

DOI: 10.7667/PSPC170258

计及母联开关的高压直流工程最后断路器智能判断方法

于海¹, 富银芳², 于锋³, 曾丽丽¹, 胡欢¹, 李跃鹏¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网浙江省电力公司检修分公司, 浙江 杭州 310018;
3. 许继电源有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 为了提高电网运行的安全可靠性和稳定性, 提出了一种计及母联开关的高压直流工程最后断路器智能判断方法。建立了涉及母联开关的交流场等效模型和图论求解模型, 针对各交流母线上接入的 N 个母联开关, 将交流母线抽象为 $N+1$ 个节点, 各节点之间经母联开关相连。以线路汇集节点为起点, 以阀组为终点, 通过搜索图论模型中起点到终点之间割边的集合, 解决了多种功率输送方式下使用常规逻辑设计无法实现包含母联开关在内的整个交流场阀组最后断路器求解的问题。理论推导和工程用例结果表明, 该方法能够大大降低工程应用程序的编写和调试难度, 有效规避工程扩建期间由于功能修改带来的风险, 确保电网安全可靠地运行。

关键词: 母联开关; 高压直流; 多种功率输送; 最后断路器; 割边

Intelligent judgment method for the last breaker in HVDC project including bus-tie switch

YU Hai¹, FU Yinfang², YU Feng³, ZENG Lili¹, HU Huan¹, LI Yuepeng¹

(1. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. Maintenance Branch, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310018, China; 3. XJ Power Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to improve the safety and reliability of power grid operation, an intelligent judgement method for the last circuit breaker in HVDC project including bus-tie switch is proposed. An equivalent model and graph theory model for the last circuit breaker of AC field including bus-tie switch is set up, in view of the N bus-tie switches which are inserted in each AC bus, the AC bus is abstracted as $N+1$ nodes, and the nodes are connected by bus-tie switch. Taking line convergence joint as starting point and converter as the finishing point, by way of searching the set of cut edges between starting and finishing point in the graph theory model, the problem that using conventional logic design can not realize the judgement of last breaker of the full AC field including bus-tie switch under multiple power transmission mode is solved. Theoretical analysis and engineering case results show that this method can make the engineering application programming and debugging much easier, effectively avoid the risk of functional changes during the project expansion, and ensure the safe and reliable operation of power grid.

Key words: bus-tie switch; HVDC; multiple power transmission; last breaker; cut edges

0 引言

最后断路器的智能判断在高压直流工程中具有重要的应用价值, 控制保护装置通过实时采集交流场所有断路器的分合状态, 预先判断哪些开关为线路到阀组之间的最后断路器, 一旦判断某些开关为最后断路器, 并且最后断路器出现跳闸或分断, 将启动对应阀组的紧急停运, 避免系统过压损坏设备, 以保证电网系统安全可靠的运行^[1]。

高压直流工程最后断路器的判断过程比较复杂, 以一个包含 10 条 3/2 交流分支串的常规交流场

为例, 共计 30 个断路器, 那么相应的间隔开关组合多达 2^{30} 种。以往国内外直流工程最后断路器判断大多基于枚举法, 任意一处功能变化都可能导致现场修改应用逻辑程序, 繁琐、耗时又存在安全隐患^[2]。文献[3]提出了一种基于路径重合节点的判断方法, 对解决最后断路器智能判断问题具有一定的参考价值。文献[4]建立了基于图论的最后断路器求解模型, 实现了常规交流场最后断路器的求解。但是, 目前国内在建和新建的一些直流工程为了满足多种功率输送方式的要求, 在逆变站的交流母线上接入了分段母联开关, 通过分断母联开关和出线隔

离开关,将直流功率直接输送到不同的异步电网^[5-6]。母联开关相当于把交流场分割成了几个部分,交流场的实际拓扑结构随着不同功率输送方式而变化,使得整个交流场最后断路器的判断变得更加复杂,使用现有方法和技术无法对包括母联开关在内的交流场最后断路器进行判断。

