{sim}(X, Y)$  为欧氏距离  $d(X, Y)$ , 即  $\text{sim}(X, Y) = d(X, Y)$ , 当  $d(X, Y) < \epsilon$  时, 称向量  $Y$  在欧氏距离下以  $\epsilon$  为界相似。通过该方法找出当前状态与模型状态中的最近距离来完成设备测点的状态估计, 即  $s(X, Y)$  为序列  $X$  与  $Y$  的相似度。

### 1.2 建模分析

#### 1.2.1 建模流程说明

基于相似性原理的非线性状态估计方法(NSET)是应用较为广泛的一种建模方法。通过对比当前数据与存储的系统运行过程状态的相似程度, 即监测这些多维信号之间的相似度进行系统运行状态估计。通过对系统状态的正常模式提取, 从历史数据中挖掘出系统各观测变量之间的关系, 以建立非参数定性模型, 属于高级模式识别技术中的一种。然后通过模型中系统状态的正常模式加权组合计算出系统的状态估计, 权重一般通过模式间的相似度来确定<sup>[6]</sup>。状态估计建模原理如图 1 所示。

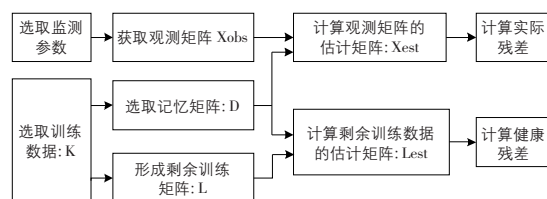


图 1 状态估计建模原理图

首先需要进行的就是对训练数据  $K$  进行筛选。选择训练数据  $K$  的基本原则是:

(1) 训练数据  $K$  中所覆盖的状态必须包含系统正常运行状态下所有监测参数动态变化过程, 如机组启动和停机全程负荷状态下的监测参数变化过程。

(2) 训练数据  $K$  中的状态不能包含故障状态, 必须全部为能表征系统正常运行状态的参数。

基于上述两项原则, 对历史数据进行人工筛选, 即可得到系统的训练数据矩阵  $K$ 。

收稿日期: 2016-11-19

过程存储矩阵 D 的构造是本方法最为关键的部分,其构造的成功与否直接与基于相似性的状态估计精度密切相关。从数据挖掘角度分析,过程存储矩阵 D 的构造属于聚类问题,所以本文引入聚类分析的概念,通过改进“峰”方法,实现过程存储矩阵 D 的构造,对过程存储矩阵的构造进行优化。改进“峰”的聚类分析方法,认为所有样本都为潜在的聚类中心,一定程度上避免了传统“峰”方法在求解时的计算复杂性及划定每个网格时需权衡准确性的问题,然后通过计算密度函数,选取样本密度较大的作为聚类中心<sup>[7]</sup>。

最后还要选取相似性算子,对模型进行去相关性处理。由于非线性算子对于模型估计效果影响不大,因此选取了物理意义较为直观的欧式距离作为相似性算子,并引入岭优化的概念对模型进行了去相关性处理,给出了最优化的岭参数。至此就完成了整个建模的过程。

利用上述理论基础,在实际系统中就可为不同设备建立不同模型,可归纳为以下几个主要步骤。

(1)先对设备过去一年的历史数据进行分析,建立一个能反映多种工况和环境变化正常运行状况的矩阵。这些矩阵就构成了设备模型的基础。

(2)每台设备都有自己的矩阵,都使用自己的历史数据建立。即使是型号完全一样的一台机组上的两台泵,由于运行情况不同,它们的模型也会不同,这些差异都可通过历史数据反映出来。

(3)根据每台设备的状态矩阵,读取当前的工况信息,模型可给出特征量实时的模型值。以模型值为基准,设定合理的上下偏差,就会产生一个动态的报警带。这个状态矩阵通常包括了与设备状态或性能相关的大量参数,可将这个带设得比较窄,从而能监测到细微但有重要意义的变化,动态报警带都在传统报警的界限之内,因此可合理避免误报警,而又不会漏掉设备的异常变化。

### 1.2.2 建模方法优势分析

相似理论模型最大的优点在于它提供了能很容易并且很迅速实施的可靠的故障预警系统。训练相似理论模型只涉及简单的决定性矩阵计算,没有对用来建模的数据的分布和线性度进行任何假设,它是一种无参数的建模方法,因此没有为模型假设任何函数。如果一个同其它变量没有关联的变量包含在相似理论模型中,那么通常不会对其它相关变量的故障检测能力产生不利影响。相似理论模型的目标是从多变量数据中排除正常变量,是通过产生模型变量估计值,并把估计值同实际值相比较来实时完成的。估计值和实际值的差异形成一个偏差,偏差为 0 及在允许偏差内的数据代表运行是正常的。当异常情况发生时,一个或多个偏差信号会偏离 0 值。这些偏差偏离产生的模式与特定的故障相关,因此提供了一个隔离和诊断故障的方法。随着时间的推移,维护模型仅需要增加数据并重新执行决定性矩阵计算。相似理论模型十分灵敏,因为每个相似理论模型仅是基于为每个具体监视设备收集的历史数据

