

考虑通信约束的区域保护分区策略及其实现技术

李振兴¹, 龚 旻¹, 翁汉琮¹, 李振华², 徐艳春²

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要:基于区域电网多源信息的区域保护依赖于通信技术和通信基础,实现广域大电网分区域保护必须着眼于考虑通信约束的分区策略与实现。基于此目的,考虑对子站与主站通信影响最大的跳数因素,并结合分区域的均衡性,基于 Floyd 最短路径算法提出一种排列组合择优法的区域保护主站选取模型;进一步根据区域性保护通信时延的影响因素指标建立子站划分模型。针对分区域形成后发生 $N-1$ 信道故障的情况,分析其子站通信迂回过程,考虑通信延时的影响对分区域策略进行修正。最后,基于图论技术提出了分区域策略的实现技术与方法。

关键词:继电保护;通信;区域保护;通信约束;分区原则;图论技术

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.015

0 引言

传统后备保护通过就地信息进行跳闸决策,存在整定配合困难、自适应差等不足^[1-2]。随着通信技术的发展,诸如站域保护、广域保护等集合区域电网多源信息进行决策的区域性保护因解决了传统后备保护的不足而得到了广泛的研究^[3-4]。这类保护系统对广域电网划分区域,设置区域决策中心,借助通信技术收集区域内多源信息,实现就地保护的在线整定或构建基于多信息判别的保护新判据^[5]。区域性保护区域划分是否合理直接决定了多源信息能否快速、准确地传输至区域决策中心,进而决定了区域性保护的速动性和可靠性。因此,对广域电网进行合理的分区对实现区域性保护具有重大且实际的意义。

目前,已有很多学者提出了区域性保护分区思想和实现技术,其研究方法主要是依据电网电气拓扑、变电站地理位置或者保护原理,按区域有限元或网格式进行区域划分,鲜有考虑到通信系统参数及数据传输对于区域性保护实时性的要求。文献[6]选定初始中心站,以指定半径划分 1 个有限元区域,在有限元区域外再根据主站选取原则确定其他主站。文献[7]根据定性原则选取主站,以 3 个逻辑长度为半径进行圆网格式搜索。文献[8]提出一种区域自治式后备保护分区方案,以一定主站半径为原则进行分区方案的制定,执行多次分区算法,确定中

心站个数较少的方案为最终结果。文献[9]综合考虑实时性、经济性、均衡性建立参考指标,利用遗传算法进行二层搜索实现分区。文献[10]依据地理因素人为指定主站,将距离中心站拓扑距离小于 2 的划分到 1 个区域,再根据优化原则进行人为优化。文献[11]基于邻接矩阵利用最短路径搜索方法确定区域边界,以边界子站为起点,采用模糊综合评价法确定下一个中心站选址,重复搜索过程直至区域划分完毕。但从区域性保护构成的角度,区域保护依赖于通信技术和通信基础,其保护分区应该进一步考虑通信约束的影响。因此,为使广域大电网的保护分区更加均衡,时延更短,对分区策略及实现方法有进一步研究的必要。

本文进行分区的对象是考虑了长远规划的区域保护通信系统,基于区域性保护通信约束,综合考虑区域保护通信的实时性和均衡性,分别建立了主站选取模型和子站划分模型:在主站选取过程中,基于 Floyd 最短路径算法(下文简称为 Floyd 算法)提出一种排列组合择优法进行主站选取;在子站划分过程中,结合图论技术,考虑区域保护通信网络拓扑关系及长度、带宽等网络参数的影响,对子站进行合理分配。本文提出的分区方法能够克服传统方法需要大量人工判断及指定的不足,保证了分区的区域均衡性,且区域内通信时延较短。

1 区域保护基本结构与分区基本要求

站域保护、广域保护、层次化保护、系统保护、智能中心保护均以改善传统后备保护与控制为目的,应用区域电网多源信息重构新的保护系统。基于这类保护的共性研究,可以将这一主站通过通信技术和通信基础获取区域电网子站信息,重构保护的形势统称为区域性保护,简称区域保护。

区域保护的结构一般分为分布式结构、集中结

收稿日期:2018-02-23;修回日期:2019-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607106);湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目(Z2017037)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607106) and Key Projects of the Science and Technology Research Program of Hubei Provincial Education Department(Z2017037)

构、混合式结构。不论何种结构的保护系统,均设置决策主站(分布式系统的每个子站均可理解为主站),主站通过电网各变电站的通信技术和通信基础,获取区域内多个或全部子站的实时测量或者处理后的电气信息,基于多信息实现保护判别与跳闸决策^[12]。区域保护信息传输实现形式如图 1 所示。在保护区域的每个变电站中,各智能电子设备(IED)采集其安装处的电气量与状态量信息,并将实时测量信息或处理后的实时测量信息以采样值(SV)报文或者面向通用对象的变电站事件(GOOSE)报文形式,通过过程层总线和站控层总线传输至变电站主控单元;各子站的主控单元采用异步传输模式(ATM)通信技术,通过同步数字体系(SDH)光纤网,将信息上传至所属区域中心站的决策单元;系统发生故障时,中心站决策单元根据收集的多源信息判断故障元件,制定保护策略,然后以 SV 报文形式向相关子站发送跳闸指令,选择相应的 IED 执行保护功能。对于区域间的边界,将会存在部分子站同时向其他区域主站发送相关测量信息。

