

900605

高等学校教材

高压电器

(修订本)

华中理工大学 刘绍峻 编



GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社



2·2

高等学校教材

高压电器

(修订本)

华中理工大学 刘绍峻 编



机械工业出版社

本书是高等学校电机专业的专业教材，内容主要包括：电力系统中开关的闭合与开断，高压断路器的工作原理与基本技术参数，油断路器、压缩空气断路器、SF₆断路器、真空断路器等的工作原理、性能与结构，高压断路器的机构与机械性能，高压断路器的开断与闭合能力试验，其它高压开关电器、SF₆全封闭组合电器。

本书可作为高等工业学校电机专业、高压技术及设备专业、电力工程专业及其它有关专业的教材和教学参考书；也可供厂矿、电力系统、研究单位中从事高压电器设计、运行、试验、维护的工程技术人员参考。

高压电器

(修订本)

华中理工大学 刘绍岐 编

*

责任编辑：刘家琼 责任校对：刘思昭

责任印制：卢子洋 版式设计：张世琴

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市德县门印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张14·字数 320千字

1982年1月北京第一版

1989年10月北京第二版·1989年10月北京第五次印刷

印数 17,901—19,200·定价：2.85元

*

ISBN 7-111-01646-7/TM·209 (课)

前 言

本书是根据 1983 年 4 月在杭州召开的电器专业教材编审小组制订的《高压电器》教学大纲,并参照 1984 年 12 月在武汉召开的对 1982 年机械工业出版社出版高等学校试用教材《高压电器》的评议意见编写的。

和 1982 年出版的试用教材对照,本书作了以下较大的变动:

在系统上,为了加强断路器的机械知识,本书将断路器的各种机构单列为一章。这样加强了对断路器总的机械性能及机构组成部分的讲述,加强了对各类断路器机械性能要求的分析比较。为了加强断路器气吹灭弧方面的知识,加强对不同气体介质灭弧性能的分析比较,将压缩空气断路器与 SF₆ 断路器合并成一章。

在内容上,为了适应国内外新型高压电器的发展需要,删去了静态断路器,限流装置,加米管,爆炸开关,超导开关,互感器,断路器各种特殊切断试验,测量方法与测量装置,敞开式组合电器以及防爆配电装置等部分;适当精简了油断路器方面的内容;着重加强了对 SF₆ 断路器、真空断路器以及 SF₆ 全封闭组合电器方面的讲述。

本书共分十章,基本内容包括:电力系统中开关的闭合与开断,断路器的主要技术参数与开断、闭合能力试验,各种高压断路器(油断路器、压缩空气断路器、SF₆ 断路器、真空断路器)的工作原理与结构,断路器的机构与机械性能。此外还介绍了其它高压开关电器(隔离开关、负荷开关、熔断器、同步断路器),并较全面地讲述了 SF₆ 全封闭组合电器(GIS)。

本书可作为高等工业学校电器专业、高压技术及设备专业、电力工程专业及其它有关专业的教材或教学参考书。也可供工矿、电力系统、研究单位中从事高压电器设计、运行、试验、维护的工程技术人员参考。

本书由上海交通大学蒋公惠教授主审,蒋教授并邀请西安交通大学王季梅教授、清华大学张节容教授、沈阳高压开关厂罗永树工程师参加了审核。在教材编写和审阅过程中,他们对教材的编写和修改提出了宝贵的意见。编者在此深表感谢。

编 者
1988 年 8 月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 高压电器在电力系统中的作用	1
§ 1-2 高压电器的种类及其特点	2
§ 1-3 高压电器的生产现状与发展方向	4
参考书目	5
第二章 电力系统中开关的闭合与开断	6
§ 2-1 电力系统的短路故障与高压断路器在系统短路下的闭合	6
§ 2-2 断路器开断短路电流的物理过程——触头间的暂态恢复电压	7
§ 2-3 影响断路器开断能力的因素	11
§ 2-4 感性小电流（电感负载）的开断与闭合——分、合空载变压器、电抗器与电动机	13
§ 2-5 闭合电容器组与空载长线	15
§ 2-6 容性电流的开断——开断电容器组、空载架空线与电缆长线	19
§ 2-7 其它开断	22
§ 2-8 断路器断口间并联电阻的作用	26
参考书目	30
第三章 高压断路器	31
§ 3-1 高压断路器的工作原理	31
§ 3-2 高压断路器的基本技术参数	33
§ 3-3 高压断路器的种类和用途	37
参考书目	40
第四章 油断路器	41
§ 4-1 电弧在油中的熄灭过程与油吹灭弧室	41
§ 4-2 油自能灭弧室的工作性能分析	44
§ 4-3 油断路器的典型结构	49
§ 4-4 影响油断路器开断能力的二次因素	53
§ 4-5 220kV 及其以上的超高压少油断路器	55
参考书目	59
第五章 压缩空气断路器与 SF ₆ （六氟化硫）断路器	60
§ 5-1 压缩空气与 SF ₆ 的物理化学性质	60
§ 5-2 管道中的气流特性	62
§ 5-3 静止空气与 SF ₆ 中的电弧性质	68
§ 5-4 压缩空气与 SF ₆ 气体纵吹灭弧时的电弧弧柱特性	71
§ 5-5 单向纵吹时，电弧对气流速度与流量的影响	77
§ 5-6 单向纵吹灭弧室的结构参数对开断能力的影响	80
§ 5-7 压缩空气断路器	86
§ 5-8 气吹式 SF ₆ 断路器	89
§ 5-9 旋弧式与自能灭弧式 SF ₆ 断路器	94

