

主编 李洪波 孟祥臣

DIANLI SHENGCHAN JINENG RENYUAN PEIXUN JIAOCAI

# 电力生产技能人员培训教材

## 变电检修



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANLI SHENGCHAN JINENG RENYUAN PEIXUN JIAOCAI

# 电力生产技能人员培训教材

## 变 电 检 修

主编 李洪波 孟祥臣



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是按照国家电网公司生产技能人员模块化培训课程体系的要求,依据《国家电网公司生产技能人员职业能力培训规范》,结合生产实际编写而成。

全书共 8 章,主要内容包括高压断路器、真空断路器、SF<sub>6</sub>断路器、SF<sub>6</sub>全封闭组合电器 GIS、高压开关柜的检修及故障处理、高压隔离开关及操动机构检修、高压隔离开关的更换安装、高压隔离开关整体调试及试验。

本书主要作为供电企业变电检修工作人员的技能培训教学用书,也可作为电力职业院校教学辅助教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

变电检修 / 李洪波, 孟祥臣主编. —北京: 中国电力出版社, 2015.4

电力生产技能人员培训教材

ISBN 978-7-5123-6957-3

I. ①变… II. ①李… ②孟… III. ①变电所—检修—技术培训—教材 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 300097 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 4 月第一版 2015 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22 印张 540 千字

印数 0001—2000 册 定价 76.00 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

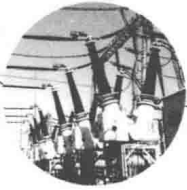
版权专有 翻印必究

## 编 委 会

主 任 张 彬  
副主任 李洪波 王润慧 赵玉岩  
成 员 孟祥臣 寇太明 曹世龙 刘文鹏  
张歆华 郝昌文  
主 审 赵玉岩 曹世龙 郝昌文

## 编 写 组

主 编 李洪波 孟祥臣  
委 员 侯振河 李献群 张金昌 李进刚  
孙家伟 高利东 田玉恒 孙 鹏  
徐彦凯 徐英丰 桑彦来



# 前言

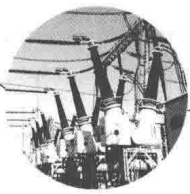
为大力实施“人才强企”战略，加快培养高素质技能人才队伍，国网黑龙江省电力有限公司齐齐哈尔培训中心按照“集团化运作、集约化发展、精益化管理、标准化建设”的工作要求，充分发挥集团化优势，组织省公司系优秀管理、技术、技能和培训教学专家，按照统一标准，开发变电检修生产技能人员培训教材，形成了一线生产人员的培训教材体系。

本套培训教材以 Q/GDW232—2008《国家电网公司生产技能人员职业能力培训规范》为依据，在编写原则上，突出以岗位能力为核心；在内容定位上，遵循“知识够用、为技能服务”的原则，突出针对性和实用性。

本书包括高压断路器、真空断路器、SF<sub>6</sub>断路器、SF<sub>6</sub>全封闭组合电器 GIS、高压开关柜的检修及故障处理、高压隔离开关及操动机构检修、高压隔离开关的更换安装、高压隔离开关整体调试及试验等内容。

由于编写时间仓促，难免存在疏漏之处，恳请各位专家和读者提出宝贵意见，使之不断完善。

编者  
2015年



# 目 录

## 前言

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| <b>第一章 高压断路器</b> .....                        | 1   |
| 第一节 高压断路器基本知识.....                            | 1   |
| 第二节 高压断路器短路电流的开合.....                         | 6   |
| 第三节 高压断路器负荷电流的关合.....                         | 9   |
| 第四节 高压断路器负荷电流的开断.....                         | 14  |
| <b>第二章 真空断路器</b> .....                        | 21  |
| 第一节 真空断路器基本知识.....                            | 21  |
| 第二节 真空断路器的结构原理.....                           | 23  |
| 第三节 35kV 真空断路器的更换安装.....                      | 28  |
| 第四节 35kV 真空断路器及操动机构检修.....                    | 33  |
| 第五节 真空断路器的常见故障处理.....                         | 39  |
| <b>第三章 SF<sub>6</sub> 断路器</b> .....           | 42  |
| 第一节 SF <sub>6</sub> 气体性能.....                 | 42  |
| 第二节 SF <sub>6</sub> 断路器的结构原理.....             | 45  |
| 第三节 SF <sub>6</sub> 断路器的附件.....               | 50  |
| 第四节 SF <sub>6</sub> 气体回收、处理.....              | 58  |
| 第五节 SF <sub>6</sub> 气体检漏、密度继电器校验.....         | 65  |
| 第六节 SF <sub>6</sub> 气体微水量测试.....              | 73  |
| 第七节 LW8(LW16)-35 型 SF <sub>6</sub> 断路器大修..... | 75  |
| 第八节 LW6B 型断路器传动系统和操动机构的检修、调整.....             | 85  |
| 第九节 LW6B 型断路器整体调试.....                        | 97  |
| 第十节 GL317 型断路器传动系统和操动机构的检修调整.....             | 100 |
| 第十一节 GL317 型断路器整体调试.....                      | 107 |
| 第十二节 LW56 型断路器传动系统和操动机构的检修调整.....             | 110 |
| 第十三节 LW56 型断路器整体调试.....                       | 120 |
| 第十四节 断路器机械特性试验及电气试验.....                      | 124 |
| 第十五节 SF <sub>6</sub> 断路器常见故障处理.....           | 130 |
| <b>第四章 SF<sub>6</sub> 全封闭组合电器 GIS</b> .....   | 138 |
| 第一节 SF <sub>6</sub> 全封闭组合电器基本知识.....          | 138 |
| 第二节 GIS 常规检修.....                             | 145 |

