

基于图论的含DG的配电网保护分区新方法

首先基于区域保护概念提出配电网保护的分区原则,包括信息域半径选择、中心节点选取、交互区的处理和边界处理等。进一步在分区实现过程中以保护设备总投资为目标函数,以后备保护范围、DG供电范围、通信带宽与延时和区域均衡性等要求为约束条件,选择最优区域半径;利用邻接矩阵和 m 级可达矩阵的加权顶点度之和选择多个候选中心节点,然后基于候选中心节点的权重分配最终确立中心节点。基于邻接矩阵和 m 级可达矩阵,提出矩阵快速搜索方法,完成区域的初始划分、交互区的处理及边界点的确定。最后以某市10 kV配电网为实例,验证了分区原则和实现方法的合理性。

王秋杰 李振兴 王 欣 张腾飞/三峡大学电气与新能源学院

0 引言

随着越来越多的分布式电源(DG)接入到配电网,传统的三段式保护已不再满足配电网保护的要求,于是基于多点信息的广域保护日益成为人们研究配电网保护的焦点^[1]。由于配电网幅员辽阔而且节点众多,基于全配电网构建广域保护不仅存在人为、地域和技术难题,同时也不符合配电网保护工程实际,于是分区域实现广域保护成为研究的主流。保护分区的目的是把广域电网分成有限个区域电网,并对各个区域电网分别构建区域保护系统,这不仅是广域保护技术发展的要求,也是推进广域保护在配电网工程应用的要求^[2]。

目前,对于配电网保护分区主要有以下三种方法。第一,按照每个馈线节点的年平均负荷,以DG出力的最大供电范围划分保护区域^[3]。此方法在线路出现

故障时,DG能够孤岛运行,提高了供电的可靠性,但是区域大小的均衡性差,受DG参透率影响较大。第二,按照DG接入节点为分界点划分区域。该方法虽然加强了对DG接入点的控制与保护,但是孤岛运行能力和区域的均衡性较差^[4]。第三,以馈线上的多分支节点为分界点划分区域^[5],此方法虽然能够在多分支节点处利用基尔霍夫定理间接地判断电流方向,但是划分的区域大小极不均匀,而且区域个数过多,变电站通信负担过重。综上所述,目前的分区缺乏综合考虑DG孤岛运行能力和参透率、区域的均衡性、总投资、通信负担、地理位置和交通状况等因素的影响。

保护分区必须建立合理的分区原则及便利的实现方法^[6]。本文从工程实际的角度、考虑多方面因素,提出了一种新的配电网保护分区方法。该方法从保护半径的选择、中心节点的选取、交互方式选取和边界点的识别等多个方面论述了区域划分的原则,同时考虑了工程实践的多方面因素,如区域的均衡性、总投资和通信负担等,并把这些因素的重要性在分区的实现方法中加以体现。以某10 kV配电网为例的仿真分析验证了分区工程合理性。

1 含DG的配电网保护分区原则

区域保护是有限广域保护思想在配电网保护的实践中孕育出来的,其关键技术有以下几点要求^[7-8]。区域保护承担配电网“第一道防线”性能,遵循故障切除优先的原则,体现承担的任务有



王秋杰/硕士研究生

关键词/Keywords

分布式电源·
广域保护·
配电网分区·
最优半径·
加权顶点度·

湖北省自然科学基金项目(2014CFB680)。

限；区域保护最大范围实现含DG的配电网远后备保护功能，需要的信息范围有限；区域保护不需要全网信息，仅需要利用近故障点灵敏度比较高的信息实现冗余计算，提高保护可靠性；区域保护的速动性要求保护在通信、计算等方面尽可能缩短系统延时。根据以上几点要求提出以下原则。

1.1 信息域半径 R 的确定

保护区域半径 R 的选取与中心节点的选取密不可分，两者相互影响。其选择主要遵循以下步骤。配电网区域保护取代三段式保护，其区域半径至少满足三段式后备保护动作的最大范围；尽量以DG的最大供电范围作为区域半径的最小值，保证孤岛运行只在一个区域内，以便控制；现阶段，FTU和RTU在配电网中起重要作用，通常在一般节点配置FTU，中心节点配置兼容FTU功能的RTU，根据RTU的通信极限、经济约束和分区均衡性综合确定 R 的最大值；考虑配电网的重构和优化以及新增馈线节点的问题，保护半径保留一定的裕度。