建立的<sup>[8]</sup>。

图 2 展示的是相似性原理建模技术使用前后的一个实际对比,两边模型十分相似,由此可知基于相似性原理得出的系统估计值具有很高的还原度,显示这种建模方法有很高的精确性。

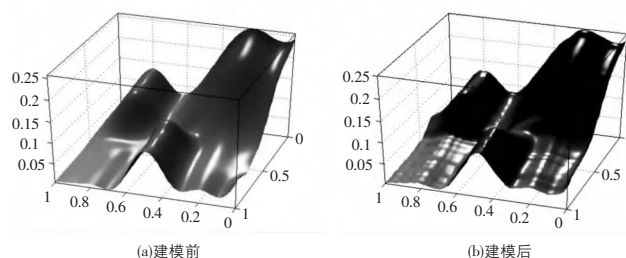


图 2 模型对比图

## 2 故障预警系统总体架构

### 2.1 系统介绍

设备故障预警系统可作为一个引擎,使点检系统、资产管理系统、SIS 系统等有机结合起来,共同组成设备的模型体系。如图 3 所示,本系统可利用现有 SIS 系统积累的历史数据,对每台关键设备建立模型,然后读取 SIS 系统的实时数据,对每台机组的数百个模型、数千个变量进行实时在线计算,并与模型结果进行比较和逻辑判断,从而准确发现位于常规的报警系统界限内的设备异常,便于及时制定和执行设备管理决策<sup>[9]</sup>。设备检修的结果反馈到系统中又可不断积累故障知识,提高预见性分析和诊断的效率。

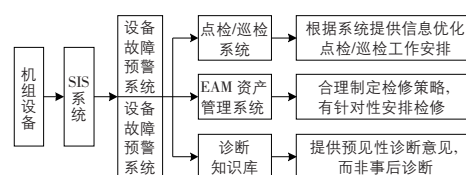


图 3 故障预警系统结构图

### 2.2 系统组成

#### 2.2.1 系统硬件组成

系统硬件主要由计算服务器、Service 服务器、诊断知识库服务器和客户机等组成。设备状态监测与分析服务器从 PI 数据库读取需要的实时数据(过程数据、振动监测数据、电气数据)并送到计算服务器进行分析,分析结果通过预警信息 Service 服务器发布。设备模型的建立和维护工具安装在客户机上<sup>[7]</sup>。计算服务器负责连接实时数据库,将数据送入计算引擎进行计算,输出计算结果并保存在数据库中。预警信息 Service 服务器负责从实时数据库读取分析结果,并通过客户端软件展示给用户,能有重点地显示出异常的设备列表,快速访问诊断需要的数据,以事件驱动方式进行管理并可快速浏览历史数据<sup>[8]</sup>。诊断

知识库服务器可触发对故障的初步诊断，给出部分典型的可能故障和处理措施，起到辅助诊断和分析的作用。

### 2.2.2 系统软件组成

安装在客户机上的模型生成与配置工具是用来对模型进行开发和配置的应用服务器，可配置系统运行参数。模型生成与配置工具能建立设备的关系结构开发模型和初步诊断规则、模型的学习训练、数据显示和分析及离线进行模型的测试。使用者可根据需要进行自行开发相关设备的模型<sup>[9]</sup>。为了便于实施，系统还提供了典型设备的模型库，根据模型库可在同类设备的故障分析经验基础上结合自身经验产生自己的设备模型，使得项目实施速度快、效

果好。经过相关的培训后，电厂可自行分析和维护系统，也可根据自身经验建立新的模型，对于原有模型也可进行修改和优化。

## 3 应用实例

下面通过空压机电机故障案例来说明故障预警系统的实际工作过程。将设备出现异常的具体时间、相关测点描述等详细信息整理成表 1 所示的预警点详情表。工作人员可按照相关流程，并根据相关设备的实际预警信息对设备可能出现的故障进行分析判断，从而提前排除设备故障。

图 4 中，温度异常值标记为叉。由此可知，自 2016

表 1 预警点详情

源标签点名	源标签点描述	点类型	报警类型	首次发生时间	最近发生时间
LH.01CXQ02XB03	空压机 B 电机前轴承温度	特有点	高报警	2016-04-20T22-20-11	2016-06-01T21-08-31
LH.01QFA12AN001XQ01	空压机 B 电机电流	公共点	低报警	2016-05-18T17-58-31	2016-06-25T14-38-09
LH.01CXQ02XB03	空压机 B 电机前轴承温度	特有点	高报警	2016-09-12T07-37-38	2016-09-13T14-48-02

