

一种主从式网络备自投自适应控制策略

江东林, 唐小菊

(国网四川省电力公司德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 为应对地区电网中常规备自投用于站间特殊接线方式的局限性, 针对单母分段型变电站提出一种具有主从式结构的网络备自投概念, 即各站端 SBATS 和调度自动化端 MBATS。首先根据需求及恢复规则定义 SBATS 运行模式并为各站量身定制运行模式划分表, 母线失压后站端 SBATS 根据开关位置优先选择可独立完成的恢复策略或向 MBATS 求助, 由 MBATS 计算后下发符合静态稳定约束的恢复策略, 既避免冗余的信息交互, 也可保证实效性以及多站同时失压恢复的整体协调性。最后通过算例验证了该方法的有效性。

关键词: 地区电网; 网络备自投; 自适应; 控制策略

Abstract: In order to tackle the limitations of the conventional busbar automatic transfer switch applied in the regional power grid, the concept of a new network busbar automatic transfer switch system with master-slave structure is presented aiming at the substations with sectionalized single-bus configuration, which has SBATS deployed in the substation and MBATS deployed in the EMS. Firstly, the restoration rule and operation mode of SBATS are proposed. SBATS selects the most appropriate restoration control strategy or asks help from MBATS on the basis of operation mode, MBATS sends the confirmed restoration control strategy to SBATS, which can avoid information redundancy and guarantee the validity and coordination of the restoration process. Finally, the results of calculation examples show that the proposed method is effective.

Key words: regional power grid; network busbar automatic transfer switch; adaptive; control strategy

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)06-0028-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.06.007

0 引言

电力系统中电磁环网闭环运行存在网络结构不清晰、短路电流大以及故障易引发连锁跳闸等问题, 因此地区电网按闭环结构建设但开环运行, 同时为弥补电磁环网解环导致的可靠性下降, 备用电源自动投入装置(busbar automatic transfer switch, BATS)被大量用于 110 kV 变电站^[1-2]。

双电源供电 110 kV 变电站理想情况应从不同的 220 kV 变电站获得电源, 而实际中由于线路走廊、投资及土地等因素限制, 220 kV 变电站布点不足, 导致 110 kV 电网出现 T 接、 π 接及多站串联等特殊接线方式。而随着智能电网建设的不断推进, 对电网故障后的快速自愈能力提出了更高的要求。常规备自投利用单一数据源制定控制策略, 其逻辑固定, 无法满足特殊接线方式的备用电源自动投入逻辑。针对备自投应用局限, 国内已有部分研究。文献[3]提出了适于两站串接的远方备自投, 其在

本侧信息基础上通过保护通信接口远传必须信息, 能满足两站串接在各运行方式下双侧备用的逻辑要求。文献[4]从运行方式、通信及保护配合方面对本站及远方备自投方案分析比较, 给出了特定情况下增设远方备自投的必要性说明。文献[5]针对扩大内桥接线改进了本站备自投, 其通过枚举故障分析备自投动作需求, 其动作逻辑可应对断路器拒跳且具有一定自适应性。文献[6]则考虑单站增加主变压器后变为扩大外桥接线, 在 110 kV 和 10 kV 侧各配置 2 个备自投并优化其动作逻辑, 可实现全站备自投方案。文献[7]则提出一种基于 EMS 的无装置型广域备自投, 其通过采集相关变电站的遥测、遥信及保护信号综合判断, 满足动作条件时由控制中心遥控投切相关设备。文献[8]基于信息共享和远程光纤通道信息提出一种装置型广域备自投, 其通过建立备自投功能点, 将远方备用电源切换失去电源的变电站, 部分拓展了常规备自投适用范围。

针对常规备自投应用局限性, 下面提出适应多种站间特殊接线方式的主从式网络备自投概念及其

控制策略,故障后网络备自投综合利用高可靠性的本地遥信、遥测、保护动作信号及网络拓扑信息,经逻辑运算后快速给出控制策略,实现各站内及站间的备用电源自动投入功能。

1 常规备自投局限性

根据数据源及各站间相互备用关系,常规备自投可分为本站备自投、远方备自投和复合备自投。

1.1 本站备自投

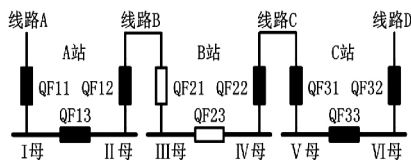


图1 110 kV地区电网局部网架

本站备自投仅利用站端信息,实现本站主供电源失去后的备用电源投入功能。某110 kV地区电网局部网架如图1, A、B和C站串接,线路A和D分别连接至2个220 kV变电站,其中仅B站符合本站备自投配置条件且具有2种备投方式。QF21断开而其他断路器闭合时,为进线备投方式(线路B备用);仅QF23断开时,则为分段备投方式。当各线路保护及B站备自投为进线备投方式时,故障动作情况见表1。

表1 进线备投方式故障动作情况

| 故障区域 | 保护动作 | BATS动作 | 停电区域 |
|------|-------------|---------------|-------|
| 线路A | 跳 QF11 | - | I、II母 |
| 线路B | 跳 QF12 | 放电 | - |
| 线路C | 跳 QF22、QF31 | 跳 QF22 合 QF21 | - |
| 线路D | 跳 QF32 | 跳 QF22 合 QF21 | V、VI母 |
| I母 | 跳 QF11、QF13 | 放电 | I、II母 |
| II母 | 跳 QF12、QF13 | 放电 | II母 |
| III母 | 跳 QF23 | 闭锁 | III母 |
| IV母 | 跳 QF22、QF23 | 跳 QF23 合 QF21 | IV母 |
| V母 | 跳 QF31、QF33 | 跳 QF22 合 QF21 | V母 |
| VI母 | 跳 QF32、QF33 | 跳 QF22 合 QF21 | V、VI母 |

由表1可知B站BATS在故障致其主供电源消失后能切换至备用电源,避免III母和IV母同时停电。但A站及C站在其主供电源失去后,站内非故障区域均会停电。

1.2 远方备自投

远方备自投通常用于具有联络线的两站串接方式,当联络线对侧站主供电源失去后,对侧站通过两站间远传的必需信号进行逻辑判断并在满足动作要求时发出“远方合”命令,在收到对侧站“远方合”命令后,本站合上联络线断路器,实现对侧站的备用电源投入功能。对于两站及以上的串接方式,单独配置远方备自投显然无法兼顾站内及站间的备用电源自动投入需求。

1.3 复合备自投

复合备自投则是在本站备自投基础上增加了2种远方备自投功能。正常运行时,装置可选择是否闭锁远方备自投功能,具有联络线的两站串接方式下,若两站中有且仅有一站复合备自投闭锁远方备自投功能,可满足两站站内及站间的备用电源自动投入需求。对于两站以上的串接及其他特殊接线方式,复合备自投同样无法兼顾各站站内及站间的备用电源自动投入需求。

2 网络备自投

针对常规备自投应用的局限性,提出的网络备自投系统概念如下。

2.1 系统结构

考虑地区电网接线方式的特殊性,为保证通用,各变电站均配置1套备用电源自动投入子站装置(sub-busbar automatic transfer switch, SBATS),地区电网调度自动化配置1套备用电源自动投入主站装置(main-busbar automatic transfer switch, MBATS),系统结构如图3。

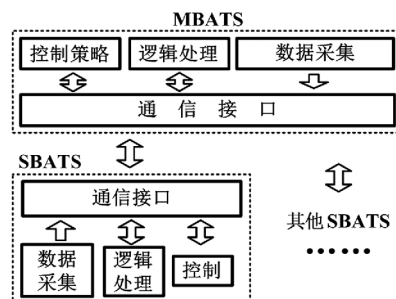


图2 BATS结构

MBATS、SBATS均包含通信接口、控制、逻辑处理和数据采集模块,其中SBATS仅与MBATS通信,各SBATS间不通信。

2.2 需求分析

为使接线方式更具代表性,以图3的A站为

例,在该运行方式下线路 A 故障引起 I 母失压时,可通过 II 母或线路 B 恢复 I 母,比较而言同属本站的 II 母可靠性及时效性更具优势,为避免恢复后分段开关电流超限,制定以下恢复规则:

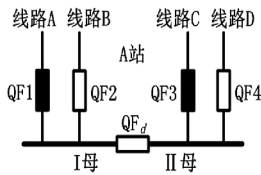


图3 接线方式

1) 优先考虑站内失压母线外的其他母线作恢复电源,恢复前需跳开失压母线上所有线路开关,包括故障前处于充电状态的线路;

2) 当母线分段开关检修时,优先考虑失压母线上线路作恢复电源。

为使SBATS区分规则顺序,首先给出SBATS运行模式,定义为:

1) 分段开关 QF_d 断开时运行方式集合为模式1/模式2,运行方式详见表2;

2) 分段开关 QF_d 检修时运行方式集合为模式3/模式4;

3) 分段开关 QF_d 闭合时运行方式集合为模式5。

受篇幅限制,模式3/模式4以及模式5的具体运行方式不再罗列。

单母分段接线方式,线路数量不同的变电站需为本站SBATS量身定制运行模式划分表,恢复规则可通用。图3所示变电站,5种模式下运行方式数量共计33种,其中运行方式1-9属模式1/模式2,运行方式10-18属模式3/模式4,运行方式19-33属模式5,如表3所示。

表2 备自投模式1/模式2

| 模式 | 运行方式 | 开关编号 | | |
|-------------|------|---------|----|-------|
| | | 闭合 | 断开 | 断开/检修 |
| 模式1/ 模式2 | 1 | 1,3 | d | 2,4 |
| | 2 | 1,4 | d | 2,3 |
| | 3 | 2,3 | d | 2,4 |
| | 4 | 2,4 | d | 2,3 |
| | 5 | 1,2,3 | d | 4 |
| | 6 | 1,2,4 | d | 3 |
| | 7 | 1,3,4 | d | 2 |
| | 8 | 2,3,4 | d | 1 |
| | 9 | 1,2,3,4 | d | - |

表3 各模式对应的运行方式

| 运行方式 | 模式1/模式2 | 模式3/模式4 | 模式4/模式5 |
|------|---------|---------|---------|
| | 1-9 | 10-18 | 19-33 |

其中模式1/模式2各运行方式中,由于110 kV电网开环点不一定在本站以及存在充电线路,可知分段开关 QF_d 闭合时,也存在多个线路开关均闭合的情况。当SBATS判断开关位置后属于某一运行方式,则进入相对应模式运行。

2.3 信息交互

110 kV电网发生故障后,根据站内母线是否失压可将变电站分为故障站和正常站。为恢复失压母线,故障站SBATS需根据运行模式选择恢复规则,当故障站SBATS运行于模式1/模式2时,采用恢复规则1),而运行于模式3/模式4、模式5时,采用恢复规则2);正常站SBATS则可能接收MBATS下发的控制策略后,合上本站开关,恢复失压母线。

2.3.1 SBATS数据

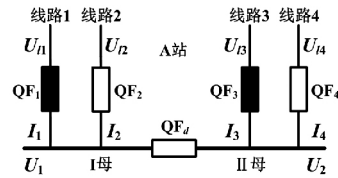


图4 SBATS的采集数据

设110 kV单母分段变电站有 N 条线路, d 个分段开关 QF_d , SBATS可采集数据包括:

- 1) 线路电压 $U_n (n=1, 2, \dots, N)$;
- 2) 线路电流 $I_n (n=1, 2, \dots, N)$;
- 3) 线路闭锁位 $G_m (n=1, 2, \dots, N)$, 当 $G_m=1$ 表示线路 n 闭锁;
- 4) 母线电压 $U_m (m=1, 2)$;
- 5) 母线闭锁位 $G_m (m=1, 2)$ 当 $G_m=1$ 表示母线 m 闭锁;
- 6) 开关位置 $S_n (n=1, 2, \dots, N+1)$ 当 $S_n=1$ 表示开关 QF_n 闭合;
- 7) 开关闭锁位 $G_{bn} (n=1, 2, \dots, N+1)$ 当 $G_{bn}=1$ 表示 QF_n 闭锁;
- 8) I_m , 定义 I_m 为第 m 条母线上线路电流的集合,如图4所示 $I_1 = \{I_1, I_2\}$;
- 9) B_{cy} , 定义 $B_{cy} (y=1, 2, \dots)$ 为运行方式 y 的闭合开关集合,如 $B_{c28} = \{QF_3, QF_4, QF_d\}$;
- 10) B_{oy} , $B_{oy} (y=1, 2, \dots)$ 为运行方式 y 的断开开关集合,如 B_{o28} 为空集;

11) B_m 为第 m 条母线上线路开关的集合,如 $B_1 = \{QF_1, QF_2\}$ 。

2.3.2 MBATS 数据

MBATS 预置有网络拓扑数据,实时从调度自动化系统中获取各站 U_{ln}, U_m, S_n, I_n 信息,闭锁信息 G_{ln}, G_m, G_{bn} 刷新后主动从各站传送到 MBATS。当网架结构因改建等变化时需对网络拓扑数据进行修正。

共计 R 条母线 K 条线路的多个变电站,将母线作节点,线路作支路,并分别给予唯一编号,则改进邻接矩阵为 R 阶方阵。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & L_k & \cdots & 1 \\ L_k & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:矩阵中元素 a_{ij} 与 a_{ji} 相等;若 $a_{ij} = L_k$,则母线 i 与 j 通过线路 k 连接; $a_{ij} = 1$,则母线 i 与 j 为同站母线,通过分段开关连接; $a_{ij} = 0$ 则母线 i 与 j 无连接。

线路开关矩阵为 $K \times 2$ 阶矩阵

$$L = \begin{bmatrix} QF_i & QF_j \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $L_{k1} = QF_i; L_{k2} = QF_j$ 表明线路 k 两端的开关分别为 QF_i 和 QF_j 。

在此基础上,根据图论定义两段母线之间未闭锁的线路两侧开关均闭合,则两段母线称连通,最大连通域(maximum connected region, MCR) 包含的母线相互必连通且与 MCR 之外的母线不连通。

2.4 SBATS 动作流程

SBATS 拥有充电、放电和动作过程以及闭锁功能,准确定位故障点是故障发生后保证准确动作和避免停电范围扩大的关键点。SBATS 通过 S_x 判定当前属于运行方式 y 时,SBATS 进入 y 对应模式运行,故障后采用文献[9]故障定位方法将故障母线及线路闭锁并用 G_{ln} 和 G_m 标记,若开关为检修状态则相应 G_{bn} 也须由人工或自动装置标记。

2.4.1 模式 1/模式 2

SBATS 可同时运行于模式 1/模式 2,用于分别保证 QF_d 断开时 I 母和 II 母的可靠供电,这里仅介绍模式 1。

充电条件: $U_1 > U_{hset}$ 且 $U_2 > U_{hset}$, U_{hset} 为有压检定值,经延时 T_c 后充电完成。

动作流程:

1) 充电完成后 $U_1 < U_{lset}, I_1 < I_{lset}, U_2 > U_{hset}$ (其中 U_{lset} 为无压检定值, I_{lset} 为无流检定值)。

2) 如 $G_1 = 1$ 转至流程 4)。

3) 经延时 T_{act1} 跳开 B_1 所有开关,确认 B_1 所有开关均跳开;若 B_1 中有开关拒跳则转至流程 4) 经延时 T_{act2} 合上母线分段开关 QF_d 。

4) 放电结束。

动作流程外其他放电条件:

1) QF_d 在合位;

2) $U_1 < U_{lset}$ 且 $U_2 < U_{lset}$, 延时 T_{dc} ;

3) 开关 QF_n 位置异常,其中 QF_n 为 B_{cy} 中任意开关,指运行方式 y 中应闭合的开关位置变为断开;

4) 收到外部引入的“闭锁模式 1”信号。

2.4.2 模式 3/模式 4

SBATS 可同时运行于模式 3/模式 4,用于分别保证 QF_d 检修时 I 母和 II 母的可靠供电,这里仅介绍模式 3。

充电条件: $U_1 > U_{hset}$, 经延时 T_c 后充电完成。

动作流程:

1) 充电完成后 $U_1 < U_{lset}, I_1 < I_{lset}$ 。

2) 若 $G_1 = 1$ 转至流程 6)。

3) 若 n 满足 $G_{ln} = 1$ 且 $QF_n \in B_1$, 经延时 T_{act1} 跳开 QF_n , 确认 QF_n 均跳开并转至流程 4); 如 QF_n 拒跳则转至流程 6); 若上述 n 不存在, 转至流程 4)。

4) 若 n 满足 $U_{ln} > U_{hset}, S_n = 0, G_{ln} \neq 0, G_{bn} \neq 0, QF_n \in B_1$, 经延时 T_{act1} 合上 QF_n 并转至流程 6); 若上述 n 不存在, 转至流程 5)。

5) 则经延时 T_{act0} 向 MBATS 发送援助指令。

6) 放电结束。

可知流程 3) 用于准确切除故障线路并隔离, 流程 4) 判断合上站内开关是否能够恢复失压母线并实施, 当不能时执行流程 5) 向 MBATS 发送信息。

动作流程外其他放电条件:

1) $U_1 < U_{lset}$, 延时 T_{dc} ;

2) QF_d 退出检修状态, 即 QF_d 对应 $S_n = 0$ 或 1;

3) 开关 QF_n 位置异常, 其中 QF_n 为 B_{cy} 中任意开关;

4) 收到外部引入的“闭锁模式 3”信号。

2.4.3 模式 5

SBATS 运行于模式 5 时, 保证线路故障时 I 母及 II 母的可靠供电。

充电条件: $U_1 > U_{hset}$ 且 $U_2 > U_{hset}$, 经延时 T_c 后充

电完成。

动作流程:

- 1) 充电完成后 $U_1 < U_{set}$, $U_2 < U_{set}$, $I_1 < I_{set}$, $I_2 < I_{set}$ 。
- 2) 若 n 满足 $G_{ln} = 1$, 经延时 T_{act1} 跳开所有 QF_n , 确认 QF_n 均跳开转至流程 3); 如有 QF_n 拒跳则转至流程 5); 若上述 n 不存在 (经延时 T_{act1} 转至流程 3) 。
- 3) 若 n 满足 $U_{ln} > U_{hset}$, $S_n = 0$, $G_{ln} \neq 0$, $G_{bn} \neq 0$ 经延时 T_{act1} 合上 QF_n 并转至流程 5); 若上述 n 不存在转至流程 4) 。
- 4) 则经延时 T_{act0} 向 MBATS 发送援助指令。
- 5) 放电 结束。

动作流程外其他放电条件:

- 1) $U_1 < U_{set}$ 且 $U_2 < U_{set}$, 延时 T_{dc} ;
- 2) 开关 QF_n 位置异常 , 其中 QF_n 为 B_{cy} 中任意开关;
- 3) 收到外部引入的“闭锁模式 5”信号。

2.5 MBATS 动作流程

故障站 SBATS 优先采用合上满足条件的站内开关恢复失压母线 , 否则其向 MBATS 发送援助指令 , MBATS 经逻辑判断后向相关站 SBATS 下发控制策略。为保证控制策略正确且满足约束 , MBATS 需进行以下流程:

- 1) 根据失压母线连通情况搜索网络中 MCR 数量 , 设共计 V 个 MCR 。
- 2) 估算 MCR_i ($i = 1, 2, \dots, V$) 中所有母线功率和 P_{MCR_i} 。
- 3) 搜索与 MCR_i 中母线连接的线路及其连接的对侧站母线 , 根据 G_m 、 S_n 、 U_m 判断是否可作恢复电源 (如无满足条件的线路则转至流程 6) 。
- 4) 根据 $PMCR_i$ 对流程 3) 中所有线路校验传输功率约束 (如满足转至流程 5); 如不满足则对 MCR_i 对进行拆分 (再次重复流程 1) 至流程 4) 。
- 5) 生成控制策略。
- 6) 结束。

其中估算 MCR_i 可采用调度自动化历史数据。而拆分则随机令 MCR_i 中两母线连接线路的开关断开 , 待所有控制策略均生成后 MBATS 再向 SBATS 下发。先下发跳闸策略 , 待 SBATS 执行并确认成功后 , 再下发合闸策略 , 其中 SBATS 在任一运行模式下均可独立执行 MBATS 控制策略 , 互不影响。

3 算例仿真

为验证上述备自投控制策略 , 现对图 5 测试系统

进行仿真分析。测试系统包含 110 kV 变电站 A - J 及 220 kV 电源点 , 忽略无功功率及线路传输功率限额 , 各站单条母线负荷 30 MW , 开关及线路状态已标注。各站均装设 1 套 SBATS , 其中 220 kV 电源点变电站 SBATS 各模式闭锁 , 仅接收 MBATS 控制策略 , 测试系统含 1 套 MBATS。假设各线路无重合闸装置 , 故障后保护装置能够明确给出故障范围 , 取 $T_{act0} = 2$ s、 $T_{act2} = 1$ s、 $T_{act1} = 6$ s、 $T_c = T_{dc} = 15$ s , 控制策略算法程序考虑程序运行时间损耗 , 在 core i5 3.2 GHz 计算机 matlab 及 simpowersystem 环境下实现。

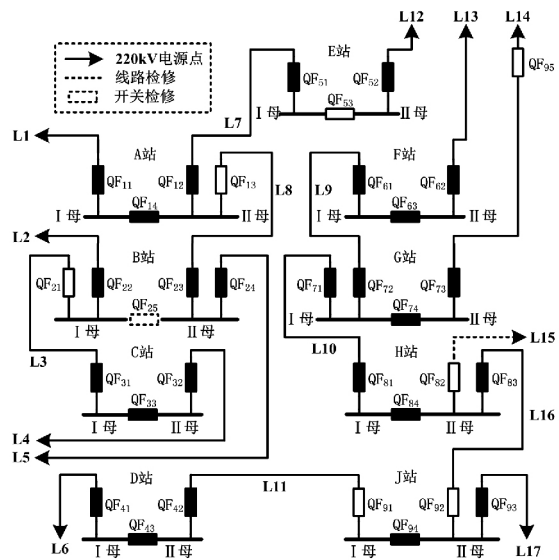


图 5 测试系统

首先生成运行模式划分表 , 单母分段方式包含 2/3/4 条线路的变电站运行方式分别有 4/13/33 种 , 其中各模式下运行方式划分见表 4。

表 4 仿真算例下各模式对应的运行方式

| 线路数量 | 模式 1/模式 2 | 模式 3/模式 4 | 模式 5 |
|------|-----------|-----------|---------|
| 2 | 1 | 2 | 3 - 4 |
| 3 | 1 - 3 | 4 - 6 | 7 - 13 |
| 4 | 1 - 9 | 10 - 18 | 19 - 33 |

测试开始后约 15.1 s , A - J 站 SBATS 均完成充电 , 其中 E 站工作于模式 1/模式 2、B 站工作于模式 3/模式 4、其他站工作于模式 5 , 标记充电完成为 $t = 0$ s 。

1) 令线路 L7 故障退出 , E 站 I 母失压 $t = 6$ s 跳 QF_{51} , $t = 7$ s 合 QF_{53} , E 站 I 母电压恢复 $t = 22$ s 时 E 站 SBATS 充电完成 , 工作于模式 5 。

可知 E 站 SBATS 模式一流程启动后首先根据闭锁信息跳开故障线路开关 QF_{51} , 确认跳开后合上 QF_{51} , 失压母线恢复 , 且在其对 QF_{51} 发出合闸命令后放电并调整运行模式重新充电完成。

2) 令线路 L2、L5 同时故障退出 $t = 6$ s 跳 QF_{22} 及 QF_{24} $t = 7$ s 合 QF_{21} $t = 8.31$ s A 站 QF_{13} 合上 QF_{53} B 站失压母线恢复。

可知 B 站分段开关 QF_{25} 故障前为检修状态, 故其 SBATS 模式 3/模式 4 因 I、II 母均失压被同时启动, 分别跳开故障线路开关 QF_{22} 及 QF_{24} 。在执行 2.4.2 节流程 4) 时模式 3 判断存在满足条件的 QF_{21} 而模式 4 判断不存在满足条件的开关, 向 MBATS 发送援助指令, MBATS 通过拓扑信息搜索到可作为恢复电源的 A 站 II 母线, 并由此生成控制策略。故 QF_{21} 由 B 站 SBATS 模式 3 直接合上, 而 QF_{13} 由 MBATS 向 A 站下发控制策略合上, 用时也较合上 QF_{21} 的时间长。

