

广域保护条件下电网初始故障的快速定位

潘一飞^{①*} 付强^{**} 郭良^{*} 黄珣^{*}

(^{*} 国网冀北电力有限公司工程管理分公司 北京 100038)

(^{**} 北京华电天仁电力控制技术有限公司 北京 100085)

摘 要 本文将传统保护中的纵联方向比较原理引入到广域保护中,通过元件/智能电子设备(IED)关联矩阵来反映 IED 对于不同元件的故障判断的重要性,并借用 Petri 网络中的基本概念与矩阵推导从数学角度获得 IED 与电力元件之间的量化关系。运用元件/IED 关联矩阵与各方向元件的动作值矩阵提出连锁故障初始故障定位的方法。与传统故障定位方法相比,仿真结果表明在规模较大的电网中该方法可快速、准确地搜索出初始故障的发生元件,验证了本文定位方法的有效性。

关键词 初始故障, 广域保护, 纵联方向保护, 电网连锁故障, 快速定位

0 引言

近年来,现代电网的规模扩大和互联互通使得其安全稳定性的问题变得越来越复杂,这就对电力系统的安全稳定运行提出了新的要求和挑战,快速、可靠的切除可能引发电网连锁故障的初始故障,防止由连锁式故障引起的全网崩溃已经成为研究的热点。国内外历次发生的大规模停电事故的经验教训表明,作为大电网安全保障第一道防线的继电保护,其保护装置正确、快速、可靠的动作,能够有效地防止事故的扩大,对于维持电网安全稳定运行具有重要作用^[1,2]。特别是 2003 年北美大停电和伦敦大停电,而造成这些大规模停电的罪魁祸首正是继电保护系统在发生初始故障后未能正确判断故障位置并错误动作。根据目前已有的资料显示,已发生的大停电事故中 78% 与初始故障后保护装置未能正常判断故障点并进行了错误的拒动或误动等操作有关,继电保护装置引发的故障隐患已成为连锁故障发生的主要机理之一^[3]。

目前,研究连锁故障初始故障的方法很多,一般

都是根据连锁故障发生后,运用还原法的原理对事故进行仿真分析,如模式搜索法的随机模拟,模型分析法的 OPA 模型^[4]、CASCADE 模型^[5,6]等,而这些方法目前未大规模应用于实际电网中,特别是在初始故障发生的瞬间这些方法都无法做到快速定位和排除故障。本文提出了基于纵联方向保护原理的广域继电保护的算法,能够快速、准确地定位引起连锁故障的初始故障,由此能够防止保护装置发生拒动、误动等错误操作,从而避免了由此引发系统复合转移、稳定性下降而造成的大规模连锁故障^[7]。

1 广域保护算法

1.1 电气元件与智能电子设备的关联矩阵

在目前采用广域保护的大电网中,其保护措施一般具有 2 层架构。每个断路器均装有智能电子设备(intelligent electronic device, IED),其受调度中心的中央控制中心的决策控制。在集中式的系统结构下,所有 IED 在全球定位系统(global positioning system, GPS)同步对时下,采集所管辖电力元件的各种模拟量、开关量和位置量信息,并将所采集数据进

① 男,1990 年生,硕士;研究方向:输变电工程,电压稳定;联系人,E-mail: panyifei1990@foxmail.com
(收稿日期:2018-05-08)

行简单处理后打上“时标”传送至决策中心^[8]。决策中心接收来自各个 IED 的信息,故障情况下决策中心能够根据 IED 的故障量信息做出准确判断,然后根据主保护的动作状态及断路器位置信息来判断故障的切除情况。在主保护失效等不利情况下,决策中心做出保护和控制决策经通信系统下发至 IED。终端 IED 接收命令,执行跳合闸指令,完成后备保护的功能。

根据引入广域保护中决策层根据信息交互实现故障定位的原理,可利用广域保护范围内的电力元件与 IED 之间的关联矩阵来表示该元件与其保护范围内的 IED 的连接关系。每个 IED 的保护区域由主保护区域与后备保护区域构成,在任一个元件与 IED 的关联矩阵可以构成一个行向量,其维数为所辖范围内所有 IED 的数目。那么元件与 IED 之间的关联矩阵可表示为

$$\mathbf{Q}_{Lp} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad \cdots \quad q_{n-1} \quad q_n] \quad (1)$$