§ 5-10 SF ₆ 断路器的发展前景	96
参考书目	97
第六章 真空断路器	98
§ 6-1 真空的绝缘击穿机理与绝缘性能	98
§ 6-2 真空电弧的类型及其性能	101
§ 6-3 真空灭弧的基本原理与灭弧室结构	104
§ 6-4 真空断路器的截流现象与截流过电压	107
§ 6-5 真空断路器的触头结构与触头材料	108
§ 6-6 真空断路器的总体结构和性能特点	113
§ 6-7 真空断路器在使用和发展中的几个问题	114
参考书目	116
第七章 高压断路器的机构与机械性能	117
§ 7-1 高压断路器的传动机构	117
§ 7-2 机械传动的机构元件及其性能	119
§ 7-3 机械传动系统的运动方程式	122
§ 7-4 机械传动时, 断路器触头的运动速度、动作时间和机械振动	124
§ 7-5 高速机构的缓冲与缓冲装置	126
§ 7-6 液压传动中的液压元件	131
§ 7-7 液压传动时断路器动作速度的计算	134
§ 7-8 气动机构元件	137
§ 7-9 高压断路器的操动机构	139
§ 7-10 断路器的机械特性及其与操动机构特性的配合	145
§ 7-11 脱扣机构及其性能分析	153
参考书目	155
第八章 高压断路器的开断与闭合能力试验	156
§ 8-1 试验条件的规定	156
§ 8-2 试验数据的测量与试验结果的处理	159
§ 8-3 开断能力试验的等价性	162
§ 8-4 交流断路器开断能力的直接试验法	165
§ 8-5 合成回路试验法	168
§ 8-6 单元试验法	171
§ 8-7 失步开断闭合试验	172
参考书目	172
第九章 其它高压开关电器	173
§ 9-1 熔断器	173
§ 9-2 隔离开关与接地开关	176
§ 9-3 负荷开关	178
§ 9-4 同步断路器与同步合闸开关	179
§ 9-5 直流断路器	181
参考书目	183
第十章 SF₆ 全封闭组合电器 (GIS)	184
§ 10-1 SF ₆ 全封闭组合电器的特点及其发展前景	184

§ 10-2 SF ₆ 气体的绝缘性能	184
§ 10-3 影响 SF ₆ 绝缘性能的几个主要因素	190
§ 10-4 SF ₆ 全封闭组合电器的结构与组合元件	193
§ 10-5 SF ₆ 全封闭组合电器内的局部放电与电弧接地	195
§ 10-6 有关 SF ₆ 全封闭组合电器设计制造的问题	198
§ 10-7 SF ₆ 全封闭组合电器中隔离开关的问题	200
§ 10-8 SF ₆ 全封闭组合电器的可靠性与安全运行	202
§ 10-9 SF ₆ 全封闭组合电器的试验与维护	203
参考书目	206
习题	207

第一章 绪 论

§ 1-1 高压电器在电力系统中的作用

为了充分利用天然资源，减少燃料运输，降低电能生产成本，常将发电厂建立在天然能源的附近，再将大量的电能输送到集中用电的区域，然后分配到各类用户。这样就产生了远距离高压输电和配电的问题。

进一步从经济性和用电连续性考虑，常将相距比较远的多个发电厂或邻近的独立电网互相联结起来并列运行，这样就出现了复杂的电力系统。

高压电力系统的出现，带来了很多技术问题和理论问题。分叙如下：

一、高电压的绝缘问题

随着电力系统工作电压的提高，有关线路与电气设备的绝缘问题越来越突出。电力系统正常运行时，电气设备长期处在正常工作电压也就是额定电压之下。按照规定，电气设备要求能耐受的最高工作电压一般约为额定电压的 1.15 倍。又由于大气中雷电的作用，或者由于系统中参数的突然变化，常会引起电力系统中电压短时的升高。这类短时升高的电压称为过电压。电气设备的绝缘能力，除了要耐受正常工频最高工作电压外，还要求能耐受这些短时的过电压。

电力系统中线路与设备的绝缘能力，不应仅从系统中可能出现的最高电压值来考虑，这样作是不经济的。因此，在电力系统中，允许出现超过线路与设备绝缘能力的过电压，但要采用限制过电压、保护线路与设备绝缘的措施。

