

# 双内桥接线备自投的简化与理论分析

汤大海<sup>1</sup>, 黄永红<sup>2</sup>

(1. 镇江供电公司, 江苏 镇江 212001; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** 将双内桥接线简化为由 2 个内桥接线和 1 个扩大内桥接线组成, 双内桥接线备自投也简化为由 2 个内桥接线备自投和 1 个扩大内桥接线备自投组成; 尝试采用逻辑代数为理论分析工具, 通过建立备自投运行方式数学模型, 并利用逻辑代数进行数学运算, 对由 3 个接线备自投组合的三电源供电的双内桥接线备自投运行方式进行理论分析, 与穷举的双内桥接线备自投运行方式进行比较, 结果表明, 二者的运行方式一样、运行效果一致, 证明了双内桥接线备自投的简化, 在理论上是成立的。列举了 3 个备自投在部分运行方式下的协同动作实例, 提出了 3 个备自投协同运行注意事项。

**关键词:** 双内桥一次主接线; 备自投; 简化; 运行方式; 逻辑代数; 理论分析

北京、广东、广西等地的电网中部分 110kV 变电所 110kV 侧一次主接线采用了双内桥接线, 相应备用电源自动投入装置 (简称备自投) “穷举”运行方式, 多达 21 多种, 不容易记忆; 该接线备自投在市场上没有产品供应, 需要特别设计。采用“穷举法”来构成双内桥接线备自投, 逻辑非常复杂, 运行方式有时也穷举不全或难以穷举全。运行经验表明, 复杂接线备自投可以简化为几个简单接线备自投<sup>[1~2]</sup>, 因此双内桥接线备自投也可以简化, 即简化为由 2 个内桥备自投<sup>[4~8]</sup>和 1 个扩大内桥接线备自投<sup>[2~3]</sup>的组成。但如此简化至今没有文献给出理论依据, 本文将尝试以逻辑代数为工具, 通过建立备自投运行方式的数学模型和逻辑代数运算, 找出简化的双内桥接线备自投的运行方式, 与“穷举”的双内桥接线备自投运行方式进行对比, 是否一致, 寻找出双内桥接线备自投简化的理论依据, 为类似复杂备自投的简化提供方法和参考。

## 1 双内桥接线及其备自投的简化

### 1.1 双内桥接线备自投“穷举”的运行方式

双内桥接线采用三路电源供电, 其一次主接线图见图 1。由于每两路电源之间 (即线路 1 与线路 2 之间、线路 2 与线路 3 之间、线路 1 与线路 3 之间) 不能长时间并列运行, 每两路电源之间的环路中的断路器至少应有 1 只断路器为热备用状态, 因此, 双内桥接线备自投按“穷举法”可列举出 21 种运行方式, 如表 1。

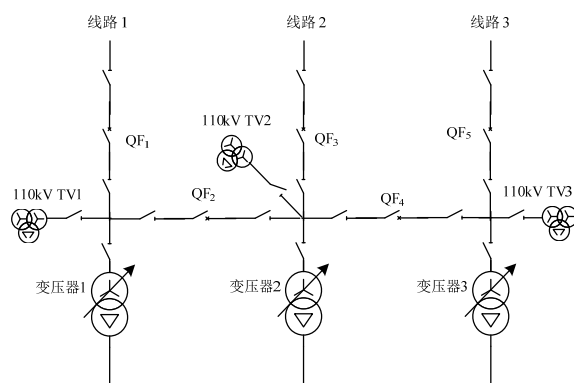


图 1 双内桥一次主接线

### 1.2 双内桥接线及其备自投的简化

#### 1.2.1 双内桥接线的简化

参考文献[1]和[2], 对图 1 双内桥一次主接线进行简化。当线路 1、线路 2、线路 3 电源均运行时, 双内桥一次主接线可以由 2 个内桥接线组成:

a. 由断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub> 组成第 1 个双电源三断路器的内桥接线, 如图 2, 其中 1 号、2 号主变压器的运行由 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub> 控制, QF<sub>2</sub> 为桥断路器;

b. 由断路器 QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 组成第 2 个双电源三断路器的内桥接线, 如图 3, 其中 2 号、3 号主变压器的运行由 QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 控制, QF<sub>4</sub> 为桥断路器。

