

核电站调试技术丛书

DIANQI ERCI BUFEN

# 电气二次部分

主 编 陈天生

副主编 吴晓锋 徐程宏



 中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

核电站调试技术丛书

DIANQI ERCI BUFEN

# 电气二次部分

主 编 陈天生

副主编 吴晓锋 徐程宏

参 编 程劲松 彭 凯 王洪猛 张 凯 朱 誉



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书主要介绍了核电站二次电气部分的调试技术,共分4章,主要内容包括500kV开关站调试技术、核电发电机-变压器组保护系统调试技术、核电励磁系统的调试技术、核电调试专用技术。

本书可供现场试验、调试、运行和检修的技术人员阅读,也可供核电电力设计制造部门以及核电相关专业的在校师生阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

电气二次部分/陈天生主编. —北京:中国电力出版社, 2015.12

(核电站调试技术丛书)

ISBN 978-7-5123-8445-3

I. ①电… II. ①陈… III. ①核电站-电气回路-二次系统  
IV. ①TM623

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第243175号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2015年12月第一版 2015年12月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 4.625印张 107千字

印数0001—2000册 定价29.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 前 言

中国电力工业特别是火力发电工业的飞速发展,为国民经济发展做出了卓越的贡献,极大地化解了电力能源危机,与此同时,火力发电厂排放的环境污染物,如二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物以及粉尘对空气造成较为严重的污染,雾霾天气越来越多,雾霾地域越来越广,环境保护越来越受到世界各国的高度重视。自党的十八大以来,国家领导人对中国的环境保护提出了一系列新要求,“大气十条”的深入实施,使环境执法监管和环境风险管理进一步加强,于是低碳排放的电力能源已到渴求的地步。

再生电力能源主要有光伏发电、水电、风电和生物质能发电,低排放非化石能源主要有核能发电,已成为人类使用的重要清洁能源之一。核电不造成对大气的直接污染,二氧化碳排放少。与其他的一些可再生能源相比,核电以其规模大和电能质量稳定的明显优势成为电力工业不可或缺的方式。核电设备国产化率在不断提升,有的国产化率已经达到85%以上,为国内大力发展核电奠定了基础,核电的发展已经成为了国家发展战略。

因此,保证核电站的安全稳定运行就显得极其重要。本书根据核电站调试的实际情况,紧密结合现场工作,总结了核电站发电机-变压器组、变电站二次系统、励磁二次调试和核电站特殊调试技术。

本书共分为4章。第1章简要地介绍了500kV核电站电源

配置、500kV 接线特点以及单体设备配置的一些特殊要求。第 2 章主要围绕发电机的故障类型及相应的保护、主变压器及高压系统的保护、厂用变压器及 24kV 封母系统保护、核电特有保护以及调试过程中遇到的问题做了介绍。第 3 章从原理上对有关核电站安全的一些特殊装置做了介绍，并针对这些装置的功能设计介绍了调试方法。第 4 章主要介绍了核电站一些典型的案例。

本书由广东电网有限责任公司电力科学研究院的陈天生主编，副主编为吴晓锋、徐程宏，由程劲松、彭凯、王洪猛、张凯、朱誉等参与编写。由于编写水平有限以及编写时间紧张，不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

陈天生

2015 年 3 月

## 目 录

前言

<b>第 1 章</b>	<b>500kV 开关站调试技术</b> .....	<b>1</b>
1.1	500kV 核电站电源配置 .....	1
1.2	500kV 开关站主接线 .....	2
1.3	500kV GIS 断路器 .....	3
1.4	500kV 开关站电流互感器 .....	15
1.5	500kV 开关站保护 .....	21
1.6	开关站技术特点和发展 .....	37
1.7	电能表计量错误故障分析 .....	40
<b>第 2 章</b>	<b>核电发电机-变压器组保护系统调试技术</b> .....	<b>44</b>
2.1	调试技术概述 .....	44
2.2	发电机的故障类型及相应的保护 .....	45
2.3	主变压器及高压系统的保护 .....	60
2.4	厂用变压器及 24kV 封母系统保护 .....	65
2.5	核电特有保护 .....	66
2.6	调试案例 .....	69
<b>第 3 章</b>	<b>核电励磁系统的调试技术</b> .....	<b>76</b>
3.1	励磁系统的作用 .....	76
3.2	发电机励磁系统的分类 .....	77
3.3	核电站无刷励磁系统原理 .....	82
3.4	核电励磁系统技术特点 .....	83
3.5	核电励磁调试技术 .....	91