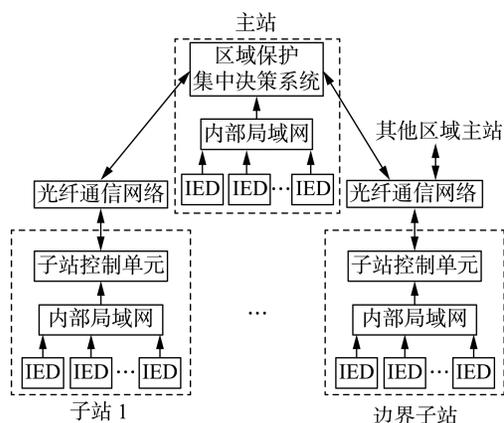


图 1 分区域保护信息传输示意图

Fig.1 Information transmission schematic diagram of regional protection

由图 1 可知,区域保护的构建基础是通信的交互和保护原理的构成。现有的部分广域保护后备保护算法均是建立在信息能够快速有效传输至决策中心的前提下,而实际上传统的通信方式并不一定能够满足这一要求。因此,为保证多源信息实时性要求,需要将广域电网分成若干子区域,区域内的信息传输尽量不经过其他区域且传输延时必须满足区域保护的需求;同时子区域间应当保持相对的均衡性,在保证本区域内信息满足该区域保护算法需求时,各子区域内的通信延时、通道利用率、主站信息量与信息处理相对均衡。

2 保护分区策略

2.1 主站选取模型

对于区域保护而言,其主要职责是依据多源信

息实现故障元件的快速识别与可靠切除。选择通信时延最短的路径进行多源信息的传输,将更加有利于系统实现快速切除故障。通信时延的影响因素包括 IED 信息传输延时、转换延时,其中信息传输过程中的跳数是最大变数。但仅采用最短跳数为依据选取的主站并不唯一。因此,引入反映主站与周边站连接密切程度的物理量,即连接度。利用最短跳数和与连接度的加权和反映信息传输时延长短。最短跳数和与连接度量纲不同,简单相加并无实际意义,需对最短跳数及对于任一种主站组合形式的连接度进行归一化处理,然后利用 Floyd 算法求取最小权重对应的最优路径。

对于主站选取,基于分区后系统各区域的均衡性提出一种排列组合择优法如图 2 所示。利用排列组合择优法,从图 2 中的 18 个变电站中选取 3 个主站,将剩余站点根据距离划分给较优的主站,即将所有站点分成 3 个区域,使得区域内子站离本区域主站距离较小。首先,将所有主站可能的组合进行排列组合,共有 C_{18}^3 种组合,任取一种组合,如选 B_4 、 B_{10} 、 B_{13} 为主站,利用 Floyd 算法求取变电站 B_1 与 B_4 、 B_{10} 、 B_{13} 的最小跳数分别为 a_1 、 a_2 和 a_3 ,取其中的最小值作为主站-子站最短跳数,同理可求得其他站的主站-子站最短跳数。对于 C_{18}^3 种待定主站形式,有 C_{18}^3 种最短跳数集合。考虑主站均匀地分布在区域电网,并结合连接度(各主站相连子站数量之和),定义集合中所有主站-子站最短跳数和与连接度的加权和最小的主站组合形式为最优主站组合。

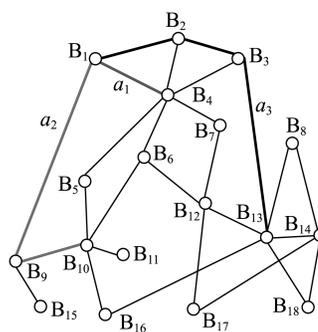


图 2 采用排列组合择优法的系统拓扑图

Fig.2 System topology using permutation and combination method

考虑到保护分区域内,各通信带宽在正常运行时能够在信道带宽的 50% 以下,故基于系统站点平均信息通信量,可以初步估算单区域内平均变电站个数,进而可以计算系统分区主站个数,如式(1)所示。

$$\begin{cases} n_{avr} = 50\% \times \bar{B} / \bar{M} \\ n_{main} = n / n_{avr} \end{cases} \quad (1)$$

其中, n_{avr} 为每个区域的平均变电站数量; \bar{B} 为系统平均信道带宽; \bar{M} 为系统中每个站点的平均数据大

小; n 为区域变电站总数; n_{main} 为主站数量。

实际应用中,在 n_{main} 的基础上,将主站数量增减1~2个,分别求解不同主站数量对应的分区结果,结合工程实际进行比较分析,选取最优的分区方案。

综上所述,对于给定的区域系统,假设设置的主站数量为 m ,则主站随机组合的数量如式(2)所示。

$$g = C_n^m \quad (2)$$

对于这 g 种组合,优先选择最小跳数和较小及连接度较高的主站组合作为最优组合。

主站选取模型如式(3)~(8)所示。

$$Q_j = \min_{j=1,2,\dots,g} \{ \omega_1 S_j^1 + \omega_2 L_j^1 \} \quad (3)$$

$$s_i = \min \{ J_1, J_2, \dots, J_m \} \quad (4)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^{n-m} s_i \quad (5)$$

