

GONGCHANG CHANGYONG DIANQI SHEBEI
YUNXING YU WEIHU

工厂常用电气设备 运行与维护

(第二版)

张方庆 赵永生 胡灵荣 徐忠 编
陆海军 李一平 审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

GONGCHANG CHANGYONG DIANQI SHEBEI
YUNXING YU WEIHU

工厂常用电气设备 运行与维护

(第二版)

张方庆 赵永生 胡灵荣 徐忠 编
陆海军 李一平 审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为加强对工厂、企业电气设备的运行与维护,提高专业技术人员分析问题、解决问题的能力,确保电气设备的安全、可靠、长周期经济运行。本书结合目前我国工厂、企业电气设备维护水平的实际情况及一、二次电气设备新技术、新工艺在工厂、企业的应用情况,主要介绍了常用电气设备运行与维护中的注意事项、常见故障的诊断及分析处理方法、主要设备典型继电保护的实用计算方法,以及节约用电管理、电气设备的安全管理方法。

本书共分十二章,主要内容包括电力系统及工厂电气设备概述、高压开关电器的运行与维护、电力变压器的运行与维护、电力互感器与电力电容器的运行与维护、高低压异步电动机的运行与维护、直流系统及常用低压电器的运行与维护、工厂继电保护及整定计算、工厂常用二次回路的运行与维护、变频器的运行与维护、PLC的运行与维护、工厂节约用电管理、电气设备的安全管理及防火与防爆。

本书是从事电气设备运行与维护多年的高级工程师或高级技师实践工作经验的总结。可供从事工厂、企业电气设备运行与维护的专业技术人员使用,亦可作为高职高专供电技术、工业自动化等电气工程类师生参考学习,也可作为工厂、企业提高电气专业技术水平的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

工厂常用电气设备运行与维护/张方庆等编. —2 版. —北京:中国电力出版社, 2017.1

ISBN 978-7-5198-0212-7

I. ①工… II. ①张… III. ①电气设备-运行-教材②电气设备-维修-教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 320654 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

2009 年 2 月第一版

2017 年 1 月第二版 2017 年 1 月北京第四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 26.75 印张 628 千字

印数 7001—9000 册 定价 81.00 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

本书第一版自 2009 年出版以来，受到了广大电气专业技术人员的关注和好评，对工厂、企业电气设备的安全、可靠、长周期经济运行以及为实现企业经济效益最大化起到了积极的促进作用，得到了从事电气设备技术管理从业人员的青睐，已成为许多工厂、企业电气设备运行与维护技术培训及日常工作必备的技术手册之一。

本次修订在保持第一版编写理念的基础上，根据近几年一、二次电气设备及其新技术、新工艺的在工厂、企业的应用情况，结合编者在给相关企业电气专业技术人员培训时的经验，对第一版的内容进行修订、补充。删减了一些电气设备的基本知识、一些日常运行中故障概率很低的设备维护内容，以及一些已基本淘汰或即将淘汰的技术知识、方法，着重增加二次设备运行与维护内容，本次修订的主要内容如下：

- (1) 删除了母线、绝缘子、电力电缆及防雷设备的运行与维护内容。
- (2) 删减了电弧及电气触点、各种高低压电器的基本结构原理知识。
- (3) 删减了低压电器运行与维护内容。
- (4) 增加了主要电气设备常见故障诊断及处理方法的内容。
- (5) 增加了高低压电动机运行与维护的内容。
- (6) 增加了工厂常用继电保护整定计算内容。
- (7) 增加了工厂二次系统中自动控制、继电保护、电气测量回路等方面的典型故障分析与处理内容。
- (8) 增加了 PLC、变频器运行与维护的内容。
- (9) 增加了工厂电气设备节约用电及经济运行方面的内容。

通过本次修订，作品已涵盖了工厂绝大部分电气一、二次设备运行与维护的内容，包括目前已广泛用于工厂电气专业方面的新技术及方法，是提高读者电气专业技术、技能水平的重要书籍。

书中难免存在不妥和纰漏之处，敬请读者提出批评和指教，编者将不胜感谢！

编者

2016 年 10 月



第一版前言

随着我国电力工业迅速发展，工厂、企业电气自动化程度越来越高，电气设备随之不断的改进、更新，但由于电气设备在运行过程中的故障或事故时有发生，一些维护方面的误判断、误处理，使得可以避免的事故没能防止或使事故扩大，造成不应有的损失，直接影响到企业的经济效益。因此，在生产过程中，如何加强对工厂、企业电气设备的运行与维护、正确果断处理设备的异常现象，并防止同类事故的再次发生，确保电气生产设备长期稳定运行，为企业创造最大的经济效益，是每一个电气技术人员所需要做的工作和考虑的问题。