|            |                                  |            |
|------------|----------------------------------|------------|
| 第三节        | GIS 状态检修                         | 157        |
| 第四节        | GIS 常见故障处理                       | 162        |
| <b>第五章</b> | <b>高压开关柜的检修及故障处理</b>             | <b>166</b> |
| 第一节        | 10kV 真空断路器高压开关柜的更换安装             | 166        |
| 第二节        | “五防”闭锁装置的检修                      | 173        |
| 第三节        | 高压开关柜常见故障的查找、分析及处理               | 182        |
| <b>第六章</b> | <b>高压隔离开关及操动机构检修</b>             | <b>188</b> |
| 第一节        | 高压隔离开关基本知识                       | 188        |
| 第二节        | 隔离开关安装及本体检修工作的基本要求               | 190        |
| 第三节        | GW4 型隔离开关本体检修                    | 193        |
| 第四节        | GW5 型隔离开关本体检修                    | 203        |
| 第五节        | GW6 型隔离开关本体检修                    | 208        |
| 第六节        | GW7 型隔离开关本体检修                    | 220        |
| 第七节        | GW16(20)型隔离开关本体检修                | 225        |
| 第八节        | GW17(21)型隔离开关本体检修                | 241        |
| 第九节        | GW4 型隔离开关传动系统及 CJ5 电动操动机构检修      | 249        |
| 第十节        | GW5 型隔离开关传动系统及 CJ6 电动操动机构检修      | 256        |
| 第十一节       | GW6 型隔离开关传动系统及 CJ6A 电动操动机构检修     | 258        |
| 第十二节       | GW7 型隔离开关传动系统及 CJ2 电动操动机构检修      | 260        |
| 第十三节       | GW16(20)型隔离开关传动系统及 CJ7 电动操动机构检修  | 266        |
| 第十四节       | GW17(21)型隔离开关传动系统及 CJ11 电动操动机构检修 | 273        |
| 第十五节       | 接地刀闸及其操动机构检修                     | 279        |
| 第十六节       | 隔离开关常见故障处理                       | 289        |
| 第十七节       | 隔离开关检修报告的填写                      | 296        |
| <b>第七章</b> | <b>高压隔离开关的更换安装</b>               | <b>299</b> |
| 第一节        | GW4 型隔离开关更换                      | 299        |
| 第二节        | GW5 型隔离开关更换                      | 303        |
| 第三节        | GW6 型隔离开关更换                      | 306        |
| 第四节        | GW7 型隔离开关更换                      | 309        |
| 第五节        | GW16(20)型隔离开关更换                  | 312        |
| 第六节        | GW17(21)型隔离开关更换                  | 314        |
| <b>第八章</b> | <b>高压隔离开关整体调试及试验</b>             | <b>318</b> |
| 第一节        | GW4 型隔离开关整体调试及试验                 | 318        |
| 第二节        | GW5 型隔离开关整体调试及试验                 | 322        |
| 第三节        | GW6 型隔离开关整体调试及试验                 | 326        |
| 第四节        | GW7 型隔离开关整体调试及试验                 | 332        |
| 第五节        | GW16(20)型隔离开关整体调试及试验             | 335        |
| 第六节        | GW17(21)型隔离开关整体调试及试验             | 338        |
| <b>附录</b>  | <b>220kV GW7 型隔离开关检修报告</b>       | <b>342</b> |

## 高压断路器

### 第一节 高压断路器基本知识

本节介绍高压断路器的作用、结构、基本技术参数和高压断路器操动机构。通过概念描述、要点归纳、定义讲解，掌握高压断路器的主要功能、种类、结构及其基本技术参数，熟悉高压断路器操动机构相关知识。

#### 一、高压断路器的作用

断路器是指能带电切合正常状态的空载设备，能开断、关合和承载正常的负荷电流，并且能在规定的时间内承载、开断和关合规定的异常电流（如短路电流）的电器。断路器是电力系统中最重要的控制和保护设备。额定电压为3kV及以上的断路器为高压断路器。

断路器在关合状态时应为良好的导体，在通过正常电流和规定的短路电流时，应能承受其发热和电动力的作用，断口间、对地及相间要具有良好的绝缘性能。在关合状态的任何时刻，在不发生危险过电压的条件下，断路器应在尽可能短的时间内开断额定短路电流及以下的电流。在开断状态的任何时刻，断路器能在短时间内安全地关合规定的短路电流。