年 9 月 10 日起，#01B 仪用空压机电机前轴承温度发出高偏差预警，轴承实际温度已高达 85℃，导致设备故障预警及状态监测系统高频预警。

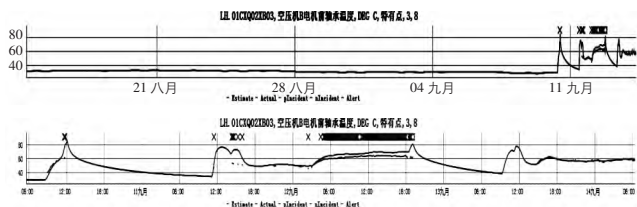


图 4 测点趋势图

判断异常后停运该台空压机，对其电机轴承油脂进行少量加注、主机温度检查（刚性联轴器主机温度高有可能传导至电机轴承）、油分离芯取出检查清洁度、超级冷却剂油位检查等，在确认无异常后再次投运空压机。2016 年 9 月 12 日电机轴承再次发生温度高报警，在排除导致电机轴承温度高的因素后怀疑是轴承内部润滑出现问题。于是在就地监控空压机电机前轴承振动、温度、异音等情况下对该轴承进行连续缓慢加注置换油脂，温度下降明显，在温度低于 60℃ 时停止注油并卸载运行 2h 后加载正常投运，温度得到控制，报警消除，#01B 仪用空压机至今未发生报警。实际案例显示，由于系统产生了相关设备的预警信息，机组运行与检修人员才能对相关设备做出及时的故障排除与诊断，从而可进行早期的维修，避免了设备状态的进一步恶化。

从历史预警信息可看出，#01B 仪用空压机在 2016 年 5 月 12 日发生数次预警（运行小时数为 10 907h），进行了 8 000h 保养，包含空气过滤器、油过滤器、油分离芯及超级冷却剂更换，电机轴承油脂加注保养。保养后运行至 2016 年 7 月 20 日进行了 2 000h 例行检查（运行小时数为 12 105h），空压机状态及运行参数均正常。为平衡各空压机运行小时数，2016 年 7 月 20 日～9 月 10 日停用 #01B 仪用空压机约 50 天，再次开启后发生了空压机电机轴承温度高现象。结合空压机《电机轴承润滑指导手册》，电机

运行时温度较高，较干燥，如果停运时间较长，慢慢冷却后电机变潮，就会导致轴承内部油脂硬化变质，引起轴承温度升高。

综上所述，由相关预警信息可判断此台空压机长时间未运行致使轴承内部油脂硬化变质是本次预警出现的主要原因。这次预警信息出现也为今后检修运行提供了宝贵的经验，即在机组运行期间必须定期切换空压机，尽量避免空压机连续停运超过 30 天，并严格参照《电机轴承润滑指导手册》，做好加油脂台账，切勿过多或过少加注油脂。

## 4 结束语

相似性建模技术相比传统的预警方法更易于实施并快速实施，能有效对线性、非线性和离散数据进行建模，故在多变量的高维度问题中表现出稳定、精确等优点。以相似性建模技术为基础的故障预警系统通过全面分析设备信息、辨识设备性能异常状况，能为发电机组提供早期和可控的预警，使得发电机组能更加稳定地运行，为维修及管理人员在线监控设备运行状态、正确制定设备维修计划、确保设备安全运行提供科学依据。实践证明，该建模方法不仅简单、准确，而且以这种方法为基础的预警系统延长了检修间隔，减少了设备故障的发生，降低了检修费用，是实现海量数据挖掘和设备状态早期故障预警的理想平台<sup>[10]</sup>。

### 参考文献

- [1]刘鑫沛. 基于相似性建模的发电设备故障预警方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2014
- [2]杨阳. 含风力发电的电力系统故障诊断研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013
- [3]安学利, 蒋东翔, 李少华, 等. 基于决策融合的直驱风力发电机组轴承故障诊断[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 36-41
- [4]张祥罗. 风力机中发电机在线故障提取与故障诊断系统在线研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013

(下转第 30 页)