1.2 中心节点选取

中心节点的选取要考虑到诸多因素^[9-10]，结合配电网的实际，主要遵循以下原则。中心节点应首先考虑相邻节点多，路径关联密集的枢纽馈线节点；考虑DG接入点信息量大，通信负担重，应优先选取DG接入点附近的节点；考虑配电网重构对区域结构的影响，优先选择联络开关附近的节点便于控制；考虑配电网是辐射型结构，每条支路长短不均匀，优先选取地理位置处于区域几何中心的节点，以满足区域大小均衡性和通信要求；考虑安装、运行和维护便利等因素，选择区域内保护设备安装方便，运行和维护快速到达的节点为中心节点。

1.3 交互区的处理原则

区域与区域之间的交互方式主要有点交互、母线交互、线路交互和多单元交互^[7]。总结四种交互方式的特点，选择线路交互作为区域之间的交互方式，具体如图1所示。这种交互方式的好处在于：①当线路 L_2 发生故障时，区域1、区域2的中心

节点都能够采集母线 B_2 、 B_3 的方向信息，实现冗余计算，如当 B_3 的方向信息缺失时，区域1无法定位故障，区域2后备动作，定位故障；当 QF_2 拒动时， QF_1 、 QF_3 都能作为备用断路器隔离故障。②不会产生多单元交互过多的通信冗余。

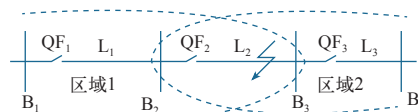


图1 区域交互方式

当交互的线路有多条时，选择远离两区域中心节点的线路，以避免交互线路误动作或拒动时影响中心节点数据的处理。

优先考虑没有DG接入的线路，如果有，则改为相邻线路。

1.4 区域边界的处理原则

根据中心节点和信息域初始划分区域，对于少数的孤岛节点、新增节点应该划到就近区域，孤岛节点较多，则另外单独组成一个区域。

考虑联络开关的影响，在联络开关闭合后，两个边界点变成交互点，其组成的线路变成交互线路，应该按照交互原则处理。

2 含DG的配电网保护分区的实现方法

图论作为拓扑学的一个分支，其应用在各个领域迅速发展。将其应用于节点众多、辐射面积广及结构错综复杂的配电网系统能够快速分析其拓扑结构并为实现配电网保护分区提供理论依据。根据配电网保护分区原则，结合图论的基本理论，应用矩阵的简单运算来实现含DG的配电网保护分区。

2.1 构建描述矩阵

由于每条馈线上馈线节点数分布不均匀，为了使分区具有代表性，以图2所示配电网中最典型的25节点网络为例说明配电网保护系统分区方法。在配电网形成的网络拓扑图中，定义母线为图论节点，定义线路为图论支路。

用 C 表示图2的邻接矩阵，根据邻接矩阵的定

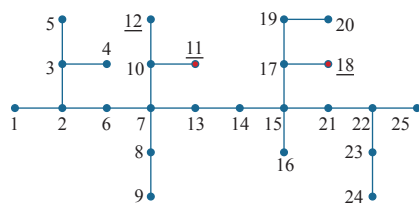


图2 典型配电网络结构分析

义式

$$C_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点}i\text{与节点}j\text{邻接} \\ 0 & \text{节点}i\text{不与节点}j\text{邻接} \end{cases} \quad (1)$$

得出图2的邻接矩阵为

[illegible]

节点 n_1 可直接或间接影响节点 n_2 的状态称为 n_1 可达 n_2 ，描述一个系统中节点之间在一定范围内的可达性关系的矩阵称为系统的可达矩阵。可达矩阵体现了系统故障时影响范围的有限性。根据邻接矩阵和可达矩阵的关系式可以确定 m 级可达矩阵，即

$$\mathbf{P}^m = (\mathbf{C} - \mathbf{I})^1 \cup (\mathbf{C} - \mathbf{I})^2 \cup \dots \cup (\mathbf{C} - \mathbf{I})^m + \mathbf{I} \quad (2)$$