#### 二、高压断路器的类型及型号含义

##### 1. 高压断路器的类型

按照灭弧介质的不同，断路器可划分为以下几种类型：

(1) 油断路器。采用油作为灭弧介质的断路器，称为油断路器，可分为多油断路器和少油断路器。其触头是在油中开断、接通的。目前这种断路器在电力系统中基本被淘汰。

(2) 压缩空气断路器。利用高压压缩空气作为灭弧介质的断路器，称为压缩空气断路器。压缩空气除作为灭弧介质外，还作为触头断开后的绝缘介质。

(3) 真空断路器。利用真空的高介质强度来灭弧的断路器，称为真空断路器。触头在真空中开断、接通，在真空条件下灭弧。

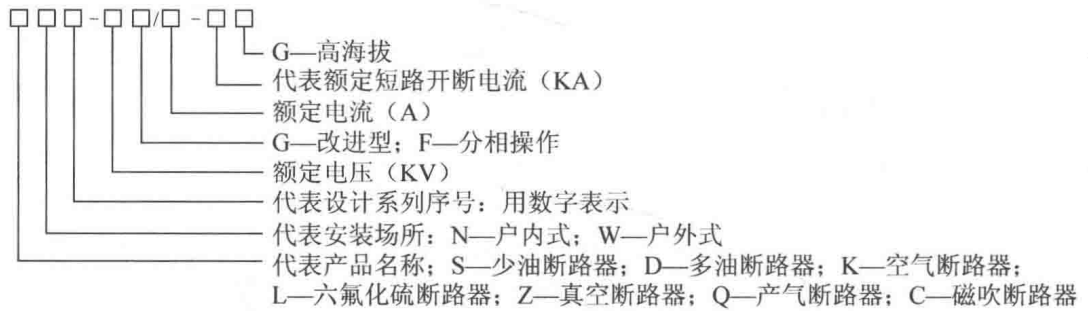
(4) SF<sub>6</sub>断路器。采用 SF<sub>6</sub> 气体作为灭弧介质的断路器，称为 SF<sub>6</sub> 断路器。SF<sub>6</sub> 气体具有优良的灭弧性能和绝缘性能。

(5) 自动产气断路器和磁吹断路器。利用固体产气材料在电弧高温作用下分解出的气体来熄灭电弧的断路器，称为产气断路器。在空气中由磁场将电弧吹入灭弧栅中，使电弧拉长、冷却而熄灭的断路器，称为磁吹断路器。



## 2. 高压断路器的型号含义

高压断路器型号含义如下：



例如：型号 LW10B-252/4000-50 中，L 表示 SF<sub>6</sub> 断路器，W 表示户外式，10B 表示设计系列序号，252 表示额定电压为 252kV，4000 表示额定电流为 4000A，50 表示额定短路开断电流为 50kA。

## 三、高压断路器基本结构

高压断路器的类型很多，结构比较复杂，但从总体上由以下几部分组成：

- (1) 开断元件。开断元件包括断路器的灭弧装置和导电系统的动、静触头等。
- (2) 支持元件。支持元件用来支撑断路器器身，包括断路器外壳和支持瓷套。
- (3) 底座。底座用来支撑和固定断路器。
- (4) 操动机构。操动机构用来操动断路器分、合闸。
- (5) 传动系统。传动系统将操动机构的分、合运动传动给导电杆和动触头。

## 四、高压断路器主要技术参数和常用术语

### 1. 主要额定参数

(1) 额定电压（最高电压）。是指在规定的使用 and 性能条件下连续运行的最高电压，并以它来确定高压断路器的有关试验条件。

(2) 额定电流。是指在规定的使用 and 性能条件下，高压断路器主回路能够连续承载的电流数值。

(3) 额定峰值耐受电流（额定动稳定电流）。是指在规定的使用 and 性能条件下，高压断路器在闭合位置所能承受的额定短时耐受电流第一个大半波的峰值电流。

(4) 额定短路持续时间（额定热稳定时间）。是指高压断路器在闭合位置所能承受的额定短时耐受电流的时间间隔。

(5) 额定短路关合电流。额定短路关合电流为在额定电压以及规定的使用 and 性能条件下，高压断路器能保证正常关合的最大短路峰值电流。

(6) 额定短路开断电流。额定短路开断电流为在规定条件下，高压断路器能保证正常开断的最大短路电流（以触头分离瞬间电流交流分量有效值和直流分量百分数表示）。

(7) 额定短时耐受电流（额定热稳定电流）。额定短时耐受电流为在规定的使用 and 性能条件下，在确定的短时间内，断路器在闭合位置所能承载的规定电流有效值。

(8) 额定操作顺序。额定操作顺序是指在规定的时间内进行的一连串规定的操作。额定操作顺序分为两种：①自动重合闸操作顺序，即分— $\theta$ —合分— $t$ —合分； $\theta$ 为无电流时间，取 0.3s 或 0.5s， $t$  为 180s；②非自动重合闸操作顺序，即分— $t$ —合分— $t$ —合分，通常  $t$  取 15s，

断路器的开断能力与操作顺序相对应。

(9) 合闸线圈、分闸线圈额定电源电压。交流为 220、380V，直流为 48、110、220V，合闸线圈一般配一套，分闸线圈为满足可靠性的要求，一般可配 2 套及以上，其动作电压：合闸为  $[85(80)\% \sim 110\%] U_N$ ，分闸为  $[(30 \sim 65)\% \sim 110\%] U_N$ 。