本文将图论应用到多种功率输送方式下交流场最后断路器的求解算法中,建立了计及母联开关的交流场等效模型和最后断路器图论求解模型。将交流场抽象为一个无向连通图,断路器(包含母联开关等)抽象为图的边,线路、阀组和交流母线等其他设备抽象为图的节点。另外,针对每条交流母线上接入的 N 个母联开关,可将交流母线抽象为对应的 $N+1$ 个节点,各节点通过母联开关与其他节点相连。以线路汇集节点为起点,以阀组为终点,通过搜索模型中起点到终点之间割边的集合,将最后断路器的求解问题转换为无向连通图求解割边的问题,实现了多种功率输送方式下交流场最后断路器一次性求解。

1 直流多种功率输送方式

永仁—富宁±500 kV 直流工程是目前国内首次设计和应用多种功率输送方式的工程^[5-8]。富宁换流站交流场规划主接线如图1所示,BX和BY表示两条交流母线,母线之间并联有9条3/2交流分支串,每条交流串有三个断路器,每两个断路器之间可以接入阀组、线路、交流滤波器和隔离刀闸等其他设备。富宁换流站初期设计的交流出线共有四回,分别接入两个异步电网,其中靖西1和靖西2

接入广西电网,砚山1和砚山2以及4回备用出线接入云南电网。富宁换流站交流场与以往所有直流工程的配置相比,特殊之处在于交流母线上接入四个分段母联开关(M1、M2、M3、M4),在接入广西电网的两条出线上接入了两个隔离开关(1号、2号)。通过分合母联开关和隔离开关,可以控制系统运行在直流功率“全送云南”,“全送广西”,“极1送广西、极2送云南”等三种方式,基本实现方案是如下所述。

1) 直流功率“全送云南”: M1、M2、M3、M4母联开关合位,1号、2号出线隔离开关分位。

2) 直流功率“全送广西”: M1、M2母联开关合位,M3、M4母联开关分位,1#、2#出线隔离开关合位。

3) 直流功率“极1送广西,极2送云南”: M1、M2母联开关分位,M3、M4母联开关合位,1#、2#出线隔离开关合位。

由以上方案可知,各种功率输送方式下交流场的拓扑结构是不同的,而工程设计要求交流场保护系统能够实时计算出各种功率输送方式下整个交流场各阀组的最后断路器。使用现有方法需要建立4个独立的交流场模型,应用程序需要管理和整合每个模型的输入输出数据。工程中三种功率输送方式需要进行在线转换,即在直流功率稳定输送的工况下完成功率输送方式的任意转换。这就对最后断路器的判断方法和实现过程提出了更高的要求,不仅要满足工程的设计需求,更要确保相关功能在实际工程运行过程中的安全可靠。

