

配电网故障定位的通用矩阵算法

张 钊

(东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 提出了一种反映馈线区域和开关设备拓扑联接关系的网络关联描述矩阵模型, 并给出了基于这一模型的馈线故障区域定位的新方法, 可直观地定位出故障区域, 且同时能确定出隔离该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。该算法程序设计简单, 进一步满足了故障定位的实时性要求, 并可推广至多电源复故障系统。通过算例证明了此算法的正确性。

关键词: 故障直接定位; 网络关联描述矩阵; 实时性; 多电源系统

中图分类号: TM 711; TM 727.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)05-0040-03

0 引言

馈线自动化是配电网自动化系统的重要组成部分, 其核心要实现的功能是配电网故障定位和隔离, 并为非故障区域的恢复供电奠定必要条件。随着配电网规模的日益扩大, 配电网故障定位的实时性要求就显得格外突出, 所以开发出优异性能的故障定位算法软件满足在线要求, 已成为众多配电自动化方面专家和学者共同关注的问题。故障定位软件均是基于馈线终端单元 FTU (Feeder Terminal Unit) 等现场监控终端上报的故障过流信息而工作的。

文献[1]及随后发展的适用于多电源并列运行情况下的文献[2]提出了配电网故障区段判断的矩阵算法。文献[3,4]对上述模型进行了改进, 采用有向图描述配电网, 基于的判断原理也是故障存在的充要条件, 从而避免了矩阵相乘和规格化处理, 减少了计算量, 但从形成的故障判定矩阵到最终故障区域的定位需对每一流过故障电流的开关设备一一进行搜寻, 校验其下游子开关状态, 再根据判断原理进行判断。另外, 文献[1~4]所述方法的定位结果都是通过对比各区域参考正向上下游两侧各开关流经的过流状态得出的, 若有定位结果则至少有 2 个节点, 故均不能直接正确定位网络树状分支末端(故障区段对应 1 个节点)的故障。

本文针对文献[1~4]尚有待改进之处, 采用馈线区域与该区域源点开关对应统一编号的方法形成网络拓扑描述矩阵, 由此再根据故障信息形成最终的故障判定矩阵。该故障判定矩阵简单直观, 每一行均与相应馈线区域对应, 由每行各元素绝对值代数和即可判定该行所对应馈线区域是否故障, 实现了故障区域的直观定位。该方法编程简单, 运算量极小, 进一步改善了在线实时性能, 同时该故障定位算法也可扩展至多电源多故障的复杂故障系统, 且适用于末梢馈线段的定位。

1 算法基本原理

本节从单电源辐射型配电网入手, 引入一种馈线区域与其源点开关统一编号的方法生成网络关联描述矩阵 $D^{[5]}$, 再根据故障时 FTU 检测到的故障过流信息对原矩阵 D 加以处理而形成故障区间判定矩阵 P 。最后, 依据 P 矩阵进行馈线故障区域的直接定位。

1.1 网络关联描述矩阵

单电源配电网潮流呈单向流动特性, 若把开关视为顶点, 则有多少顶点必可确定多少块馈线区域, 即任一顶点必对应着某一区域的唯一源点。这某一区域可能是一般的馈线段, 也可能是 T 接点区域或末梢馈线区域。因此, 可采用馈线区域与其相应源点开关统一编号的方法生成网络关联描述矩阵 D 。

如图 1 所示, 对馈线上开关设备(断路器、分段开关)作了统一编号, 编号无需固定规则, 这里有意打乱。按照上述馈线区域编号原则, 各区域编号如图 1 所示, 其中有圈数字为区域编号。对任一馈线区域, 由于单电源配电网潮流辐射性流动, 和该区域直接相连的各开关中唯一源点定义为该区域入点即功率流入点, 剩余点均定义为该区域出点即功率流出点。利用该模型, 可生成网络关联描述矩阵 D , 其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。一般情况下, 设某一含故障信息的配电网开关设备数为 N , 则网络关联描述矩阵 $D = [d_{ij}]_{N \times N}$ 中的每个元素作如下定义:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当顶点 } j \text{ 为馈线区域 } i \text{ 的入点时} \\ -1 & \text{当顶点 } j \text{ 为馈线区域 } i \text{ 的出点时} \\ 0 & \text{当顶点 } j \text{ 和馈线区域 } i \text{ 不直接相连时} \end{cases}$$

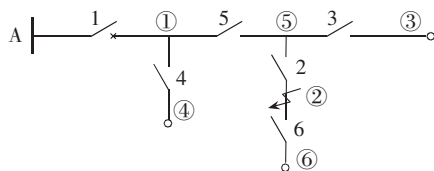


图 1 典型配电网

Fig.1 A typical distribution network

按照上述方法,对图1建立的网络关联描述矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

可以看出该矩阵是一非对称矩阵。其中,主对角线各元素均为1,这主要是各馈线区域与其入点采用统一编号所致。显然,每一行有且仅有一个“1”元素,这与入点对应;各行元素“-1”与该行对应区域出点相联系,其数量多少即该区域出点的多少反映了不同馈线区域类型,如T接点馈线区域、一般馈线段或未梢馈线区域。

1.2 故障区间判定矩阵

在单电源辐射配电网中发生故障后,由馈线开关FTU上报的开关故障信息量可得故障信息向量 G ,在 N 节点网络中它是 N 维列向量,其元素 g_j ($j = 1, 2, \dots, N$) 可定义如下:

$$g_j = \begin{cases} 1 & \text{开关 } j \text{ 经历了故障电流} \\ 0 & \text{开关 } j \text{ 未经历故障电流} \end{cases}$$

假设图1中馈线区域②处发生故障,则相应的故障信息向量为 $G = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ 。

分析上述故障列向量,其中 n ($n < N$) 个“1”元素的列下标实质上与流过故障过电流的 n 个开关设备顶点编号相对应。可以推测到若在整个网络拓扑中,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,重新生成的网络关联描述矩阵实际上反映出仅保留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,此即故障区间判定矩阵 P 。显然,故障区域一定位于整个流过过流开关链上的最末级区域,形象地说,即位于故障电流“有进不出”的区域,故可在 P 矩阵中通过搜寻只存在入点(源点)而无出点的馈线区域的办法来方便地实现故障区域定位。至于 P 矩阵的形成方法相当简便,只需将 D 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。按照此修正方法,得到的故障区间判定矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

下面将根据 P 矩阵进行故障区间直接定位。如前所述 P 矩阵实际是对仅流经过电流的馈线区域及开关连接关系的一种有向描述,对于图1示例而言其 P 矩阵实际上是反映了图2所示简化了的等效配电网拓扑关系。 P 中零元素行实际对应着未流经

过电流的馈线区域,此区域实际被完全隔离不予考虑。由上可知故障定位实质是在简化了的等效配电网中搜寻“末梢区域”(如图2中区域②)的过程。具体判别只需计算 P 矩阵中与各馈线区域所对应的各行元素绝对值的代数和 $f_i = \sum_{j=1}^N |P_{ij}|$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 即可。判别公式如下:

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

$f_i = 1$ 意味着 i 行只有唯一的非零元素1,即对区域 i 只存在功率入点即故障过流“有进无出”,该区域符合故障区域判定原理。另外,从本算法判定原理可知对原本网络中末梢区域处的故障可同样准确定位。

对于图1示例,在假设的故障下,通过 P 矩阵可计算出 $f_1 = f_5 = 2, f_2 = 1, f_3 = f_4 = f_6 = 0$,则判定馈线区域②(即以2节点为入点的区域)为故障区间,与假设相符,判断正确。从中不难发现采用馈线及其源点的统一编号法,在判断出故障馈线区域的同时亦可确定隔离该区故障应切断的电源侧开关。

2 多电源并列情况下算法拓展

由前一节论述可以看出,该改进型矩阵算法对单电源单重故障的故障馈线区间可以做出准确的定位,而在实际配电网中,多电源供电的并列运行状态也很多,此算法在规则略加修改的情况下也可方便地推广到配电网中多电源多重故障的复杂情况。

为使算法能够适用于任意多个电源,本算法将对网络拓扑和故障信息的描述都考虑其方向性^[2~4]。对于单电源网络,全网潮流参考正方向就取该电源供电下线路潮流的实际流向;对于多电源网络则假定配电网仅由其中某一电源供电(该电源可任取),全网潮流参考正方向就取该电源向全网供电的功率方向。只有事先确定全网潮流参考正方向后,才能建立相应的网络关联描述矩阵。在多电源并列运行情况下,故障信息向量元素定义为

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

经过以上处理后,将配电网的多电源故障定位问题转化为单一电源的故障定位问题。若将其推广至配电网中多电源多重故障的复杂情况,只要对每一电源都假定一次正方向后,且在此正向下应用本文的直接定位改进型矩阵算法求一次故障馈线区域,就可以最终求得所有存在故障的馈线区域。

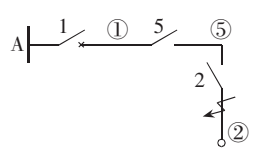


图2 基于 P 矩阵的等效配电网
Fig.2 Equivalent distribution network based on matrix P

3 算例

以下将针对图3所示的三电源并列供电模式下存有三重故障的配电网具体说明本算法进行故障区间定位的应用。设故障点为 K_1, K_2, K_3 。

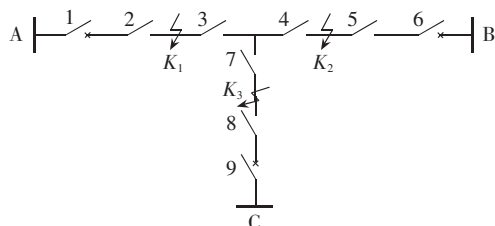


图3 并列三电源配电网中的复杂故障定位

Fig.3 Complex fault locating in a three-power-source distribution network

设B为供电电源,则取该电源供电时潮流方向为全网参考正方向并对馈线区域与其相应源点开关统一编号如图4所示,则

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在此正方向下,只有开关5,6流有正向过电流,则

$$G = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (4)$$

由前修正规则,得最终故障区间判断矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

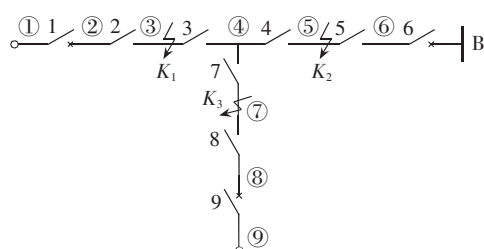


图4 B为供电电源时的故障定位

Fig.4 Fault locating when B is the power source

由式(5)可计算出 $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_7 = f_8 = f_9 = 0, f_5 = 1, f_6 = 2$,因此区域⑤即以5节点为入点的区

域有一故障,因此该节点应予以断开。再分别假设A和C为供电电源,可以求得节点2与3之间以及节点7与8之间的故障,结果列于表1。

表1 三电源配电网复杂故障定位结果

Tab.1 Results of complex fault locating in a three-power-source distribution network

定位取 用电源	定位 短路点	正方向故障 过电流节点	故障馈线区域入点 (应断开的开关设备编号)
A	K_1	1,2	2
B	K_2	6,5	5
C	K_3	9,8	8

4 结论

馈线故障区域直接定位的改进型矩阵算法着眼于馈线区域和开关顶点的关联拓扑联接关系,由此通过最终形成的故障区间判定矩阵可直观地定位出故障区域且同时能确定出隔离该区域应断开的各电源侧开关,运算处理量极小,完全可满足在线应用的需要。算法原理本身体现了对末梢馈线段故障定位的优越性。算例结果明确、直观,证明该算法亦可拓展应用于多电源多故障复杂配电网故障定位场合。

参考文献:

- [1] 刘健,倪建立,杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化,1999,23(1): 31-33.
LIU Jian, NI Jian-li, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(1): 31-33.
- [2] 王飞,孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统自动化,2003,27(24): 45-46,49.
WANG Fei, SUN Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(24): 45-46,49.
- [3] 卫志农,何桦,郑玉平. 配电网故障定位的一种新算法[J]. 电力系统自动化,2001,25(14): 48-50.
WEI Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping. A new algorithm for the fault sections location [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(14): 48-50.
- [4] 吴薛红,郑梅,唐小波. 配电网故障区间定位的新型矩阵算法[J]. 南京师范大学学报,2003,3(2): 54-57.
WU Xue-hong, ZHENG Mei, TANG Xiao-bo. A new matrix algorithm for fault section locating in distribution system [J]. *Journal of Nanjing Normal University*, 2003, 3(2): 54-57.
- [5] 刘健,毕鹏翔,董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [6] 林景栋,曹长修,张帮礼. 基于拓扑辨识的配电网故障定位算法[J]. 重庆大学学报,2001,24(5): 51-54.
LIN Jing-dong, CAO Chang-xiu, ZHANG Bang-li. Fault section diagnosis algorithm of distribution networks based on topology identification [J]. *Journal of Chongqing University*, 2001, 24(5): 51-54.

(责任编辑:柏英武)