## 2. 主要调整参数

(1) 总行程。总行程为在分、合操作中，高压断路器动触头起始位置到终止位置的距离。

(2) 超行程。超行程为合闸操作中，高压断路器触头接触后动触头继续运动的距离。

(3) 分闸速度。分闸速度为高压断路器在分闸过程中动触头的运动速度，实施时常以某个尽量小的区段的平均值表示。

(4) 触头刚分速度。触头刚分速度为高压断路器分闸过程中，动触头与静触头分离瞬间的运动速度，测试有困难时，常以刚分后 10ms 内的平均值表示。

(5) 合闸速度。合闸速度为高压断路器在合闸过程中，动触头的运动速度。实施时常以某个尽量小的区段的平均值表示。

(6) 触头刚合速度。触头刚合速度为高压断路器合闸过程中，动触头与静触头接触瞬间的运动速度，测试有困难时，常以刚合前 10ms 内的平均值表示。

(7) 合闸时间。合闸时间为从接到合闸指令起到所有极触头都接触的时间间隔。对装有并联电阻的断路器，需区分与并联电阻串联的触头都接触前的合闸时间和主触头都接触前的合闸时间。除非另有说明，合闸时间就是指直到最后一个主触头接触的时间。合闸时间的长短，主要取决于断路器的操动机构及传动机构的机械特性。

(8) 分闸时间。分闸时间为从高压断路器分闸操作起始瞬间（即接到分闸指令瞬间）起到所有极的触头分离瞬间的时间间隔。对具有并联电阻的断路器，需区分直到弧触头都分离瞬间的分闸时间和直到带并联电阻的串联触头都分离的分闸时间。除非另有说明，分闸时间就是指直到最后一个主触头分离瞬间的时间，时间的长短主要和断路器及所配操动机构的机械特性有关。

(9) 开断时间。开断时间指从高压断路器接到分闸指令瞬间起到各极均熄弧的时间间隔，即等于高压断路器的分闸时间和燃弧时间之和。

(10) 合闸相间同步。合闸相间同步是指断路器接到合闸指令，自首先接触相的触头刚接触起到最后相触头刚接触为止的一段时间。一般合闸相间同步时间不大于 5ms。

同一相内串联几个断口时，有断口间合闸同步要求，断口间合闸同步时间不大于 2.5ms。

(11) 分闸相间同步。分闸相间同步是用来反映三相触头分开时间差异的。这一性能的衡量，是以断路器接到分闸指令，自首先分离相的触头刚分开起到最后分离相的触头刚分开为止这一段时间的长短来表示。一般分闸相间同步应不大于 3ms。

同一相内串联几个断口时，有断口间分闸同步要求，断口间分闸同步时间应不大于 2ms。

(12) 重合闸时间。高压断路器分闸后经预定时间自动再合闸的操作顺序称自动重合闸。重合闸操作中，从接到分闸指令瞬间起到所有极的动、静触头都重新接触瞬间的时间间隔为重合闸时间。

(13) 无电流时间。无电流时间是指在自动重合闸过程中，从断路器所有极的电弧最终熄灭起到随后重合闸时任一极首先通过电流为止的时间间隔。

(14) 金属短接时间。金属短接时间是指在合闸操作过程中，从首合极各触头都接触瞬间起到随后的分闸操作时所有极中弧触头都分离瞬间的时间间隔。金属短接时间的长短要满足断路器自卫能力的要求，原则上应大于其分闸时间与预击穿时间之和。

### 3. 常用术语

(1) 复燃，指高压断路器在开断过程中，在电流过零且熄弧后，在  $1/4$  工频周期以内触头间非剩余电流的电流重现。

(2) 重燃，指高压断路器在开断过程中，在电流过零且熄弧后，在  $1/4$  工频周期及以上时间内触头间非剩余电流的电流重现。

(3) 动合触头（常开触头），指当高压断路器的主触头合时闭合而主触头分时断开的控制触头或辅助触头。

(4) 动断触头（常闭触头）。动断触头是指当高压断路器的主触头合时断开而主触头分时闭合的控制触头或辅助触头。

(5) 自能灭弧室。自能灭弧室是指主要利用电弧本身能量灭弧的灭弧室。

(6) 外能灭弧室。外能灭弧室是指主要利用外加能量灭弧的灭弧室。

(7) 防跳装置。防跳装置是指在合闸操作中，只要引起合闸操作的操动机构仍保持在闭合的位置，如果由于某种原因使高压断路器分闸，也不能再合的保护装置。

(8) 脱扣器。脱扣器是指与高压断路器机械连接的一种装置，用它来释放保持装置以使开关分或合。

(9) 自由脱扣开关装置。自由脱扣开关装置是指当合闸操作起始后需要立即转为分闸操作时，即使合闸指令继续保持着，其动触头也能返回，且保持在分闸位置的开关装置。

(10) 首开相因数。三相电力系统中，三相短路第一相开断后，在高压断路器安装处的完好相和另外两短路相之间的工频电压与短路消除后同一处相电压之比为首开相因数。

## 五、高压断路器操动机构

### 1. 高压断路器操动机构种类

断路器的分、合闸动作是靠操动机构来实现的。按操动机构所用操作能源的能量形式不同，操动机构可分为以下几种。

(1) 手力操动机构（CS），指用人力合闸的操动机构。

(2) 电磁操动机构（CD），指用电磁铁合闸的操动机构。

(3) 弹簧操动机构（CT），指事先用人力或电动机使弹簧储能实现合闸的弹簧操动机构。

(4) 液压操动机构（CY），指以高压油推动活塞实现合闸与分闸的操动机构。

(5) 弹簧储能液压机构（AHMA 或 HMB），这种机构综合了弹簧机构和液压机构的优点，采用差动式工作缸，弹簧储能液压一连杆混合传动方式。

(6) 气动操动机构（CQ），指用压缩空气推动活塞实现合闸与分闸的操动机构。

### 2. 对高压断路器操动机构的要求

断路器的分、合闸动作是通过操动机构来实现的，因此，操动机构的工作性能和质量的优劣，对断路器的工作性能和可靠性起着极为重要的作用。对高压断路器操动机构的主要要求如下。