本书结合目前我国工厂、企业的实际情况，详细介绍了工厂、企业常见的高压断路器、隔离开关、负荷开关、熔断器、变压器、互感器、绝缘子、母线、电力电缆、电力电容器、工厂防雷保护装置、工厂常用二次回路、工厂继电保护装置、常用低压电器、直流系统等运行与维护的实用知识，以及上述各种设备装置的运行与维护注意事项，常见故障的原因及其处理方法、预防性试验的方法及试验结果的分析判断，并介绍了电气设备的安全管理及防火与防爆。

本书力求内容完整，通俗易懂，并在编写过程中，参考、查阅了大量的文献资料，从中吸取了多年从事电气设备运行与维护的技术人员的经验和成果，在此向参考文献中所示的所有作者表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，本书难免存在缺点和错误，敬请读者提出批评和指教，编者将不胜感谢！

编 者

2008年10月



目 录

前言

第一版前言

第一章 电力系统及工厂电气设备概述	1
第一节 电力系统概述	1
第二节 工厂电气设备概述	5
第二章 高压开关电器的运行与维护	7
第一节 电弧现象及电弧的熄灭方法	7
第二节 高压断路器的运行与维护	9
第三节 高压隔离开关、负荷开关和高压熔断器运行与维护	29
第三章 电力变压器的运行与维护	41
第一节 变压器的运行、操作管理	41
第二节 变压器常见故障的原因及处理方法	49
第三节 变压器检修的工艺及质量要求	67
第四节 变压器的试验及其结果分析与判断	88
第四章 电力互感器与电力电容器的运行与维护	97
第一节 电流互感器及电压互感器的接线方式	97
第二节 电流互感器及电压互感器的运行与维护	102
第三节 电流互感器与电压互感器的试验及其结果分析与判断	114
第四节 电力电容器的运行与维护	118
第五章 高低压异步电动机的运行与维护	130
第一节 高、低压异步电动机运行技术要求	130
第二节 高低压异步电动机常见故障、原因及其处理	133
第三节 高低压异步电动机试验方法及其结果分析与判断	148
第六章 直流系统及常用低压电器的运行与维护	155
第一节 操作电源及蓄电池	155

第二节	蓄电池的运行方式及维护	160
第三节	常用低压电器的运行与维护	162
第七章	工厂继电保护及其整定计算	172
第一节	工厂继电保护的基本任务与要求	172
第二节	工厂常规继电保护	175
第三节	工厂继电保护整定计算	192
第四节	工厂继电保护整定计算算例	215
第八章	工厂常用二次回路的运行与维护	228
第一节	工厂二次回路基本电路图	228
第二节	工厂二次回路运行与维护注意事项	233
第三节	工厂高压断路器控制回路和信号回路	240
第四节	工厂常用电测仪表运行与维护	248
第五节	工厂自动控制回路典型故障分析与处理	260
第六节	工厂继电保护、计量回路典型故障分析与处理	295
第九章	变频器的运行与维护	318
第一节	变频调速现状与其控制技术	318
第二节	变频器的类型及特点	328
第三节	通用变频器的运行与维护	333
第十章	PLC 的运行与维护	347
第一节	PLC 的基本功能与结构	347
第二节	PLC 的日常运行与维护	352
第三节	PLC 故障分析与处理	355
第十一章	工厂节约用电管理	365
第一节	工厂节约用电的措施	365
第二节	工厂用电设备的能效管理	368
第三节	工厂用电设备的经济运行	387
第十二章	电气设备的安全管理及防火与防爆	398
第一节	电气设备的安全管理	398
第二节	用电事故的调查和管理	405
第三节	电气装置的防火与防爆	408
参考文献		422



电力系统及工厂电气设备概述

第一节 电力系统概述

一、电力系统的构成

现代工业及整个社会生活中所应用的电力，绝大部分是由发电厂发出来的。电力从生产到供给用户应用，通常都要经过发电、输电、变电、配电、用电等五个环节。电力从生产到应用的全过程，客观上就形成了电力系统。严格来说，由发电厂的发电部分、输配电线路、变配电系统及用户的各种用电设备组成的整体称为电力系统，常简称系统，其示意图如图 1-1 所示。