$$S_j^1 = \frac{S_j - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (6)$$

$$L_j = \sum_{i=1}^m l_i \quad (7)$$

$$L_j^1 = \frac{L_j - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (8)$$

其中, S_j 为所有子站与其对应主站的最小跳数之和; S_j^1 为第 j 种主站形式下,应用排列组合择优法求取的最小跳数和归一化形式; L_j^1 为各主站相连子站数量之和的归一化形式; ω_1 和 ω_2 为权值,根据比例标度利用层次分析法确定^[9]; J_1, J_2, \dots, J_m 分别为第1、2、 \dots 、 m 个子站与 m 个主站之间的最小跳数; s_i 为第 i 个子站与 m 个主站之间的最小跳数的最小值; S_{\max}, S_{\min} 分别为所有主站组合中最小跳数之和的最大值和最小值; L_j 为对于第 j 种主站组合,所有主站的连接度之和; L_{\max}, L_{\min} 分别为所有主站组合中连接度之和的最大值和最小值。

当 Q_j 最小时,对应的第 j 种主站组合为最优组合,选取该组合中的主站作为区域保护分区的主站。

2.2 子站划分模型

数据传输的时延主要由发送时延、传播时延、排队时延和处理时延构成。发送时延与信道带宽有关,传播时延与信道长度有关,处理时延与数据传输经过的跳数有关,排队时延与信道利用率有关。子站的划分直接影响到子站信息传输到主站的通信指标,理论上,分区实现保护首先要降低区域内通信量,减小信息传输延时;然后是各区域间变电站相对均衡,主站信息量与信息处理基本一致。

本文综合考虑发送时延、传播时延、处理时延等指标对子站划分的影响,以信道带宽倒数 $1/b$ 、信道长度 d 的加权和作为路径指标,再考虑与处理时延相关的迂回路径总跳数 J ,以此作为子站划分

参考指标。考虑到3个参考指标量纲各不相同,需对这3个参考指标进行归一化处理后再进行加权求和。

综上所述,根据区域性保护通信时延的各影响因素,建立子站划分模型如式(9)~(13)所示。

$$Q_k = \sum_{i=1}^t [\omega_3 (1/b_i)^1 + \omega_4 d_i^1] + \omega_5 J^1 \quad k \in K \quad (9)$$

$$(1/b_i)^1 = \frac{(1/b_i) - (1/b)_{\min}}{(1/b)_{\max} - (1/b)_{\min}} \quad (10)$$

$$d_i^1 = \frac{d_i - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (11)$$

$$J^1 = \frac{J_k}{J_{\max}} \quad (12)$$

$$M_i \leq 75\% \times b_i \quad (13)$$

其中, K 为两站间所有可能路径集合; k 为集合中的任一路径, i 为路径 k 对应的 t 条信道中的任一信道; $\omega_3, \omega_4, \omega_5$ 分别为信道带宽、信道长度、数据传输经过的跳数进行归一化处理后对应的权值,权值确定参考文献[9]; $(1/b_i)^1$ 为第 i 条信道带宽倒数进行归一化处理后的值; $(1/b)_{\max}, (1/b)_{\min}$ 分别为整个通信网中信道带宽倒数的最大值和最小值; d_i^1 为第 i 条信道长度进行归一化处理后的值; d_i 为第 i 条信道的长度; d_{\max}, d_{\min} 分别为整个通信网中信道长度的最大值和最小值; J_{\max} 为通信网允许最大跳数,通常取为5跳^[13]; J_k 为路径 k 经过的跳数; J^1 为路径 k 的总跳数进行归一化处理后的值。式(13)为保证信息完整性的约束条件, M_i 为第 i 条信道上的通信量。基于分区结果,需检验每条信道上的通信量是否满足该约束条件,若不满足,则返回主站选取步骤。

对于两站间的任一路径 k ,对应的信道条数 t 等于跳数 J_k 。为便于利用Floyd算法求取各路径对应的权值 Q_k ,将式(9)改进为:

$$Q_k = \sum_{i=1}^t [\omega_3 (1/b_i)^1 + \omega_4 d_i^1 + \omega_5 (1/J_{\max})] \quad k \in K \quad (14)$$

根据不同子站与主站之间的权值 Q_k ,按照设定区域子站数量,为各主站选取较小的 Q_k 对应的子站作为相应区域内子站。

2.3 分区修正

2.3.1 $N-1$ 信道故障下的分区修正

分区完成后,若出现 $N-1$ 信道故障情况,需针对不同的信道故障情况,对分区进行相应的修正,原则如下。

原则1:本区域存在可迂回路径时,通过本区域迂回路径对断线上的信息进行迂回,子站划分不变。

原则 2:若本区域不存在可迂回路径,则需传输至其他区域进行迂回。判断经其他区域信道迂回至本区域主站决策中心是否满足时延要求,若满足,则通过其他区域迂回,子站划分不变;否则将信息传输至时延最小的主站,将该子站划分至相应的区域。

下面结合图 3 所示系统对上述原则进行说明。区域 1 包括变电站 B_1 、 B_2 、 B_3 ,区域主站为 B_3 ;区域 2 包括变电站 B_4 、 B_5 、 B_6 、 B_7 ,区域主站为 B_5 。