3.6 励磁系统常见问题·····	98
<b>第4章 核电调试专项技术</b> ·····	<b>100</b>
4.1 变压器励磁涌流抑制原理及现场应用 ·····	100
4.2 核电同期并网调试技术 ·····	108
4.3 全厂机械钥匙联锁系统介绍 ·····	123
4.4 核电站开关站送电试验案例 ·····	130
4.5 核电站电气整套启动试验案例 ·····	134
<b>参考文献</b> ·····	<b>139</b>

## 500kV开关站调试技术

### 1.1 500kV 核电站电源配置

某 500kV 核电站电源配置图如图 1-1 所示。

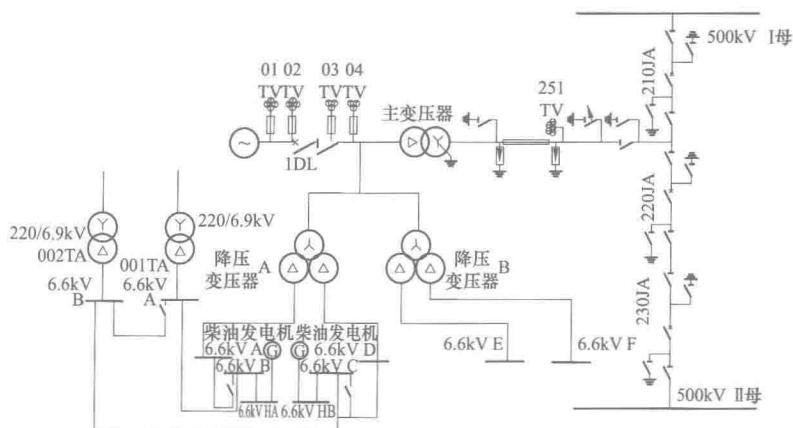


图 1-1 某 500kV 核电站电源配置图

该核电站主要有 500、220kV 电源和 6.6kV 应急电源三大供电系统。500kV 电源作为核电站的主要电源，在机组正常运行的情况下，发电机发出的电能通过主变压器升压送到 500kV 开关站，再通过开关站输送到电网，同时厂用电通过两台厂用变压器降压至 6.6kV 为厂用电提供电能。在机组正常的情况下，220kV 电源起到备用电源作用。在 500kV 主电源系统发生故障时，或者机组故障将主变压器电源切除时，厂用电源经过 BAS 切换至 220kV 系统供电。6.6kV 应急电源是在机组 500kV 和