式中, I 为单位矩阵; $\cup$ 为布尔运算下的逻辑并。

当 $R=4$ 时, 求出图2的4级可达矩阵 P^4 为

1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

[illegible]

2.2 分区原则实现方法

根据邻接矩阵、 m 级可达矩阵和分区原则得出分区的具体步骤。

(1) 确定信息域半径 R

区域保护在配电网取代三段式保护。根据三段式保护原理, 定时限过电流保护作为线路主保护和断路器拒动时的远后备保护, 故区域保护范围不能低于三段式保护范围, 其区域半径 $R>2$ 。

DG接入配电网以后,目前普遍采用的是限制DG接入容量的做法,在不影响三段式保护误动作的前提下,DG最大供电范围是三个馈线段^[11],当区域保护取代三段式保护以后,DG的准入容量将大幅增加,在忽略多分支节点的影响下,区域半径 $R>3$ 。

根据式 (3) 检查通信带宽是否满足配电网保护的要求; 利用式 (4) 确定单个区域通信允许的最大节点个数。

$$\text{BWM} = \text{TEU} / \text{BW} \quad (3)$$

$$S_{\max} = \text{BW}_{\text{RTU}} / \text{BW}_{\text{FTU}} \quad (4)$$

式中, BW为信道利用率; TEU为通信地吞吐量; BW为信道带宽; $S_{\max}$ 为区域包含节点的极限个数。

在目前的工程实际当中, FTU的信道带宽可达300~600 bit/s, 吞吐量约为100 bit/s, RTU的信道带宽在250 Kbit/s~10 Mbit/s。得出FTU的极限BWM为0.33, $S_{\max}$ 为416, 根据配电网保护的要求, 0.33的信道利用率合适, 一条馈线上的节点最多也只有几十个, 于是得出通信条件不会对 R 造成限制^[13]。

利用式 (5) 检验通信延时是否满足要求。

$$T_p = \tau_s + \tau_b + \tau_p \quad (5)$$

式中, T_p 为信息传输总延时; τ_s 为指由节点设备发送数据帧至通信网络上所需要的时间; τ_b 为信息在传输过程中经过多个交换机的总的交换时间; τ_p 为电磁波在信道中传播一定距离所需的时间。

根据opnet软件仿真、收集时延统计量, 得出 τ_s 为0.1 ms, τ_b 为0.06 ms, τ_p 约为0.2 ms, T_p 为0.36 ms。根据目前配电网保护5 ms的要求, 动作延时也不会对 R 造成约束^[14]。

利用式(6)检验分区均衡性情况, 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (6)$$

式中, σ 为总体标准差; X_i 为第 i 个区域包含的节点数; $\bar{X}$ 为每个区域平均的节点数; N 为总的分区个数。

根据图2可以得出信息域 R 分别为1、2、3、4、5和6时的 σ 值, 即 $\sigma_1 = 0.67$, $\sigma_2 = 0.56$, $\sigma_3 = 0.72$, $\sigma_4 = 0.87$, $\sigma_5 = 1.63$, $\sigma_6 = 2.03$ 。可以看出, 当 $R \geq 5$ 以后, 分区的均衡明显变差, 于是得出 $R < 5$ 时分区均衡性较好。

通常在一般节点配置FTU, 中心节点配置兼容FTU功能的RTU, 利用式(7)检验区域保护设备投资情况, 即

$$F_i = p_1 X_i + p_2 N = p_1 X_i + p_2 \frac{X_i}{KR} \quad (7)$$

式中, F_i 为第 i 条馈线的投资; p_1 为FTU的单价; p_2 为RTU的单价, 万元; X_i 为一条馈线上的节点总数; N 为划分区域的个数, 即中心节点的个数; R 为区域半径; K 为 $\bar{X}$ 与 R 之间的比例系数。

根据目前通信设备制造水平, 得出 $p_1 = 0.85$, $p_2 = 0.08$; 根据图2, 得出 $F_i = 0.85 \times 25 + 0.08 \times [25/(KR)]$, 于是得出 R 越大, 投资越低。