(1) 合闸。正常工作时，用操动机构使断路器合闸，这时电路中流过的是工作电流，关

合是比较容易的。但在电网事故情况下，断路器要合到有故障的电路上时，出现短路电流，受到阻碍断路器合闸的电动力，有可能出现不能可靠合闸，即触头合不到位，从而引起触头严重烧伤，甚至会发生断路器爆炸等严重事故。因此，操动机构必须具有克服短路电动力的阻碍能力，即具有关合短路故障的能力。

对于电磁、气动、液压等操动机构，还应考虑到合闸电源电压、气压和液压在一定范围内变化时，仍能可靠工作。当电压、气压和液压在下限值（规定为额定值的 80%或 85%）时，操动机构仍应使断路器具有关合短路故障的能力。而当电压、气压和液压在上限值（规定为额定值的 110%）时，操动机构不应出现由于操作力、冲击力过大等原因使断路器的零部件损坏。

(2) 保持合闸。在合闸过程中，合闸命令的持续时间很短，而且操动机构的操作功也只在短时间内提供，因此，操动机构中必须有保持合闸的部分，以保证在合闸命令和操作功消失后，断路器保持在合闸位置。

(3) 分闸。操动机构应具有电动和手动分闸功能，当接到分闸指令后，为满足灭弧性能要求，断路器能快速分闸，分断时间尽可能缩短，以减少短路故障存在的时间。为了达到快速分闸和减少分闸功，在操动机构中应有分闸省力机构。

对于电磁、气动、液压等操动机构，还应考虑到分闸电源电压、气压和液压在一定范围内变化时，仍能可靠工作。当电压、气压和液压在下限值（规定为额定值的 30%~65%）时，操动机构仍应使断路器正确分闸，而当电压、气压和液压在上限值（规定为额定值的 110%）时，操动机构不应出现操作力过大，损坏断路器零件。

(4) 自由脱扣。自由脱扣的含义是在断路器合闸过程中，如操动机构又接到分闸命令，则操动机构不应继续执行合闸命令而应立即分闸。

当断路器关合有短路故障的电路，若操动机构没有自由脱扣能力，则必须等到断路器的动触头关合到底后才能分闸。对有自由脱扣的操动机构，则不管触头关合到什么位置，也不管合闸命令是否解除，只要接到分闸命令，断路器都应能立刻分闸。

(5) 防“跳跃”。当断路器关合有短路故障的电路时，断路器将自动分闸。此时若合闸命令还未解除，则断路器分闸后又将再次合闸，接着又会由于短路而分闸。这样，有可能使断路器连续多次合分短路电流，这一现象称为“跳跃”。出现“跳跃”现象时，断路器将连续多次合分短路电流，造成触头严重烧伤，甚至引发断路器爆炸事故。防“跳跃”措施有机械防“跳跃”和电气防“跳跃”两种方法。

(6) 复位。断路器分闸后，操动机构中的各个部件应能自动地回复到准备合闸的位置。因此，在操动机构中还需装设一些复位用的零部件。

(7) 连锁。为了保证操动机构的动作可靠，要求操动机构有一定的连锁装置，常用的连锁装置有分合闸位置连锁，低气（液）压与高气（液）压连锁和弹簧机构中的位置连锁。

(8) 缓冲。断路器的分合闸速度很高，要使高速运动的零部件立即停下来，不能简单地采用在行程终止处装设止钉的办法，而必须用缓冲装置来吸收运动部分的动能，防止断路器中某些零部件受到很大的冲击力而损坏。

### 3. 断路器与操动机构组合

断路器的分合闸要靠操动机构来实现，而操动机构要靠能源才能动作，两者靠机械传动系统连接并传递操作功使断路器分、合闸。

合闸的能源可以是人力、电磁能、弹簧能、气体或液体的压缩能等，分闸的能源可以在合闸过程中储能的分闸弹簧能，也可以直接用气体或液体的压缩能。

除操动机构外，断路器的机械系统还包括提升机构和传动机构两部分。

(1) 提升机构。提升机构是指直接带动断路器触头系统运动的机构，它能使动触头按照一定的轨迹运动，通常为直线运动或近似直线运动。机构由拐臂、连杆和在导向装置中的滑块组成，当拐臂尺寸小于连杆时，称为曲柄滑块提升机构，当拐臂尺寸大于连杆时，称为摇臂滑块提升机构。滑块提升机构的结构，应考虑使导向装置上的受力尽量小一些，以免运动时的摩擦阻力太大。

(2) 传动机构。传动机构是指连接操动机构和提升机构的中间环节。由于操动机构与提升机构之间相隔一定的距离，而且运动方向往往也不一致，因此需要增设一套传动机构。

操动机构是一个独立的产品，一种型号的操动机构可以和几种型号的断路器相配装，同样一种型号的断路器也可以和几种不同型号的操动机构相配装。

## 第二节 高压断路器短路电流的开合

本节介绍短路故障的关合、恢复电压的基本概念、单相电路开断时的恢复电压和三相电路开断时的恢复电压。通过概念描述、原理讲解，掌握短路故障的关合、恢复电压的基本概念，熟悉高压断路器在开合短路电流时的电压恢复过程。