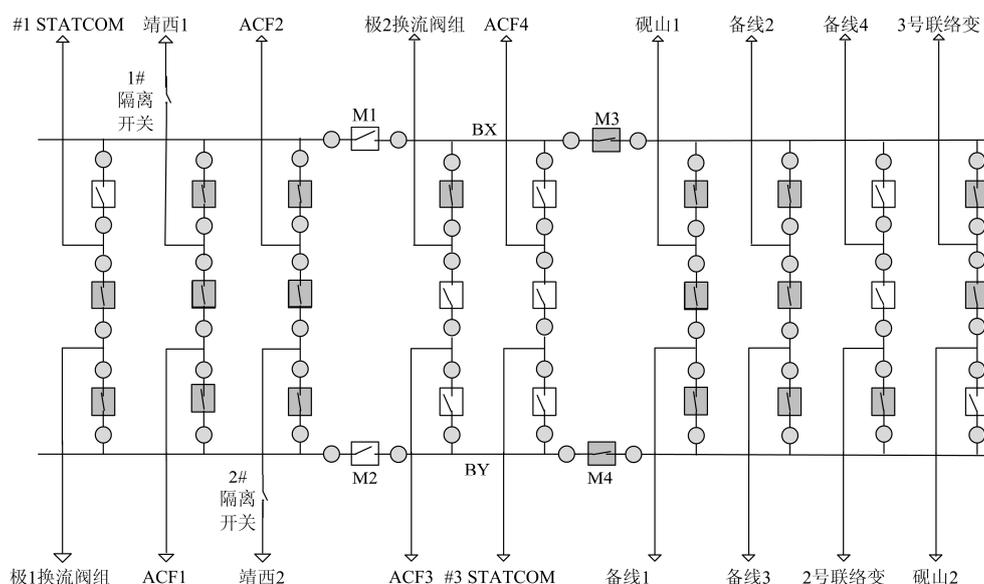


图1 富宁换流站交流场接线图

Fig. 1 Wiring diagram of AC field for Funing converter station

2 交流场最后断路器求解模型

计及母联开关的交流场等效模型如图 2 所示,模型中实线部分共并有 4 个交流分支,分别接入了 2 个线路和 2 个阀组。由图中红色和蓝色虚线表示的路径可以看出,线路 1 和线路 2 均必需经过断路器 A1、A2、B2、C2 以及母联开关 M2 可以到达阀组 1,分断其中任意一个,所有线路与阀组 1 将被隔断,因此可以简单地判断出 A1、A2、B2、C2,以及母联开关 M2 都是所有线路到阀组 1 的最后断路器。当然,实际工程中交流场的分支串数在 10 条左右,线路和阀组投入个数更多,断路器的分合状态变换无常,最后断路器的判断非常复杂。

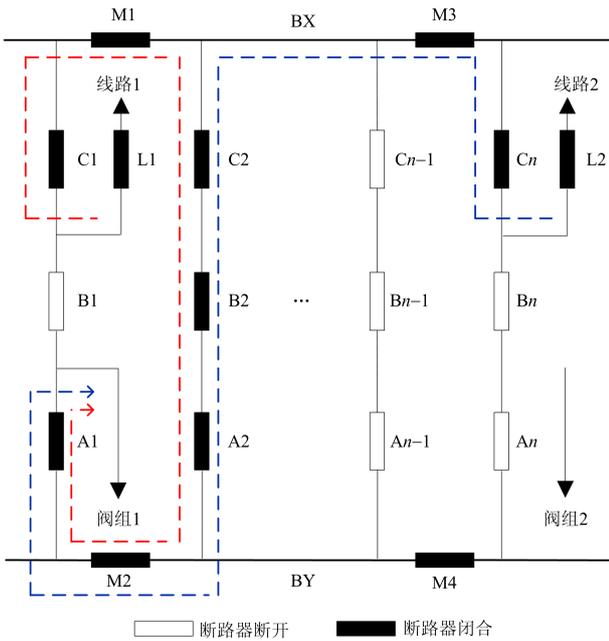


图 2 计及母联开关的交流场等效模型

Fig. 2 Equivalent model of AC field including bus-tie switch

图论是以图为研究对象,研究顶点和边组成的图形的数学理论和方法,目前广泛应用于生产管理、交通运输、网络通信、电路设计各个领域,特别适合解决网络拓扑相关的工程问题^[9-10]。图论中的图形可以用来描述某些事物之间的某种特定关系,用节点代表事物,用连接两个节点的边表示相应两个事物间具有这种关系。为了方便计算机运算,通常采用邻接链表或者邻接矩阵来表示图中各节点之间的关系。设 $G(V,E)$ 是一个具有 n 个节点的无向连通图, V 表示所有节点的集合, E 表示所有节点之间边的集合,则图的邻接矩阵是一个 $n \times n$ 的二维数组,这里用 $Edge[n][n]$ 表示,它的定义为

$$Edge[i][j] = \begin{cases} 1 & \text{if } (V_i, V_j) \in E, \text{ or } (V_j, V_i) \in E \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

这里需要引入图论的另外一个概念是割边,即在无向连通图 G 中, e 是其一条边,如果去掉 e 后,图 G 不再连通,则 E 称为图 G 的割边。这里定义一个割边的集合 Ep ,即删除 Ep 中的任意一条割边,图 G 不再连通^[11]。

根据交流场的交流母线、线路、阀组和断路器(包含母联开关和出线隔离开关)的配置及拓扑结构特点,本文设计的最后断路器图论求解模型创建方法是:

- 1) 将交流场抽象为无向连通图;
- 2) 将断路器抽象为无向连通图的边;
- 3) 将交流母线、阀组和线路抽象为无向连通图的节点;
- 4) 由于母联开关的接入,交流母线不再是单一的节点,针对每条母线上接入的 N 个母联开关,需将交流母线抽象为相应的 $N+1$ 个节点,并通过母联开关与其他节点相连。

由以上方法建立的最后断路器图论求解模型如图 3 所示,其中黑色闭合的断路器表示连通的边,白色断开的断路器表示非连通的边。四个母联开关(M1、M2、M3、M4)将两条交流母线分割成了六段,这里将其抽象为 6 个节点(BX1、BX2、BX3、BY1、BY2、BY3)。另外,为了完善图论求解模型,增加了阀组与接入节点之间的虚拟连通边,如 S1 和 S2,最后断路器计算结果中需要将其去除^[12-13]。

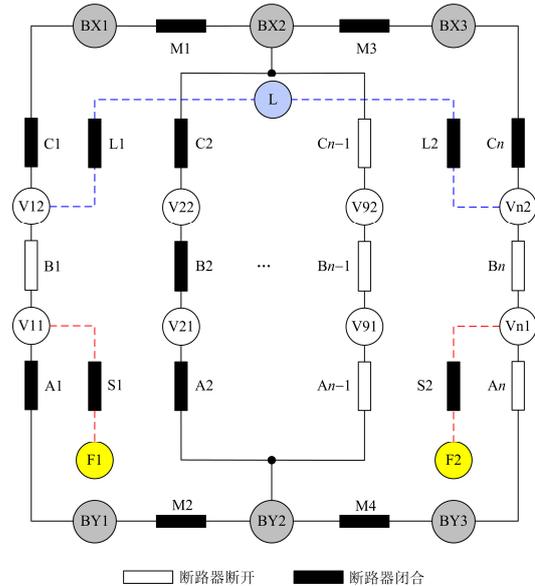


图 3 最后断路器图论求解模型

Fig. 3 Solving model of the last breaker based on graph theory

模型中各分支相邻断路器之间通过节点相连,同时为了简化后面的搜索运算,可将所有输入线路汇集为一个节点 L,这样不需要分别搜索每条线路到阀组之间的最后断路器,只需一次性搜索线路汇集节点 L 到阀组的最后断路器即可。

由图 3 中的最后断路器图论求解模型可以建立各个阀组及其相关节点之间的邻接矩阵。具体生成方法是:如果两个节点之间有边连接,并且该边代表的断路器为闭合状态,则对应邻接矩阵中的元素为 1,否则为 0。与阀组 1 相关节点之间的邻接矩阵如图 4 所示。

V11	V12	V21	V22	...	V91	V92	Vn1	Vn2	BX1	BX2	BX3	BY1	BY2	BY3	L	F1
V11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
...
V91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vn1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vn2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BX1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BX2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BX3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BY1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BY2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BY3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 4 图 3 阀组 1 相关节点的邻接矩阵

Fig. 4 Adjacency matrix node for converter 1 in Fig. 3

3 最后断路器智能判断实现方案

直流工程在投运、运行和停运的过程中断路器的分合状态变化不定,需要交流站控系统实时采集、计算和处理。因此,最后断路器判断应涵盖输入编码、智能判断和解码输出 3 个过程。

3.1 编码策略

工程中由分布式测控装置实时采集交流场所所有断路器(包含母联开关、隔离开关)的分合状态,并通过现场总线传递给交流站控系统主机,并在其内部组织成系统能够识别的二进制输入序列码,有效位数由断路器的实际个数而定。组织规则是:二进制序列从右到左,从低位到高位依次表示母联开关 M1、M2、M3、M4,隔离开关 L1、L2,阀组与节点间的虚拟断路器 S1、S2,然后自交流场左上角开始,从上到下,从左到右依次排列的交流串断路器。二进制序列中“1”表示闭合,“0”表示分断。图 3 模型对应的二进制序列如表 1 所示。系统程序根据二进制输入序列码、交流场线路和阀组接入位