220kV 两路电源都失去的情况下，由应急柴油机向核电站应急设备供电，以保证核电站安全，设备正常运行。相比常规火电百万机组，核电站的电源设置更加可靠。

## 1.2 500kV 开关站主接线

该电站建成以后机组容量达到 6480MW，成为电网重要的负荷中心，其通过 500kV 升压站接入电网，主接线图如图 1-2 所示。

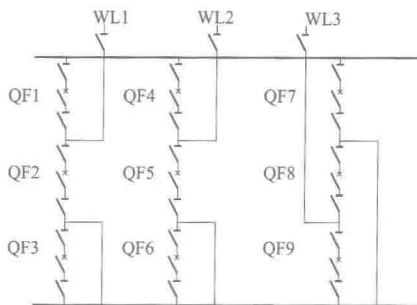


图 1-2 500kV 开关站主接线图

该开关站负荷中心采用 3/2 断路器接线方式即每两回进、出线占用 3 台断路器构成一串，其优点有：

(1) 供电可靠性高。正常情况下两条母线和所有断路器均在运行状态，形成多个环路，线路或者主变压器都由两个断路器供电，一台断路器跳开不影响供电状态。

(2) 运行方式多样，可以同时检修两台以上的断路器。

(3) 任意一条母线故障或停电不影响线路或者主变压器的运行。

(4) 隔离开关仅作为隔离电源，不需切换母线，降低了误操作几率。

其缺点总体有：使用的断路器多、电流、电压互感器多，



导致投资费用大，站内接线复杂，保护也复杂，所以需要较高的运行操作能力。

## 1.3 500kV GIS 断路器

### 1.3.1 断路器技术规范

二次调试人员应该关注以下断路器基本参数：

- (1) 额定开断电流：6.3kA。
- (2) 额定动稳定电流（峰值）：170kA。
- (3) 额定热稳定电流：6.3kA/3s。

(4) 雷电冲击耐受电压（峰值）：相对地 1675kV，断口 1675kV+450kV。操作冲击耐受电压（峰值）：相对地 1300kV，断口 1250kV+450kV。

(5) 工频耐受电压（1min 有效值）：相对地 740kV，断口 740kV+315kV。

(6) 额定开断时间： $\leq 40\text{ms}$ 。

(7) 额定合闸时间： $\leq 60\text{ms}$ 。

(8) 额定分闸时间： $\leq 20\text{ms}$ 。

(9) 相间最大不同期时间（3 相）：合闸， $\leq 4\text{ms}$ ；分闸， $\leq 3\text{ms}$ 。

(10) 断路器合闸线圈电阻：40 $\Omega$ 。

### 1.3.2 断路器灭弧工作原理

目前 500kV 高压断路器基本都是分相灭弧，采用单压压气式双断口灭弧室。在进行短路电流开断时，压气式断路器将操动机构的驱动能力与电弧的自身能量相结合来提供灭弧所需的气流，每一个断路器壳内均有一个灭弧室，灭弧室工作原理如图 1-3 所示。在进行合闸动作时，断路器操动机构推动操作杆，操作杆进而推动灭弧室的绝缘喷嘴、辅助喷嘴和吹弧活塞，向灭弧室静触头移动，灭弧触头先接触，在动、静灭弧触头之间



预先产生电弧。因此主载流触头在闭合过程中实际上几乎无电弧产生，起灭弧作用。

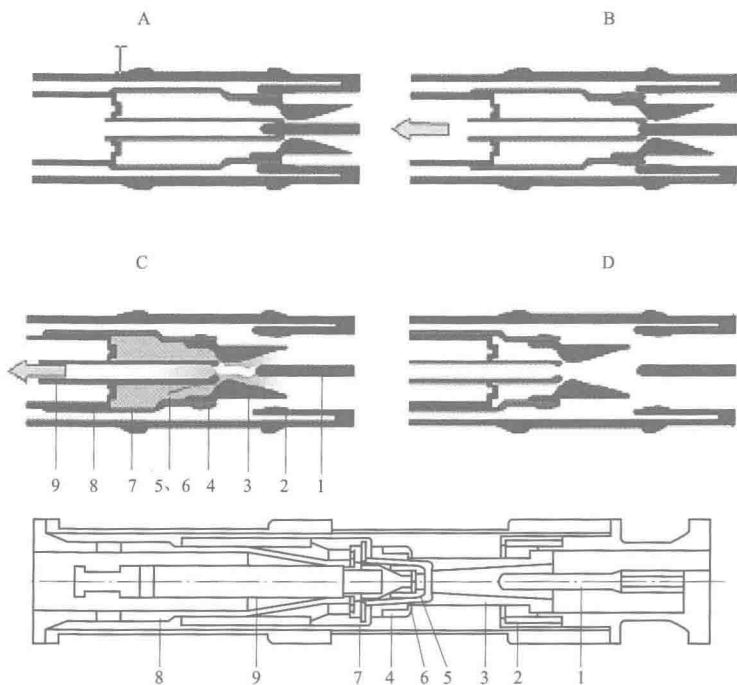


图 1-3 灭弧室的工作原理

A—合闸位置；B—主触头分离；C—燃弧；D—分闸位置；

1—静灭弧触头；2—主载流静触指；3—绝缘喷嘴；4—主载流动触头；  
5—辅助喷嘴；6—动灭弧触指座；7—压气缸；8—固定活塞；9—排气管

分闸动作的顺序与合闸动作相反，在分闸过程中，主载流触头先分开，随后灭弧触头再分开，产生电流转移至电弧触头，电弧产生的热量和操动机构的动作使升温室的压力升高。当灭弧触头分开时，高压气流从辅助喷嘴和绝缘喷嘴喷出，集中径向地吹向电弧，使其冷却直至消失，从而使电流减少为零。



