

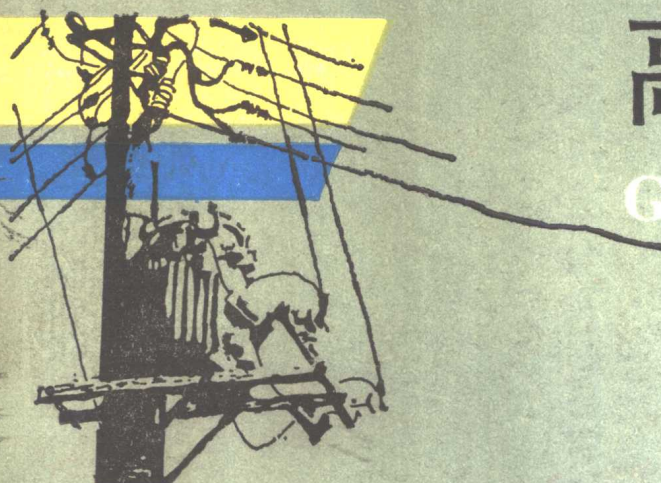
965531

TM51
9051

高压电器

GAOYADIANQI

尚振球 郭文元 编
西安交通大学出版社



高 压 电 器

尚振球 郭文元 编

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书由四大部分组成：开关电器在电力系统中工作时所发生的各种暂态过程及其对开关电器的影响；各种开关电器的结构、工作原理和基本的计算方法；电流和电压互感器的结构、工作原理和特性；断路器开断能力试验的基本问题。

本书可作为高等工业学校、专科学校和职工大学的电器及高电压技术和设备专业的教材或参考书，也可供从事电器研究、设计、制造、试验和运行方面的工程技术人员参考。

(陕)新登字 007 号

高 压 电 器

尚振球 郭文元 编

责任编辑 刘宏珊

*

西安交通大学出版社出版

(邮政编码:710049)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 12.625 字数,301千字

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数:1—3000

ISBN7-5605-0464-7/TM·21 定价:7.00元

前 言

本书是参照1983年5月原机械部高等院校电器专业教材编审小组制订的《高压电器》教学大纲和实际教学需要编写的。在成书之前,已在西安交通大学和其他院校电器专业以讲义的形式讲授过多次,正式出版时又作了修改和补充。

本书由四大部分组成:1. 开关电器在电力系统中工作时所发生的各种暂态过程及其对开关电器的影响;2. 各种开关电器的结构、工作原理和基本的计算方法;3. 电流和电压互感器的结构、工作原理和特性;4. 断路器开断能力试验的基本问题。关于电器的基本理论问题,如发热、电动力、电弧、电接触和电磁机构等,已在电器专业的另一课程——“电器学”中讲授,所以除必要的知识外,在本书中皆从略。

本书共十四章,其中第十和第十二章由郭文元编写,其余各章皆由尚振球编写。

本书可作为高等工业学校、专科学校和职工大学的电器及高电压技术和设备专业的教材或教学参考书,也可供从事高压电器研究设计、制造、试验和运行方面的工程技术人员参考。

本书在取材和编写方面,力求简练易懂,便于教学和学生自学,但由于水平所限,不妥之处自知难免,欢迎读者给以批评指正。

本书承西安电力机械制造公司楼家法高级工程师审阅并提出了许多宝贵的修改意见,编者在此深表谢意。

编 者

7A003/02

目 录

前 言

第一章 高压电器概论

- § 1.1 高压电器的定义、分类和用途..... (1)
- § 1.2 高压电器的基本技术参数 (3)
- § 1.3 高压电器的绝缘 (4)
- 思考题和习题..... (8)

第二章 开关电器关合和开断时电路中的电流变化过程

- § 2.1 电力系统中短路电流的暂态波形 (9)
- § 2.2 开断三相短路时流过开关电器弧隙的短路电流波形..... (13)
- § 2.3 弧隙预击穿对短路电流波形的影响..... (14)
- § 2.4 关合电容器组时暂态电流的波形..... (16)
- 思考题和习题 (17)

第三章 开关电器开断电路时弧隙上的电压变化过程

- § 3.1 开断三相短路时首开极弧隙上的恢复电压..... (18)
- § 3.2 开断近区故障时弧隙上的恢复电压..... (28)
- § 3.3 开断失步故障时弧隙上的恢复电压..... (31)
- § 3.4 开断异相接地故障时弧隙上的恢复电压..... (33)
- 思考题和习题 (34)