3) 图 5 中 F、G 和 H 3 个站为串接状态并由线路 L13 供电。不考虑 L13 传输功率限额, 设 L14 - L15 传输功率限额为 130 MW。①当 L15 为正常状态时, 令 L13 故障退出 $t = 6$ s 跳 QF_{62} $t = 7$ s 合 QF_{82} L15 传输功率为 180 MW; ②当 L15 为检修状态时, 令 L13 故障退出 $t = 6$ s 跳 QF_{62} $t = 8.37$ s 跳 QF_{71} $t = 8.38$ s 合 QF_{71} 及 QF_{96} , 其中 L14 传输功率为 120 MW, L16 传输功率为 60 MW。

可知①中故障后 F、G 和 H 站 SBATS 模式 5 均启动 H 站 SBATS 合上 QF_{82} 后 3 个站失压母线均恢复, 但各 SBATS 互不通信, 且其控制策略中无功功率校验环节, 致 L15 传输功率越限。为避免此情况, 需充分考虑 $N - 1$ 故障后 SBATS 连锁动作影响, 对运行方式安排要求较高。②中故障后 3 个站 SBATS 都无法靠自身恢复, 故 MBATS 在校核功率后将单个 MCR 拆分为 2 个, 生成控制策略在跳开 QF_{71} 后合上 QF_{71} 及 QF_{96} , 失压母线恢复且无线路传输功率越限。

4 结 语

网络备自投控制策略适用于单母分段型变电站多种特殊接线方式, 当主电源失去、后备用电源恢复

过程中, 其能够兼顾时效性和整体协调性, 主要体现在: 1) 电网拓扑变化及站点增减后仅需完成 SBATS 运行模式划分表及 MBATS 中网络拓扑信息修正; 2) SBATS 依据运行模式及开关位置选择可独立完成的恢复策略或向 MBATS 求助; 3) MBATS 计算并校核后下发的恢复策略符合静态稳定约束。

参考文献

[1] 邱建, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 基于 $N - 1$ 准则的备自投退控制策略[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 66 - 71.

[2] 沈琼, 许正涛, 吴祖升. 220 kV 变电站单主变运行的备自投实现方式[J]. 继电器, 2006, 34(15): 80 - 82.

[3] 杨合民, 路小俊, 王军, 等. 一种适用于串联电网接线的远方备自投装置[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 94 - 99.

[4] 赵达维, 刘天琪, 卢政尧. 城市电网中的远方备用电源自动投入[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 103 - 107.

[5] 汤大海, 杨合民, 刘春江, 等. 一种自适应的扩大内桥备自投装置[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 107 - 111.

[6] 吕浩, 何胜利, 龚志辉. 备自投组在 110kV 扩大外桥和 10 kV 单母 IV 分段主接线变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 81 - 83.

[7] 杨浚文, 吴文传, 孙宏斌, 等. 一种基于 EMS 的广域备自投控制系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 61 - 67.

[8] 李明, 李景强. 一种基于智能电网的广域备自投方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 129 - 133.

[9] 周伊琳, 孙建伟, 陈炯聪. 区域网络备自投及其测试关键技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 109 - 113.

作者简介:

江东林(1986), 工程师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制;

唐小菊(1992), 助理工程师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制。

(收稿日期: 2017 - 08 - 26)

(上接第 15 页)

[4] 王春明, 刘兵. 区域互联多回直流换相失败对送端系统的影响[J]. 电网技术, 2013(4): 1052 - 1057.

[5] 滕予非, 汤涌, 周波, 等. 基于高频电压突变变量的特高压直流输电系统接地极引线故障监测方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 72 - 78.

[6] 代贤忠, 沈沉. 基于端口供给功率的低频振荡强相关机

组识别方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 65 - 70.

作者简介:

朱清代(1966), 高级工程师, 研究方向为特高压直流控制系统研究;

滕予非(1984), 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析。

(收稿日期: 2017 - 10 - 08)