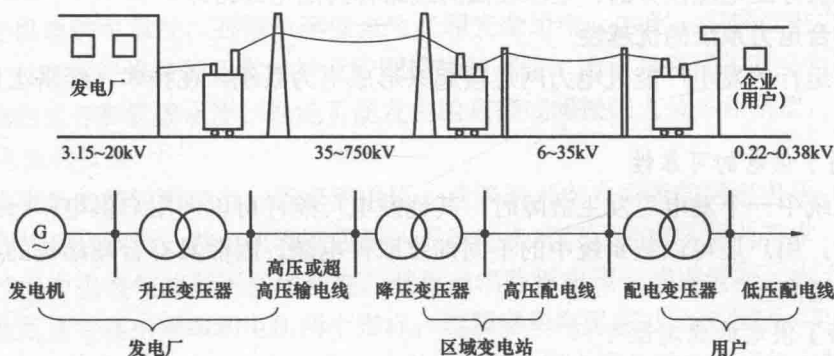


图 1-1 电力系统示意图

发电厂是电力系统的中心环节，它是将其他形式的一次能源转变成电能的一种特殊工厂。按原动机的类别分为火力发电厂、水力发电站、潮汐发电站、风力发电站和核能发电厂等，此外还有地热发电、太阳能发电和沼气发电等。按发电厂的规模和供电范围又可分为区域性发电厂、地方发电厂和自备专用发电厂等。

火力发电厂利用煤、石油、天然气等燃料的热能将锅炉中的水变成高温高压蒸汽，推动汽轮机，带动发电机发电。

水力发电站利用河流的水能，推动水轮机，带动发电机发电。

潮汐发电站与水力发电站类似，通过出水库在涨潮时将海水储存在水库内，以势能的形式保存；在落潮时放出海水，利用高、低潮位之间的落差，推动水轮机旋转，带动发电机发电。

风力发电站利用风力带动风车叶片旋转，再透过增速机将旋转的速度提升，来促使发电机发电。

核能发电厂利用核燃料在反应堆中产生的热能，将汽锅中的水变为高温高压蒸汽，推动汽轮机组发电。

在电力系统中，各级电压的电力线路及其所联系的变电所称为电力网，它担负着输、变、配电的任务。电力网按供电范围和电压等级分为地方电力网和区域电力网。地方电力网一般电压等级为 110kV 及以下的电网。区域电力网供电范围广，电压一般为 220kV 及以上。电力网按其作用，分为输电网和配电网。输电网是以输电为目的，采用高压或超高压将发电厂、变电所或变电所之间连接起来的送电网络。而直接将电能送到用户去的网络称为配电网或配电系统，它是以配电为目的。配电网一般又分为高压配电网（30~110kV）、中压配电网（6、10kV）和低压配电网（0.22、0.38kV）。

变电站是电力网的重要组成部分，是汇集电能、升降电压和分配电力的场所，是联系发电厂和用户的中间环节。变电站有升压和降压之分。升压变电站通常是发电厂的升压部分，紧靠发电厂；降压变电站通常远离发电厂而靠近负荷中心。根据变电站在电力网结构中所处的地位和供电的范围分为区域变电站、地方变电站和终端变电站等。

电力线路也是电力网的重要组成部分，它担负着输送电能和分配电能的任务。由电源向电力负荷中心输送电能的线路，称为输电线路或送电线路，其电压等级一般在 35kV 及以上；主要担负分配电能任务的、电压较低的线路称为配电线路。

二、联合电力系统的优越性

把各个运行的发电厂能过电力网连接起来形成电力系统，在技术、经济上的主要优点如下：

1. 提高了供电的可靠性

电力系统中一个发电厂发生故障时，其他发电厂照样可以向用户供电；一条输电线路发生故障时，用户还可以从系统中的不同部位取得电源。因而具有合理结构的电力系统的可靠性大为增高。

2. 提高了供电的稳定性

电力系统容量较大，即使有较大的冲击负荷，也不会造成电压和频率的明显变化。小容量电力系统或孤立运行的系统则不同，较大的冲击负荷很容易引起电压和频率波动，影响电能的质量。严重的甚至将系统冲垮，即系统或机组间解裂，造成整体供电中断。

3. 提高了发电的经济性

（1）充分利用动力资源。如果没有电力系统，很多能源就难以充分利用。在电力系统中可实现水电、火电之间的相互调度，丰水季节可多发水电，少发火电，节约燃料；枯水期则多发火电以补充水电。其他如具有不同调节性能和特性的水电之间以及风力、潮汐、太阳能和核电站等，只有与较大的系统相接，才能相互配合，实现经济调度，达到合理利用资源、提高经济效益的目的。

（2）提高发电的平均效率和其他经济指标。在大的电力系统内采用大容量的机组，获得较高的发电效率、较低的相对投资和较低的运行维护费用。此外，在电力系统中，在各发电厂之间可以合理的分配负荷，可以让效率高的机组多发电，在提高平均发电效率上实