置及交流分支串数,即可生成各阀组对应的邻接矩阵。

表 1 图 3 交流场断路器与开关状态输入编码

Table 1 Breaker and switch inputs for the AC filed in Fig. 3

位数	Bit 20	Bit 19	Bit 18	Bit 17			
断路器	A_n	B_n	C_n	A_{n-1}			
分合状态	0	0	1	0			
Bit 16	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9
B_{n-1}	C_{n-1}	A2	B2	C2	A1	B1	C1
0	0	1	1	1	1	0	1
Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1
S2	S1	L2	L1	M4	M3	M2	M1
1	1	1	1	1	1	1	1

3.2 判断策略

本文提出的判断策略是,在图 3 最后断路器图论求解模型中,以输入线路汇集节点 L 为起点,以某一阀组节点为终点,搜索起点到终点割边的集合,集合中的每条割边代表一个最后断路器,该集合即为交流场所有接入线路到某一阀组最后断路器的集合。集合里割边的个数可以是一个、多个或者零个,删除集和中任意一条割边,即分断集合里任意一个断路器,起点到终点之间不再连通,所有线路与阀组将被隔断。

搜索无向连通图指定两点之间的割边可以使用深度优先搜索或者广度搜索优先算法,其中深度优先搜索算法思想是,首先选择图中任意一个未被访问过的节点作为起始点开始搜索,若被搜索到的节点满足从未被访问过,则将该节点标记为已访问,同时以该节点为起点继续搜索,如此反复,直到图中所有的节点均被访问。在深度优先遍历的过程中可以设置不同的回退条件和判断逻辑,解决不同的工程问题^[14-15]。本文设置的深度优先搜索判断策略是:

- 1) 指定起点和终点,即搜索线路汇集节点到某一指定阀组之间的所有路径;
- 2) 记录路径的条数以及每条边的遍历次数(小于等于路径条数);
- 3) 路径中所有遍历次数等于路径条数的边都是割边。

该策略的输入量是图论模型中对应的阀组邻接矩阵、起点和终点,输出结果是起点到终点之间的所有路径、路径条数和各边遍历次数以及经过判断输出的割边集合。图 3 模型中阀组 1 的计算结果如表 2 所示。交流场所有线路到阀组 1 的路径共有 2 条,其中只有断路器 C2、B2、A2、M2、A1 遍历的次数等于 2,其他边的遍历次数均小于 2,由此判

断出 C2、B2、A2、M2、A1 即是所有线路到阀组 1 的最后断路器。S1 是与阀组 1 邻接的虚拟连通边，需要将其从割边的集中去除。另外，起点和终点不必计入集合中。

表 2 图 3 阀组 1 最后断路器搜寻结果
Table 2 Searching result of last breaker for the first converter in Fig. 3

F1 路径条数	2
F1 路径	L→L1→C1→C2→B2→A2→M2→A1→S1→F1 L→L2→Cn→M3→C2→B2→A2→M2→A1→S1→F1
F1 各边遍历次数	C2=2; B2=2; A2=2; M2=2; A1=2 L1=1; L2=1; C1=1; Cn=1; M3=1
F1 割边的集合	C2、B2、A2、M2、A1

3.3 解码策略

最后断路器计算结果需要转换成装置能够识别的二进制输出序列码，阀组 1 对应的二进制序列码如表 3 所示，其中“1”表示该位代表的断路器是最后断路器，“0”表示不是。该输出结果会通过控制总线发送给换流阀保护系统主机和极控系统主机。在特殊情况下一旦有严重系统故障产生，即判断最后断路器中的一个断路器即将分断，系统立即发出紧急停运连锁信号(ESOF)，紧急停运阀组。同时系统会通过站间通信将 ESOF 信号发送到对站，对站

也采取相应的操作。

表 3 图 3 阀组 1 最后断路器输出编码
Table 3 Output coding of last breaker for the first converter in Fig. 3

位数	Bit 20	Bit 19	Bit 18	Bit 17			
判断状态	0	0	0	0			
断路器	A_n	B_n	C_n	A_{n-1}			
Bit 16	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9
0	0	1	1	1	1	0	0
B_{n-1}	C_{n-1}	A2	B2	C2	A1	B1	C1
Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1
0	0	0	0	0	0	1	0
S2	S1	L2	L1	M4	M3	M2	M1

