

# 基于指定元分析的接地网多故障诊断方法研究\*

刘先锋, 彭敏放

(湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

**摘要:** 引入一种新的故障诊断和预测方法——指定元分析法(DCA),即先建立DCA多故障诊断理论的空间投影框架,从而把异常检测和诊断问题转换为将观测数据向故障子空间投影后投影能量的显著性检测问题。在确定系统存在异常的情况下,再将观测数据向故障子空间中各故障模式方向分别进行投影,根据投影能量的显著性进行故障的识别和多故障的诊断。给出了接地网故障诊断的实例研究,其仿真计算和诊断结果验证了新方法的有效性。

**关键词:** 接地网; 多故障诊断; 指定元分析; 故障模式; 投影框架

**中图分类号:** TM862      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2012)08-2970-03

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.043

## Application of data-driven technique to multiple faults diagnosis in grounding grids

LIU Xian-feng, PENG Min-fang

(College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** This paper introduced designated component analysis(DCA) to implement multiple faults diagnosis and prediction in grounding grids based on data-driven technique. It established a projection frame, which was the theory foundation for DCA based on multiple faults diagnosis. Under the DCA projection frame, anomaly detection and fault diagnosis problem was transformed into the significance detection problem for projection energy of the observation data which was projected to fault subspace spanned by fault patterns defined in advance under condition that the system was abnormal, it could identify faults diagnosis according to the significance detection problem for projection energy. It provided a case study of the diagnosis in grounding grids, and simulation results shows that the efficiency of the DCA method for multiple faults diagnosis.

**Key words:** grounding grid; multiple faults diagnosis; DCA (designated component analysis); fault patterns; projection frame

## 0 引言

变电站接地网对于电力系统的可靠运行和变电站工作人员的人身安全起着重要作用。由于现阶段我国电力系统接地装置所选用的材质主要为普通碳钢或镀锌钢,受土壤、雨水等因素影响,容易发生腐蚀,从而导致接地网网格导体因腐蚀等原因造成锈断的故障时有发生。接地网发生故障时,将产生机械的、电气的、物理的、化学的变化和现象。根据实际运行经验和理论分析,发、变电站站内接地网故障的发生一般是由多处故障模式引起。目前,随着接地网在变电站的广泛应用,如何对接地网进行有效的多故障诊断和故障模式的识别是一个值得研究的课题。

近年来,不少学者对接地网故障诊断方面进行了理论和实践研究,无论在理论上还是实际应用中都取得了一定的进展。例如,文献[1~3]是基于电网有关原理的检测方法,文献[4~6]是基于电化学原理的检测方法,文献[7,8]是基于磁感应强度有关原理的检测原理,但大多故障诊断中需要建立精确的数学模型。而本文引入一种新的接地网诊断方法,即指定元分析法(DCA)<sup>[9]</sup>,它在故障诊断中不需要建立精确的数学模型。

## 1 指定元分析的基本原理

### 1.1 指定模式的定义

对于变电站接地网的监控,往往需要安装不同类型的传感器,系统的故障现象、故障原因之间的关系用故障征兆集来描述<sup>[10]</sup>。而征兆集实际上是用测量值和标准值的偏离程度来表示的,设备状态的变化模式包括正常变化模式和故障模式,统称为指定模式,可由模式类型和征兆集之间的关系定义。若系统的故障包括 $m$ 个典型故障 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_m$ ,并可提取 $n$ 个征兆 $u_r(r=1, 2, \dots, n)$ 作为 $d_i$ 的特性指标。 $u_r$ 按以下规律取:

$$u_r = \begin{cases} 1 & \text{第 } r \text{ 种征兆出现} \\ 0 & \text{第 } r \text{ 种征兆不出现} \end{cases} \quad r=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

从而变化模式 $d_i$ 可通过一个取值为0或1的 $n$ 维向量表示

$$d_i = [d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in}]^T \quad (2)$$

其中:

$$d_{ir} = \begin{cases} 1 & \text{模式 } i \text{ 呈现征兆 } r \\ 0 & \text{模式 } i \text{ 不呈现征兆 } r \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, m, r=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