现经济调度。

(3) 减小总装机容量。电力系统中的综合最大负荷常小于各发电厂单独供电时各地区最大负荷的总和,这是因为不同地区间负荷性质的差别、负荷的东西时差和南北季节差等。通过电力网将多个发电厂连接起来后有利于错开各地区的高峰负荷,导致减小系统中的综合最大负荷,从而减小了总装机容量。

三、对电力系统运行的基本要求

由于电能不能贮存,电力流程与其他产品的流程相比具有不同的特点:电能的生产、分配、输送、再分配直至消耗必须在同一时刻完成,这就是电力流程的连续性。根据这一特性,要使电力流程的最后环节——电能的消费得以维持,就必须随时保证电力流程的消费前环节不致中断。又由于电能的无比优越性,它已成为现代工业、农业生产和人民日常生活不可缺少的二次能源,是整个国民经济的“粮食”,对国民经济的发展起着强烈的制约作用;还由于社会经济的不断发展,电能的消费量越来越大,使电力工业成为巨大的经济部门,在国民经济中占有相当大比重。

基于电能的上述特点和电力工业在国民经济中的作用和地位,电力系统应满足以下基本要求:

1. 保证供电的安全可靠

电力系统因故停电会给工农业生产和人民生活带来不同程度的损失,可能使产量下降、产品报废、生产计划不能完成、生活受到干扰,严重的可导致设备和人身伤亡。

为了保证供电的可靠性,必须做到安全生产和安全用电。为此,应保证电力系统中各元件的质量,及时做好设备的正常维护及定期检修与试验;加强和完善各项安全技术措施,提高电力系统的运行和管理水平,杜绝可能发生的直接或间接的人员责任事故。

2. 保证电能的质量

衡量电能质量的指标有波形、频率和电压。通常要求电力系统的供电电压(或电流)的波形为严格的正弦波形,发电机和变压器的设计制造部门已考虑了这一要求,但在电能输送和分配过程中也要使波形不发生畸变,避免或消除再出现一些谐波源。电力系统运行中所说的电能质量主要指频率和电压两个指标。当频率和电压超过允许范围(见表 1-1 和表 1-2)时,可能造成企业减产,产出次品、废品,影响用电设备的安全运行,甚至引起人身设备事故。频率主要取决于电力系统中有功功率的平衡,电压则取决于无功功率的平衡,可通过调频、调压和无功补偿等措施来保证频率和电压的稳定。

表 1-1

我国电网频率允许偏差值

运 行 情 况		允许频率偏差值 (Hz)
正常运行	中小容量电网	± 0.5
	大容量电网	± 0.2
事故运行	30min 以内	± 1
	15min 以内	± 1.5
	绝对不允许	-4

表 1-2 我国对用户供电电压的允许变化范围

线路额定电压 U_e	正常运行电压允许变化范围
35kV 及以上	$\pm 5\% U_e$
10kV 及以下	$\pm 7\% U_e$
低压照明及农业用电	$(+5\% \sim -10\%) U_e$

3. 完成足够的发电功率和发电量

因为电力对国民经济的强烈制约作用，电力必须先行。故电力系统要超前搞好规划设计，不断增加投入；同时也要充分挖掘设备潜力，最大限度地向用户提供需要的电力。

4. 保证电力系统运行的经济性

要使电能在生产、输送和分配过程中效率高、损耗小、成本低，必须降低一次能源消耗率（每千瓦·时的煤耗、油耗或水耗）、厂用电率和线损率，使这三个指标达到最小，即经济运行。电能成本的降低不仅节省了能源，还将有助于用户生产成本的降低，给整个国民经济带来效益。要实现经济运行，除进行合理规划设计之外，还需对整个电力系统实施最佳经济调度。

四、电力系统中性点运行方式

电力系统中性点实际上指发电机和变压器的中性点。我国电力系统目前采用的中性点运行方式主要有三种，即中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和中性点直接接地。采用前两种中性点运行方式的系统称为小接地电流系统；采用后一种中性点运行方式的系统称为大接地电流系统。中性点运行方式不同对电力系统的可靠性、设备的绝缘，通信的干扰以及继电保护等均有影响。

1. 中性点不接地（绝缘）系统

DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定，3~10kV 不直接连接发电机的系统和 35、66kV 系统，当达到以下条件时，应采用不接地方式。

（1）3~10kV 钢筋混凝土或金属杆塔的架空线路构成的系统和所有 35、66kV 系统，单相接地故障电容电流不超过 10A 时。

（2）3~10kV 非钢筋混凝土或非金属杆塔的架空线路构成的系统，电压为 3kV 和 6kV，单相接地故障电容电流不超过 30A 时；电压为 10kV，单相接地故障电容电流不超过 20A 时。