式(1)中,元素 $q_p (1 \leq p \leq n)$ 为元件 p 与 IED 的关联系数,即 IED 对此元件的权重值,其值越大表明元件与该 IED 联系越紧密,其故障信息对预测元件是否发生故障的分析、计算越重要。若应用此方法与变电站集中式结构的广域保护系统相结合^[9],将由此得出的关联矩阵都存放在决策层中,即得出一个 $M \times N$ 维的矩阵。进一步可按照元件类型和安装位置进行分类,优化排序。

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccccccc}
 \text{普通}IED & & & \text{母联}IED & & & \text{虚拟母联}IED & & \text{非断路器}IED \\
 \hline
 IED1 & \cdots & IEDj & IEDk & \cdots & IEDl & IEDm & \cdots & IEDp & IEDq & \cdots & IEDz
 \end{array} \\
 \left[\begin{array}{cccccccccccc}
 L1 & q_{11} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & q_{1z} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 Lm & q_{j1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & q_{jz} \\
 B1 & q_{k1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & q_{k1} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 Bn & q_{m1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & q_{mz} \\
 T1 & q_{n1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & q_{nz} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 Tk & q_{w1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & q_{wz} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \quad (2)$$

式(2)得到广域保护系统下的 $M \times N$ 维的矩阵, M 为整个保护范围内一次设备的数量, N 为系统范围内 IED 的数量。

1.2 关联矩阵元素的确定

引入 Petri 网的基本原理就关联矩阵中元素的合理取值进行推导,则仅需以令牌在 Petri 网中的位置分布为研究对象^[10,11],并用矩阵表示。令牌在网络模型中的位置可以表示为

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_0 + \mathbf{H} \cdot \mathbf{S} \quad (3)$$

式(3)中, $\mathbf{W}_0$ 称为令牌的初始分布状态矩阵, 列数为位置节点数, 当该点有令牌时取 1 否则取 0; $\mathbf{H}$ 则为转移激活的条件关联矩阵, 其列数就是转移节点数, 该点被激活时取 1 否则取 0; $\mathbf{S}$ 为输入输出关联矩阵, 每一行代表一个转移节点, 而每一列代表列对应的一个位置节点, 若转移节点是位置节点的输出取 1, 若转移节点是位置节点的输入取 -1, 当转移节点与位置节点无直接联系时取 0。

由式(1)可知,在广域保护系统中的 IED 都在由主保护区域和后备保护区域组成的保护范围,所以在 Petri 网搜索时仅需要搜索保护范围内的所有 IED。每一次转移发生后,令牌的位置都将发生变化,因此在式(3)中仅有 S 是固定不变的。 W 与 H 的计算可按下述计算公式求得:

$$\mathbf{W}_n = \mathbf{H}_n \times \mathbf{S} \quad (4)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{W}_{n-1} \times \mathbf{S}^T \quad (5)$$

由式(4)可以发现 $\mathbf{W}$ 元素的特性,过多次转移后,若此时某位置节点获得令牌其值为 1;若从未曾获令牌其值为 0;若为其他值则表示该点曾获得过令牌。该值越高代表此 IED 与初始故障发生点的电力元件关系越密切。当需要求解其他元件与 IED 之间关联矩阵的系数时,元件对应的转移节点处引入故障节点 G ,按照上述过程不断求解 $\mathbf{W}$,直至所有保护范围内含有该元件的 IED 都曾获得过令牌。此时矩阵中元素值便是该电力元件与对应的 IED 间的关联矩阵元素。

再将所辖保护范围内的电网拓扑结构,建立起电力元件与 IED 之间的关联矩阵,并对矩阵进行优化,存储于系统决策层,以便于下一步的初始故障判据的制定。对于系统决策层来说,清楚系统各元件与 IED 之间的关联矩阵,是制定初始故障判据的基础。在了解一个元件与系统 IED 之间的紧密程度之后,系统在对该元件进行故障识别时,与该元件联