第四章 开关电器关合和开断小电流时弧隙上的电压变化过程

- § 4.1 开断小电感性电流时的过电压..... (35)
- § 4.2 开断电容性电流时的过电压..... (39)
- § 4.3 关合空载输电线时的过电压..... (43)
- 思考题和习题 (44)

第五章 开关电器在几种特殊开断情况下的电流变化过程

- § 5.1 开断发展性故障..... (45)
- § 5.2 开断并联电路..... (45)
- 思考题和习题 (46)

第六章 改善弧隙上恢复电压波形、分布状况和抑制过电压的方法

- § 6.1 改善弧隙上恢复电压波形的办法..... (47)
- § 6.2 改善弧隙上恢复电压分布状况的办法..... (49)
- § 6.3 抑制操作过电压的办法..... (51)
- § 6.4 限压电阻元件结构参数的计算..... (55)
- 思考题和习题 (58)

第七章 断路器概论

- § 7.1 断路器的定义和分类..... (59)
- § 7.2 断路器的基本参数..... (60)
- 思考题和习题 (61)

第八章 油断路器

- § 8.1 油灭弧装置的工作原理..... (62)
- § 8.2 油断路器的结构..... (65)
- § 8.3 影响油断路器灭弧装置灭弧性能的主要因素..... (71)
- § 8.4 油断路器灭弧装置开断能力的计算..... (78)
- 思考题和习题 (84)

第九章 真空断路器

- § 9.1 真空间隙的绝缘特性..... (85)
- § 9.2 真空电弧的特性..... (87)
- § 9.3 真空灭弧装置的结构和工作原理..... (89)
- § 9.4 真空断路器的结构和特点..... (98)
- § 9.5 真空断路器过电压的抑制方法..... (99)
- 思考题和习题..... (101)

第十章 六氟化硫断路器和变电站

- § 10.1 气体动力学的基本知识..... (102)
- § 10.2 六氟化硫气体的物理化学特性..... (107)
- § 10.3 六氟化硫气体的电性能..... (110)
- § 10.4 六氟化硫气吹灭弧装置..... (117)
- § 10.5 六氟化硫断路器及气体绝缘变电站..... (123)
- 思考题和习题..... (129)

第十一章 熔断器、隔离开关和负荷开关

- § 11.1 熔断器..... (130)
- § 11.2 隔离开关..... (135)
- § 11.3 负荷开关..... (138)
- 思考题和习题..... (140)

第十二章 开关电器的机构

- § 12.1 高压开关机构的组成..... (141)
- § 12.2 操动机构..... (142)
- § 12.3 传动机构和触头行程机构..... (149)
- § 12.4 连杆机构的运动特性和缓冲..... (155)
- 思考题和习题..... (162)

第十三章 变换电器

- § 13.1 电流互感器..... (163)
- § 13.2 电压互感器..... (176)
- 思考题和习题..... (185)

第十四章 断路器的开断能力试验

§ 14.1 概述	(186)
§ 14.2 规定的试验条件	(187)
§ 14.3 电网试验	(188)
§ 14.4 冲击同步发电机试验	(189)
§ 14.5 振荡回路试验	(189)
§ 14.6 合成回路试验	(191)
思考题和习题	(192)

参考文献

第一章 高压电器概论

§ 1.1 高压电器的定义、分类和用途

高压电器,广义而言,是指额定电压在 3 000V 及以上的电器。在本书中,则仅指装在额定电压 3 000V 及以上交流电力系统中,用来关合和开断电路、限制电路中的电压和电流以及变换电路中的电压和电流,使之便于检测的电器。

按照用途,高压电器可以分成下列几类:

一、**开关电器**——用来关合和开断电路的电器。它包括:

1. **断路器**(Q_b)——用来在电路正常工作和发生故障(例如发生短路)时关合和开断电路。
2. **隔离开关**(Q_G)——主要用来将高压设备与电源隔离,以保证检修工作人员的安全。
3. **熔断器**(F_R)——用来在电路发生过载或短路时依靠熔件的熔断开断电路。
4. **负荷开关**(F_F)——用来在正常工作或过载时关合和开断电路。

二、**限制电器**——用来限制电路中电压或电流的电器。它包括:

1. **电抗器**(L)——主要用来限制电路中的短路电流。某些型式的熔断器也有限制短路电流的作用。
2. **避雷器**(F_b)——用来限制电路中出现的过电压。

三、**变换电器**——用来变换电路中的电压和电流使之便于检测的电器。它包括:

1. **电流互感器**(T_A)——用来变换电路中的电流,以便供电给测量仪表或继电器,并使之与高电压隔离;
2. **电压互感器**(T_V)——用来变换电路的电压,以便供电给测量仪表或继电器,并使之与高电压隔离。

四、**组合电器**——将上述某几种电器,按一定的线路装配成一个整体的电器。

图 1.1 表示一发电厂向用户输电用的变电所原理接线图。变电所的母线 M 可以由发电机 G 供电,也可以在发电机停止工作时由电力系统供电。从此图可以粗略地看到高压电器在电力系统中所处的地位和作用。

断路器 Q_{b1} 、 Q_{b2} 和 Q_{b3} 分别用来在正常工作时将发电机 G、变压器 T_{b1} 和 T_{b2} 接到母线 M 上或从 M 上断开。同时 Q_{b1} 用来当母线 M 以及接到其上的设备发生故障时开断电路,以免发电机 G 遭到损坏; Q_{b2} 用来当输电线 1 或变压器 T_{b1} 本身发生故障时开断电路; Q_{b3} 用来当输电线 2 或变压器 T_{b2} 本身发生故障时开断电路,以免它们遭到损坏; Q_{b3} 用来在正常工作时,关合和开断变压器 T_{b1} 右侧电路以及当变压器 T_{b1} 本身发生故障时,使之和输电线 1 断开。

隔离开关 Q_{G1} 用来当检修发电机 G 和断路器 Q_{b1} 时使之与母线 M 隔离,或者当检修母线 M 时,使之与发电机 G 隔离。 Q_{G2} 和 Q_{G3} 用来当检修断路器 Q_{b2} 、 Q_{b3} 或变压器 T_{b1} 时,使之与母线 M 及电力系统隔离。 Q_{G4} 用来当检修断路器 Q_{b1} 或变压器 T_{b2} 时,使之与母线 M 隔离。 Q_{G5} 和 Q_{G6} 分别用来当检修电压互感器 T_V 或避雷器 F_b 时使之与母线 M 隔离。

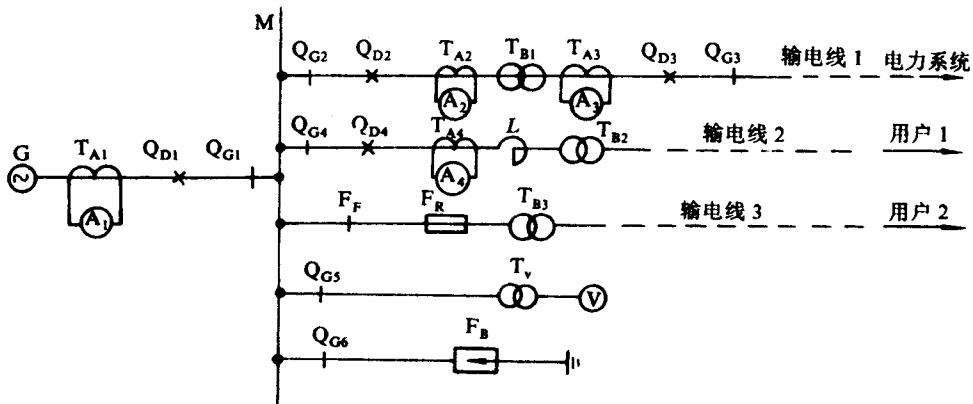


图 1.1 说明高压电器用途的发电厂变电所的原理接线图

负荷开关 F_F 和熔断器 F_R 配合,用以代替断路器完成对变压器 T_{B3} 和输电线 3 的各种操作和保护。前者担任在正常工作和过载时关合和开断电路,后者担任在发生过载或短路时开断电路。

电抗器 L 用来限制当变压器 T_{B2} 或输电线 2 发生故障时产生的短路电流,以减轻断路器 Q_{D4} 、变压器 T_{B2} 和输电线 2 的工作条件。它在高压线路中不是必需的,只有当短路电流过大以致有关的设备不能承受时才装设。