### 1.2 指定元分析的基本原理

其基本思想是首先根据设备运行中常见的故障和征兆之

**收稿日期:** 2011-12-19; **修回日期:** 2012-02-09      **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60673084, 60973032, 61173108); 湖南省自然科学基金资助项目(10JJ2045); 湖南省学位与研究生教育教改项目(JG2011C004)

**作者简介:** 刘先锋(1985-),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备智能检测(zdhliuxianfeng@163.com); 彭敏放(1964-),女,教授,博导,博士,主要研究方向为电路测试与诊断、电气设备状态监测、智能信息处理、电磁场理论及其应用等。

间的关系,定义正常或故障变化模式为

$$d_i = [d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in}]^T \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

然后将观测变量  $y$  在指定模式  $d_i$  所表示的方向上作投影,可得到相应的指定元  $w_i$  为

$$w_i = d_i^T y \quad (5)$$

在进行  $k$  次采样的情况下,可得

$$[w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ik}] = [d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in}] \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1k} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对所有  $i=1, 2, \dots, n$ , 可用矩阵形式表示为

$$W = D^T Y \quad (7)$$

其中:  $D \in \mathbb{R}^{n \times n}$  是由标准正交指定模  $d_i \in \mathbb{R}^{n \times 1} (i=1, 2, \dots, n)$  构成的矩阵, 满足  $DD^T = I$ 。  $W \in \mathbb{R}^{n \times k}$  为指定元  $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  的  $k$  次采样矩阵。所以

$$Y = DW \quad (8)$$

从而观测数据矩阵具有基于指定元的分解式为

$$Y = \sum_{i=1}^n d_i w_i \quad (9)$$

而观测数据阵对各指定模式的显著性定义为

$$D_i \% = \frac{e_{d_i}}{\|Y\|_F^2} = \frac{\text{var}(w_i)}{\text{tr}(\Sigma Y)} \quad (10)$$

其中:  $e_{d_i}$  为采样数据阵  $Y$  在  $d_i$  方向投影的能量,  $\|Y\|_F^2$  为观测数据阵的范数。事实上, 式(10)表示第  $i$  种指定模式  $d_i$  对系统变化的贡献率,  $D_i \%$  越大说明故障可能是由这个模式引起的。

综合上述研究, 在 DCA 空间投影框架下, 故障诊断问题则已转换为观测数据阵  $Y$  在空间上能量的显著性检测问题。但在基于 DCA 故障诊断中, 一般需要定义一组相互正交的变化模式, 而整个接地网运作过程中, 由征兆定义的变化模式并非完全彼此正交。为解决这个问题, 基于模式分组的思想, 本文在上述方法的基础上采用完善后的逐步 DCA 故障诊断法。

## 2 逐步 DCA 多故障诊断原理

首先, 按照式(3)的方式定义  $m$  种变化模式  $d_i (i=1, 2, \dots, m)$ , 并将其分为  $P$  组组内正交的变化模式集

$$D^p = [d_1^p, d_2^p, \dots, d_{m_p}^p] \in \mathbb{R}^{n \times m_p} \quad (11)$$

满足

$$D^{pT} D^p = I \quad (12)$$

$$\sum_{p=1}^P m_p = m \quad (13)$$

先将观测数据阵  $Y$  关于第一组正交模式  $D^1$  作 DCA 分析, 根据能量显著性判断是否包含其他故障, 在确定包含其他故障的情况下, 将第一组指定模式从观测数据中移除得到残差数据阵  $Y^2$ ; 再将  $Y^2$  关于第二组指定模式  $D^2$  作指定元分析, 依此类推, 直到对全部故障模式都完成分析。分别计算每步 DCA 过程中指定元的显著性:

$$D_i^p \% = \frac{\text{var}(w_i^p)}{\text{tr}(\Sigma Y^p)} \quad i=1, 2, \dots, m_p \quad (14)$$