（3）3~10kV 电缆线路构成的系统，单相接地故障电容电流不超过 30A 时。

中性点不接地系统发生单相金属性接地故障时，有以下特点：

（1）故障相对地电压为零，非故障相对地电压升高为线电压。因此在这种系统中相对地的绝缘水平应按线电压来考虑。

（2）线电压不变，三相系统仍然对称，可以继续运行。但为防止事故扩大，应尽快消除接地点，最多不超过 2h。

（3）接地点通过的容性电流为正常一相对地电容电流的 3 倍，容易在接地点形成持续性电弧（当电容电流大于 30A 时）或间歇性电弧（当电容电流大于 10A 小于 30A 时）。持

续性电弧可能烧坏设备,引发相间短路扩大事故;间歇性电弧将导致相与地之间产生弧光过电压,其值可达 2.5~3 倍相电压峰值,危及设备绝缘。一般要求发电机内部电容电流小于 5A,6~10kV 电容电流小于 30A,35kV 及以上电容电流小于 10A。

2. 中性点经消弧线圈接地系统

在中性点不接地系统中,当接地点产生的电弧不能自行熄灭时,可在中性点与大地之间接入消弧线圈来熄灭电弧,即中性点经消弧线圈接地系统。

(1) 中性点经消弧线圈接地系统正常运行时,在电源对称时,三相对地电容值相等,中性点对地电位为零,消弧线圈中无电流通过,流过地中的电容电流为零。

(2) 中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地时的电流、电压变化规律与中性点不接地时一样,仍可继续运行,但在 2h 内要消除故障,以保障系统安全运行。

3. 中性点直接接地系统

将系统的中性点直接接地,当发生一相接地时,中性点电位被接地体所固定,基本上仍保持地电位,必须立即切除故障线路,以免短路电流使导体发热、危及绝缘、烧坏电气设备和避免在接地点产生持续电弧。

中性点直接接地系统有如下优点:

(1) 不需任何消弧设备,减少设备投资,运行维护也较简单。

(2) 发生单相接地时,由于中性点电位和非故障相对地电压不升高,主绝缘水平可以以相电压为基准,降低了电网造价。电网电压越高,其经济效益越显著。

(3) 彻底解决了接地点的接地电弧引起过电压的问题。

这种运行方式也存在缺点:① 一相接地故障后产生强大的单相磁场,干扰邻近的通信线路;② 由于单相短路电流大,引起系统电压降低,以致影响系统稳定,在大容量电力系统中,为了限制单相短路电流,只能将系统中的一部分变压器中性点直接接地,或在中性点加装电抗器;③ 由于单相短路故障必须迅速切除,导致用户供电中断,为了克服这一缺点,提高供电的可靠性,在中性点直接接地系统的线路上需要装设自动重合闸装置,即当发生单相接地故障时,继电保护动作使断路器跳闸,经过一定延时后,又在自动重合闸装置的作用下断路器合闸,如果单相接地为永久性的,则继电保护再次加速使断路器跳闸,对极重要用户,为保证不中断供电应装设备用电源。

第二节 工厂电气设备概述

工厂企业电气设备主要包括一次设备和二次设备。一次设备是指生产、输送、分配电能的设备,将一次设备按设计或现场要求连接起来的电路称为一次接线或主回路;二次设备是指对一次设备或电力拖动的生产装置进行测量、控制、保证、监视的电气装置,二次设备及相关的连接回路称为二次回路。

一、工厂一次设备

1. 能量转换设备

发电机、变压器、电动机、蓄电池等属于能量转换设备。其中变压器的作用是将电力系统输送过来的电能电压等级转换成工厂实际需要的电压等级;发电机是将其其他形式的能

量转换成电能，供给工厂电力拖动的生产装置；电动机是将电能转换成生产机械装置需要的能量。

2. 开关设备

开关设备用于电路的接通或断开。当电路中通过电流，尤其通过很大的短路电流时，要开断电路很不容易，需要具备足够的灭弧能力。按作用及结构特点，开关设备分为以下几种：

（1）断路器。不仅可切断和闭合正常的负荷电流，也能切断和闭合短路电流。它是作用最重要、构造最复杂、功能最完善的开关设备。

（2）熔断器。不能接通和断开负荷电流，它专用于断开故障电流，切除故障回路。

（3）负荷开关。允许带负荷接通和断开电路，但其灭弧能力有限，不足以断开短路电流。将负荷开关和熔断器串联在电路中便大体上相当于断路器的功能。

（4）隔离开关。主要用于设备或电路检修时隔离电源，形成一个可见的、足够大的空气间距。

隔离开关因没有灭弧能力，不能断开负荷电流。若在负荷电流下错误地断开隔离开关，称为带负荷拉闸，会引起电弧短路，是一种严重的误操作，要避免。通常按功能可将开关电器分为保护电器、操作电器和隔离电器三类。熔断器属于保护电器；隔离开关是隔离电器；负荷开关为操作电器，有时也兼作隔离电器；断路器则既是保护电器，又是操作电器。