避雷器 F_B 用来限制由于雷波沿输电线侵入而使母线 M 上的电压过分升高,以免接到母线 M 上的电气设备遭到损坏。

电流互感器 T_{A1} 用来变换流过发电机 G 出线端的电流,以供电给电流表 A_1 进行计量,或供电给继电器,使之当线路发生过载或短路时发出信号,令断路器 Q_{D1} 开断电路。 T_{A2} 和 T_{A3} 分别用来变换流过变压器 T_{B1} 左侧和右侧的电流,以供电给电流表 A_2 和 A_3 ,或供电给继电器,使之当线路发生过载或短路时发出信号,令断路器 Q_{D2} 和 Q_{D3} 开断电路。 T_{A4} 用来变换流过变压器 T_{B2} 的电流,以供电给电流表 A_4 ,或供电给继电器,使之当线路发生过载或短路时发出信号,令断路器 Q_{D4} 开断。

电压互感器 T_v 用来变换加在母线 M 上的电压,以供电给电压表 V 进行计量,或供电给继电器,使之当母线 M 上电压降低到规定值以下时发出报警信号,或令接到母线 M 上的所有断路器开断。

按照装置场所,高压电器可以分为

1. 户内式——装在建筑物内,不具有防风、雨、雪、灰尘、露、冰和浓霜等性能。
2. 户外式——适于装在露天,能承受风、雨、雪、灰尘、露、冰和浓霜等作用。

按照极数,高压电器可以分为

1. 三极式——三极在机械结构上联成整体或三极装在一个支架上。
2. 单极式——每极单独装在一个支架上。

§ 1.2 高压电器的基本技术参数

为说明高压电器的性能,必须采用各种技术参数。下列的几种技术参数中,额定电压是所有高压电器的技术参数,其余的为大多数高压电器的技术参数,一些高压电器专用的技术参数,将在叙述该高压电器时进行介绍。

一、额定电压 U_e/kV (有效值)

额定电压是指高压电器设计时所采用的标称电压。所谓标称电压是我国国家标准中列入的电压等级。对于三极电器是指其极间电压。由于实际运行中,电网的电压容许在一定范围内变动,所以高压电器应能在所谓最高电压下长期工作。按我国标准,高压电器的额定电压和与之相应的最高电压如表 1.1 所示。

表 1.1 高压电器的额定电压和最高电压

额定电压/kV	3	6	10	15	20	35	63	110	154	220	330	500
最高电压/kV	3.5	6.9	11.5	17.5	23	40.5	69	126	177	252	363	550

额定电压愈高,为保证足够的绝缘距离,高压电器的外形尺寸愈大。对于额定电压在 35kV 及以下的高压电器,为了减轻其工作条件从而降低其造价,多制成户内式并且是三极式的;对于额定电压在 110kV 及以上的高压电器,由于其外形尺寸和相间距离较大,多制成户外式并且是单极式的。但是,对于封闭式组合电器,即使额定电压为 110kV 甚至 220kV,也多制成户内式并且是三极式的。

二、额定电流 I_e/A (有效值)

额定电流是高压电器在额定频率下能长期通过,而各个金属和绝缘部分的温升不超过长期工作时最大容许温升的最大标称电流。我国标准规定的高压电器的额定电流等级是按所谓“R10 系列”选取的。所谓 R10 系列即是按比值为 $10^{1/10}$ 递增的级数。按此系列自 1 到 10 的数字以及系列化整数的数字,如表 1.2 所示,其余的数则按表中数字 10 的倍数延伸。

表 1.2 R10 系列和 R10 系列化整数

R10 系列	1	1.25	1.5	2.0	2.5	3.15	4.0	5.0	6.3	8
R10 系列化整数	1	1.2	1.5	2.0	2.5	3	4	5	6	8

实际上由于每一类高压电器工作情况的不同,它们具体采用的额定电流等级也不一样,而且有的也并不完全遵从 R10 系列数字。例如,对熔断器以外的交流高压开关电器,按我国标准,其额定电流有下列几种:

200, 400, 630, 1 000, 1 250, 1 600, 2 000, 3 150, 4 000, 5 000, 6 300, 8 000, 10 000, 12 500, 16 000, 20 000。

对高压电流互感器,其额定电流有:

5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1 000, 1 500, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000, 6 000, 7 500, 10 000。

额定电流的大小决定了高压电器导体、触头的尺寸和结构。额定电流愈大,它们的尺寸愈大,否则将不能满足容许温升的要求。

三、额定短时耐受电流或热稳定电流 I_T/kA (有效值)