高压断路器在电力系统中开断电路时，总会出现电弧，开断的电流愈大，电弧愈难熄灭，其工作条件也愈严酷。在电力系统发生短路故障时，短路电流比正常负荷电流大得多，因而关合与开断短路故障是高压断路器最基本也是最困难的任务。

恢复电压对开断过程有着决定性的影响，下面分析短路故障的电压恢复过程。

### 一、短路故障的关合

高压断路器在电力系统中的关合有两种类型：①正常关合，指关合前线路和电气设备不存在绝缘故障；②短路故障的关合，指关合前线路或电气设备已存在绝缘故障，甚至处于短路状态。后一种关合大部分出现在线路发生短路故障，断路器由继电保护控制跳闸后，进行自动重合而短路故障并未消除时，也可能出现在电力系统投入运行前已存在未被发现的“预伏故障”时。由于在各种关合中短路故障的关合最危险，因此具有足够的关合短路故障的能力是对断路器的一项基本要求，也是国家标准中规定的型式试验考核项目。标志这一能力的参数是断路器的额定短路关合电流。

### 二、恢复电压的基本概念

交流电弧过零后能否熄灭，除与弧隙介质恢复过程有关外，还与弧隙的电压恢复过程有关。当恢复电压高于介质强度时，电弧重燃；当恢复电压低于介质强度时，电弧熄灭。弧隙介质强度和恢复电压如图 1-1 所示。图中  $u_d$  为弧隙介质强度恢复曲线，当恢复电压按曲线  $u_{r2}$  变化时，在  $t_1$  后电弧重燃；而当恢复电压按曲线  $u_{r1}$  变化时，电弧就熄灭。

由此可见，要研究灭弧问题必须弄清楚电压的恢复

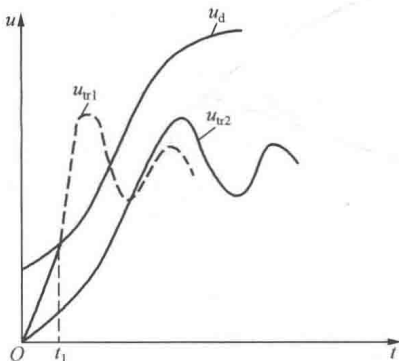


图 1-1 弧隙介质强度和恢复电压



过程。对于断路器来说，开断短路故障是一项严重的任务。因此弧隙介质强度和恢复电压相比，分析断路器开断短路故障时的电压恢复过程更为重要。

电压恢复过程中，首先出现在弧隙两端的是具有瞬态特性的电压，称为瞬态恢复电压。瞬态恢复电压存在的时间很短，只有几十微秒至几毫秒。瞬态恢复电压消失后，弧隙两端出现的是由工频电源决定的电压，称为工频恢复电压。工频恢复电压也可以说是电弧熄灭后，弧隙两端恢复电压的稳态值，瞬态恢复电压与工频恢复电压统称恢复电压。

从灭弧角度看，在开断短路故障时，瞬态恢复电压具有决定性的意义，是分析研究的主要方面，而且许多场合下提到的恢复电压往往就是指瞬态恢复电压。瞬态恢复电压的变化取决于：

(1) 工频恢复电压的大小。

(2) 电路中电感、电容和电阻的数值以及它们的分布情况。实际电网中，这些参数的差别很大，因此瞬态恢复电压的波形也会有很大的差别。

(3) 断路器的电弧特性。交流电流过零时，特别在开断大电流时，弧隙不可能由原来的导电状态立刻转变为绝缘介质，即电流过零时，弧隙有一定的电阻。断路器的开断性能不同，电流过零时弧隙电阻值的差别很大。显然，弧隙电阻对瞬态恢复电压会带来很大的影响。

电流过零时，弧隙电阻能立即变成无限大的断路器称为理想断路器。因此，理想断路器的瞬态恢

复电压只取决于电网参数（电源电压、电感、电容和电阻等），而与断路器的开断性能无关。称理想断路器开断无直流分量的交流电流时的瞬态恢复电压为电网的固有瞬态恢复电压或预期瞬态恢复电压。在断路器标准中规定的瞬态恢复电压都指的是电网固有瞬态恢复电压。

### 三、单相电路开断时的恢复电压

单相电路开断时的恢复电压波形如图 1-2 所示。

从图 1-2 中可以看出，瞬态恢复电压中含有高频振荡，其振荡频率  $f_0$  与电源侧  $L$ 、 $C$  有关，但衰减很快。当  $t$  接近  $\frac{1}{2f_0}$  时，瞬态恢复电压到达最大值  $U_{tm}$ ，