3. 载流导体

载流导体有母线、绝缘子和电力电缆等，用于电气设备或装置间的连接，通过强电流传递功率。母线是裸导体，需要用绝缘子支持和绝缘；电缆是绝缘导体，并具有密封的封包层以保护绝缘层，外面还铠装或塑料护套以保护封包。

4. 互感器

互感器分为电压互感器和电流互感器等，分别将一次侧的高电压或大电流按变比转变为二次侧的低电压或小电流，以用于二次回路的测量和保护。

5. 避雷器

避雷器主要用于主要电气设备的过电压保护。

二、工厂二次设备

各种电测仪表、继电保护装置、自动控制设备（包括控制装置及自动化元件）、信号、计算机监控系统、通信系统、视频监控系统等都属于二次设备。二次设备对保证一次电气设备安全可靠运行起到十分重要的作用，是工厂实现自动化生产、提高产品质量、提高生产效率、提高安全生产的主要保障。



高压开关电器的运行与维护

第一节 电弧现象及电弧的熄灭方法

电气设备、线路在发生短路时，短路点处会产生强烈的电弧；当开关电器切断有电流的电路时，只要触头间的电压高于 10V、电流大于 80mA，在触头间也会产生电弧。电弧就是电流流过气体介质的现象。开关电器刚刚分离后，在触头间发生电弧，就是电流从触头间流过，电路仍处于通路状态，只有当电弧彻底熄灭后，电路才真正断开。

电弧的产生条件很低，因此是电路断开过程中不可避免的现象。在正、负两个极间燃烧的电弧可分成三部分，如图 2-1 所示。靠近负极一个极小的距离称为阴极区，靠近正极附近极小的距离称为阳极区，阴极区和阳极区之间叫弧柱区，其尺寸随电弧的长短而变。弧柱区发光强，温度很高，弧柱的温度在 6000℃ 以上；而阴极区与阳极区由于受到电极传导散热等原因的影响，温度较低，但在阴极区与阳极区的个别点上温度特别高，特别明亮，叫作阴极斑点与阳极斑点。此外，电弧是正在导电的气体，质量小、容易变形、能迅速移动。如果在开关电器内电弧长久不熄灭，就会造成烧坏触头和触头附近绝缘的后果，并延长了断路时间，甚至使油断路器内的油不断汽化，压力不断增加，引起爆炸。我们研究电弧的目的，在于了解电弧的形成过程、特性和熄灭电弧的方法。

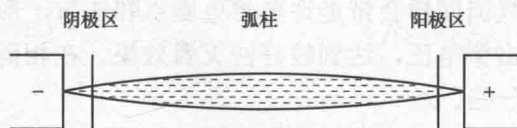


图 2-1 电弧示意图

一、电弧的形成

电弧是气体放电的现象，气体在正常条件下是绝缘介质，虽然气体的原子内也有电子存在，但这些电子受原子核中正电荷的吸引，只能在围绕原子核的轨道上运动，成为束缚电子，不能起导电作用。要导电必须有大量的带电粒子作定向运动，而带电粒子主要是自由电子。

自由电子主要由热电子发射和强电场发射产生。当开关电器的触头分开时，触头间的接触压力及接触面积逐渐减小，接触电阻增大，触头分离到最后只剩下几处点接触时，电流流过会使这些点急剧发热，温度升高而发射电子，即热电子发射；金属内部的自由电子在强大电场力的作用下被拉出来，称为强电场发射，当开关电器的动静触头刚分开、距离极小时，即使在低压电路中，触头间的电场强度 $E=U/d$ 仍可达到极大的数值，电场强度超过 10^5V/cm 时，就有显著的强电场发射现象。

在电场的作用下,触头间的自由电子向着阳极加速运动,能量逐渐增加,并在运动的过程中不断地与其他中性粒子(原子或分子)发生碰撞。若运动着的自由电子具有足够大的动能时,则能从中性粒子中打出一个或几个电子,使中性粒子游离,形成自由电子和离子,这种现象称为气体的碰撞游离,又叫电场游离。新形成的自由电子也以高速向阳极运动,当碰撞其他中性粒子,又将产生碰撞游离。这样连续发生碰撞,使介质中带电粒子大量增加,弧隙中的电导逐渐增大,当碰撞游离达到一定强度,带电粒子累积到一定数量时,介质的导电性质发生改变,由绝缘体变成了导体,在外加电压的作用下,电流流过触头间的间隙,发生刺眼的白光,产生电弧,这种现象称为介质的击穿,使触头间介质击穿的外加电压,称为破坏性放电电压。