据此判断相应的故障有无发生。其诊断过程如图1所示。

上述逐步 DCA 过程是将观测数据阵由非完全正交模式定义的指定元的和表示的, 即

$$Y = D^1 W^1 + D^2 W^2 + \dots + D^P W^P + E \quad (15)$$

适当的取指定模式下的情况, 当指定模式数目  $m \rightarrow n$  时, 残差矩阵  $E \rightarrow 0$ 。

## 3 实例仿真与分析

以图2所示接地网为例进行仿真计算说明, 图2中的数字表示接地网的节点数。对于  $6 \times 6$  的水平等间距接地网, 总计36个节点, 60根导体, 设地网埋深  $h=0.6$  m, 土壤为一层, 其电阻率取  $100 \Omega/\text{m}$ , 导体的电阻率  $\rho=200 \text{ n}\Omega/\text{m}$ , 相对磁导率  $u=200$ , 激励为  $5 \text{ A}$ ,  $500 \text{ Hz}$ 。

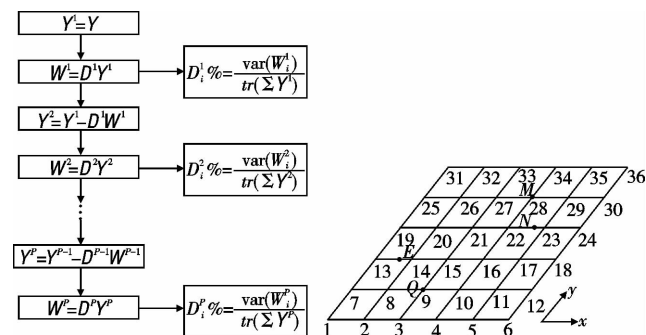


图1 逐步DCA故障诊断算法 图2 仿真计算接地网等效图

接地装置长期运行在地下, 运行环境恶劣, 容易发生腐蚀, 由于土壤性质的不均匀及各接地网导体上通过的电流强度不同, 不同位置的接地网导体在土壤中被腐蚀的程度亦不同, 接地网中的磁场强度、节点电压等也会随之变化。

### 3.1 接地网正常情况时的磁场分布

图3为接地网正常状况下的地表电磁场  $B_x$  的分布情况。

从仿真结果看, 当接地网正常时,  $B_x$  的分布具有明显的规律, 沿  $x$  方向随着远离导体, 每根导体的  $B_x$  逐渐下降, 另每根导体沿  $y$  方向的  $B_x$  分布比较均匀, 一旦接地网局部导体出现断裂点, 势必会改变这种分布特征。当断裂点位于非节点处时, 该处  $B_x$  明显跌落; 而当位于节点处时, 该处  $B_x$  明显升高, 这就为测量磁感应强度提供了判断依据。

### 3.2 接地网正常情况时的电位分布

图4所示为接地网正常状况下地表电位的分布情况。

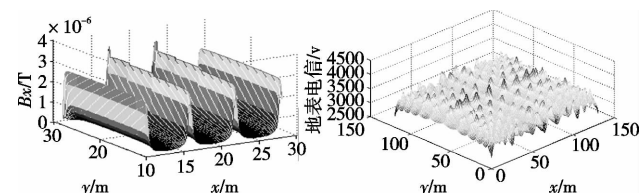


图3 接地网正常时  $B_x$  分布规律 图4 接地网地表电位三维分布图

由图4结果表明, 地网电位分布大致为中间高, 向四周逐渐降低, 网格金属导体上的地面电位高于网格中心处地面电位, 节点处存在垂直接地极的地方更高, 这为判断电位差是否正常提供了依据。

如图2所示, 本文在不同位置、不同腐蚀程度的导体上分别设置  $E$ 、 $Q$ 、 $M$ 、 $N$  等多个故障点, 它们包含轻度腐蚀、中度腐蚀、严重腐蚀和出现断点多种故障模式。对每一次不同的故障模式, 在节点13、14、9、22、23、28、29、33等多个节点中测取六组节点电压  $u_i$  和六组磁感应强度  $E_j$ , 其故障征兆集如表1所示。

仿真中选用12种征兆来表示变化模式和选定8个指定模式  $d_1, d_2, \dots, d_8$ 。其中,  $d_1, d_3, d_5, d_7$  为仿真故障模式;  $d_2, d_4, d_6, d_8$  为正常随机变化模式。设观测数据由12种共存的变化