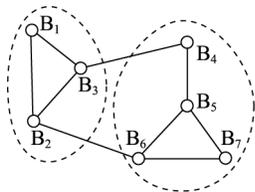


图 3 两区域系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of two regional system

当 B_7 和 B_5 之间的信道中断时,根据原则 1,应通过信道 $B_7-B_6-B_5$ 进行迂回,如图 4(a)所示。当 B_4 、 B_5 之间的信道中断时,按照原则 2,应通过计算判断经信道 $B_4-B_3-B_2-B_6-B_5$ 进行迂回是否满足通信时延约束。若满足,则通过此迂回通道进行迂回,如图 4(b)所示;否则变电站 B_4 将信息传输至区域 1 主站 B_3 ,如图 4(c)所示。

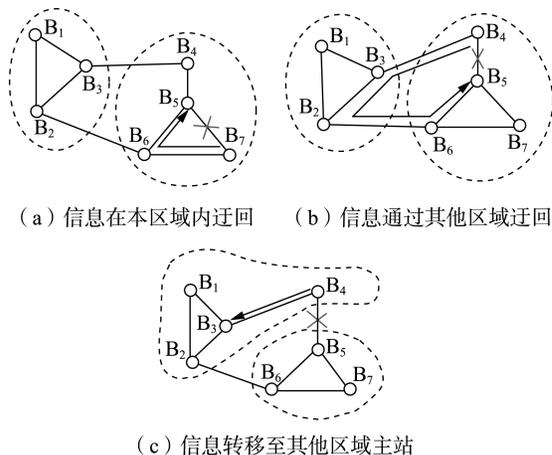


图 4 不同信道故障情况下的修正

Fig.4 Corrections under different channel faults

2.3.2 应对单点实效的主站修正

在完成主站选择后,区域保护配置时首先要根据保护对象的重要程度,考虑设置双重化甚至三重化主站决策单元;当主站出现直流故障等严重故障时,区域内需要设置其他子站,作为备用主站,备用主站选取原则依据该区域内各子站连接度,选取连接度最大的子站作为备用主站。当区域内子站与主站通信中断时,备用主站将自动切换成为主站,实现区域保护的功能,以此原则应对系统出现单点失效风险。

3 分区流程

3.1 基于图论技术的矩阵构造

本文基于图论技术,将电力系统通信网用无向图 $G=(V,E)$ 表示。其中, $V=\{V_i | i=1,2,\dots,p\}$ 为基本节点的集合,每个节点代表电力系统中的 1 个变电站; $E=\{E_i | i=1,2,\dots,q\}$ 为连接基本节点的支路集,每个支路代表连接变电站与变电站之间的光纤通信信道。支路权值 E 的值可代表信道长度等物理意义。对于不同的研究对象,无向图 G 中所取权值 E 不同。

基于图论技术构造电力系统连接矩阵,以表征系统拓扑连接关系。连接矩阵构造方法如式(15)所示。

$$A(i,j)=\begin{cases} 1 & \text{变电站 } i \text{ 与 } j \text{ 直接相连} \\ \text{inf} & \text{变电站 } i \text{ 与 } j \text{ 不直接相连} \\ 0 & i=j \end{cases} \quad (15)$$

其中,inf 表示站 i 与站 j 之间不直接相连。

类似地,可建立信道带宽矩阵 B 、信道长度矩阵 D 等表征系统物理特性的矩阵。结合上述矩阵,利用 Floyd 算法可求取所有节点之间的权值最小路径矩阵。对于不同的研究对象,权值的物理意义不同。

3.2 实现方法与实现流程

利用 IEEE 39 节点系统对应的通信系统对分区策略的实现进行说明。将位于同一站点的母线合并为 1 点,如图 5 所示,系统各信道长度及带宽见附录中的表 A1。

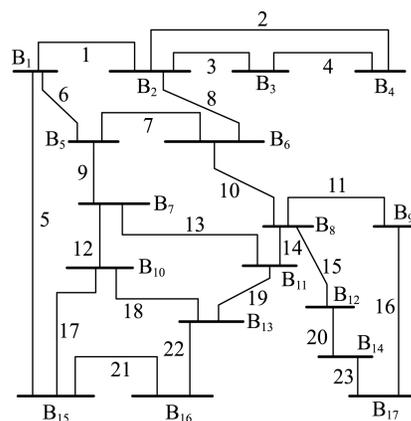


图 5 IEEE 39 节点系统对应的通信网络拓扑图

Fig.5 Topology of communication network of IEEE 39-bus system

分区步骤具体如下。

a. 根据系统拓扑结合图论技术确定系统连接矩阵,行数 i 和列数 j 均为变电站编号,对应位置的数值代表变电站 i 与变电站 j 之间的连接关系,按式(15)构造连接矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & \text{inf} & \text{inf} \\ 1 & 0 & & & \text{inf} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \text{inf} & & & 0 & \text{inf} \\ \text{inf} & \text{inf} & \cdots & \text{inf} & 0 \end{bmatrix}$$

b. 根据式(1),确定主站数量,本算例以主站个数为 3 进行分区求解说明,对 C_{17}^3 种主站组合进行求解并储存,所有主站组合的集合 P 为:

$$P = \{ [1, 2, 3], [1, 2, 4], \dots, [15, 16, 17] \}$$

c. 对于每种主站组合,通过排列组合择优法依据式(2)求解最优主站组合,可得 Q_j 最小时对应的主站组合,即最优主站组合 $P_j = [2, 8, 10]$ 。

d. 根据系统情况结合图论技术构造信道带宽、信道长度等影响通信时延的影响因素对应的矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 100 & \dots & 0 \\ 100 & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 64.6 & \dots & 0 \\ 64.6 & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

e. 在此系统中,参考文献[9]确定 $\omega_3, \omega_4, \omega_5$ 分别取为 0.35、0.15、0.1。结合信道带宽矩阵、信道长度矩阵,根据改进模型式(14)利用 Floyd 算法求解任意两站点之间的最小权值矩阵 Q 为:

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0.39 & \dots & 1.86 \\ 0.39 & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 2.18 \\ 1.86 & \dots & 2.18 & 0 \end{bmatrix}$$

f. 利用上述所求权值最小矩阵,结合所选主站以及计划子站数按照权值 Q_k 最小原则划分子站至各主站。初步分区结果如表 1 所示。

表 1 按计划子站数分区结果
Table 1 Results of dividing by planning number

| 主站 | 子站 |
|-----------------|---|
| B ₂ | B ₁ , B ₃ , B ₄ , B ₆ , B ₁₅ |
| B ₈ | B ₅ , B ₆ , B ₉ , B ₁₂ , B ₁₇ |
| B ₁₀ | B ₁ , B ₇ , B ₁₁ , B ₁₃ , B ₁₅ |

g. 判断是否存在未分配子站,若存在,则转至步骤 h,否则转至步骤 i。本算例中,变电站 B₁₄、B₁₆ 未划分,故跳转至步骤 h。

h. 对每个未划分子站,根据步骤 e 所求权值矩阵,获取剩余变电站与主站间的权值集合,选取此权值集合中最小值对应的主站作为其最优主站,将所有未划分子站分配至相应主站。本算例中,剩余变电站与主站的权值集合如下:

$$Q(B_{14}) = [1.77 \quad 0.89 \quad 2.21]$$

$$Q(B_{16}) = [1.33 \quad 1.38 \quad 0.79]$$

子站 B₁₄ 与主站 B₈ 之间的权值 0.89 为最小值,子站 B₁₆ 与主站 B₁₀ 之间的权值 0.79 为最小值。因此,子站 B₁₄ 应划分至主站 B₈ 对应区域内,子站 B₁₆ 应划分至主站 B₁₀ 对应区域内。

i. 将区域间重复子站作为边界子站进行配置,按照 $N-1$ 信道故障下分区修正原则对分区结果进行修正,输出分区结果,本算例分区结果如表 2

所示。

表 2 子站全覆盖分区结果

Table 2 Results with full coverage of sub-stations

| 主站 | 子站 |
|-----------------|---|
| B ₂ | B ₁ , B ₃ , B ₄ , B ₆ , B ₁₅ |
| B ₈ | B ₅ , B ₆ , B ₉ , B ₁₂ , B ₁₄ , B ₁₇ |
| B ₁₀ | B ₁ , B ₇ , B ₁₁ , B ₁₃ , B ₁₅ , B ₁₆ |

综上所述,基于通信约束的区域保护分区流程如附录中的图 A1 所示。

4 算例分析

为进一步验证本文分区方法,对鄂东地区 220 kV 电网通信系统(如附录 B 中的图 B1 所示)进行分区,该系统的信道长度、信道带宽等参数见附录 B 中的表 B1。

依据式(8),确定较优主站数量为 8,为从工程实际需求上给予理论指导和分区建议,分别设定分区主站数量为 7、8、9。系统按不同分区数量要求分别进行分区,分区结果如表 3—5 所示。

表 3 7 区域分区结果

Table 3 Results of dividing into seven regions

| 区域 | 主站 | 子站 |
|----|-----|------------------------|
| 1 | 凤凰山 | 关山、岳府湾、珞珈、冶、巡司、电、庙山、沙塘 |
| 2 | 汪庄余 | 茶庵、鹿门、蒲圻、咸宁、塘角镇、吴田 |
| 3 | 栖霞 | 磁湖、下陆、四棵、姜家滩、铁山、向家嘴 |
| 4 | 和 | 沙湖、北洋、青山、轧、武东、钢、花山 |
| 5 | 郎家 | 炼、铁山、下陆、鄂州、华容、左岭 |
| 6 | 蕲春 | 蔡城、崔家湾、张家湾、西塞山 |
| 7 | 石板路 | 黄石、西塞山、四棵、韦源、磁湖、大吉 |

表 4 8 区域分区结果

Table 4 Results of dividing into eight regions

| 区域 | 主站 | 子站 |
|----|-----|------------------------|
| 1 | 凤凰山 | 关山、岳府湾、珞珈、冶、巡司、电、庙山、沙塘 |
| 2 | 汪庄余 | 茶庵、鹿门、蒲圻、咸宁、塘角镇、吴田 |
| 3 | 栖霞 | 磁湖、下陆、四棵、姜家滩、铁山、向家嘴 |
| 4 | 和 | 沙湖、北洋、青山、轧、武东 |
| 5 | 郎家 | 炼、铁山、下陆、鄂州、华容 |
| 6 | 蕲春 | 蔡城、崔家湾、张家湾、西塞山 |
| 7 | 石板路 | 黄石、西塞山、四棵、韦源、大吉 |
| 8 | 花山 | 武东、钢、轧、鄂州、北洋、左岭 |