二、额定负载电流的发热问题

线路与高压电器的主导电回路，要长期通过额定工作电流。这种电流通过时，由于导电回路中存在导体本身的电阻和导体间接触处的接触电阻，会产生电能损耗。这种损耗和线路及电器中存在的铁磁损耗和介质损耗都是热源，要引起线路和电器的温度升高。电器的工作电流不能超过规定的数值，否则温度过高，就要导致导体与电器性能的破坏。因此在电力系统中除了规定导电回路的最大通流能力外，还采用防止过电流负载的措施。

三、电力系统的故障，特别是短路故障的问题

电力系统在运行中可能发生各种类型的故障，其中最严重的是短路故障。发生短路后，电流可到几万甚至几十万安培，由于发热及电动力等效应，可能使电气设备遭到严重的破坏。在短路期间，电力系统的电压降低，破坏并联运行的工作稳定性，以致造成停电事故。

短路故障给系统带来的危害是相当大的。短路发生后，要求迅速排除短路故障。这就要求有保护及快速开断短路电流的设备。

电力系统中，80~90%的短路故障都是暂时性的（如雷击、鸟害），它们在短路电流开断后能自行消除。在开断短路电流之后，如果采用自动重合闸措施，使线路再行接

通，可以提高电力系统工作的连续性和可靠性。

四、电力系统运行稳定性的问题

电力系统中从电能的生产、输送、分配到转换为其它形式的能量，全部过程实际上是在同一瞬间实现的。换句话说，电能一般是不能储存的，在任何瞬间，都要求输入和输出平衡。一旦发生不平衡，电力系统中就产生一种扰动，这就是暂态过程。如果在暂态过程结束后，能够重新建立起一个新的平衡，我们就称这个系统是稳定的。否则就是不稳定的。

引起电力系统不平衡的原因很多，如负载的变化、输配电线路的切换、短路故障的发生以及故障切除的快慢等等。短路故障可以严重破坏系统的平衡，使并联运行的系统解列，造成大面积的停电。

在提高电力系统运行稳定性的措施中，采用快速开断是重要的方法之一。此外，采用快速的自动重合闸，对提高电力系统的稳定性，提高电网的输送容量也有重大的意义。

§ 1-2 高压电器的种类及其特点

高压电器一般指额定电压在 3kV 以上的电器。高压电器在电力系统中的应用可以从图 1-1 得到说明。如图，有两台发电机 G_1 、 G_2 ，并联在 10kV 的母线上，通过升压变压器 TM_1 、 TM_2 升压后与 220 kV 及 110 kV 的高压母线联结，通过输电线（例如 l_3 ）向远方变电所输电，通过 l_1 、 l_2 、及 l_4 直接用 10kV 向近区供电。用高压断路器 QF_1 、 QF_2 及 QF_3 对线路进行接通及开断的控制，并且用它们来切除系统中发生的短路故障。为了限制短路电流，装有电抗器 L 。电流互感器 TA 及电压互感器 TV_1 、 TV_2 及 TV_3 用来测量电流、电压及负载的大小，并用作继电保护装置动作的信号源。电阻 R 用来限制电压互感器短路时的短路电流，然后由熔断器 FU 将短路电流开断。避雷器 F_1 、 F_2 及 F_3 限制过电压，不使线路及电气设备的绝缘遭受破坏。为了检修方便，在系统中还采用隔离开关 QS_1 、 QS_2 及 QS_3 等。

在图 1-1 所示的电力系统中，发电厂和变电所内都采用分段双母线接线系统。

如上所述，可以归纳高压电器的种类及其特点如下：

一、高压断路器

这是高压电器中最重要的一类电器，它们的功能是在电力系统正常运行和故障情况下开断、闭合各种电流。

高压断路器的最主要功用，是自动地切除电力系统中的短路故障。在高压电力系统中，断路器开断短路电流时，要产生强烈的电弧。电压越高，电流越大，电弧的电弧能越大，越不容易熄灭。

高压断路器也应该能开断负载电流、空载长线的充电电流（容性电流）、空载变压器的激磁电流（感性小电流）等等。断路器在开断容性电流或感性小电流时，容易产生过电压，导致系统绝缘的破坏。