模式复合而成。

$$Y = \sum_{i=1}^{10} d_i w_i$$

其中:  $w_i$  是指定元样本, 可通过 MATLAB 简单运算产生 12 组相关的随机样本  $w_i (i=1, 2, \dots, 10)$ 。根据 DCA 的分析方法, 计算出  $D_1$  中各指定模式的显著性, 如表 2 所示。

表 1 接地网故障征兆集

|          | $u_{13,14}$ | $u_{14,9}$ | $u_{22,23}$ | $u_{23,28}$ | $u_{28,29}$ | $u_{28,33}$ | $E_{13,14}$ | $E_{14,9}$ | $E_{22,23}$ | $E_{23,28}$ | $E_{28,29}$ | $E_{28,33}$ |
|----------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $d_E$    | 1           | 0          | 0           | 0           | 0           | 0           | 1           | 0          | 0           | 0           | 0           | 0           |
| $d_Q$    | 0           | 1          | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 1          | 0           | 0           | 0           | 0           |
| $d_M$    | 0           | 0          | 0           | 1           | 1           | 1           | 0           | 0          | 0           | 1           | 1           | 1           |
| $d_N$    | 0           | 0          | 1           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0          | 1           | 0           | 0           | 0           |
| $\vdots$ | $\dots$     |            |             |             |             |             |             |            |             |             |             |             |
| $d_m$    | $\dots$     |            |             |             |             |             |             |            |             |             |             |             |

表 2  $D_1$  中各指定模式的显著性

|       | $d_1$  | $d_2$  | $d_3$  | $d_4$  | $d_5$  |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $D\%$ | 0.4275 | 0.0164 | 0.3569 | 0.2278 | 0.4813 |

从表 2 可以看出, 观测数据关于  $d_1, d_3, d_5$  的显著性较大, 据此可判断观测数据中包含这三种故障。

对  $D^1$  中各指定模式再作指定元分析得到 5 个指定元的 Shewhart 图, 如图 5 所示。其中, UCL (upper control limit) 和 LCL (lower control limit) 分别表示控制上、下限, 不难看出, 图 5 的结果进一步验证了基于表 2 进行多故障诊断结果的可靠性。

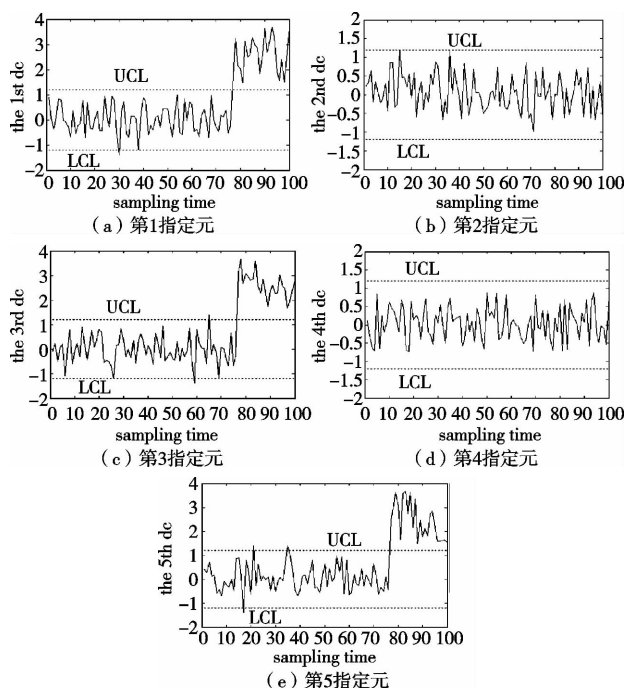


图 5  $D^1$  中各指定元的 Shewhart 图

移除变化模式  $D^1$  后得到残差阵  $Y^2$ , 再将残差矩阵关于第二组变化模式  $D^2$  作指定元分析, 计算各变化模式的显著性, 如表 3 所示。从表 3 可发现,  $d_7$  显著性较大, 据此可判断系统中也发生了这种故障。图 6 中给出了  $D^2$  中各指定元的 Shewhart 图, 结合图 5 和 6 的 Shewhart 图, 本文证实了除已诊断出的  $d_1, d_3, d_5$  外, 系统还发生了  $d_7$  这种故障。

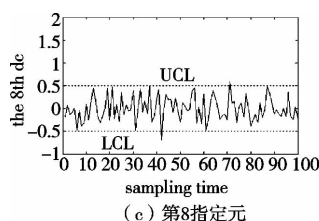
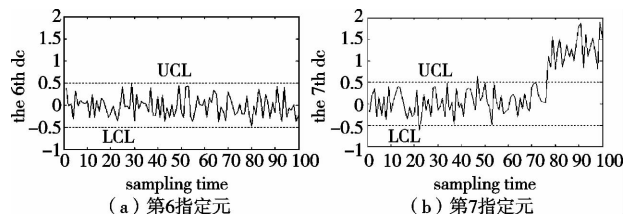


图 6  $D^2$  中各指定元的 Shewhart 图

表 3  $D^2$  中各指定模式的显著性

|         | $d_6$  | $d_7$  | $d_8$  |
|---------|--------|--------|--------|
| $D_i\%$ | 0.0142 | 0.3683 | 0.0096 |

## 4 结 束 语

本文引入的指定元分析法, 为接地网多故障诊断提供了一种新的诊断方法。这种方法在建立 DCA 多故障诊断理论的空间投影框架的基础上, 将异常检测和诊断问题转换为将观测数据向故障子空间投影后的能量的显著性检测问题, 有效地进行了故障的识别和诊断。

## 参 考 文 献:

- [1] 刘建, 王树奇, 李志忠, 等. 基于网络拓扑分层简约的接地网腐蚀故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 122-128.
- [2] 付龙, 吴广宁, 王颖, 等. 青藏铁路变电站接地网腐蚀断裂点的判断[J]. 电力系统及自动化学报, 2006, 18(1): 20-23.
- [3] 王福胜, 张可村, 申培洋, 等. 电力系统中地网腐蚀诊断的一种新的数学模型及其仿真计算[J]. 高校应用数学学报(A 辑), 2007, 22(2): 141-152.
- [4] LIU Cong-li, PENG Min-fang. A new approach for monitoring grounding grid of electrical power system[C]//Proc of the 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. 2007.
- [5] 张秀丽, 骆平. 接地网腐蚀状态电化学检测系统的开发与应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 152-156.
- [6] ZENG Rong, HE Jin-liang, HU Jun, et al. The theory and implementation of corrosion diagnosis for grounding system[C]//Proc of the 37th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial applications of Electrical Energy. 2002.
- [7] 刘洋, 崔翔, 赵志斌. 测量磁感应强度诊断变电站接地网断点[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1389-1394.
- [8] 刘洋, 崔翔, 卢铁兵. 变电站接地网的断点诊断方法[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 21-25.
- [9] 周福娜, 文成林, 汤天浩, 等. 基于指定元分析的多故障诊断方法[J]. 自动化学报, 2009, 35(7): 971-982.
- [10] 周守西, 李柱国, 杨慧, 等. 模糊理论在大型空气压缩机故障诊断中的应用[J]. 润滑与密封, 2004, 166(6): 94-96.
- [11] 金松茂, 江荣汉. 证据结合在电力设备故障诊断中的应用[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2001, 28(2): 55-60, 66.
- [12] 张波, 崔翔, 赵志斌, 等. 大型变电站接地网的频域分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 59-63.
- [13] VENKATASUBRAMANIAN V, RENGASWAMY R, KAVURI S N, et al. A review of process fault detection and diagnosis Part III: process history based methods[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3): 327-346.
- [14] VENKATASUBRAMANIAN V, RENGASWAMY R, YIN K, et al. A review of process fault detection and diagnosis Part I: quantitative model based methods[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3): 293-311.
- [15] 郭明. 基于数据驱动的流程工业性能监控与故障诊断研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [16] 熊丽. 基于数据驱动技术的过程监控与优化方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.