表 5 9 区域分区结果

Table 5 Results of dividing into nine regions

| 区域 | 主站 | 子站 |
|----|-----|--------------------|
| 1 | 凤凰山 | 岳府湾、珞珈、冶、电、庙山、沙塘 |
| 2 | 汪庄余 | 茶庵、鹿门、蒲圻、咸宁、塘角镇、吴田 |
| 3 | 栖霞 | 磁湖、下陆、四棵、姜家滩、向家嘴 |
| 4 | 和 | 沙湖、北洋、青山、轧 |
| 5 | 郎家 | 炼、铁山、下陆、鄂州、华容 |
| 6 | 蕲春 | 蔡城、崔家湾、张家湾 |
| 7 | 石板路 | 黄石、西塞山、四棵、韦源、大吉 |
| 8 | 花山 | 武东、钢、轧、鄂州、左岭 |
| 9 | 关山 | 巡司、轧、青山、钢 |

针对表3—5的分区结果,进一步判断各区域内时延最长的通信业务是否满足区域保护通信对于快速性的要求,测算区域内载荷量最大信道是否存在信道堵塞,以此判断分区结果是否满足区域保护分区均衡性要求。根据文献[14]可知,设定每个变电站上传数据的大小为21.7 Mbit/s,通信时延的计算方法参考文献[13],分区域通信指标对比结果如表6所示。

表6 分区域通信指标对比结果

Table 6 Comparison results of sub-regional communication index

| 区域 | 各区域最大时延/ms | | | 各区域最大信道利用率/% | | |
|----|------------|------|------|--------------|-----|-----|
| | 7区域 | 8区域 | 9区域 | 7区域 | 8区域 | 9区域 |
| 1 | 2.55 | 2.55 | 2.43 | 28 | 28 | 28 |
| 2 | 2.49 | 2.49 | 2.49 | 28 | 28 | 28 |
| 3 | 3.37 | 3.37 | 3.37 | 42 | 42 | 28 |
| 4 | 3.79 | 2.65 | 2.63 | 70 | 42 | 28 |
| 5 | 3.73 | 2.52 | 2.52 | 42 | 28 | 28 |
| 6 | 3.06 | 3.06 | 1.90 | 28 | 28 | 14 |
| 7 | 2.60 | 2.30 | 2.30 | 28 | 28 | 28 |
| 8 | — | 2.53 | 2.53 | — | 42 | 28 |
| 9 | — | — | 2.40 | — | — | 28 |

由表6结果可知,当分区较少时,单个分区域内将出现信息传输延时较长,较严重的是其信道利用率超过了50%,基于文献[15],此时信道延时出现非线性增加,再结合故障时信息量大幅增加,延时将难以满足区域保护的需求。随着区域主站个数的增多,各区域时延明显降低,载荷量也趋于更加均匀,但这也意味着主站较多,投资费用更大。因此可根据工程实际需求,综合考虑系统实时性、均衡性和投资经济性,确定合适的区域个数,如本系统采取8区域分区。相比较文献[16],仅考虑了拓扑关系,依据跳数将主站周边站点划分至相应区域,未全面考虑影响传输时延的信道距离、带宽等因素。依据上述参数计算,区域1存在划分明显不均衡的情况,区域1和区域3存在传输时延过长的情况。本文的分区方法较好地解决了上述不足,可作为该分区方法一个很好的延拓。