二、交流电弧的熄灭方法

根据电弧中物理过程与特性,在高压断路器中,设有专供灭弧用的灭弧室;在低压电器中也设有灭弧栅。在开关电器中,加速电弧熄灭的基本方法主要有以下几种:

1. 利用气体吹动灭弧

按照气体吹动方向的不同,利用气体吹动灭弧方法可分为纵向吹动(简称纵吹)灭弧和横向吹动(简称横吹)灭弧两种,如图 2-2 所示。

采用横向吹动灭弧,使未游离的低温气体穿过弧柱中心区,吹动的气流带走大量的带电质点和热量,形成强迫扩散和降温;横向吹动电弧的另一个作用是拉长电弧,增大电弧周长与截面之比,同样加强复合与扩散。采用横向吹动灭弧明显提高电弧的弧隙击穿电压而使电弧加速熄灭。

采用纵向吹动灭弧,使未游离的低温气体沿着弧柱的表面逐渐向弧柱中心区深入,气流同样会带走许多带电质点和热量,形成强迫扩散和降温,同样明显提高电弧的弧隙击穿电压,达到较好的灭弧效果。在相同的工作条件下,纵吹灭弧较横吹灭弧效果要差一些。

利用气体或油气混合物吹动电弧是加速电弧熄灭的基本方法之一,它广泛地应用于高压断路器之中。吹弧的气体介质可用压缩空气、 SF_6 气体或者用绝缘油、固体有机介质在电弧高温下产生的气体。

2. 采用多断口灭弧

在高压断路器中,将一相触头的断点制造成两个或多个串联的断口。当断路器断开时,多断点同时断开,加速电弧熄灭,该方法称为多断口灭弧,如图 2-3 所示。当一相断路器触头选用 n 个断点时,在断路过程中形成 n 个电弧相串联的燃弧方式,在外电路条件不变的情况下,加至每个断口上的电压仅为每相为单断口的 $1/n$,显然,采用多断口灭弧是通过降低每个断口的恢复电压达到加速熄弧目的的方法。多断口灭弧适用于加速高压长弧的熄灭。每相断口较多时(如每相断口为 4~6 个),为使每个断口上的恢复电压均匀一致,常在各个断口上并联接入容量相同的高压电容器进行均压(其电容量一般为 1000~2000pF),断口上并联接入均压电容后,一般能保证各个断口的实际电压值与均匀分布电压值之差小于 10%。

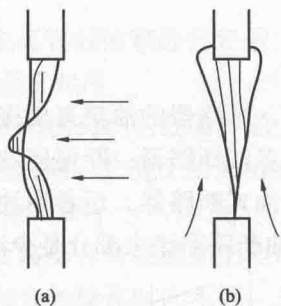


图 2-2 气体吹动灭弧

(a) 横吹灭弧; (b) 纵吹灭弧

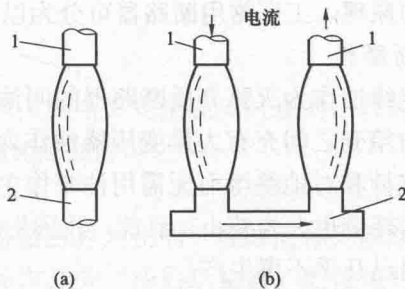


图 2-3 多断口灭弧

(a) 每相单断口; (b) 每相双断口

1—静触头; 2—动触头

3. 利用电弧与固本介质接触灭弧

当电弧与石英砂、瓷或石棉水泥等耐高温的固体介质接触时，固体介质表面的带电质点使电弧的复合速度大大加快，并能加速降温，这种加速熄弧的方法称为利用电弧与固体介质接触灭弧。该方法主要适用于 10kV 及以下的高压断路器、低压开关和有填料的熔断器之中。

4. 将电弧分为多个串联短电弧灭弧

将电弧分为多个串联短电弧，加速电弧熄灭的方法又称为金属灭弧栅灭弧。利用金属灭弧栅加速熄弧，是低压开关中常用的灭弧方法之一。

利用金属灭弧栅加速熄弧示意图如图 2-4 所示。动、静触头之间产生电弧时，电弧 5 恰好处于金属栅片 2 的下部 [图 2-4 (b) 中的位置 A]。这时弧柱轴线位置与钢质的金属栅片 2 垂直，弧电流在弧柱周围的磁力线图经磁阻最小的路径构成回路，因此电弧在金属栅片的开口处不断上移，直到电弧抵达金属栅片上方 [图 2-4 (b) 中的位置 B] 才停止移动。这样，原有的一个电弧被多个金属栅片分为多个串联的短电弧，弧电流再次经过零值时所有短电弧几乎同时熄灭。电弧暂时熄灭之后，低压外电路再加到每个短电弧的恢复电压远小于近阴极效应所要求的 150~250V 击穿电压。因此，在多个串联短弧形成以后，当弧电流再一次过零值，电弧便会彻底熄灭。