SF<sub>6</sub>气体具有优良的理化性能和灭弧绝缘性能，其抗电强度是空气的2.5倍，SF<sub>6</sub>气体本身虽无毒，但它的比重大，比空气重5倍，往往积聚在地面附近，不易稀释和扩散，容易造成工作人员缺氧、中毒甚至窒息。

### 1.3.3 断路器一次试验与SF<sub>6</sub>试验项目

断路器在首次启动前必须进行常规试验及特殊性试验，在试验结果合格后才能投入使用。断路器常规一次试验项目有：

- (1) 测量绝缘电阻；
- (2) 测量每相导电回路的电阻；
- (3) 断路器均压电容器的试验；
- (4) 测量断路器的分、合闸时间；
- (5) 测量断路器的分、合闸速度；
- (6) 测量断路器主、辅触头分、合闸的同期性及配合时间；
- (7) 测量断路器分、合闸线圈绝缘电阻及直流电阻；
- (8) 断路器操动机构的试验。

特殊性试验包括有：

- (1) 断路器交流耐压试验；
- (2) GIS整体包含断路器的局部放电试验。

SF<sub>6</sub>气体主要的试验项目有：

(1) 测量断路器内SF<sub>6</sub>气体的含水量：在与灭弧室相通的气室，应小于150μL/L；在不与灭弧室相通的气室，应小于250μL/L。SF<sub>6</sub>气体含水量的测定应在断路器充气48h后进行，测量微水时环境相对湿度不大于85%，进行测量时气体对空排放1min左右。

(2) 密封性试验（检漏试验）。现场最常用的检漏方法一般有以下两种：

1) 检漏仪检漏：所用的检漏仪灵敏度一般不低于10<sup>-8</sup>，将检漏仪探头在离被测点1~2mm处缓慢移动。如果有气体泄漏，读数增大，扬声器发出报警声，电离腔内的激发光变亮，此时

可准确地确定漏气点。

2) 包扎法检漏：将待检测的部位用塑料薄膜和不干胶带包好，形成可测量容积  $V_2$  ( $\text{cm}^3$ )，经过一定的时间  $t$  (s)，检测塑料薄膜围起的空间内，累积漏出的  $\text{SF}_6$  浓度  $C$  ( $\text{mL}/\text{m}^3$ )。C 值根据检漏仪的读数得到。计算包扎部位的  $\text{SF}_6$  漏气率

$$f = 0.1C(V_2 - V_1)/t \quad (\text{Pa}(\text{cm}^3)/\text{s})$$

断路器气室  $\text{SF}_6$  气体漏气率的允许值为  $0.45$  ( $\text{Pa}(\text{cm}^3)\text{s}$ )。

断路器气室  $\text{SF}_6$  气体另外一个重要参数就是年漏气率：GIS 的一个气室所有密封面检测到的漏气率的总和为  $\Sigma f$ ，这一气室的  $\text{SF}_6$  气体相对压力为  $p$  (MPa)，此 GIS 气室的内部  $\text{SF}_6$  气体所占容积为  $V$  ( $\text{m}^3$ )，则该气室  $\text{SF}_6$  年漏气率  $F$  公式为

$$\begin{aligned} F &= \Sigma f(3600 \times 365 \times 24) \times 10^2 / (p + 0.1)V \times 10^{12} \\ &= 0.00315 \Sigma f / (p + 0.1)V \end{aligned}$$

一般规定 GIS 气室  $\text{SF}_6$  年漏气率不大于 1%。

### 1.3.4 断路器二次试验项目

(1) 断路器具有就地、远方操作方式，在汇控柜面板上采用操作手柄进行手动分、合闸，选择“远方”方式时，就地控制无效；选择“就地”方式时，远方控制无效。

(2) 断路器闭锁调试：当断路器所需操作压力降至闭锁压力或  $\text{SF}_6$  气体密度降至最小运行密度时发出信号，断路器应闭锁或强制开断。

(3) 断路器电气信号调试：断路器气室的  $\text{SF}_6$  气体压力报警与控制面板信号一致，断路器的合、分闸位置信号应与远方对应，断路器操作信号、断路器储能信号、断路器计数器信号、断路器闭锁信号应与主控信号一致。