4 工程应用实例

永仁—富宁±500 kV 直流工程富宁换流站交流场对应的最后断路器图论求解模型如图 5 所示，1 号和 2 号隔离开关合并，4 个母联开关将交流母线分割成 6 个母线节点，交流场 9 个交流分支串中的前 4 个串汇集到母线节点 BX1 和 BY1，第 4 和第 5 串汇集到 BX2 和 BY2，最后 3 串汇集到 BX3 和 BY3，各母线节点经母联开关相连。根据本文方法得出的各阀组最后断路器计算结果如表 4 所示。

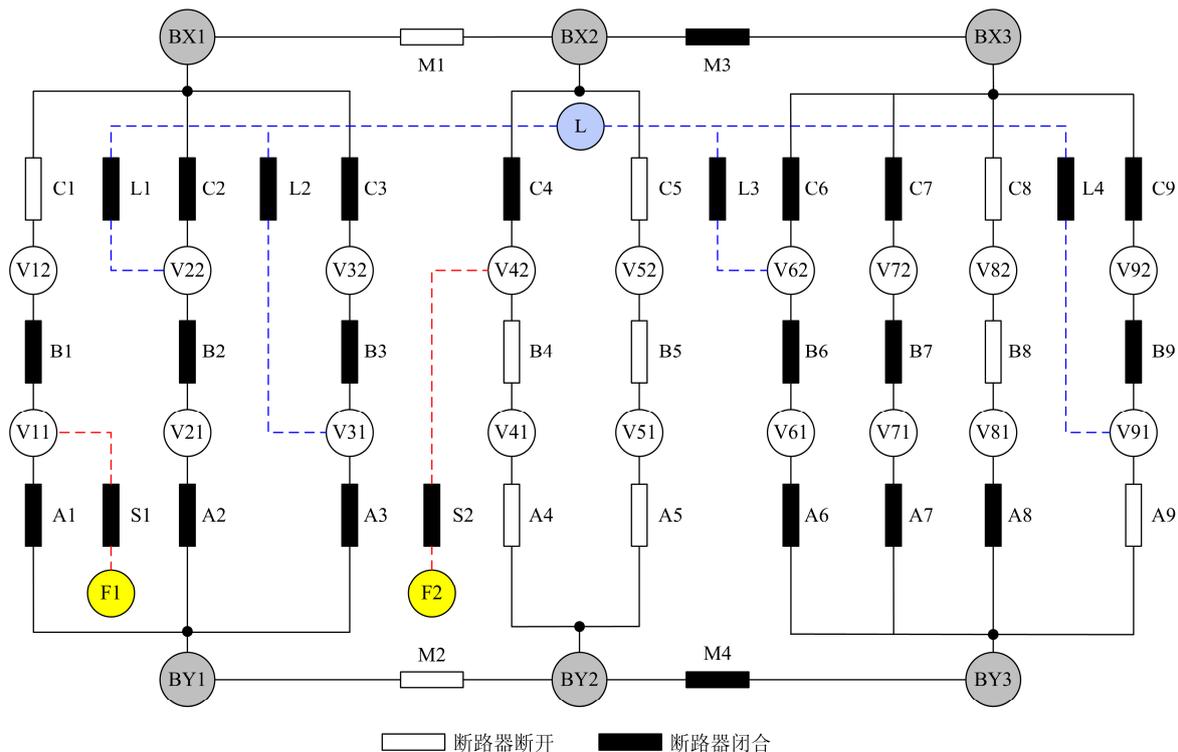


图 5 图 1 交流场最后断路器图论求解模型

Fig. 5 Solving model of the last breaker based on graph theory for the AC filed in Fig. 1

表 4 图 5 各阀组最后断路器计算结果
Table 4 Computed result of last breaker for the converters in Fig. 5