综上所述, 以投资 $F_i = 0.85 \times 25 + 0.08 \times [25/(KR)]$ 为线性目标函数, 以 $R > 2$ 、 $R > 3$ 和 $R < 5$ 为约束条件, 得出 $R = 4$ 为最优半径。

(2) 确定中心节点

根据前文确定的 $R = 4$ 和中心节点的选取原则, 节点的相邻节点数、路径关联密集度可以通过邻接矩阵和4级可达矩阵的加权顶点度和 $D(n)$ 来反映, 即

$$D(n) = \omega_1 D(C_1) + \omega_2 D(P^4) \quad (8)$$

式中, $D(C_1)$ 、 $D(P^4)$ 分别为图2中邻接矩阵和4级可达矩阵的顶点度; ω_1 、 ω_2 分别为邻接矩阵和4级可达矩阵的权重。

与中心节点相连的节点数是以每级分支数为基数, 按指数增长。例如, 一个中心节点先有两个分支节点, 后分成4条支路, 再分成8条支路, 当区域 $R = 4$, 最终分成16条分支。但是配电网每级的分支数并不均匀, 无法按指数直接计算分支数。于是考虑4级可达矩阵的意义, 当 $R = 4$ 时, 区域内分支总数约为10。故当设4级可达矩阵的权重 $\omega_2 = 1$ 时, 邻接矩阵顶点度的权重 $\omega_1 = 10$ 。计算每个节点的初始加权顶点度和, 即

$$\begin{aligned} D(n) = D[n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8, n_9, n_{10}, n_{11}, n_{12}, n_{13}, \\ n_{14}, n_{15}, n_{16}, n_{17}, n_{18}, n_{19}, n_{20}, n_{21}, n_{22}, n_{23}, n_{24}, n_{25}] \\ = [20, 44, 40, 17, 17, 34, 58, 32, 20, 43, 20, 20, 39, \\ 40, 59, 23, 43, 20, 30, 18, 34, 42, 29, 16, 19] \end{aligned} \quad (9)$$

由于当 $R = 4$ 时, 图2大致可以划分成两个区域, 于是取顶点度前四位的节点为候选节点。很明显顶点度和的前四位“节点(顶点度)”依次为15(59)、7(58)、2(44)和22(42)。

修正顶点度排序。中心节点选取的其他原则可以通过权重来反映, 根据式(9)修正候选节点排名, 即

$$D'(n) = \omega_3 [D(x_1), D(x_2), \dots, D(x_n)] \quad (10)$$

式中, $D(x_n)$ 为初始候选节点; ω_3 为不同影响因素下的权重值; $D'(n)$ 为新的加权顶点度排名。

在不影响三段式保护误动作的前提下, DG最大供电范围是三个馈线节点, 约占区域总节点数的3/10, 于是离DG接入点最近的候选中心节点的权重设为1.3; 在提高供电可靠性方面, 联络开关的作用与DG作用类似, 于是离联络开关最近的候选中心节点权重设为1.3; 一个区域只有一个几何中心, 具有地理优势的候选节点权重设为1.1; 根据实际整个市的配电网交通状况分布来看, 交通便利点约占所有节点的2/10, 处于山丘地带的节点约占总节点数的1/10, 当候选中心节点是交通便利点, 则权重设为1.2, 处于山丘地带时设为0.9。根据图2可以得出, 节点11、节点18为DG接入点;

节点12为联络开关安装点；当以节点7和节点15为中心节点时，其处于区域的几何中心；节点2为交通便利点；节点22为山丘地区。综上所述，计算四个节点的加权顶点度和，新的排名依次为7(107.8)、15(84.3)、2(50.4)和22(39.6)。