(4) 断路器的联锁操作调试：

- 1) 断路器的分闸是优先的、不受任何闭锁的限制。
- 2) 当断路器的两侧隔离开关在合位时闭锁断路器就地合闸。
- 3) 断路器闭锁隔离开关带负荷拉、合隔离开关。



- 4) 断路器闭锁接地开关带电拉、合接地开关。
- 5) 断路器防止带接地开关合断路器送电。
- (5) 断路器其他方面调试：
  - 1) 防误操作断路器。
  - 2) 防跳跃调试。
  - 3) 非全相保护调试。

### 1.3.5 断路器本体非全相保护

在500kV等级电压电网中，基本都采用分相操作断路器，由于断路器机械或者电气故障等原因，运行中可能出现三相动作不一致的状态，此时电网将出现不对称分量，可能引起保护装置动作或者异常的报警，为了保障这个故障能及时得到消除，一般在断路器机构内设置三相不一致保护回路，或者配备三相不一致保护装置。目前三相不一致保护几乎都采用断路器本体的保护回路，断路器一旦出现三相不一致，在故障的时间内未能恢复三相运行，通过三相不一致保护跳开三相，一般线路侧三相不一致时间要躲过线路重合闸时间，从而实现保护的多重配合。

#### 1. 断路器本体三相不一致保护使用现状

该核电站500kV断路器三相不一致保护功能，直接用断路器的三相动合、动断辅助触点组合实现，不经过任何电气量闭锁，带延时直接跳闸，并配备了两个功能连接片，一个为跳闸出口连接片，一个为功能连接片，三相不一致动作时必须由继保人员进行现场手动复位，恢复三相不一致保护功能。图1-4为三相不一致原理图。

该核电站的500kV升压站采用3/2断路器接线方式，线路采用单跳单重保护，母线侧断路器优先重合，其他重合闸时间为70ms，中断路器重合闸时间为150ms，线路断路器的三相不一致动作时间可按躲过单相重合闸时间整定，因此两个线路断路器三相不一致时间整定为2s。

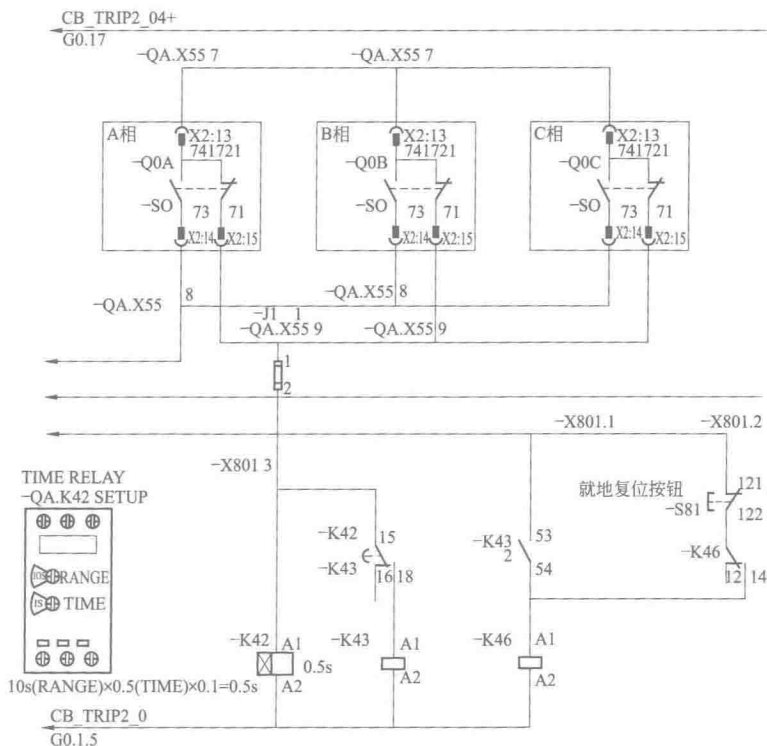


图 1-4 三相不一致原理图

## 2. 断路器本体三相不一致保护优化

从上面的三相不一致原理图可以看出三相不一致触点的方案简单,但其安全性较差,当断路器辅助触点出现问题时就会引起断路器的跳闸。为了保证三相不一致保护的可靠运行,在三相不一致触点后串联一个零序继电器或负序继电器触点,增加了三相不一致保护的可靠性。串联零序继电器后的三相不一致原理图如图 1-5 所示。