5 结论

为了满足区域保护工程化的实际需求,本文提出考虑通信约束的分区策略,综合考虑实际应用中影响通信时延的因素,研究了区域保护分区的实现技术。

a. 基于Floyd算法提出一种排列组合择优法的区域保护主站选取模型;在此基础上,考虑影响通信时延的多因素指标建立子站划分模型。

b. 考虑分区完成后区域内出现 $N-1$ 信道故障,计及对通信延时的影响,对分区域策略进行修正。

c. 基于图论技术,利用主站选取模型、子站划分

模型,将系统进行合理分区。仿真结果表明该分区方法能有效保证区域保护对于通信的要求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王艳,金晶,焦彦军. 广域后备保护故障识别方案[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):70-75,99.
WANG Yan, JIN Jing, JIAO Yanjun. Wide area backup protection fault identification scheme[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12):70-75, 99.
- [2] LIN Xiangning, ZHANG Rui, TONG Ning, et al. Regional protection scheme designed for low-voltage micro-grids[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015(64):526-535.
- [3] LI Zhenxing, MENG Xiaoxing, WANG Xin, et al. A wide-area relaying protection system based on multi-point measurement information[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(4):529-536.
- [4] MA Jing, XIANG Xiaoqiang, ZHANG Runfeng. Regional protection scheme for distribution network based on logical information[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2017, 11(17):4314-4323.
- [5] OSMAN A H, HASSAN M S, SULAIMAN M. Communication-based adaptive protection for distribution systems penetrated with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5):1-9.
- [6] 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.
YIN Xianggen, WANG Wei, ZHANG Zhe. Participation and tripping strategy of limited wide area relay protection adapted to smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7):1-7.
- [7] 马静,王希,王增平. 圆网格式保护区交叠全覆盖分区新方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):50-54.
MA Jing, WANG Xi, WANG Zengping. A new method for overlapped full coverage sub-area in the protection of circular grids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9):50-54.
- [8] 姜宪国,王增平,李琛,等. 区域自治式后备保护分区方案[J]. 电工技术学报,2013,23(1):234-241.
JIANG Xiangguo, WANG Zengping, LI Chen, et al. Zoning of regional autonomous reserve protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 23(1):234-241.
- [9] 何志勤,张哲,尹项根,等. 集中决策式广域后备保护的分区模型与优化算法[J]. 电工技术学报,2014,29(4):212-219.
HE Zhiqin, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Zoning model and optimization algorithm for centralized decision-making wide area backup protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4):212-219.
- [10] 孔德洪,吕飞鹏. 基于区域多信息融合的广域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(4):26-32.
KONG Dehong, LÜ Feipeng. Global area backup protection algorithm based on regional multi-information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4):26-32.
- [11] 和敬涵,王紫琪,张大海. 基于图论及模糊评价的广域后备保护分区方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):75-82.
HE Jinghan, WANG Ziqi, ZHANG Dahai. Zoning of wide area backup protection based on graph theory and fuzzy evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):75-82.
- [12] 马静,张涌新,项晓强,等. 基于保护动作信号的配电网区域保

- 护方案[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):34-41.
MA Jing,ZHANG Yongxin,XIANG Xiaoqiang,et al. Regional protection scheme for distribution network based on protection action signals[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):34-41.
- [13] 熊小平,谭建成,林湘宁. 基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法[J]. 电工技术学报,2013,28(6):257-263.
XIONG Xiaoping,TAN Jiancheng,LIN Xiangning. Routing algorithm for wide area protection communication system based on MPLS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(6):257-263.
- [14] 蔡煜,蔡泽祥,王奕,等. 配电网广域保护控制通信网络建模与组网策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):1-7.
CAI Yu,CAI Zexiang,WANG Yi,et al. Modeling and networking strategy of wide area protection control communication network for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(4):1-7.
- [15] 谢希仁. 计算机网络[M]. 5版. 北京:电子工业出版社,2008:22.
- [16] 李振兴,尹项根,张哲,等. 分区域广域继电保护的系统结构与故障识别[J]. 中国电机工程学报,2011,31(28):95-103.
LI Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. A system structure and fault identification of sub-area wide area relay protection[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(28):95-103.

作者简介:



李振兴

李振兴(1977—),男,河南漯河人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制(E-mail:lzx2007001@163.com);

龚 旸(1994—),男,湖北鄂州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制(E-mail:122988772@qq.com)。

Regional protection partitioning strategy considering communication constraints and its implementation technology

LI Zhenxing¹, GONG Yang¹, WENG Hanli¹, LI Zhenhua², XU Yanchun²

(1. School of Electrical and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Key Laboratory of Operation and Control of Cascade Hydropower Stations in Hubei Province, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The regional protection based on multi-source information of regional power grid depends on the communication technology and communication foundation, the implementation of regional protection of wide area power grid must be focused on the partitioning strategy and implementation considering communication constraints. Therefore, considering the number of hops between slave station and master station that has the greatest impact on the communication between slave station and master station, and combining the balance among regions, a regional protection master selection model adopting permutation and combinatorial optimization method is proposed based on Floyd shortest path algorithm. Furthermore, the slave station division model based on factors affecting the communication delay of regional protection is established. Aiming at the $N-1$ channel failure in the formed region, the detour process of slave station communication is analyzed, and the partitioning strategy is corrected considering the influence of communication delay. Finally, the implementation technology and method of partitioning strategy are proposed based on graph theory.

Key words: relay protection; communication; regional protection; communication constraint; partitioning principle; graph theory

表 A1 IEEE39 节点系统通信系统数据
TableA1 Communication system data of IEEE 39-bus system

| 信道 | 长度/km | 带宽/Mbit | 信道 | 长度/km | 带宽/Mbit |
|----|-------|---------|----|-------|---------|
| 1 | 64.6 | 100 | 13 | 69.2 | 100 |
| 2 | 125.0 | 100 | 14 | 18.8 | 100 |
| 3 | 94.8 | 100 | 15 | 11.8 | 100 |
| 4 | 30.2 | 50 | 16 | 28.0 | 100 |
| 5 | 127.4 | 50 | 17 | 22.4 | 100 |
| 6 | 30.2 | 50 | 18 | 25.8 | 100 |
| 7 | 43.0 | 100 | 19 | 43.4 | 100 |
| 8 | 34.6 | 100 | 20 | 70.0 | 100 |
| 9 | 42.6 | 50 | 21 | 27.6 | 100 |
| 10 | 17.8 | 100 | 22 | 20.2 | 50 |
| 11 | 27.0 | 100 | 23 | 19.2 | 50 |
| 12 | 25.6 | 100 | | | |