确定中心节点。当信息域 $R=4$ 时，图2的划分区域为两个，于是选择加权顶点度最高的节点7和节点15为中心节点。

(3) 初始分区

以节点7、节点15为中心节点，在 P^4 中分别搜索第7、15行中元素为1的列节点，将其分别作各自区域的一般节点，完成初始分区。

(4) 交互区确定

根据交互原则，以节点7、节点15为中心节点，在 P^4 中分别搜索第7、15行中元素为1的列节点，检查两个区域的节点重合数是否大于2，若大于2则根据式(2)计算图2的3级可达矩阵 P^3 ，在 P^3 中分别搜索第7、15行中元素为1列节点，再检查重合节数是否大于2，依次进行，直到重合节点数等于2或1时，停止搜索。当重合的节点数为2时，重合的两个节点组成的线路为交互线路；当重合的节点数为1时，选取包含该节点且没有DG接入的线路为交互线路。在 P^3 中分别搜索第7、15行中元素为1列节点，节点13、节点14为两区域重合点，且没有DG接入，于是线路13-14为交互线路。

(5) 边界的确定

计算每个节点的邻接矩阵顶点度，搜索邻接矩阵 $D(C)$ 中为1值的节点；以节点7、节点15为中心节点，在 P^4 中分别搜索第7、15行中元素为1的列节点，满足以上两个条件的节点设为边界点，即节点1、节点4、节点6、节点9、节点11、节点12、节点16、节点18、节点20、节点24和节点25。

根据初始划分的区域，搜索变电站总的节点个数与所有区域的节点数和是否相同以检查是否存在孤岛节点。如存在孤岛节点，则划到就近区域。经检查，图2不存在孤岛节点。

根据联络开关12处于断开状态，判断12节点为边界点，非交互点。

综上所述，最终将图2划分成两个区域，如图

3所示。

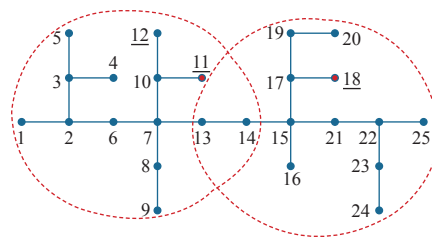


图3 区域划分

3 案例分析

以某市10 kV变电站为例说明配电网分区原理。该市总共有110 kV变电站2座、35 kV变电站1座，10 kV开关站1座，共计21条馈线、446个馈线节点，单条馈线上的节点数最少的为6个，最多的为59个，其中80%馈线节点数分布在21~29之间，分区具体步骤如下。

信息域半径 R 的选择。如图4所示，馈线2为整个市中馈线节点数最多的馈线（59个节点），根据 R 选择相关原则，后备保护（ $R>2$ ）、DG控制（ $R>3$ ）、通信带宽（无）和延时（无）对 R 造成的约束不变，只有区域均衡性对 R 的约束不同。根据式(6)得出总体标准差 σ 的值： $\sigma_1=0.53$ ， $\sigma_2=0.34$ ， $\sigma_3=0.68$ ， $\sigma_4=0.75$ ， $\sigma_5=0.69$ ， $\sigma_6=0.74$ ， $\sigma_7=0.63$ ， $\sigma_8=0.59$ ， $\sigma_9=0.64$ ， $\sigma_{10}=0.71$ ， $\sigma_{11}=1.23$ ， $\sigma_{12}=1.45$ ， $\sigma_{13}=2.36$ ， $\sigma_{14}=4.86$ ，得出当 $R<11$ 时，分区均衡性比较好。根据式(7)在投资最小的情况下，得出馈线2最优半径 $R=10$ 。馈线3为整个市中馈线节点数最少的一条（6个节点），根据式(6)得出 $\sigma_1=0$ ， $\sigma_2=0$ ，根据式(7)，很明显，馈线3确定的最优半径 $R=2$ 。可以发现馈线2的最优 R 对馈线3来说过大，相反，馈线3的最优 R 对馈线2来说其值过小，就整个市区所有馈线而言，它们都不是最优半径。由于在整个市的21馈线当中，绝大多数馈线的节点数都分布在21~29之间，于是图2（25节点）所确定的均衡性约束 $R<5$ 对整个市区所有馈线来说是合理的。

综上所述，以整个配电网总投资 $F=F_1+\cdots+F_{21}=446\times 0.85+0.08\times [446/(KR)]+20\times 4$ 为线性目标函数，其中20为变电站中央处理单元单价，4为变电站个数，以 $R>2$ 、 $R>3$ 和 $R<5$ 为约束条