同样, 三个电源供电的双内桥接线的备自投控制逻辑也可由 2 个内桥接线备自投组成:

a. 由断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub> 组成第 1 个双电源三只断路器的内桥接线备自投 1 (简称备自投 1);

b.由断路器 $QF_3$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$ 组成第 2 个双电源 三只断路器的内桥接线备自投 2（简称备自投 2）。

表 1 双内桥接线备自投可能的运行方式

方式	运行断路器	热备用断路器	动作过程
1	$QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_5$	$QF_3$ 、 $QF_4$	当进线 1 失去电源时，跳 $QF_1$ ，投 $QF_3$ 或投 $QF_4$ ；当进线 3 失去电源时，跳 $QF_5$ ，投 $QF_3$ 或投 $QF_4$ ；
2	$QF_1$ 、 $QF_3$ 、 $QF_5$	$QF_2$ 、 $QF_4$	当进线 1 失去电源时跳 $QF_1$ 投 $QF_2$ ；当进线 2 失去电源时跳 $QF_3$ 投 $QF_2$ 或投 $QF_4$ ；当进线 3 失去电源时跳 $QF_5$ 投 $QF_4$ ；
3	$QF_1$ 、 $QF_3$ 、 $QF_4$	$QF_2$ 、 $QF_5$	当进线 1 失去电源时，跳 $QF_1$ ，投 $QF_2$ ；当进线 2 失去电源时，跳 $QF_3$ ，投 $QF_2$ 或投 $QF_5$ ；
4	$QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_4$	$QF_3$ 、 $QF_5$	当进线 1 失去电源时，跳 $QF_1$ ，投 $QF_3$ 或投 $QF_5$ ；
5	$QF_2$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$	$QF_1$ 、 $QF_3$	当进线 3 失去电源时，跳 $QF_5$ ，投 $QF_3$ 或投 $QF_1$ ；
6	$QF_2$ 、 $QF_3$ 、 $QF_5$	$QF_1$ 、 $QF_4$	当进线 2 失去电源时，跳 $QF_3$ ，投 $QF_1$ 或投 $QF_4$ ；当进线 3 失去电源时，跳 $QF_5$ ，投 $QF_4$ ；
7	$QF_2$ 、 $QF_3$ 、 $QF_4$	$QF_1$ 、 $QF_5$	当进线 2 失去电源时，跳 $QF_3$ ，投 $QF_1$ 或投 $QF_5$ ；
8	$QF_1$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$	$QF_2$ 、 $QF_3$	当进线 1 失去电源时，跳 $QF_1$ ，投 $QF_2$ ；当进线 3 失去电源时，跳 $QF_5$ ，投 $QF_3$ 或投 $QF_2$ ；
9	$QF_1$ 、 $QF_2$	$QF_3$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$	当进线 1 失去电源时，跳 $QF_1$ ，投 $QF_3$ 或投 $QF_4$ 、 $QF_5$ ；
10	$QF_1$ 、 $QF_3$	$QF_2$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$	当进线 1 失去电源时，跳 $QF_1$ ，投 $QF_2$ ；当进线 2 失去电源时，跳 $QF_3$ ，投 $QF_2$ 或投 $QF_4$ 和 $QF_5$ ；
11	$QF_3$ 、 $QF_4$	$QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_5$	当进线 2 失去电源时，跳 $QF_3$ ，投 $QF_1$ 和 $QF_2$ 或投 $QF_5$ ；
12	$QF_2$ 、 $QF_3$	$QF_1$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$	当进线 2 失去电源时，跳 $QF_3$ ，投 $QF_1$ 、 $QF_4$ 或投 $QF_5$ ；
13	$QF_1$ 、 $QF_5$	$QF_2$ 、 $QF_3$ 、 $QF_4$	当进线 1 失去电源时跳 $QF_1$ ，投 $QF_2$ 、 $QF_3$ 或投 $QF_2$ 、 $QF_4$ ；当进线 3 失去电源时跳 $QF_5$ ，投 $QF_4$ 、 $QF_3$ 或投 $QF_2$ 、 $QF_4$ ；
14	$QF_4$ 、 $QF_5$	$QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_3$	当进线 3 失去电源时，跳 $QF_5$ ，投 $QF_3$ 或投 $QF_1$ 、 $QF_2$ ；
15	$QF_3$ 、 $QF_5$	$QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_4$	当进线 2 失去电源时，跳 $QF_3$ ，投 $QF_1$ 和 $QF_2$ 或投 $QF_4$ ；当进线 3 失去电源时，跳 $QF_5$ ，投 $QF_4$ ；
16	$QF_1$ 、 $QF_4$	$QF_2$ 、 $QF_3$ 、 $QF_5$	当进线 1 失去电源时，跳 $QF_1$ ，投 $QF_2$ 、 $QF_3$ 或投 $QF_2$ 、 $QF_5$ ；
17	$QF_2$ 、 $QF_5$	$QF_1$ 、 $QF_3$ 、 $QF_4$	当进线 3 失去电源时，跳 $QF_5$ ，投 $QF_3$ 、 $QF_4$ 或投 $QF_1$ 、 $QF_4$ ；
18	$QF_1$	$QF_2$ 、 $QF_3$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$	当进线 1 失去电源时，跳 $QF_1$ ，投 $QF_2$ 、 $QF_3$ 或投 $QF_2$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$ ；
19	$QF_3$	$QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$	当进线 2 失去电源时，跳 $QF_3$ ，投 $QF_1$ 和 $QF_2$ 或投 $QF_4$ 和 $QF_5$ ；
20	$QF_5$	$QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_3$ 、 $QF_4$	当进线 3 失去电源时，跳 $QF_5$ ，投 $QF_3$ 、 $QF_4$ 或投 $QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_4$ ；

注：无论变电所 1 号、2 号、3 号主变为运行还是停用，但相应的备自投装置不运行，即为停用方式。

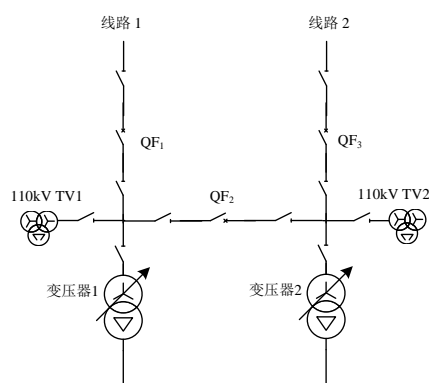


图 2 第 1 个内桥一次主接线

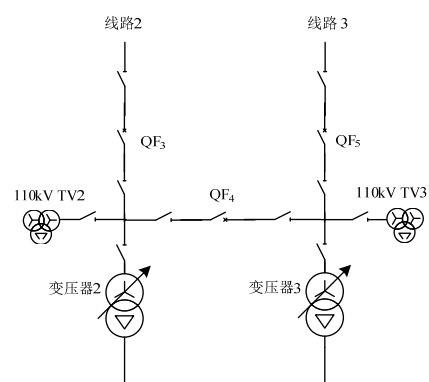


图 3 第 2 个内桥一次主接线

### 1.2.2 线路 2 电源不运行时的主接线简化

当线路 1、线路 3 电源运行、线路 2 电源停止运行时，双内桥一次主接线变为扩大内桥接线：即由断路器 $QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$ 组成双电源四只断路器的扩大内桥接线，如图 4 所示。图中 1 号、2 号、3 号主变压器的运行由 $QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$ 控制，其中 $QF_2$ 、 $QF_4$ 为桥断路器。

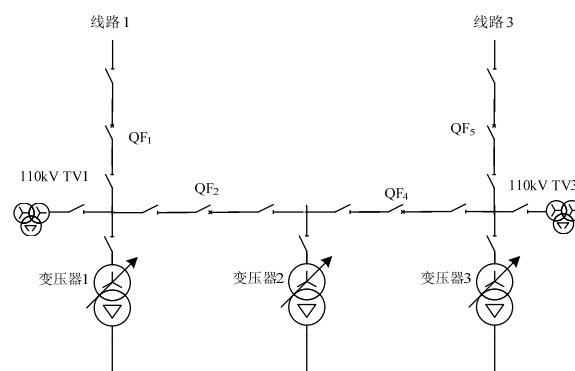


图 4 扩大内桥一次主接线

同样，三路电源供电的双内桥接线方式的备自投控制逻辑为扩大内桥接线备自投：当线路 2 或断路器 $QF_3$ 停电检修时由断路器 $QF_1$ 、 $QF_2$ 、 $QF_4$ 、 $QF_5$ 组成双电源四断路器的扩大内桥接线备自投 3（简称备自投 3）。

### 1.1.3 双内桥接线备自投的简化

由上述分析知道, 双内桥接线可以简化成 3 个简单的一次主接线, 即可以由 2 个内桥接线和 1 个扩大内桥接线组成, 同理, 双内桥接线备自投可以由 2 个内桥接线备自投和 1 个扩大内桥接线备自投组成。

## 2 双内桥接线备自投简化的理论分析

### 2.1 备自投运行方式的数学模型

双内桥接线备自投是否可以简化为由 2 个内桥接线和 1 个扩大内桥接线的组合, 本文尝试用逻辑代数的方法证明该简化方法的正确性。断路器的合闸状态和分闸状态可以用逻辑代数表示, 逻辑代数的“1”表示断路器为合闸状态, 逻辑代数的“0”表示断路器为分闸状态。图 1 中断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 分别用 A、B、C、D、E 表示, A、B、C、D、E 分别表示 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 断路器为合闸运行状态, 用“1”表示; 用  $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 、 $\bar{C}$ 、 $\bar{D}$ 、 $\bar{E}$  分别表示 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 断路器为分闸运行状态, 即为热备用状态, 用“0”表示。

#### 2.1.1 备自投 1 运行方式的数学模型

图 2 单母线第 1 个内桥接线中, 一次主接线中 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub> 的运行与不运行, 构成了内桥接线备自投 6 种运行方式, 其中之一为停用方式:

a. 断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>3</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>2</sub>。当进线 1 失去电源时, 跳开 QF<sub>1</sub> 断路器, 投上 QF<sub>2</sub> 断路器; 当进线 2 失去电源时, 跳开 QF<sub>3</sub> 断路器, 投上 QF<sub>2</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABC}$ 。

b. 断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>3</sub>。当进线 1 失去电源时, 跳开 QF<sub>1</sub> 断路器, 投上 QF<sub>3</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $ABC$ 。

c. 断路器 QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>1</sub>。当进线 2 失去电源时, 跳开 QF<sub>3</sub> 断路器, 投上 QF<sub>1</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABC}$ 。

d. 断路器 QF<sub>1</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub>。当进线 1 失去电源时, 跳开 QF<sub>1</sub> 断路器, 投上 QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABC}$ 。

e. 运行断路器 QF<sub>3</sub>, 备投断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>。当进线 2 失去电源时, 跳开 QF<sub>3</sub> 断路器, 投上 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:

$\overline{ABC}$

f. 无论变电所 1 号、2 号主变为运行还是停用, 但相应的备自投装置不运行, 即为停用方式。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABC}$ 。

由此得到内桥备自投 1 运行方式满足的逻辑代数表达式为(1)式:

$$\overline{ABC} + ABC + \overline{ABC} + \overline{ABC} + \overline{ABC} + \overline{ABC} \quad (1)$$

#### 2.1.2 备自投 2 运行方式的数学模型

图 3 第 2 个内桥接线中, 一次主接线中 QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 的运行与不运行, 构成了内桥接线备自投 6 种运行方式, 其中之一为停用方式:

a. 断路器 QF<sub>3</sub>、QF<sub>5</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>4</sub>。当进线 2 失去电源时, 跳开 QF<sub>3</sub> 断路器, 投上 QF<sub>4</sub> 断路器; 当进线 3 失去电源时, 跳开 QF<sub>5</sub> 断路器, 投上 QF<sub>4</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $CDE$ 。

b. 断路器 QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>5</sub>。当进线 2 失去电源时, 跳开 QF<sub>3</sub> 断路器, 投上 QF<sub>5</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $CDE$ 。

c. 断路器 QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>3</sub>。当进线 3 失去电源时, 跳开 QF<sub>5</sub> 断路器, 投上 QF<sub>3</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{CDE}$ 。

d. 断路器 QF<sub>3</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub>。当进线 2 失去电源时, 跳开 QF<sub>3</sub> 断路器, 投上 QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $CDE$ 。

e. 断路器 QF<sub>5</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>。当进线 3 失去电源时, 跳开 QF<sub>5</sub> 断路器, 投上 QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{CDE}$ 。

f. 无论变电所 2 号、3 号主变为运行还是停用, 但相应的备自投装置不运行, 即为停用方式。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{CDE}$ 。

由此得到内桥备自投 2 运行方式满足的逻辑代数表达式为(2)式:

$$CDE + CDE + \overline{CDE} + \overline{CDE} + \overline{CDE} + \overline{CDE} \quad (2)$$

#### 2.1.3 备自投 3 运行方式的数学模型

图 4 为扩大内桥接线, 一次主接线中 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 的运行与不运行, 构成了扩大内桥接线备自投 12 种运行方式, 其中之一为停用方

式:

a. 断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>2</sub>。当进线 1 失去电源时, 跳开 QF<sub>1</sub> 断路器, 投上 QF<sub>2</sub> 断路器; 当进线 3 失去电源时, 跳开 QF<sub>5</sub> 断路器, 投上 QF<sub>2</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABDE}$ 。

b. 断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>5</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>4</sub>。当进线 1 失去电源时, 跳开 QF<sub>1</sub> 断路器, 投上 QF<sub>4</sub> 断路器; 当进线 3 失去电源时, 跳开 QF<sub>5</sub> 断路器, 投上 QF<sub>4</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $AB\overline{DE}$ 。

c. 断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>5</sub>。当进线 1 失去电源时, 跳开 QF<sub>1</sub> 断路器, 投上 QF<sub>5</sub> 断路器; 其运行方式的逻辑代数表达式为:  $AB\overline{DE}$ 。

d. 断路器 QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>1</sub>。当进线 3 失去电源时, 跳开 QF<sub>5</sub> 断路器, 投上 QF<sub>1</sub> 断路器; 其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABDE}$ 。

e. 断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub>。当进线 1 失去电源时, 跳开 QF<sub>1</sub> 断路器, 投上 QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 断路器; 其运行方式的逻辑代数表达式为:  $AB\overline{DE}$ 。

f. 断路器 QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>。当进线 3 失去电源时, 跳开 QF<sub>5</sub> 断路器, 投上 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub> 断路器; 其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABDE}$ 。

g. 断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>5</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>。当进线 1 失去电源时, 跳开 QF<sub>1</sub> 断路器, 投上 QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub> 断路器; 当进线 3 失去电源时, 跳开 QF<sub>5</sub> 断路器, 投上 QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub> 断路器。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABDE}$ 。

h. 断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>4</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>2</sub>、QF<sub>5</sub>。当进线 1 失去电源时, 跳开 QF<sub>1</sub> 断路器, 投上 QF<sub>2</sub>、QF<sub>5</sub> 断路器; 其运行方式的逻辑代数表达式为:  $AB\overline{DE}$ 。

i. 断路器 QF<sub>2</sub>、QF<sub>5</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>4</sub>。当进线 3 失去电源时, 跳开 QF<sub>5</sub> 断路器, 投上 QF<sub>1</sub>、QF<sub>4</sub> 断路器; 其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABDE}$ 。

j. 断路器 QF<sub>1</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub>。当进线 1 失去电源时, 跳开 QF<sub>1</sub> 断路器, 投上 QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 断路器; 其运行方式的逻辑代

数表达式为:  $\overline{ABDE}$ 。

k. 断路器 QF<sub>5</sub> 运行, 备投断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>。当进线 3 失去电源时, 跳开 QF<sub>5</sub> 断路器, 投上 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub> 断路器; 其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABDE}$ 。

1. 无论变电所 2 号、3 号主变为运行还是停用, 但相应的备自投装置不运行, 即为停用方式。其运行方式的逻辑代数表达式为:  $\overline{ABDE}$ 。

由此得到扩大内桥备自投 3 运行方式满足的逻辑代数表达式为:

$$\begin{aligned} & \overline{ABDE} + AB\overline{DE} + \overline{ABDE} + AB\overline{DE} + \overline{ABDE} \\ & + \overline{ABDE} + AB\overline{DE} + \overline{ABDE} + \overline{ABDE} + \overline{ABDE} \\ & + \overline{ABDE} + \overline{ABDE} \end{aligned} \quad (3)$$

## 2.2 简化双内桥接线备自投的理论分析

在线路 1、线路 2、线路 3 电源均运行时, 双内桥接线可以简化为第 1 个内桥接线与第 2 个内桥接线, 这 2 个接线在运行中互相构成各自小系统, 相互之间的对外供电可以看成互不干扰, 双内桥接线备自投由内桥接线备自投 1 和内桥接线备自投 2 来完成, 因此, 对这 2 个接线的备自投在逻辑关系上相当于“与”的逻辑关系; 双内桥接线在线路 2 或 QF<sub>3</sub> 断路器停电检修时, 由线路 1 和线路 3 及 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 形成了扩大内桥接线, 因此, 双内桥接线此时为扩大内桥接线备自投逻辑, 扩大内桥接线备自投逻辑与内桥备自投 1 和内桥备自投 2 的共同构成的备自投逻辑应该是“或”的逻辑关系; 因此简化后的双内桥接线备自投运行方式逻辑代数表达式为:

$$\begin{aligned} & (\overline{ABC} + AB\overline{C} + \overline{ABC} + \overline{ABC} + \overline{ABC}) \cdot \\ & (C\overline{DE} + C\overline{DE} + \overline{CDE} + C\overline{DE} + \overline{CDE} + \overline{CDE}) \\ & + (\overline{ABDE} + AB\overline{DE} + \overline{ABDE} + AB\overline{DE} + \overline{ABDE} \\ & + \overline{ABDE} + AB\overline{DE} + \overline{ABDE} + \overline{ABDE} + \overline{ABDE} \\ & + \overline{ABDE} + \overline{ABDE}) \cdot \overline{C} \end{aligned} \quad (4)$$

运算(4)式并整理, 并考虑每两路电源之间(即线路 1 与线路 2、线路 2 与线路 3、线路 1 与线路 3 电源之间)不能长时间并列运行, 即断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 不能同时合上或断路器 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub> 不能同时合上或断路器 QF<sub>3</sub>、

QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub>不能同时合上，同时考虑  $\overline{CC} = 0$ ，所以(4)式变为：

$$\begin{aligned} & \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} \\ & + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} \\ & + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} \\ & + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} \\ & + \overline{ABCDE} + (\overline{ABCDE} + \overline{ABCDE} + \overline{ABCDE}) \\ & + \overline{ABCDE} \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式中每 1 个字段的逻辑代数表达式代表双内桥接线备自投的 1 个运行方式，逻辑代数演算结果(5)式有 21 个字段，则表示简化的双内桥接线备自投有 21 种运行方式，其中括号内 4 种运行方式为特殊方式（见表 1 中运行方式 4、5、16、17，运行方式 4 相当于内桥备自投 2 停用，运行方式 5 相当于内桥备自投 1 停用），平时不常见。

## 2.3 运行方式比较

对照表 1，“穷举”的双内桥接线备自投运行方式，与逻辑代数演算结果(5)式的由 2 个内桥接线备自投和 1 个扩大内桥接线备自投共同构成的双内桥接线备自投的运行方式是一致的、相同的，即二者的运行效果相同，从而证明了双内桥接线备自投的简化在理论上是成立的，简化处理方法是可行的。

## 3 简化双内桥备自投动作过程举例

### 3.1 运行方式 1

因为QF<sub>3</sub>断路器断开时，此时主要启用备自投 3，备自投 1 与备自投 2 停用，运行方式 1 为断路器QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>5</sub>运行，备投断路器QF<sub>4</sub>：当进线 1 失去电源时，备自投 3 跳开QF<sub>1</sub>断路器，投上QF<sub>4</sub>断路器，1 号和 2 号主变压器备投在线路 3 电源上运行；当进线 3 失去电源时，备自投 3 跳开QF<sub>5</sub>断路器，投上QF<sub>4</sub>断路器，3 号主变压器备投在线路 1 电源上运行。

### 3.2 运行方式 2

运行方式 2 为断路器QF<sub>1</sub>、QF<sub>3</sub>、QF<sub>5</sub>运行，备投断路器QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>；当进线 1 失去电源时，备自投 1 跳开QF<sub>1</sub>断路器，投上QF<sub>2</sub>断路器，1 号主变压器备投在线路 2 电源上运行；当进线 2 失去电源时，由备自投 1 跳开QF<sub>3</sub>断路器，投上QF<sub>2</sub>断路器，2 号主变压器备投在线路 1 电源上运行；或由

备自投 2 跳开QF<sub>3</sub>断路器，投上QF<sub>4</sub>断路器，3 号主变压器备投在线路 3 电源上运行；当进线 3 失去电源时，备自投 2 跳开QF<sub>5</sub>断路器，投上QF<sub>4</sub>断路器，3 号主变压器备投在线路 2 电源上运行。

### 3.3 运行方式 8

因为QF<sub>3</sub>断路器断开时，此时主要启用备自投 3，备自投 1 与备自投 2 停用，运行方式 8 为断路器QF<sub>1</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub>运行，备投断路器QF<sub>2</sub>：当进线 1 失去电源时，备自投 3 跳开QF<sub>1</sub>断路器，投上QF<sub>2</sub>断路器，1 号主变压器备投在线路 3 电源上运行；当进线 3 失去电源时，备自投 3 跳开QF<sub>5</sub>断路器，投上QF<sub>2</sub>断路器，2 号和 3 号主变压器备投在线路 1 电源上运行。

### 3.4 运行方式 13

当线路 2 运行时，运行方式 13 为断路器QF<sub>1</sub>、QF<sub>5</sub>运行，备投断路器QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>：当进线 1 失去电源时，备自投 1 跳开QF<sub>1</sub>断路器，投上QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub>断路器，1 号和 2 号主变压器备投在线路 2 电源上运行；当进线 3 失去电源时，备自投 2 跳开QF<sub>5</sub>断路器，投上QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>断路器，2 号和 3 号主变压器备投在线路 2 电源上运行。当线路 2 或QF<sub>3</sub>断路器停电检修时，备自投 1 与备自投 2 停用，启用备自投 3，运行方式 13 为断路器QF<sub>1</sub>、QF<sub>5</sub>运行，备投断路器QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>：当进线 1 失去电源时，备自投 3 跳开QF<sub>1</sub>断路器，投上QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>断路器，1 号和 2 号主变压器备投在线路 3 电源上运行；当进线 3 失去电源时，备自投 3 跳开QF<sub>5</sub>断路器，投上QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>断路器，2 号和 3 号主变压器备投在线路 1 电源上运行。