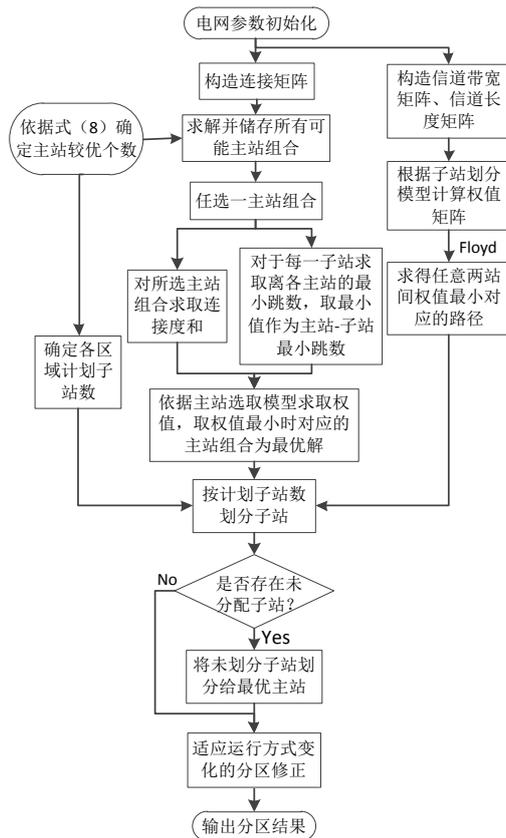


图 A1 分区流程图

Fig.A1 Flowchart of partition

附录 B

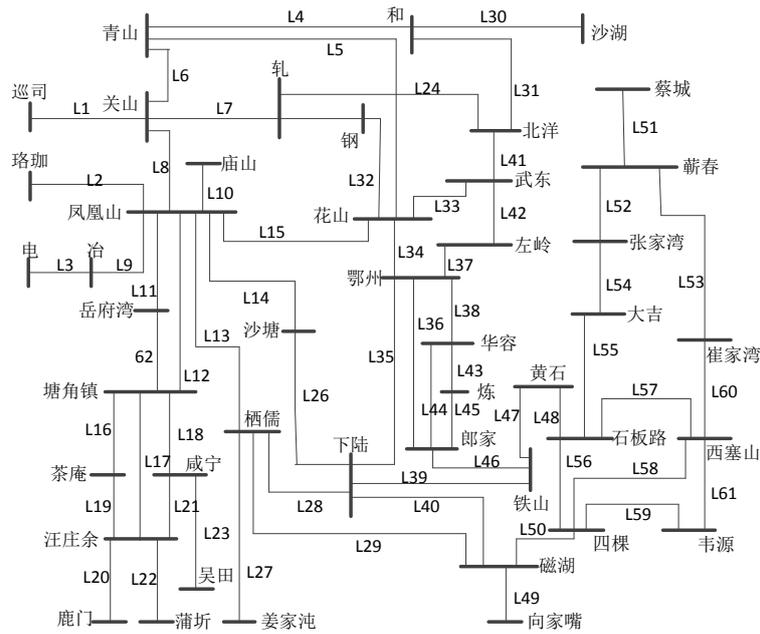


图 B1 鄂东地区 220kV 电网通信系统

Fig.B1 Communication system of 220kV grid in east region of Hubei Province

表 B1 鄂东地区 220kV 电网通信系统数据

TableB1 Communication system data of 220 kV grid in east region of Hubei Province

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 信道 | L ₁ | L ₂ | L ₃ | L ₄ | L ₅ | L ₆ | L ₇ | L ₈ | L ₉ | L ₁₀ | L ₁₁ | L ₁₂ | L ₁₃ |
| 长度/km | 14 | 20 | 8 | 34.6 | 63.4 | 31 | 22 | 31 | 25 | 50 | 18 | 83 | 87 |
| 带宽/Mbit | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 622 |
| 信道 | L ₁₄ | L ₁₅ | L ₁₆ | L ₁₇ | L ₁₈ | L ₁₉ | L ₂₀ | L ₂₁ | L ₂₂ | L ₂₃ | L ₂₄ | L ₂₅ | L ₂₆ |
| 长度/km | 116 | 104 | 79 | 52 | 17 | 18 | 25 | 43 | 40 | 34 | 23 | 8 | 43 |
| 带宽/Mbit | 155 | 622 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 |
| 信道 | L ₂₇ | L ₂₈ | L ₂₉ | L ₃₀ | L ₃₁ | L ₃₂ | L ₃₃ | L ₃₄ | L ₃₅ | L ₃₆ | L ₃₇ | L ₃₈ | L ₃₉ |
| 长度/km | 40.5 | 34 | 23 | 23 | 30 | 17.4 | 14 | 39 | 55 | 32 | 21 | 8.4 | 9 |
| 带宽/Mbit | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 |
| 信道 | L ₄₀ | L ₄₁ | L ₄₂ | L ₄₃ | L ₄₄ | L ₄₅ | L ₄₆ | L ₄₇ | L ₄₈ | L ₄₉ | L ₅₀ | L ₅₁ | L ₅₂ |
| 长度/km | 11 | 25 | 29 | 27 | 34 | 9 | 14 | 41 | 9 | 42 | 8 | 62 | 80 |
| 带宽/Mbit | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 |
| 信道 | L ₅₃ | L ₅₄ | L ₅₅ | L ₅₆ | L ₅₇ | L ₅₈ | L ₅₉ | L ₆₀ | L ₆₁ | L ₆₂ | | | |
| 长度/km | 75 | 44 | 36 | 16.5 | 9 | 25 | 18 | 21 | 10.5 | 62 | | | |
| 带宽/Mbit | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | | | |