载人航天发射场配电网在线故障诊断定位方法

张光升　吴　非　陈文利
（中国酒泉卫星发射中心）

摘　要　本文结合载人航天发射场配电网监测系统配置情况，以图论为基础，根据配电网的拓扑结构，利用 PLC 实时监测的故障电流参数，提出了基于 PLC 监测信息的配电网在线故障诊断定位方法。该方法在配电网出现故障时能为载人航天发射场配电网故障分析与定位提供技术支持及决策依据。

关键词　配电网　拓扑结构　故障诊断　故障定位
分类号　V476　**文献标识码**　A　**文章编号**　1674-5825（2009）04-0049-04

1 前言

载人航天发射场配电网，按国家规定的一级电力用户标准，采用双电源、双回路供电，对特别重要的测试场所，设置一台 250kVA/200kW 的大型在线式 UPS 不间断电源供电。引进德国西门子公司 S7-300 系列 PLC 产品，在 5 个重要厂房的配电室建立了供配电参数 PLC 监测站，对其中 39 条重要供电回路的电压、电流和频率参数进行实时在线监测与记录，并发送到 C^3I 系统。目前 C^3I 系统对配电信息仅限于状态监测与显示，发挥的作用不大。鉴于此，提出基于 PLC 监测信息的配电网在线故障诊断定位方法，目的是任务期间供配电系统出现故障后，利用实时监测到的故障电流参数，根据配电网的拓扑结构进行在线故障诊断定位，为载人航天发射场配电网故障分析与定位提供技术支持。

2 配电网 PLC 监测系统概述

该配电监测系统采用德国西门子公司 S7-300 可编程器，对 5 个主要建筑物的 39 条重点供电回路的电压、电流参数进行在线监测。供配电监测系统的任务是采集各监测回路的电压、电流参数，将大电压和大电流信号转换成小电压信号或小电流信号，计算和显示数字化值对应的实际参数值。数据采集和计算在各监测站变送器柜内的 PLC 上完成。各监测站将监测数据发送到 C^3I 系统进行模拟显示、保存。通过 RS485 网络总线端子和网络电缆连接，构成供配电监测系统 L_2 局域网（简称 L_2 网），由 C^3I 系统统一管理。供配电监测系统网络如图 1 所示。

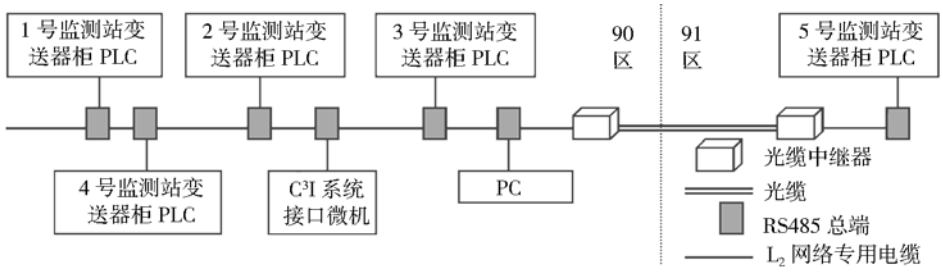

图 1　供配电监测系统总线分布式局域网

来稿日期：2008-10-08
作者简介：张光升（1967-），男，硕士，高工，主要从事发射场地面设备技术保障工作。

3 配电网故障诊断定位方法

3.1 故障定位的目的与方法

配电网故障定位是配电网故障隔离、故障排除和故障恢复的基础和前提，它对于提高配电网运行效率、改善供电质量、减少停电面积和缩短停电时间等方面都具有重要意义。配电网故障定位的目的是根据收集到的故障信息来判断故障发生的馈线及其所在区段，为故障分析和供电恢复提供条件。