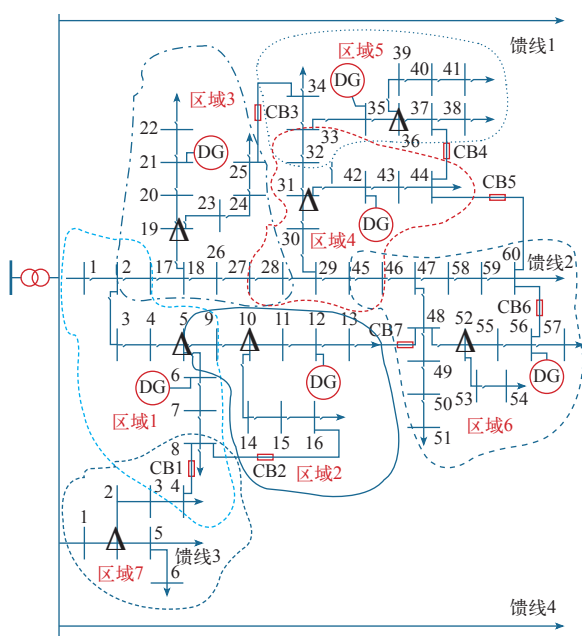


图4 变电站保护分区

件, 得出 $R=4$ 为整个市的配电网最优半径。

当 $R=4$ 时, 馈线2共有59个节点, 得出馈线2大致可以划分为6个区域, 馈线3划分成一个区域。根据式(8)计算每个节点的初始加权顶点度和, 选择馈线2排名前12的节点: 5(47)、18(46)、48(46)、29(45)、52(45)、2(44)、19(44)、31(44)、10(43)、33(42)、36(40)和12(38); 馈线3排名前2的节点: 2(36), 5(25)。考虑两条馈线其他因素: DG接入点: 6、12、21、35、42和56; 联络开关: $CB_1 \sim CB_7$; 几何中心点: 19、31、36和52; 交通便利点: 5、19、31和48; 山丘地区: 16、22、34和57; 于是计算馈线2所有节点的加权顶点度和, 得出顶点度最高的6个节点: 31(98.1)、19(98.1)、5(95.3)、52(83.6)、10(72.6)和36(68.4)。馈线3的最高加权顶点度和: 2(46.8), 选择这7个节点为中心节点。

初始划分区域。分别以节点19、节点31、节点5、节点52、节点10、节点36和节点2为中心节点, 在各自的 P^1 中分别搜索各自行中元素为1的列节点, 将其分别作各自区域的一般节点, 与中心节点共同组成初始区域。

根据交互原则和矩阵搜索方法, 在馈线2中, 选择节点(2, 17)、(5, 9)、(27, 28)、(32, 33)和(45,

46)之间的线路为交互线路。

根据边界确定原则和矩阵搜索方法, 选择节点8、13、16、22、25、34、38、41、44、51、54、57和59为馈线2边界节点, 选择4、6为馈线3边界节点; 检查馈线2中6个区域的节点数和为59, 馈线2的节点数为60, 得出节点60为孤岛节点, 就近划分到区域7; 当馈线2和馈线3之间的联络开关 CB_1 闭合时, 区域1和区域7形成交互, 根据交互原则和矩阵搜索方法, 选择线路4~8为交互线路。

最终将馈线2划分成6个区域, 馈线3分成1个区域, 见图4。

4 结束语

基于节点众多的辐射型配电网, 结合广域保护的工程实际应用, 提出了配电网有限广域保护的实现方法。

基于广域保护的区域集中式系统结构, 结合配电网保护要求, 提出了适合配电网保护的分区原则。

提出了基于图论的邻接矩阵和 m 级可达矩阵区域划分实现方法, 利用总投资为目标函数确定满足各项约束时最优区域半径 R , 利用加权顶点度和确定中心节点, 基于邻接矩阵和 m 级可达矩阵, 提出矩阵快速搜索方法, 完成区域的初始划分、交互区的处理及边界点的确定。该方法原理简单, 运算方便, 易于实现。

参考文献

- [1] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于电力系统广域保护的评述 [J]. 高电压技术, 2012, 38 (3): 513-520.
- [2] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 分区域广域继电保护的系統结构与故障识别 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (28): 95-103.
- [3] 林湘宁, 袁硕, 翁汉琨, 等. 实现有限选择性的低压微网区域保护 [J]. 电网技术, 2012, 36 (4): 149-154.