指令, 接点闭合接通跳闸回路, 183 开关分闸, 液晶及后台报 183 线路接地, 装置选线及跳闸正确。金属性接地试验的零序电压、零序电流波形如图 8 所示。

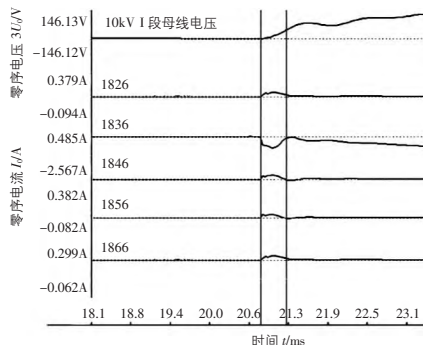


图 8 金属性接地试验录波图

由图 8 可知, 暂态过程在 20.8~21.2ms(约 0.4ms)区内, 此时故障线路 183 线的零序电流幅值最大, 且方向与其它非接地线路相反; 暂态过程结束后, 在消弧线圈补偿作用下, 接地线路与非接地线路相比不再具备幅值最大、相位相反的特征。更换接地线路, 重复试验 3 次, 装置选线及跳闸均正确, 由此可知基于暂态选线理论的小电流接地选线装置选线效果良好。

2016 年 4 月~6 月投入小电流接地选线装置, 不投入跳闸功能, 3 个月时间共发生接地故障 6 次, 选线结果全部正确, 准确率达到 100%, 满足工程应用需求, 2016 年 7 月 1 日投入跳闸压板, 转入自带跳闸功能的正式运行。在正式运行期间(2016 年 7 月~9 月), 小电流接地选线装置启动并记录的接地故障共计 4 次, 其中跳闸 4 次, 重合闸成功重合 2 次, 应用效果良好。

#### 4 典型故障数据

选取 2016 年 8 月 6 日发生的单相接地故障作为典型案例。监控后台报文: (1)09:07:18.237 182 线接地告警; (2)09:07:19.740 小电流装置跳闸 182 线; (3)09:07:19.807 182 断路器位置分开; (4)09:07:20.044 182 线接地告警消失; (5)09:07:21.309 182 线重合闸动作; (6)09:07:21.408 182 断路器位置闭合。由此可知, 182 线发生单相接地故障, 小电流接地选线装置正确选线并告警, 经延时 1.503s 成功跳闸, 切除故障线路, 然后由线路保护装置的自动重合闸重合成功恢复供电。故障录波图如图 9 所示。

由图 9 可知, 10kV I 母零序电压突变, 瞬时值达 163V, 配电系统中已发生接地故障; 故障瞬间, 各线路暂态零序电流幅值非常大, 瞬时值超过 8A(182 线的零序互感器已饱和)。其中, 182 线幅值最大且极性相反, 可准确判定为故障线路。

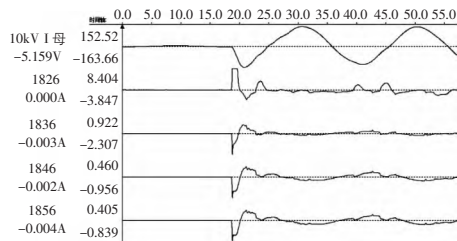


图 9 故障录波图

#### 5 结束语

小电流接地选线装置基于暂态选线原理, 不受系统参数和工程干扰的影响, 选线准确率很高; 自带跳闸功能, 可及时、自动切除故障线路, 在提高供电可靠性的同时, 减小系统带故障隐患运行的时间, 避免事故进一步扩大。实践证明, 带跳闸功能的暂态小电流接地选线装置能有效解决配电网系统单相接地故障问题, 它的推广和应用能带来十分显著的社会和经济效益。

#### 参考文献

- [1]薛永端,冯祖仁,徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 195-199
- [2]吴清, 许云峰. 小电流接地选线装置选线准确率低的原因分析及提高选线准确率的方法[J]. 电力设备, 2007, 8(11): 11-13
- [3]薛永端,冯祖仁,徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 195-199
- [4]薛永端,徐丙垠,冯祖仁,等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56
- [5]徐靖东,张保会,尤敏,等. 基于暂态零序电流特征的小电流接地选线装置[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 101-105
- [6]张兰,龚静,周有庆. 小电流接地系统单相接地暂态保护判据研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2004, 31(2): 70-73
- [7]苗友忠,孙雅明,杨华. 中性点不接地配电网系统馈线单相接地故障的暂态保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 28-32
- [8]郭康维. 基于相似性建模的锅炉一次风机故障预警研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014
- [9]韩萌. 多元时间序列数据挖掘中相似性算法的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014
- [10]赵振书. 基于相似性原理的发电机故障预警系统[D]. 北京: 华北电力大学, 2013

(编辑 丘石)

(上接第 24 页)

- [5]李铁才,李西峙. 相似性和相似原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014
- [6]刘鑫沛. 基于相似性建模的发电设备故障预警方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2014
- [7]金海峰,熊信良,吴耀武. 基于相似性原理的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 45-48