一般为工频恢复电压  $U_0$  的 1.4~1.5 倍，即电流过零时，工频电压瞬时值为

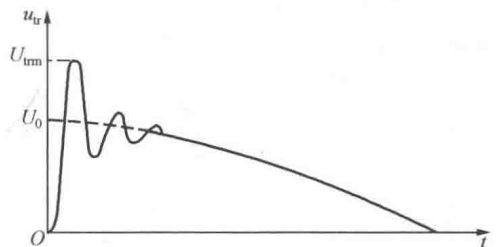


图 1-2 单相电路开断时恢复电压波形

$$U_{tm} = (1.4 \sim 1.5)U_0 \quad (1-1)$$

$$U_0 = U_m \sin \varphi \quad (1-2)$$

式中  $U_m$ ——交流电源电压峰值；

$\varphi$ ——功率因数角，由  $L$ 、 $R$  值确定。

通常短路故障时，功率因数很低，许多情况  $\cos \varphi < 0.15$ ， $\sin \varphi \approx 1$ ，此时

$$U_0 \approx U_m \quad (1-3)$$

### 四、三相电路开断时的恢复电压

三相电路开断时的工频恢复电压，随系统的接地方式与短路故障方式的不同有很大差别。现讨论以下三种情况。

### 1. 中性点不直接接地系统的三相短路故障

我国 60kV 及以下的电力系统（包括部分 110kV 电力系统），都采用中性点不直接接地方式。这种系统可能出现三相不接地短路和三相接地短路两种情况。

三相不接地短路故障时，三相短路电流不同时过零，三相电弧也不会同时熄灭。假定 U 相短路电流先过零，U 相电弧先熄灭，此时，V、W 相形成两相短路，流经 V、W 两相的短路电流为  $0.866I_U$ 。U 相开断时断路器触头两端的工频恢复电压为相电压的 1.5 倍，或称首开极（相）系数为 1.5。

U 相电流过零电弧熄灭后，V、W 两相的短路电流经过  $5\text{ms}$ （ $90^\circ$  电角度）也过零。电源电压将加在 V、W 两相的触头上。如果电压均匀分配，V、W 两相触头上的工频恢复电压只有相电压的 0.866 倍，比 U 相的工频恢复电压低很多。

由此可见，开断三相短路故障的困难和关键在于首相。首相如能灭弧，后两相一般均能顺利灭弧，但燃弧时间比首开相延长  $5\text{ms}$ ，电弧能量较大，因此触头烧损、喷油、喷气等情况比首相要严重些。

中性点不直接接地系统中发生三相接地短路故障时，短路电流和恢复电压的情况与三相不接地短路故障相同。

### 2. 中性点直接接地系统的三相接地短路故障

我国 220kV 及以上电力系统（包括部分 110kV 电力系统），采用中性点直接接地方式。中性点直接接地系统发生三相接地短路故障时，设 U 相电流先过零，电弧先熄灭，U 相开断时工频恢复电压为相电压的 1.3 倍，即首开极（相）系数为 1.3。U 相电弧熄灭后，V 相电流经（ $4.22\text{ms}$   $76^\circ$  电角度）后，电流过零，电弧熄灭。V 相开断时工频恢复电压为相电压的 1.25 倍，燃弧时间延长  $4.22\text{ms}$ 。V 相电弧熄灭后，W 相短路电流再经（ $2.44\text{ms}$   $44^\circ$  电角度）后，电流过零，电弧熄灭。W 相开断时工频恢复电压即为相电压，燃弧时间再延长  $2.44\text{ms}$ 。

中性点直接接地系统发生三相接地短路故障各相短路电流的开断次序、工频恢复电压、燃弧时间的数据见表 1-1。

表 1-1 工频恢复电压与燃弧时间

| 开断次序      | 1                  | 2                   | 3               |
|-----------|--------------------|---------------------|-----------------|
| 相别        | U                  | V                   | W               |
| 工频恢复电压    | $1.3U_{\text{ph}}$ | $1.25U_{\text{ph}}$ | $U_{\text{ph}}$ |
| 燃弧时间 (ms) | $t_a$              | $t_a+4.22$          | $t_a+6.66$      |

注  $U_{\text{ph}}$  为相电压。

中性点直接接地系统中，由于额定电压高，相间绝缘距离大，一般不会出现三相短路的情况。如果出现三相短路，则各相工频恢复电压的情况与中性点不直接接地系统中三相短路故障的分析结果相同，即首开极（相）系数仍为 1.5。

### 3. 中性点不直接接地系统中异地两相接地故障

在中性点不直接接地系统中，可能出现异地两相接地故障，简称异地故障。

异地两相接地故障电路图如图 1-3 所示，U 相在 1 处、V 相在 2 处都出现接地故障时，断路器 QF 的 U 相中流过短路电流。断路器开断短路故障，U 相电弧熄灭时的工频恢复电压为相电压的 1.73 倍，即异地两相接地故障时的工频恢复电压为相电压的 1.73 倍。

从上面三种情况的分析可以看出，三相断路器开断短路故障时的工频恢复电压除与系统中性点的接地方式、短路故障种类有关外，还因三相断路器各相开断电路的顺序而异，其中首先开断相的工频恢复电压最高。

在中性点直接接地系统中，出现三相短路故障的机会极少，首开极（相）系数  $K_1$  可取 1.3。

对中性点不直接接地系统，首开极（相）系数  $K_1=1.5$ 。

异地两相接地故障时，首开极（相）系数  $K_1=1.73$ 。

利用首开极（相）系数与断路器额定电压  $U_N$  可求得断路器首相开断时工频恢复电压最大值为  $0.816K_1U_N$ 。

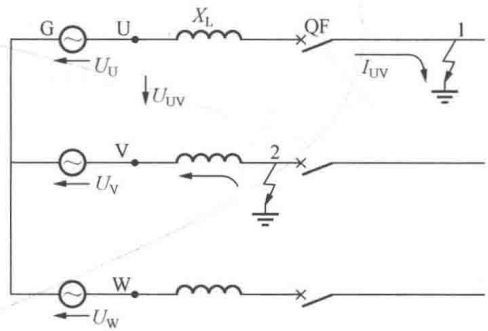


图 1-3 异地两相接地故障电路图

### 第三节 高压断路器负荷电流的关合

本节介绍高压断路器关合的电容电流特性。通过原理讲解、计算举例，了解各类电容性负荷电流的概念，熟悉关合空载输电线路和关合电容器组的电容电流特性。

电容性负荷和电感性负荷在电力系统中都是常见的，断路器在关合和开断这些负荷时常常会产生过电压，无论对断路器或其他电气设备都有可能造成危害。分析断路器在这些操作过程中的物理现象，对于限制过电压和提高断路器的操作性能都有非常重要的意义。