故障定位的方法主要可以分为三大类：一类利用继电保护装置、配电网监控系统和其它专门装置提供的特定信息，结合故障电流分析，根据配电网的拓扑结构进行故障定位；一类不需要专门的装置，只需要利用用户打来的投诉电话的信息进行故障定位；另一类是以遗传算法、神经网络算法为代表的人工智能专家型故障定位算法。第一类方法判断比较准确，但需额外的硬件投资；第二类方法基本不需要新的投资；第三类方法需要获取专家知识，适应性不好，而且建立和维护一个专家系统的任务量较为繁琐。

通常各故障诊断定位算法都是以故障过流信息的分析为前提的，对配电网三相短路、两相短路、相间短路和单相接地诸类型的故障诊断都有着很好的适应性。

本文提出配电网故障诊断定位算法属于上述第一类。利用 PLC 监测信息，不需要额外的硬件投入。PLC 监测的故障信息包括故障时的电流、电压值；故障发生时间及故障历时等。

3.2 配电网的数学模型

配电网是一个典型的耗散网络，所谓“耗散”，是因为从负荷的角度看，功率从电源点流出，经过其各条馈线向用户供电（也即耗散开出）。配电网的耗散模型将配电网看成一种赋权图，将线路上的开关作为节点（Node），节点的权为流过该节点的负荷，将相邻两个节点间的配电馈线作为图的边（edge），边的权即为该条边上所有负荷之和。这样处理之后就达到了减少节点数的目的，可以简化模型。对配电网作了如上简化处理建立起耗散网络模型后，可采用矩阵及向量的描述方法表征其网络拓扑结构及源点、负荷分布情况。

3.3 配电网的网络拓扑描述

（1）拓扑的无向图描述

将配电网耗散模型的馈线当作无向边，并采用 N 行 N 列的 D 矩阵加以描述，D 矩阵称作网基结构矩阵，其中 N 为配电网中节点的个数。若节点 i 和节点 j 之间存在一条边，则 $d_{ij}=d_{ji}=1$，其余元素为 0。

网基结构矩阵 D 描述了配电网的潜在联结方式，它决定于配电网线路的敷设。这种用无向图描述的配电网的拓扑结构称作“网基”。

（2）拓扑的有向图描述

将配电网耗散模型的馈线当作有向边，其方向就是线路上的潮流方向，并采用 N 行 N 列的 C 矩阵加以描述，C 矩阵称作网形结构矩阵，其中 N 为配电网中节点的个数。若节点 i 和节点 j 之间存在一条由 i 指向 j 的边，则 $C_{ij}=1$，$C_{ji}=0$，其余元素为 0。

网形结构矩阵 C 描述了配电网的当前实际运行方式。

3.4 基于网形结构矩阵的配电网故障定位算法

基于网形结构矩阵的算法对配电网络拓扑结构的描述采取有向图的方式，基于的判断原理是故障存在的充要条件，无需进行规格化运算，使得计算量减少很多，其对线路末梢区域故障同样具有适应性。该改进算法对配电网拓扑结构通过网络关联描述矩阵加以描述，此结构矩阵反映了配电网的当前实际运行方式，可直观地定位出故障区域且同时能确定出隔离故障区域所应断开的电源侧开关，对分支末梢区域故障也同样适用。算法程序设计简单，满足故障定位的实时性要求。

3.4.1 网络关联描述矩阵

含有故障信息的配电网络需要确定其中各馈线的正方向：对于单电源网络，馈线正方向就是线路功率流出的方向；对于多电源网络，必须事先假定一正电源，令其供出的功率方向作为该馈线各节点的潮流参考正方向。在配电网络中，若把开关视为顶点，则有多少顶点必可确定多少块馈线段区域，即任一顶点必对应着某一区域的唯一源点。因此，可以采用馈线区域与其相应源点开关对应统一编号的方法来生成网络关联描述矩阵 C。对于任意馈线区域，计及馈线正方向后，和该区域相连的周围各开关中唯一源点定义为该区域入点，剩余点均定义为该区域的出点即功率流出点。利用该模型，可生成网络关联描述矩阵 C，矩阵 C 的每一行和某一馈线区域相对应，每一列和某一开关设备（顶点）相对应。一般地，设某一含故障信息的配电网络开关设备数为 n，则网络关