二、隔离开关

隔离开关是电力系统中应用最多的一种高压开关电器。它的主要功用是：

(1) 建立必要的绝缘间隙，保证线路及电气设备修理时人身的安全；

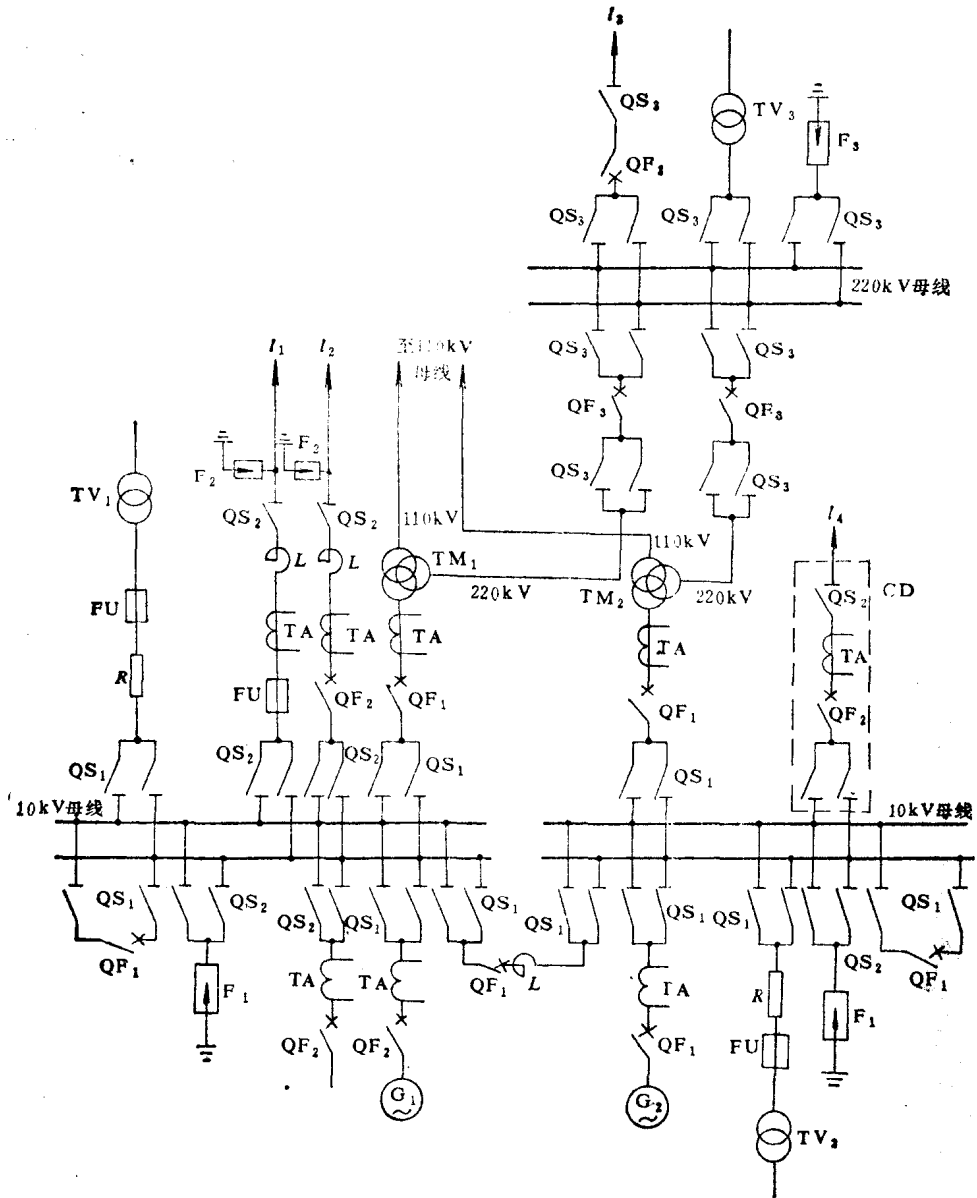


图1-1 电力系统中各种高压电器

G_1 、 G_2 —发电机 TM_1 、 TM_2 —变压器 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 —线路 FU —熔断器 QF_1 、 QF_2 、 QF_3 —断路器 QS_1 、 QS_2 、 QS_3 —隔离开关 F_1 、 F_2 、 F_3 —避雷器 L —电抗器
 R —电阻 TA —电流互感器 TV_1 、 TV_2 、 TV_3 —电压互感器 CD —成套配电装置

(2) 转换线路，增加线路联接的灵活性。

三、熔断器

熔断器是一种使用最早的电器，但到目前为止，仍是一种主要的简易电器。熔断器具有电阻值较大的熔丝或熔体，串联在线路中，电流流过熔丝。在过载电流及短路电流通过时，熔丝因电阻损耗过大、温度上升过高而熔断，因而断开电路。

四、负荷开关

负荷开关是一种只能开断负载电流和一定过载电流的开关电器，没有开断短路电流

的能力。负荷开关的结构较断路器简单，价格较断路器便宜，和熔断器组合使用，在某些地方可以代替断路器。

五、避雷器

避雷器是保护电力系统和电气设备的绝缘，使其不受过电压损坏的电器。

六、电压互感器与电流互感器

用电压、电流互感器可将测量仪表、继电器和自动调整装置接入高压线路，这样可以达到测量安全，使仪表、继电器便于工作；使仪表及继电器的参数规格标准化；当线路发生短路时，保护测量仪表，使其不受或少受大电流的影响。

七、限流电抗器

电抗器的主要功用是限制短路电流，以减轻开关电器的工作。当短路发生后，由于电抗器的使用，可以维持电厂或变电所母线上的电压在一定的水平，这样可以保证没有短路故障的分支路上的用户能继续用电。

八、成套电器

为了安装方便、降低成本、节约电气设备的占地面积并提高供电的可靠性，有时将上述各种电器元件有机地组合成一个整体，成套供应。在这类电器中各组成元件仍保有各自的独立功能。