(下转第81页)

35 kV母线侧对开关绝缘隔板进行逢停必扫,及时去除污垢,防止在潮湿天气情况下污闪的发生。

对失压变电站进行改造,使其得到不同站的双回电源供电,以提高其安全运行的能力。

6 结束语

此次事件发生的原因是多方面的,但最重要的问题就是该型开关柜的相间绝缘距离远低于行业标准,而厂家在这种情况下做的补救措施(加设绝缘隔板)显然没有考虑到在潮湿污秽环境下容易发生的污闪问题。建议在今后采购设备时,排除此类设计的开关柜,如实在需要,应该要求厂家做凝露试验以证明设备可以安全运行。

参考文献

- [1] 彭向阳,钟定珠,李谦,等.东莞220 kV立新站和跃立站主变压器跳闸分析[J].广东电力,2005,18(2):36-39.
- [2] 任业生.一起220 kV变压器保护跳闸事故分析[J].电力系统保护与控制,2008,36(24):121-123.

- [3] 张静伟,庄泽宏.一起500 kV开关误跳闸事故分析[J].电力系统保护与控制,2008,36(20):99-101.
- [4] 郭磊,王伟,樊东方,等.避雷器单相接地引起变压器跳闸事故分析[J].电瓷避雷器,2014(5):76-86.
- [5] 郭晶,刘宏亮,王胜辉,等.220 kV主变低压绕组短路变形事故分析[J].变压器,2014,51(9):75-76.
- [6] 孙宏刚,何甜.一起变压器跳闸事故的继电保护动作分析[J].湖北电力,2010,34(3):10-11.
- [7] 郭昆,郭文强,董益华,等.风电场主变压器差动保护跳闸事故原因分析及措施[J].内蒙古石油化工,2012(23):83-85.
- [8] 王海滨,兰基升,李明,等.一起220 kV变压器短路故障的分析处理[J].电力安全技术,2012,12(12):48-51.
- [9] 李书强,张惠娟.一起变压器低压侧保护越级跳闸的分析与思考[J].低压电器,2012(21):41-43.
- [10] DLT 404—2007 3.6~40.5 kV交流金属封闭开关设备和控制设备[S].

(收稿日期:2015-06-18) **EA**

(上接第77页)

- [4] 尹雁和,陈少华.含分布式电源的配电网分区域保护[J].电工电气,2011(3):34-37.
- [5] 肖伟栋,夏明超,唐念.考虑多DG接入的配电网区域保护新方案[J].电力系统保护与控制,2014,42(9):103-109.
- [6] 唐斐,陆于平.分布式发电系统故障定位新算法[J].电力系统保护与控制,2010,38(20):62-68.
- [7] 李振兴,尹项根,张哲,等.有限广域继电保护系统的分区原则与实现方法[J].电力系统自动化,2010,34(19):48-52.
- [8] 尹项根,汪旸,张哲.适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略[J].中国电机工程学报,2010,30(7):1-7.
- [9] 丁伟,何奔腾,王慧芳,等.广域继电保护系统研

究综述[J].电力系统保护与控制,2012,40(1):145-155.

- [10] 汪旸,尹项根,张哲.分布式集中决策的区域智能保护系统结构与算法[J].电力系统自动化,2009,33(21):53-57.
- [11] 王江海,等.考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J].中国电机工程学报,2010,30(22):37-43.
- [12] 曾一凡,孙波,王家同.变电站RTU及远动信道故障诊断监测系统[J].电网技术,2005,29(8):75-79.
- [13] 周洪,罗星,邓其军.基于DSP的智能配电网环网柜FTU的设计[J].电力自动化设备,2011,31(2):124-128.

(收稿日期:2015-06-03) **EA**