#### 一、电容性负荷的基本情况

关合和开断电容性负荷是高压断路器的一项基本任务，电网中电容性负荷有两种：①并联电容器组；②空载输电线路，包括架空线和电缆。

##### 1. 并联电容器组

根据电网的运行经验，每发出 1kW 的有功功率，需要有 1.2~1.4kvar 的无功功率才能维持电网的正常工作电压。产生无功功率的方法主要有发电机发无功、安装同步补偿机和安装并联电容器组三种。既简便又经济的方法就是安装并联电容器组。并联电容器组一般安装在 10、35、66kV 电网中，每组容量为 5000~40 000kvar。GB 1984《高压交流断路器》中规定了各电压等级断路器的额定单个电容器组开断电流、背对背电容器组开断电流、额定电容器关合涌流的峰值及频率的数值。单个电容器组开合性能见表 1-2。

表 1-2 单个电容器组开合性能

| 额定电压 (kV) | 开断电流 (A) | 涌流峰值 (kA) | 涌流频率 (Hz) |
|-----------|----------|-----------|-----------|
| 12        | 400      | 8.0       | 不大于 1000  |
|           | 630      | 12.5      |           |
|           | 800      | 16.0      |           |
| 40.5      | 200      | 4.0       | 不大于 1000  |
|           | 400      | 8.0       |           |
|           | 630      | 12.5      |           |
| 72.5      | 200      | 4.0       | 不大于 1000  |
|           | 400      | 8.0       |           |
|           | 630      | 12.5      |           |



## 2. 空载输电线路

(1) 架空线。架空线的电容包括各相导体之间的电容和导线对地电容。架空线采用导线循环换位后，各相电容可以认为是相等的。三相架空线每相每千米的电容电流主要与线路的额定电压有关，数据见表 1-3。

表 1-3 三相架空线每相每千米的电容电流

|             |       |       |     |       |      |
|-------------|-------|-------|-----|-------|------|
| 额定电压 (kV)   | 10    | 35    | 60  | 110   | 220  |
| 电容电流 (A/km) | 0.017 | 0.059 | 0.1 | 0.185 | 0.37 |

10、35kV 架空输电线路短、电容电流很小；电压等级高的输电线路长，电容电流较大。例如 220kV、300km 架空输电线路的电容电流可达 110A，如果架空输电线路采用两分裂导线，电容电流还会加大 20%。GB 1984《高压交流断路器》中规定了各电压等级断路器应能开断的额定线路充电电流（即架空线路的电容电流）的数值，见表 1-4。

表 1-4 额定线路充电开断电流  $I_c$

|           |      |           |           |     |     |       |
|-----------|------|-----------|-----------|-----|-----|-------|
| 额定电压 (kV) | 72.5 | 126 (123) | 252 (245) | 363 | 550 | (800) |
| $I_c$ (A) | 10   | 31.5      | 125       | 315 | 550 | 900   |

(2) 电缆。电缆的相间与对地距离都很小，固体、液体绝缘材料的介电常数又比空气大，因此每千米电缆的电容电流比架空线大几十倍。即使电缆线路的电压不高，线路也不长，但电容电流仍不小。GB 1984《高压交流断路器》中规定的各电压等级断路器应能开断的额定电缆充电电流（即电缆线路的电容电流）的数值，见表 1-5。

表 1-5 额定电缆充电开断电流  $I_c$

|           |     |     |    |      |      |      |           |           |     |     |
|-----------|-----|-----|----|------|------|------|-----------|-----------|-----|-----|
| 额定电压 (kV) | 3.6 | 7.2 | 12 | (24) | 40.5 | 72.5 | 126 (123) | 252 (245) | 363 | 550 |
| $I_c$ (A) | 10  | 10  | 25 | 31.5 | 50   | 125  | 160       | 250       | 315 | 500 |

由此可见，要求开合电容性电流的数值不是很大，一般为几十到几百安，最大也不会超过 1kA，与额定短路开断电流相比要小得多。开断电容性电流的主要问题是过电压。

## 二、关合空载输电线路

电力系统运行时主要在以下两种情况时需要关合空载输电线路：①正常操作的需要，如输电线路检修后投入运行；②线路短路故障切除后的自动重合。

如图 1-4 所示的输电线路中，当线路发生短路故障时，断路器 QF1 与 QF2 动作切除故障，



图 1-4 输电线路连接图

G1、G2—电源

经很短时间后，QF1 与 QF2 又自动重合。若 QF1 先于 QF2 重合，且重合时短路故障已消除，则断路器 QF1 遇到的就是关合空载输电线路。

关合空载线路会产生过电压，若断路器 QF1 三相同期合闸，关合三相空载线路可按单相电路进行分析。通过等值电路及数学计算得出  $U_{Cm}$ （过电压最大值）为

$$U_{Cm} = 2 U_m \sin\varphi - U_0$$

通过分析，可以得出以下结论：