联描述矩阵 $C=[C_{ij}]n\times n$ 中的每个元素作如下定义。

$$c_{ij}=\begin{cases}1,\text{当顶点 } j \text{ 为馈线匹域 } i \text{ 的入点时}\\-1,\text{当顶点 } j \text{ 为馈线匹域 } i \text{ 的出点时}\\0,\text{当顶点 } j \text{ 和馈线匹域 } i \text{ 不直接相连时}\end{cases}$$

3.4.2 故障区间判定矩阵

在配电网络中发生故障后，由馈线开关 PLC 监测采集的故障信息量可得故障信息向量 G，在 N 节点网络中它是一 N 维列向量，在考虑潮流正方向后，其元素 $g_i(i=1,2,\cdots,N)$可定义如下

$$g_i=\begin{cases}1,\text{第 } i \text{ 个节点开关存在故障过流且与参考正向一致}\\0,i \text{ 个节点开关没有故障过流或与参考正向相反}\end{cases}$$

只考虑流过过电流的开关设备及馈线区域而忽略其余开关、馈线段，重新生成的网络关联描述矩阵实际上反映出仅流有故障过流的馈线区域与相应开关设备顶点的拓扑联结关系，此即本算法采用的故障区间判定矩阵 P。矩阵 P 的形成方法相当简便，只需将 C 矩阵中和 G 向量中零元素有着相同序号的列中元素全部清零即可。具体判别只需要计算 P 矩阵中与各馈线区域所对应行元素绝对值的代数和

$f_i=\sum_{j=1}^{N}|p_{ij}|(i=1,2,\cdots,N)$即可。

判别公式如下

$$f_i=\begin{cases}1,\text{区域 } i \text{ 有故障}\\\text{其它，区域 } i \text{ 无故障}\end{cases}$$

$f_i=1$ 意味着第 i 行只有唯一的非零元素 1，即对区域 i 来说只存在功率入点即故障过流“有进无出”。该区域正符合本算法提出的故障诊断判定原理，即为故障馈线段。另外，从本算法判定原理可知网络中末梢区域处的故障同样可以准确定位。

4 应用举例

4.1 配电网络

载人航天发射场关键设备配电网络见图 2。图 2 中，代码数字“1”表示开关，代码数字“(1)”表示馈线区域，“O”表示馈线末梢。7 与(7)之间的闪电符号“ϟ”表示假设该处有短路故障。图 2 中代码数字的具体含义见表 1。

表 1　代码与监测回路名称、信息对照表

代码	监测回路名称	PLC 监测信息
1	4311 航发一回	电压 35kV 电流 200A
2	414 航射一回	电压 10kV 电流 200A
3	415 航动一回	电压 10kV 电流 200A
4	90–2 动力进线	电压 380V 电流 2000A
5	91 中频电源	电压 380V 电流 250A
6	91–1 动力进线	电压 380V 电流 1000A
7	91 动力 1 (摆杆，平台，电梯)	电压 380V 电流 300A
8	91 动力 2 (塔吊，空调)	电压 380V 电流 400A
9	91 动力 3 (发射台，空调)	电压 380V 电流 400A