系最为密切的 IED 的故障信息价值最高,对于系统的故障识别的准确度也相应最高^[8]。

利用纵联方向保护的电力系统广域保护是当前电力系统保护的一种重要方法,其核心思想是利用电力系统多点方向信息进行比较分析,做出判断^[12]。该方法的优点是在极端条件下决策层仍然能够根据这些 IED 的方向信息确定故障位置,从而采取正确的跳闸措施。利用纵联方向保护方法实际上是利用了线路两段的两个方向元件:即正向 $F+$ 和反向 $F-$ 。 $F+$ 是正向故障动作,反方向故障不动作, $F-$ 则相反。当元件动作行为满足故障线路特征时保护就发跳闸指令,否则保护闭锁。使用纵联方向原理使保护范围内的 IED 元件都具有方向性,进而由这种方向性可以确定故障点(支路或节点)。

对于保护范围内为负方向信息的 IED,可将其与该元件的关联矩阵中对应位置加上“-”号来加以区分。此时 W_n 具有纵联方向保护的方向性,从而使元件与 IED 之间的关联矩阵能够从数值和方向两方面反映出二者之间的联系。在单个 IED 的保护范围内,确立每个电力元件相对于该 IED 的动作方向,并形成相关的方向矩阵 D_{IED} 。

$$D_{IED} = [d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad d_4 \quad \cdots \quad d_{n-1} \quad d_n] \quad (6)$$

式(6)中元素值 1 表明对应元件在 IED 的正方向保护范围内,元素值 -1 表明电力元件的位置在 IED 的保护方向相反,元素值为 0 表明电力元件不在该 IED 保护范围内。在元件/IED 关联矩阵中,根据式(6)中的 IED 编号找到关联矩阵中 IED 对应的列,并提取该列组成列向量,记为 W_{nIED}^T ,即可得到所求的带有方向的元件或 IED 关联矩阵 Z :

$$Z = \text{diag}(D_{IED} \times W_{nIED}^T) \quad (7)$$

式(7)中 Z 中每一行表示广域保护系统内的一个电力元件,其优点是以每个 IED 为单位进行变换,而且对整个矩阵的运算量相对较低,当系统内的 IED 分组在数台计算机同时运算时可比现行连锁故障初始故障的求取的运算量显著减小。

2 初始故障定位指标

为求取连锁故障的初始故障,可按对现行传统

保护中的方向对 IED 元件的动作取值进行一个规范,即当 IED 存在故障时可表示为

$$\theta = \begin{cases} 1 & \text{IED 判定初始故障方向为正} \\ 0 & \text{IED 判定时未发现初始故障} \\ -1 & \text{IED 判定初始故障方向为负} \end{cases} \quad (8)$$

正常情况下系统处于监视模式,系统内的所有 IED 对各自相应的元件进行信息采集,并且将数据打包发送至决策层。当广域保护系统的决策层检测到所辖范围内的 IED 有方向元件动作时,系统立即由监视模式转入故障处理模式。在故障处理模式,决策系统在一定时间范围内收集所有 IED 的动作信息,并按照式(8)对 θ 进行赋值。当所有的 θ 都赋值后,按照式(3)中 IED 调整后的结构,形成一个反映 IED 动作信息的列矩阵 G^T, G^T 的结构如下式所示:

$$G^T = \begin{bmatrix} \text{普通 IED} & \text{母联 IED} & \text{虚拟母联 IED} & \text{非断路器 IED} \\ IED1 \cdots IEDi & IEDj \cdots IEDk & IEDl \cdots IEDm & IEDn \cdots IEDp \\ 1 & \cdots & -1 & 1 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

带有方向性的元件/IED 关联矩阵其形式如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \text{普通 IED} & \text{母联 IED} & \text{虚拟母联 IED} & \text{非断路器 IED} \\ IEDa \cdots IEDj & IEDk \cdots IEDl & IEDm \cdots IEDp & IEDq \cdots IEDz \\ \left\{ \begin{array}{l} L1 \\ \vdots \\ Lm \\ B1 \\ \vdots \\ Bn \\ T1 \\ \vdots \\ Tk \\ \vdots \end{array} \right. & \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & g_{1z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{j1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & g_{jz} \\ g_{k1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & g_{k1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{m1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & g_{mz} \\ g_{n1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & g_{nz} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{w1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & g_{wz} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(9)、式(10)构成了本文中基于纵联方向比较原理的连锁故障初始故障的定位基础,故障发生后在决策层按照式(11)形成系统内每个元件的故障判断结果。