§ 1-3 高压电器的生产现状与发展方向

一、我国高压电器工业的发展过程与生产现状

解放前，我国的电器工业非常落后，所用的高压电器大多由国外输入。根据解放前1937年4月的统计，当时我国只有上海华通电机厂等几家生产小型的油断路器。

解放后，我国的高压电器制造工业得到迅速的发展。1951年华通开关厂先后制造了三相分箱、额定电压为33kV、额定电流为600A、断流容量为350MVA以及132kV、2000A、500MVA的去离子棚式油断路器。

沈阳高压开关厂是我国建立的第一个生产高压开关的专业化工厂，它在1953年研制了69kV、1000MVA的油断路器和6~69kV一系列的断路器、隔离开关、负荷开关及熔断器。

50年代末期，又建成了西安高压开关厂和相当规模的高电压强电流试验基地，奠定了我国高速发展高压电器的基础。

现在我国已能设计制造成套的500kV级高压输变电电器。

当前我国高压电器制造工业的任务是：

1. 发展500kV电压级以上的高压电器。
2. 改进10~35kV电压级产品，并发展中压级的真空及SF₆（六氟化硫）等新的高压电器品种。
3. 加强高压电器有关的基础性的研究工作。

二、国外高压电器的生产情况与发展方向

就国外情况来说，电力系统的最高输电电压已超过765kV。就高压断路器来说，开断电流一般为50~63kA，个别可达100kA；额定工作电流达4000A；开断时间普遍为

二周波，个别的同步断路器，开断时间小于一周波。

苏联、美国、瑞典、加拿大等都正在研究 1100~1200kV 的输电系统及其中使用的电器，而且现在已有人在探索用 1500~2000kV 电压输电的可能性和经济性。在采用这种特高电压的输电系统中，估计短路电流要达到 250kA，额定工作电流要达到 8000~12000A^{[1][2]}，这样将对高压电器提出更高更严格的要求。

国外，真空断路器在配电系统中已得到普遍使用。每相采用一个灭弧室的三相真空断路器的参数已达到 84kV、31.5kA^[3]及 13.8kV、100kA^[4]。在试验室中，符合国际电工委员会 (IEC) 标准的单个灭弧室的开断能力已达到 84kV、40kA 及 12kV、120kA (最高达 130kA)；在对称短路电流情况下，可以在 12kV 电压下开断 200kA^{[5][6]}。

在互感器方面，国外正在发展光电互感器。将光电控制技术应用到超高压断路器方面，已用于 500kV 电压级以上的同步断路器。

在成套电器方面，国外已普遍使用 SF₆(六氟化硫)全封闭组合电器。目前生产的最高工作电压为 800kV^[8]，使用最多的为 245~420kV；开断电流最低为 20kA，最高可达 70kA；额定工作电流一般为 2000~4000A，个别可达 8000A。目前，一些国家已开始 1200kV 级全封闭组合电器的研制^[7]。

由于直流输电及高能技术的要求，目前各国对高压直流断路器及直流互感器进行了大量的研究工作，并取得可喜的成果。

为了促进高压电器的发展，很多国家进行了大量的科研工作。由于专门研究机构、生产单位、使用部门与高等学校的共同协作，由于电子计算机、激光全息照像等新技术的采用，加快了科学研究工作的步伐，促进了高压电器工业的发展，在基本理论研究方面，在新原理应用方面都取得了很大的进展。

参 考 书 目

- [1] C. J. O. Garand High-voltage Switchgear IEEE 1976 NO. 10R
- [2] C. J. O. Garand Circuit Breakers for Extreme Conditions Electrical Review Vol 201 No. 5 29 July 1977
- [3] 体久间信三 榎本裕 新形真空インタラプタ 明电时报 通卷145号 1979 No. 2 真空开闭机器特集
- [4] 砂田洋助 淡路俊男 奥村博行 金井康晴 13.8 kV 100kA 大容量真空遮断器 东芝レビュー 第37卷第6号P. 545 昭和57年5月
- [5] S. Yanabu E. Kaneko H. Okumura T. Aiyoshi Novel Electrode Structure of Vacuum Interrupter and Its Practical Application IEEE Tr. PAS-100 No. 4 P, 1966 1981
- [6] S. Yanabu S. Sauma T. Tamagawa S. Yamashita T. Tsutsumi Vacuum Arc under an Aerial Magnetic Field and Its Interrupting Ability IEEE Vol 126 No. 4 P313-20 April 1979
- [7] H. E. Spindle A Circuit Breaker Development Program for 1200kV GIS IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Atlanta GA USA 1-6 April 1979 P. 227-9
- [8] Gas Insulated 800 kV Station CIGRE Paper No. 23-09 August 1976

第二章 电力系统中开关的闭合与开断

§ 2-1 电力系统的短路故障与高压断路器在系统短路下的闭合

断路器要能闭合和开断各种性质的电路。以单相电路为模型，电力系统中常遇到的电路有下列几种：如图 2-1 a) 为电阻性电路，图 b) 为电感性电路（感性小电流），图 c) 为电容性电路（容性电流），图 d) 为系统短路时的电路（感性大电流）。除电阻性电路外，开断和闭合其它性质的电路时，均将在系统中引起暂态过程，出现异常的电压和电流，危害线路与设备的安全运行。断路器闭合或开断各种性质电路的能力，不仅与电路的参数有关，还与断路器的种类和结构有关。

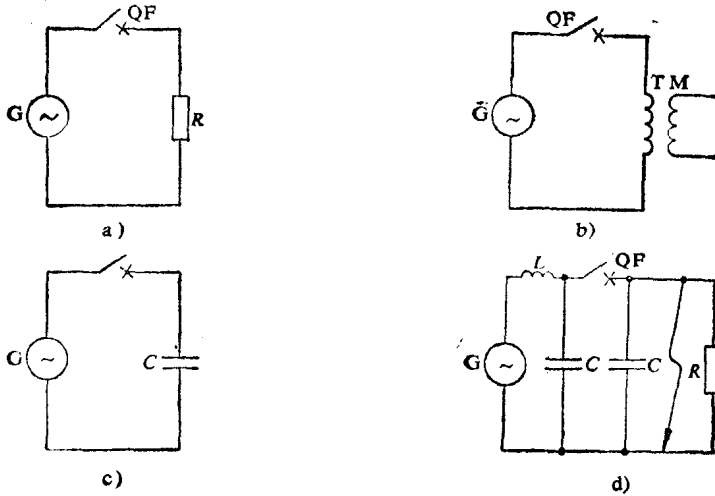


图2-1 电力系统中各种性质的电路

a) 电阻性电路 b) 电感性电路（感性小电流） c) 电容性电路（容性电流） d) 系统短路时的电路（感性大电流）

电力系统中发生短路故障，或者在存在短路故障的情况下闭合断路器，均将产生数值很大的短路电流。以图 2-1 d 所示电路为例，其短路电流可用下式表示，即

$$\begin{aligned}
 i_d &= \frac{U_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t + \varphi - \theta) - \frac{U_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\varphi - \theta) e^{-\frac{R}{L} t} \\
 &= I_{\max} \sin(\omega t + \varphi - \theta) - I_{\max} \sin(\varphi - \theta) e^{-\frac{R}{L} t} \\
 &= \text{交流分量} + \text{直流分量}
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

式中 $u = U_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$ —— 电源电压， φ 为短路角；

$\theta = \cos^{-1} \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$ ——功率因数角, $\cos \theta$ 为功率因数;

$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$ ——交流分量的幅值。

短路电流中最大瞬时电流值 $i_{d\max}$ 与交流分量幅值 I_{\max} 之比, 称为冲击系数, 即

$$k = \frac{i_{d\max}}{I_{\max}} \quad \text{——冲击系数} \quad (2-2)$$

在图 2-1 d 电路中, 如果 U_{\max} 、 R 、 L 一定, 则交流分量的幅值 I_{\max} 不变, 直流分量是短路角 φ 的函数。如果 $\varphi = \theta$, 则 $\sin(\varphi - \theta) = 0$, 不出现直流分量, $k = 1$ 。

如果 $\varphi = \theta - \frac{\pi}{2}$, 则 $\sin(\varphi - \theta) = 1$, 直流分量最大, 而

$$i_d = I_{\max} e^{-\frac{R}{L}t} - I_{\max} \cos \omega t \quad (2-3)$$

在 $t = \frac{\pi}{\omega}$ 时, 瞬态短路电流的最大值近似地为

$$i_{d\max} \approx [i_d]_{t = \frac{\pi}{\omega}} = I_{\max} \left(1 + e^{-\frac{R}{L} \frac{\pi}{\omega}} \right)$$

而
$$k = \left(1 + e^{-\frac{R}{L} \frac{\pi}{\omega}} \right) \quad (2-4)$$

在这种条件, 如果电路中 $R \ll \omega L$, 则 $k \approx 2$ 。

由上面分析可见, 短路电流的冲击系数 k 值在 1 ~ 2 之间, 其值随短路角 φ 不同而变。电力系统中发生短路的短路角是随机的, 是不能控制的, 所以短路电流中出现最大峰值的大小也是随机的。在最严重的情况下, $k = 2$, 短路电流的最大峰值为交流分量幅值的 2 倍。

上面的分析, 是一般系统中线路上的短路情况。如果是在发电机出线端短路, 则短路电流交流分量的幅值开始时也是衰减的。

由于系统中发生短路时短路角 φ 值的随机性, 在考虑断路器的工作条件时, 一般主要考虑最严重(也就是 $\varphi = \theta - \frac{\pi}{2}$), 直流分量最大的情况。

§ 2-2 断路器开断短路电流的物理过程 ——触头间的暂态恢复电压

电力系统发生短路故障后, 断路器接受开断命令而自动分闸, 开断短路电流。断路器触头分离后, 触头间产生电弧。电弧电流过零瞬间, 电弧熄灭, 触头上产生暂态恢复电压, 如果恢复电压的瞬时值超过了间隙中所恢复的介质强度, 则电弧重燃; 否则电弧熄灭, 线路被开断。

根据 § 2-1 的分析, 短路电流具有下列特点:

短路时, 负载被短接, 线路中 R 及 L 值均很小, 故电流值大, 可以达到正常工作电

流值的几十倍。而且 $R \ll \omega L$ ，功率因数 $\cos \theta$ 值很小，电流是感性大电流。

在感性大电流的电路中，电流滞后于电压约 90° ，电流过零期间，电源电压接近幅值。由于系统的暂态恢复电压的固有频率高出工频几十倍，故可以用交流电源电压的幅值作为直流电源电压来分析电流过零后触头间的暂态恢复电压。

断路器开断短路电流时触头间的暂态恢复电压过程，可以用图 2-2 所示的单相回路来进行分析。

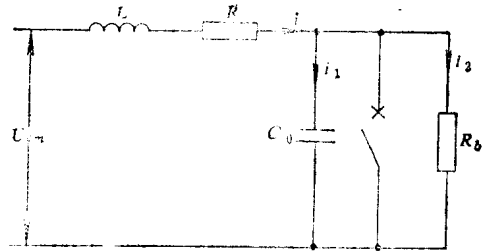


图2-2 分析暂态恢复电压的单相回路

从电器学基础理论可知^[1]，在出现振荡的情况下，暂态恢复电压为

$$u_{hf} = U_{gm} (1 - e^{-pt} \cos \omega_0 t) \quad (2-5)$$

式中 $U_{gm} \approx U_{max}$ ——工频恢复电压，为过渡过程消失后出现在触头间的电压；

$$p = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{R_b C_0} \right) \text{——衰减系数；}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{1}{LC_0} - \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{R_b C_0} \right)^2} \text{——固有振荡角频率；}$$

f_0 ——线路固有频率。

当 $t = \frac{\pi}{\omega_0}$ 时，暂态恢复电压的峰值为

$$U_{hfm} = U_{gm} \left(1 + e^{-p \frac{\pi}{\omega_0}} \right) = k U_{gm} \quad (2-6)$$

而 $k_x = \frac{U_{hfm}}{U_{gm}} = \left(1 + e^{-p \frac{\pi}{\omega_0}} \right)$ ——振幅系数 (2-7)

线路不产生振荡的条件是：

$$-\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{R_b C_0} \right)^2 > \frac{1}{LC_0} \quad (2-8)$$

如果 $R \approx 0$ ，则条件变为

$$R_b > \frac{1}{2} \sqrt{LC_0} \quad (2-9)$$

如果 $R_b \approx \infty$ ，则条件变为

$$R > 2 \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2-10)$$

当 $R \approx 0$ ， $R_b \approx \infty$ 时，

$$U_{hfm} = 2U_{gm} \quad (2-11)$$

$$k_x = \frac{U_{hfm}}{U_{gm}} \approx 2 \quad (2-12)$$

在分析高压断路器开断短路电流的暂态恢复电压时，经常用 U_{hfm} 、出现 U_{hfm} 的时间 $t \left(= \frac{\pi}{\omega_0} \right)$ 、暂态恢复电压上升率 $\frac{du_{hf}}{dt}$ ，或者用 k_x 、 f_0 来表征触头间暂态恢复电压

波形。

实际的电力系统是三相的，而且暂态恢复电压中含有多种频率^[1]。当断路器开断三相回路时，即令触头是同期分离，流过三相触头的短路电流也不是同时过零。电流首先过零的一相称为首开相。无论是何种短路形式，三相断路器开断时，首开相所开断的电流总是单相的，只不过开断过程中工频恢复电压值不同罢了。不同短路形式下，首开相触头间的工频恢复电压与系统相电压幅值之比称为首开相系数。表 2-1 示出常见的几种形式下的首开相系数 k_d ^[1]。

表2-1 常用的几种短路形式下的首开相系数 k_d

短路形式	三相不接地短路	三相中线阻抗接地短路	两相异端短路
线路简图			
k_d	1.5	一般不大于 1.3	$\sqrt{3}$

对电力系统中存在的多频暂态恢复电压波形，可以按规定的方法将其化为等效的标准波形后，再进行处理。试验室中则用标准波形的暂态恢复电压对断路器进行试验。目前照国际电工委员会 (IEC) 的规定有两种归化法^{[2][3]}：

一、两参数法

两参数法是将多频暂态恢复电压波形等效地化为单频波形，如图 2-3 a。如果多频电压波形第一个峰值 U_1 等于或大于工频恢复电压值 U_{gm} ，则用电压零点和第一峰值点 (t_1, U_1) 的连线的斜率表征等效单频波形的平均暂态恢复电压上升率 $\left[\left(\frac{dU_{hf}}{dt} \right)_{av} = \frac{U_1}{t_1} \right]$ 。

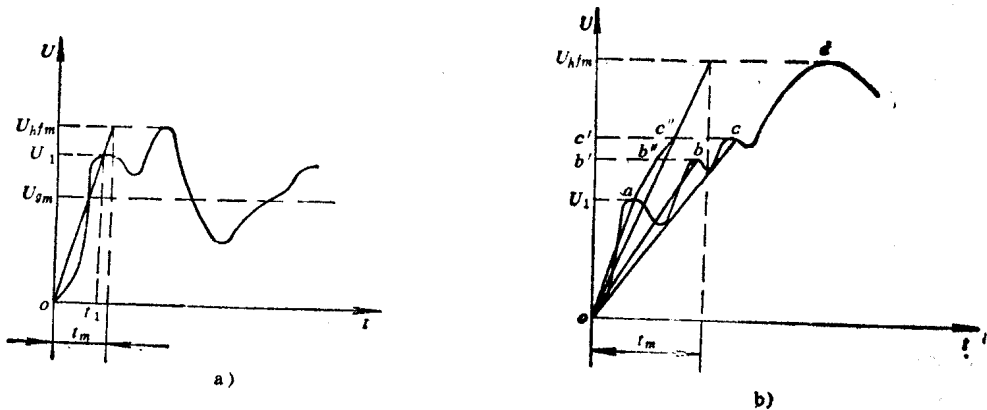


图2-3 多频暂态恢复电压曲线两参数等效归化法

a) $U_1 > U_{gm}$ b) $U_1 < U_{gm}$

延伸这一连线，与过最大峰值电压 U_{hfm} 平行于横坐标轴的直线相交于 (t_m, U_{hfm}) 点，求得 t_m ， t_m 称为峰值时间。这时除 U_{gm} 、 U_{hfm} 、 $\left(\frac{du_{hf}}{dt}\right)_{av}$ 及 t_m 外，等效单频波形的其它

参数为振幅系数 $=k_a = \frac{U_{hfm}}{U_{gm}}$ ，固有振荡频率 $=f_0 = \frac{1}{2t_m}$ ，角频率 $=\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{\pi}{t_m}$ ，

在这些参数中，只需适当地采用两个，就可以表征暂态恢复电压的大小。

如图 2-3 b，如果多频电压波形的第一个峰值 U_1 小于工频恢复电压值 U_{gm} ，则采用下列步骤进行归化。图中 a 、 b 、 c 、 d 各点是波形出现峰值电压的点， U_{hfm} 为最大峰值电压。连 oa 、 ob 、 oc 各线，由 a 点作直线平行于 ob ，与 bb' 交于 b'' 点。由 b'' 点作直线平行于 oc ，与 cc' 交于 c'' 点。连 oc'' 并延长与 $y = U_{hfm}$ 水平线相交于 (t_m, U_{hfm}) 。此时等效单频暂态恢复电压为

$$\text{振幅系数} = k_a = \frac{U_{hfm}}{U_{gm}}$$

$$\text{平均暂态电压上升率} = \left(\frac{du_{hf}}{dt}\right)_{av} = \frac{U_{hfm}}{t_m}$$

$$\text{固有振荡频率} = f_0 = \frac{1}{2t_m} \quad \text{角频率} = \omega_0 = 2\pi f = \frac{\pi}{t_m}$$

二、四参数法

最近的研究指出，电弧的重燃可以发生在暂态恢复电压升起的初始阶段，也可以发生在暂态恢复电压已超过工频恢复电压值之后的阶段。前者是由于热的复燃作用，后者由于电的重击穿作用。在这种情况下，不能用单频的暂态恢复电压来完成表征恢复电压对电弧重燃开断失效的作用，因此出现了四参数的归化法。

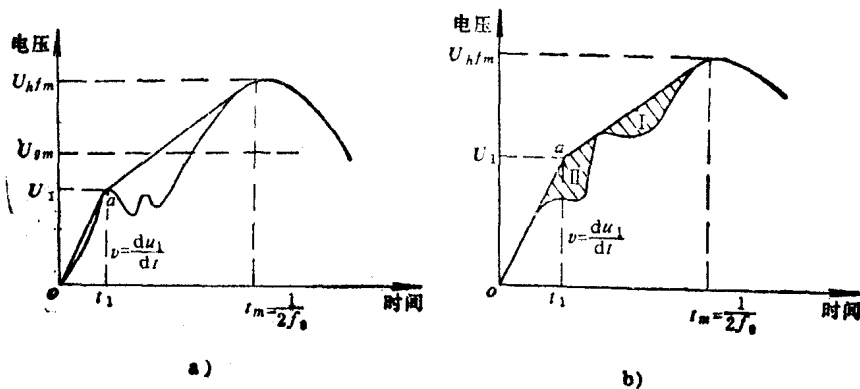


图2-4 决定四参数暂态恢复电压的图解法

四参数法是，采用二个定点的两组共四个参数来规定暂态恢复电压的波形。第一点相当于暂态恢复电压在工频恢复电压以下的部分，决定于波形的第一个峰值。如图 2-4 a，第一个峰值电压为 U_1 ，其峰值时间为 t_1 ，电压上升率为 $\frac{du_1}{dt} = v = \frac{U_1}{t_1}$ ，振幅