### 3.5 其他运行方式

在其他运行方式下，双内桥接线备自投的动作分别可由备自投 1、备自投 2、备自投 3 之间的协同动作来完成，分析方法与上述类似。

### 3.6 运行注意事项

由上述分析并对照表 1，在QF<sub>3</sub>断路器热备用时，双内桥备自投的动作面临着动作后选择究竟去让哪个断路器合闸的问题。同时双内桥备自投在QF<sub>3</sub>断路器断开时，备自投 1 或备自投 2 启用时，在某些运行方式下由于备自投 1 动作或备自投 2 动作会造成两路电源环网运行（比如表 1 中的运行方式 1、运行方式 8 等）。以运行方式 1 为例：当QF<sub>3</sub>断路器热备用时，运行方式 1 为断路器QF<sub>1</sub>、

QF<sub>2</sub>、QF<sub>5</sub>运行,备投断路器QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>;当进线 3 失去电源时,备自投 2 跳开QF<sub>5</sub>断路器,并合上QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>断路器,此时QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub>则均为合闸运行状态,线路 1 和线路 2 电源形成环网运行。为防止这种不明确的动作行为和上述备自投动作错误,建议在QF<sub>3</sub>断路器断开情况下(无论是否检修),停用备自投 1 和备自投 2,只启用备自投 3。

对照表 1,在QF<sub>3</sub>断路器运行已及进线 2 失电情况下也存在备自投 1 和备自投 2 同时动作也会造成两路电源环网运行(比如表 1 中的运行方式 2、运行方式 3 等)。以运行方式 2 为例:断路器QF<sub>1</sub>、QF<sub>3</sub>、QF<sub>5</sub>运行,备投断路器QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>,当进线 2 失去电源时,备自投 1 跳开QF<sub>3</sub>断路器,投上QF<sub>2</sub>断路器,备自投 2 跳开QF<sub>3</sub>断路器,投上QF<sub>4</sub>断路器,则断路器QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub>均为合闸运行状态,线路 1 和线路 3 电源形成环网运行。因此,在此情况下,备自投 1 和备自投 2 之间应有相互闭锁措施,即备自投 1 动作了,应闭锁备自投 2 动作,反之亦然,并在动作时间应有时间级差。

## 4 电网运行实例

北京、广东、广西等地电网 110kV 变电所双内桥接线采用了 2 个内桥接线备自投来构成双内桥接线备自投,同时也考虑了在线路 2 运行时备自投 1 和备自投 2 之间应有闭锁措施;当线路 2 或断路器QF<sub>3</sub>停用检修时,因为停用检修时间一般在 1 个星期左右,在此运行方式下不考虑启用备自投。

## 5 结论

由理论研究分析和电网实际工程案例得出结论:

(1) 利用逻辑代数为数学工具,通过建立备自投运行方式数学模型,对简化双内桥接线备自投的运行方式进行理论分析的方法是可行的。

(2) 双内桥接线备自投简化为 2 个内桥接线备自投和 1 个扩大内桥接线备自投的组合在理论上是成立的、简化处理方法是合理的。

### 参考文献:

- [1] 汤大海.基于双电源五角形接线的备自投控制策略[J].电力自动化设备,2005,25(12):52-54.
- [2] 汤大海.基于双电源扩大内桥的备自投解耦控制策略研究[J].电力系统自动化,2009,33(23):103-107.
- [3] 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):108-111.
- [4] 刘沪平,汤大海,郑建勇,等.一种新型自适应备投方案及其实现[J].电力自动化设备,2005,25(8):84-86.
- [5] 阮爱民,李民,汤大海.保护闭锁备自投的运用[J].江苏电机工程,2003,22(4):41-42.
- [6] GB-14285-2006,继电保护和安全自动装置技术规程[S].
- [7] DL/T584-2007,3~110 kV 电网继电保护运行整定规程[S].
- [8] DL/T 526-2013,备用电源自动投入装置技术条件[S].

### 作者简介:

汤大海(1963-),男,江苏镇江人,研究员级高级工程师/高级技师,从事电网继电保护运行管理工作。  
黄永红(1970-),女,江苏如东人,博士、教授,从事电力系统保护与控制教学与研究工作。