从该核电站的主接线图可以发现,机组在停堆的情况下,厂用电由主变压器反送电提供厂用电源。由于主变压器高压侧

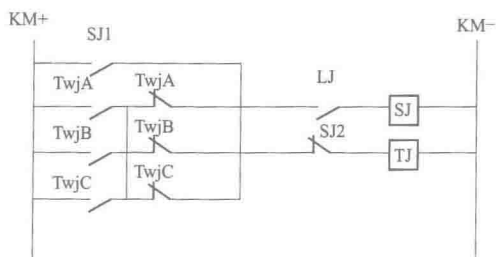


图 1-5 串联零序继电器后的三相不一致原理图

电流比较小,当发生三相不一致时,由于零序、负序分量比较小,三相不一致保护可能会拒动,但该核电站完全建成以后由于总体发电负荷为 6000MW,经过每个断路器的负荷很大,所以可以在机组投运后对断路器三相不一致保护增加零序、负序继电器,以增加三相不一致保护的可靠性。

### 1.3.6 断路器防跳回路

断路器防跳试验是二次调试中一个重要的调试内容,断路器在手动或自动装置动作合闸后,如果操作控制开关未复归或控制开关触点及自动装置触点卡住,而保护装置动作,断路器跳闸将发生多次跳-合现象,该现象称为跳跃。利用操动机构本身的机械闭锁或者在增加电气防跳回路可以避免该故障的发生。

#### 1. 防跳试验方法

(1) 在断路器就地机构操作箱面板上,将方式选择为“就地”,将手柄拧至“合闸”位置不放手,断路器合闸后,短接保护跳闸触点,断路器分闸,不再合闸。

(2) 在断路器就地面板上选择手柄“远方”位置,短接断路器远方合闸指令触点,断路器合闸后,短接保护跳闸触点,断路器分闸后,不再合闸。

在以上两种方式下试验正确后才能证明该断路器防跳功能正确。





## 2. 防跳回路原理分析

常用的防跳回路主要有串联式防跳回路、并联式防跳回路、弹簧储能式防跳回路、跳闸线圈辅助触点式防跳回路等。该核电站防跳回路采用了串联式防跳回路，其原理接线图如图 1-6 所示。当 KOE 合闸辅助触点闭合时，合闸线圈带电使断路器成功合闸；当合闸辅助触点卡死时，KOE 辅助触点一直闭合。在断路器第一次合闸时，断路器辅助触点启动了 K201A 继电器，该继电器设计了自保功能，在 KOE 辅助触点一直闭合的情况下 K201A 继电器一致动作，从而将合闸回路的 K201A 动断辅助触点变成动合触点，闭锁了合闸回路，起防跳的作用。

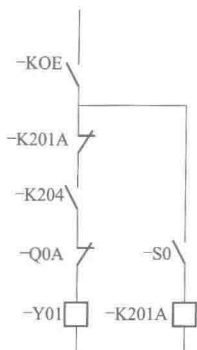


图 1-6 断路器辅助触点防跳回路原理图

串联式防跳回路应用最广泛，它除了具有防跳功能，还具有防止保护出口触点断弧而烧毁的优点。

除了辅助触点防跳回路运用广泛之外，还有一种并联防跳回路在实际中也大量运用。图 1-7 为并联防跳回路接线原理图，防跳继电器 KO 由电压启动自保持，其线圈经断路器动合辅助触点 QF 并联在断路器合闸回路上，断路器合闸后，如果还有一个持续的合闸信号，则启动防跳继电器 KO，KO 触点即由 2-1 位置切换至 4-1，断开合闸回路并自保持，此时断路器跳闸，但由于合闸回路已经断开，断路器将不会重新合闸，从而起防