F1 路径条数	4
F1 路径	L→L2→A3→A1→S1→F1 L→L2→B3→C3→C2→B2→A2→A1→S1→F1 L→L1→B2→A2→A1→S1→F1 L→L1→C2→C3→B3→A3→A1→S1→F1
F1 各边遍历次数	A1=4; others<4
F1 割边的集合	A1
F2 路径条数	3
F2 路径	L→L3→C6→C4→S2→F2 L→L3→B6→A6→A7→B7→C7→C4→S2→F2 L→L4→B9→C9→C4→S2→F2
F2 各边遍历次数	C4=3; M3=3; others<3
F2 割边的集合	C4、M3

HCM3000 装置是应用于高压直流输电工程控制保护领域的一款大型嵌入式二次开发软硬件平台。其硬件部分包括一个 VME 机箱和十几种处理器、I/O、通信板卡, 软件部分包含算术、逻辑、通信和故障诊断等几百个功能块, 功能块内部由 C 代码编写, 外部封装起来供工程应用编程人员调用, 实现直流工程中各种控制保护功能。

基于本文策略编写和封装的最后断路器智能判断功能块(LAST_CB)及其平台运行结果如图 6 所示。鉴于平台数据限制, 一个无符号长整型变量最多能表示 32 位, 交流场断路器和母联开关的个数如果超过了 32 位, 相关输入输出值需要用 2 个变量分别表示。其输入输出定义如下所述。

- 1) STA_ACT: 输入交流串断路器分合状态。
- 2) MBK_STA: 输入母联开关分合状态。
- 3) MX_LCAT: 输入母联开关接入位置信息。
- 4) BAY_1A—BAY_10C: 输入各分支的线路和阀组配置参数, “2”为阀组, “3”为线路。
- 5) BAY_N: 输入当前交流场有效分支个数。
- 6) LCB_G1—LCB_G4: 分别输出四个阀组的交流串最后断路器计算结果。
- 7) LCM_G1—LCM_G4: 分别输出四个阀组的母联开关最后断路器计算结果。

图 6 阀组 1 的计算结果 LCB_G1 为 16 进制的 4, 表示存在交流串最后断路器 A1, LCM_G1 为 0, 表示没有母联最后断路器, 即母联开关不是最后断路器。阀组 2 的计算结果 LCB_G2 为 16 进制的 200, 表示存在交流串断路器 C4, LCM_G2 为二进制的 100, 表示存在母联断路器 M3。

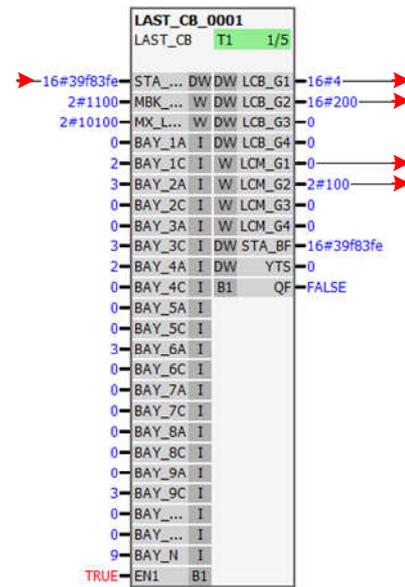


图 6 最后断路器功能块计算结果

Fig. 6 Computed result of the function block for the last breaker

5 结论

针对高压直流工程多种功率输送方式下, 使用常规逻辑设计和现有方法无法实现交流场最后断路器判断的问题。本文提出了一种计及母联开关的最后断路器智能判断方法, 当交流场母联开关、线路、阀组的数量和接入位置发生变化时, 无需修改原来复杂的控制保护程序逻辑, 无需控制系统停电更新程序, 只需在线修改简单的配置参数, 系统即可通过实时采集当前交流场断路器的分合状态, 实现所有输入线路到各个换流阀组之间最后断路器快速、准确的判断。该方法既适用于 ± 500 kV、 ± 800 kV 及其他即将建设的特殊电压等级直流工程的常规交流场拓扑结构, 也适用于类似永仁-富宁 ± 500 kV 直流工程富宁换流站复杂的分断交流场拓扑结构。该方法在实际工程中的顺利实施, 大大降低了工程应用程序的编写和调试难度, 有效规避了工程扩建期间由于功能修改带来的风险, 确保了电网安全可靠的运行。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 333-339.
- [2] 王华伟, 蒋卫平, 吴娅妮, 等. 云广 ± 800 kV 特高压直流工程逆变站最后断路器跳闸故障研究[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 6-9.
WANG Huawei, JIANG Weiping, WU Yani, et al. Study on last break trip fault of inverter station in ± 800 kV UHVDC Project from Yunnan to Guangdong[J]. Power