金属栅片是用钢板冲压制成的，为了防止金属栅片腐蚀，在其外表面镀铜。运行中金属栅片与灭弧罩在电弧高温作用下会逐渐损坏，当金属栅片和灭弧罩损伤严重时，要及时更换，否则会影响其开断能力。

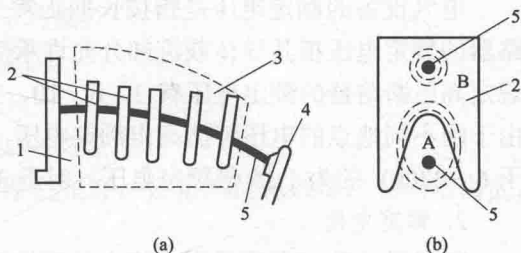


图 2-4 利用金属灭弧灭弧

(a) 灭弧栅示意图; (b) 灭弧栅片

1—静触头; 2—金属栅片; 3—灭弧罩;

4—动触头; 5—电弧

第二节 高压断路器的运行与维护

高压断路器在电路正常工作时用来接通和开断负载电流（起控制作用），在发生短路时通过继电保护装置的作用将故障线路的短路电流开断（起保护作用）。根据所采用的灭弧介

质及其作用原理，工厂常用断路器可分为以下几种：

1. 油断路器

采用绝缘油作为灭弧介质断路器的叫油断路器。其中，断路器的油箱直接接地，并在带电部分与箱壳之间充有大量变压器油作为主绝缘的，叫多油断路器；断路器油箱带电，并用绝缘支持和对地绝缘而无需油来作主绝缘的叫作少油式断路器。后者用油量少，体积和钢材消耗量也大为减小。目前，我国生产的多种高压油断路器绝大部分是少油断路器，多油断路器已几乎不再生产。

2. SF₆ 断路器

采用具有优良灭弧性能和绝缘性能的 SF₆ 气体作灭弧介质的断路器，称为 SF₆ 断路器。这是一种新型断路器，具有开断能力强、快速、检修周期长和体积小等到优点。一般用于 110kV 及以上电压等级，多与配电装置中的其他电器如互感器、母线等一起构成封闭式组合电器，可大量节省布置场地和建筑面积。

3. 真空断路器

利用真空的高介电强度来灭弧的断路器，称为真空断路器。它具有灭弧速度快、寿命长、检修周期长、体积小等优点，目前在 10、35kV 配电装置中得到广泛应用。

一、高压断路器的基本技术参数

1. 额定电压

电气设备的额定电压是指按长期正常工作时具有最大经济效益所规定的电压。高压断路器的额定电压指其导体载流部分允许承受的（线）电压，GB/T 156—2007《标准电压》规定高压断路器的额定电压有 3、6、10、35、60、110、220、330、500、750kV 等各级。由于网不同地点的电压可能高出额定电压 10% 左右，故制造厂家规定断路器的最高电压对于 6~220kV 的为 1.15 倍额定电压，对于 330kV 及以上为 1.1 倍额定电压。

2. 额定电流

断路器的额定电流是指在规定的环境下，当断路器的绝缘和载流部分不超过其长期工作的最高允许温度时，断路器允许通过的最大电流。

GB/T 156—2007 规定，断路器的额定电流有 200、400、630、1000、1600、2000、2500、4000、5000、63 000、8000、10 000、12 500、16 000、20 000A 各级。

3. 开断电流

断路器的开断电流是指在额定电压下能可靠开断的最大短路电流的有效值，它表征断路器的开断能力。由于开断电流与电压有关，当断路器降低电压等级使用时（如 10kV 的断路用于 3~6kV 电网）时，具有相应增大的开断电流。GB/T 156—2007 规定额定开断电流有 1.6、3.15、6.3、8、10、12.5、16、20、25、31.5、40、50、63、80、100kA 等级。断路器的开断能力也可用开断容量来表述。

4. 动稳定电流

断路器的动稳定电流表明断路器在冲击作用下承受电动力的能力，该值不会小于开断电流的 2.55 倍。

5. 热稳定电流

断路器的热稳定电流表明断路器承受短路电流热效应的能力，用通电时间（一般取 4s）