$$K = T \cdot G^T \quad (11)$$

式(11)中, K 代表系统中保护范围内所有元件

的故障判断结果 k_i 组成的列向量。

在广域保护系统中的所有电力元件应当都具有阈值,而阈值是根据电网的拓扑结构而确定的,也是当前研究连锁故障中常用的量^[13]。在研究连锁故障的初始故障时确定阈值时要从 2 种情况进行考虑。第一,当保护范围包含该元件的所有 IED 具有明确的方向信息,此时一般可以利用的广域信息相对较多,使得信息容错性与数据冗余度相对较高,决策层主要利用元件的主保护的 IED 信息即可完成相应的故障定位,此时从故障定位的准确性与可靠性方面考虑阈值应适当取高。第二,当缺少部分保护范围内包含该元件的 IED 的方向信息,一般是由通信原因造成方向信息不能够及时传输到决策层或者由元件灵敏度不够造成没有方向元件没有动作,系统的容错性与数据冗余度相对较低,因此故障判断的阈值也应适当调低。

对于线路或者变压器元件而言,如果其对应的故障判断结果 k_i 满足下列条件,则系统可能的故障点处于该元件内。

$$k_i \geq k_{set}$$

(12)

式(12)中, k_{set} 为系统预先设定的阈值。对于母线元件而言,如果其对应的故障判断 k_i 满足下列条件,则系统认为是该母线发生初始故障。

$$k_i \geq k'_{set}$$

(13)

式(13)中, k'_{set} 为系统预先设定的母线故障阈值,可根据实际系统状态确定故障阈值^[8,12,13]。

3 算例分析

根据文献[1]、[3]和[5]所述,引发连锁故障的初始故障一般都发生在如长程连接、靠近重要发电机或重要负荷的关键线路和节点,为快速验证本文方法的有效性、可靠性并方便仿真和计算,本文忽略了电网中不会造成连锁故障的节点和线路,将我国某地区的实际电网简化成如图 1 所示的结构。首先形成元件/IED 关联矩阵,矩阵的行按照线路 L1 ~ L15、母线 B1 ~ B10 排列共 25 行,矩阵的列按照 IED1 ~ IED30 排列共 30 列。

以线路 L4 为研究对象,当 L4 发生短路故障

时,图 1 系统中 IED1 ~ IED30 的动作值矩阵为:

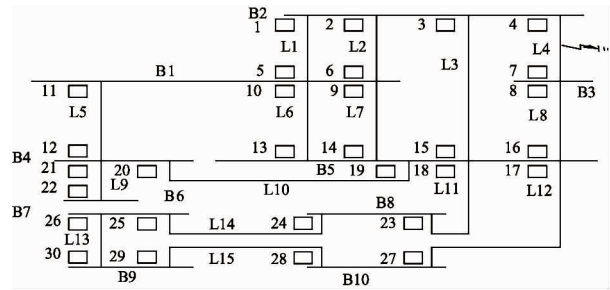


图 1 经简化后的 10 节点系统结构图

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

根据关联矩阵 T 以及 IED 动作值矩阵,对线路 L1、L2、L3、L4、L8 以及母线 B2、B3 的故障计算结果如表 1 所示。

表 1 故障点附近线路及母线的故障计算结果

保护对象	主保护 IED 动作取值	故障判断结果 (绝对值)	故障阈值
L1	IED1: -1 IED5: 1	6	55
L2	IED2: -1 IED6: 1	6	55
L3	IED3: -1 IED15: 1	6	70
L4	IED4: 1 IED7: 1	56	44
L8	IED8: -1 IED16: 1	12	65
B2	IED1: -1 IED2: -1 IED3: -1 IED4: 1	18	28
B3	IED7: 1 IED8: -1	6	14

从表 1 可以看出,故障线路的故障计算结果要明显高于其他非故障线路的故障计算结果,主要原因在于在非故障线路中负方向元件动作后起到一定的负反馈作用,从而部分抵消了非故障线路的正方向元件动作后的故障计算值,而在故障线路中则不存在这种情况。根据这种特征,再加以设定适当的故障阈值,广域保护系统的决策层就能区分故障元件与非故障元件。而这样就可以在电网中迅速、准确地找到连锁故障的初始故障,从而使决策层能准确找到故障发送点,使保护装置正常运行,能够有效地缓解甚至避免连锁故障的发生。

当采用不经简化后的地区电网模型时,依然采用如本文所述方法,相对于本文其仅为增加 IED 及相关设备,得到的结论与本文相同,故不再叙述,这也证明了本文方法的有效性和可靠性。

根据文献[14]的方法,在 10 节点系统中 L4 为支路的故障进行保护系统分别进行正常和拒动两种操作,通过比较发现,当继电保护装置正常操作时,该系统经过 $N - 4$ 次后才会发生系统解列、崩溃,而拒动时,若考虑最严重状态下,线路 L1、L2、L3 和 L8 会因此断开,那么系统即在这种情况下当即发生崩溃。

4 结 论

本文将广域保护引入到可能连锁故障的初始故障的预测和定位中,并将传统保护中的纵联方向比较原理与广域保护的算法相结合。在实际电网中,能够快速地诊断、定位初始故障,防止继电保护装置的错误操作,大大提高了系统的稳定性、安全性,有效地降低了连锁故障发生的概率。对于连锁故障机理的研究和引起的大停电事故的预防有一定的指导意义,同时也是未来研究复杂电力网络连锁故障初始故障定位的趋势。

参考文献

[1] 丁明,钱宇骋,张晶晶,等. 基于风险评估的电力系统连锁故障协调控制模型[J]. 电力系统自动化, 2016,

40(7):1-8

- [2] 丁明,朱自强,张晶晶,等. 保护隐性故障及其对电力系统连锁故障发展影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(1):256-265
- [3] 冀星沛,王波,董朝阳,等. 电力信息-物理相互依存网络脆弱性评估及加边保护策略[J]. 电网技术, 2016, 40(6):1867-1873
- [4] Ren H, Dobson I, Carreras B A. Long-term effect of the $n - 1$ criterion on cascading line outages in an evolving power transmission grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(3):1217-1225
- [5] 石立宝,简洲. 基于动态攻防博弈的电力信息物理融合系统脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17):99-105
- [6] Dobson I, Chen J, Carreras B A, et al. Examining criticality of blackouts in power system models with cascading events[C]. In: *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, Big Island, USA, 2001. 11-20
- [7] 卢锦玲,陈媛,朱永利. 基于输电线路过负荷特性的连锁事件识别[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(5):27-31
- [8] 丛伟,潘贞存,赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21):8-14
- [9] 高卓,罗毅,涂光瑜. 基于分布式对象技术的变电站远程维护系统[J]. 电子系统自动化, 2002, 26(16):66-70
- [10] 谢红涛,童晓阳. 基于分层模糊 Petri 网的电网故障综合诊断方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1):246-252
- [11] 李日隆,李雄刚. 利用 Petri 网对电力系统进行故障诊断[J]. 华中电力, 2000, 1(13):1-4
- [12] 张慧. 一起线路故障纵联方向保护拒动的分析及改进方案[J]. 宁夏电力, 2009(1):38-40
- [13] 胡晟,房金彦. 广域测量系统故障定位新方法[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(2):9-12
- [14] 余晓丹,贾宏杰,陈建华. 电力系统连锁故障预测初探[J]. 电网技术, 2006, 13(30):20-25

Fast location based on wide area protection on initial failure of electric network

Pan Yifei*, Fu Qiang**, Guo Liang*, Huang Xun*

(* State Grid Jibei Electric Power Company Limited Engineering Management Company, Beijing 100038)

(** Beijing Huadian Tianren Electric Power Control Technology Co. Ltd, Beijing 100085)

Abstract

The traditional longitudinal direction conception is introduced into the wide-area protection, and components / intelligent electronic device (IED) correlation matrix is used to reflect the importance of IED for the failure judgments of the different components. The study also obtains quantitative relationship between IED and power components from the mathematical perspective by using the basic concepts and matrix derivation in Petri network. Finally, the initial fault location method of cascading failure is proposed by using the element/IED correlation matrix and the action value matrix of each direction. Compared with the traditional fault location method, the simulation results show that the proposed method can rapidly and accurately locate the initial fault components in large-scale power grids, which verifies the effectiveness of the proposed positioning method.

Key words: initial failure, wide area protection, directional protection, power grid cascading failure, rapid positioning