- System Technology, 2008, 32(18): 6-9.
- [3] 曹俊龙, 肖筱煜, 邹荣盛. 特高压直流输电工程中最后断路器策略的分析[J]. 湖北电力, 2014, 38(12): 8-10.
CAO Junlong, XIAO Xiaoyu, ZOU Rongsheng. Analysis of last breaker tripping strategy in HVDC project[J]. Hubei Electric Power, 2014, 38(12): 8-10.
- [4] 于海, 曾丽丽, 杨亚璞, 等. 基于图论的特高压直流工程最后断路器自适应判断策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 121-126.
YU Hai, ZENG Lili, YANG Yapu, et al. Adaptive strategy for the Last breaker in UHVDC project based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 121-126.
- [5] RAHMAN M H, XU L, YAO L Z. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [6] 贾轩涛, 史博伦, 胡锦根, 等. 永富直流三种功率输送方式在线转换直流过电压仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 131-138.
JIA Xuantao, SHI Bolun, HU Jingen, et al. DC overvoltage simulation for online-switching of three power transmissin modes in Yongfu HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 131-138.
- [7] 刘毅力, 贾轩涛, 戴国安, 等. 永仁一富宁直流工程三种功率输送方式自动转换顺序控制及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 139-146.
LIU Yili, JIA Xuantao, DAI Guoan, et al. Analysis of au-to-sequence control and influence of three power transmission modes in Yongren-Funing HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 139-146.
- [8] 李新, 熊炬, 董泉, 等. 基于母联断路器为跳闸对象的保护方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 242-246.
LI Xin, XIONG Ju, DONG Quan, et al. Summary of relay scheme which trips bus-tie[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 242-246.
- [9] 郝文斌, 夏春, 王彪, 等. 一种基于图论搜索的限制短路电流分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 35-44.
HAO Wenbin, XIA Chun, WANG Biao, et al. A short-circuit current limiting partitioning method based on graph theroy search[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 38-44.
- [10] 田果, 黄小莉, 邓强. 基于图论的智能配电网馈线保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 95-99.
TIAN Guo, HUANG Xiaoli, DENG Qiang. Feeder protection based on graph theory in smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 95-99.
- [11] 冯雪平, 梁英, 郭炳庆. 基于图论的含分布式电源配电网供电恢复动态规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 24-29.
FENG Xueping, LIANG Ying, GUO Bingqing. A dynamic programming method based on graph theory for restoration of distribution system with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 24-29.
- [12] 苗世洪, 马帅, 尚亚男, 等. 基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 39-45.
MIAO Shihong, MA Shuai, SHANG Yanan, et al. A fast recognition method of transmission section based on cut-vertex and path search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 39-45.
- [13] 王阳, 曾祥君, 黎锐烽, 等. 基于图论的配电网故障行波定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 143-147.
WANG Yang, ZENG Xiangjun, LI Ruifeng, et al. A travelling wave fault location algorithm for distribution network based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 143-147.
- [14] 周德才, 张保会, 姚峰, 等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 32-38.
ZHOU Dechai, ZHANG Baohui, YAO Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 32-38.
- [15] 梅义, 丘东元, 张波. 基于深度优先搜索的潜在电路计算机辅助分析法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 75-81.
MEI Yi, QIU Dongyuan, ZHANG Bo. Computer-aided sneak circuit analysis method based on depth-first search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 75-81.

收稿日期: 2017-02-25; 修回日期: 2017-07-17

作者简介:

于海(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为高压直流输电控制保护设备软件平台研发; E-mail: yuhai_xj@163.com

富银芳(1984—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为特高压换流站设备运维;

于锋(1979—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为大功率储能充电电池均衡系统。

(编辑 葛艳娜)