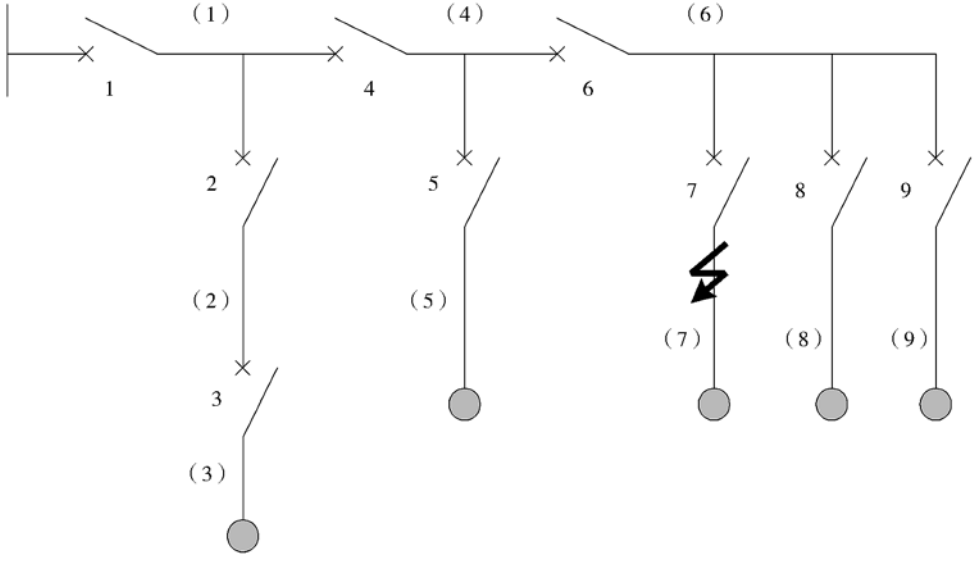

图 2　载人航天发射场关键设备配电网络

4.2 建立网络关联描述矩阵

按照上述方法，对图 2 建立网络关联描述矩阵 C 为

$$C=\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.3 建立故障区间判定矩阵

假设图 2 中馈线区域(7)处发生故障，则 PLC 应监测到开关 1、2、6、7 有故障过电流信号，将开关 1、2、6、7 的故障信息置数字“1”，其余开关的故障信息置数字“0”。从而得到相应的故障信息向量为 $G=[1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0]^T$。

将网络关联矩阵 C 中与 G 向量中零元素有着相同序号的列中元素全部清零，得到的故障区间判定矩阵 P 为

$$P=\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.4 进行故障定位

在图 2 中假设的故障下，通过故障判定矩阵可以计算出，$f_1=f_2=f_6=2$，$f_7=1$，$f_3=f_4=f_5=f_8=f_9=0$。根据前述故障判别公式，只有 $f_7=1$，因此，判定馈线区域(7)，即以开关 7 为入点的区域为故障区间，与假设相符，判断正确。

5 结束语

供配电 PLC 监测系统数据应用于故障诊断，需要注意以下几点，供配电监测系统只监测系统中的 B 相，并没有三相全部监测。监测系统主要测量了重要回路的负载电流参数和电压参数，而且只测量了一相参数。因此，根据本文提出的方法，配电网出现故障时，只能将故障大致定位至某一区域，给配电网故障分析与定位提供技术支持。新一代智能断路器本身带有遥信、遥测、遥控、谐波分析、故障录波等功能。再配备配电监控系统，通过 RS485 接口，接入载人航天发射场 C^3I 监控系统，可直接作为配电系统故障诊断的依据。

参 考 文 献

[1] 徐青山著.电力系统故障诊断及故障恢复.北京：中国电力出版社，2007

[2] 王昌长，李福祺，高胜友著.电力设备的在线监测与故障诊断.北京：清华大学出版社，2006

[3] 徐克俊著.航天发射故障诊断技术.北京：国防工业出版社，2007

The Method of On-line Fault Diagnosis and Location for Electric Distribution Network in Manned Spaceflight Launch Site

ZHANG Guangsheng　WU Fei　CHEN Wenli

(China Jiuquan Satellite Launch Centre)

Abstract: This paper studies the monitoring system installed in manned spaceflight launch site distribution network, and puts forward a method of on-line fault diagnosis and location based on PLC monitor parameters, on the basis of graph theory, the topology structure of distribution network, as well as the real-time data of PLC on-line monitor of fault current parameters. when fault ocears in, this method can provide technological support for fault analysis and location of distribution network, and suppors decision making of chief commander.

Keywords: Distribution network, Topology structure, Fault diagnosis, Fault location