额定短时耐受电流是高压电器在规定时间内能够通过,而其温升不超过规定条件的最大

标称电流。这一技术参数主要反映高压电器承受短路电流热效应的能力。规定时间通常为 2s, 当需要大于 2s 时可用 4s。这一时间又称为额定热稳定时间。2s 和 4s 额定短时耐受电流 I_{T2} 和 I_{T4} 之间可通过下列关系进行换算:

$$2I_{T2}^2 = 4I_{T4}^2 \quad (1.1)$$

在开关电器中, I_T 通常等于其额定开断电流 I_{sk} (其定义见第七章)。

在高压电流互感器中, 这一性能以额定短时耐受电流的倍数 K_T 表示:

$$K_T = \frac{I_T}{I_{1e}} \quad (1.2)$$

式中 I_{1e} ——电流互感器的原边额定电流。

规定条件为, 通过此电流后, 电器应能继续正常工作, 载流部分的温度对铜和铜的合金不得超过 300°C , 对铝和铝的合金不得超过 200°C , 开关电器的触头不得发生熔焊, 对用树脂浇铸的电器不得出现开裂等。

四、额定峰值耐受电流或动稳定电流 I_F/kA (峰值)

额定峰值耐受电流是高压电器在规定条件下, 能够通过而不发生机械损坏的最大标称电流。这一技术参数主要反映高压电器承受短路电流电动力效应的能力。

规定条件为, 通过此电流后, 电器应能继续正常工作。例如, 对开关电器要求触头不能自行分开和发生熔焊等。

因为在高压电器中短路电流的冲击系数规定取为 1.8, 所以 I_F, I_T 和 I_{sk} 之间的关系为

$$I_F = 1.8 \sqrt{2} I_{sk} = 2.5 I_{sk} \text{ 或 } 2.5 I_T \quad (1.3)$$

在高压电流互感器中, 这一性能常以额定峰值耐受电流的倍数 K_F 来表示:

$$K_F = \frac{I_F}{I_{1e}} \quad (1.4)$$

§ 1.3 高压电器的绝缘

一、常用的绝缘介质材料和绝缘元件

为了熄灭电弧以及使各个带有不同电位的导体之间和带电导体对地之间进行电的隔离, 在高压电器中采用了各种各样的绝缘介质、材料和由这些绝缘材料制成的元件。在这些绝缘介质和材料中, 有些只用作电的绝缘, 有些则既可作为电的绝缘, 又可用于灭弧。最常用的一些绝缘介质和材料如表 1.3 所示。

表 1.3 高压电器中常用的绝缘介质和材料

可用作灭弧和绝缘的			仅用作绝缘的
气 体	液 体	固 体	固 体
空气 高度真空 SF ₆	变压器油 蒸馏水	钢纸板 有机玻璃 石英砂 陶土	瓷、纸、木材、玻璃丝 布、塑料、树脂

关于表中绝缘材料的性能可参看有关电工材料的书籍。

由于瓷具有很多优点, 如介质损耗小、击穿强度高、耐高温、被电弧烧灼后不会炭化、价格便宜、容易加工成各种形状等, 因而在高压电器中获得最广泛的应用。按照应用场所的不同, 它

被制成不同形状的元素,主要地可分为下列几类:

1. 作为支持带电部分之用,如针式绝缘子、棒式绝缘子、支持用瓷筒等。
2. 作为带电导体穿过接地金属箱壁时使两者绝缘之用,如瓷套管等。
3. 作为其它绝缘元件的外套,以使其避免受到大气影响或高温气体的损害,如电容套管的瓷套等。
4. 作为容器,用以盛装电器元件,如断路器灭弧室的瓷套、互感器的瓷箱等。
5. 作为传动元件,如隔离开关的瓷拉杆等。

近几十年来,由于树脂工业的发展以及树脂在加工方面的优越性,在额定电压 35kV 及以下的电器中,不少绝缘元件皆改用树脂制造,从而使电器的体积大为缩小,重量大为减轻。但在额定电压较高的电器中,主要的绝缘材料仍然是瓷。

二、绝缘距离的确定

在高压电器中,按照工作情况,可以分为三类绝缘距离:

1. 带电导体对地(对接地金属外壳或底座)的绝缘,简称相对地绝缘距离。
2. 各极带电导体之间的绝缘距离,简称极间绝缘距离。
3. 开关电器在开断位置时,同极触头之间的绝缘距离,简称开断间隙的绝缘距离。

所有这些绝缘距离,对于户内式电器,在确定其数值时,按我国标准都必须在干燥状态下满足下列要求:

1. 在表 1.4 所示的工频试验电压作用下,一分钟内不发生绝缘击穿和沿绝缘表面放电的现象。

表 1.4 3~500kV 输变电设备的一分钟工频耐受电压/kV(有效值)

额定电压	最高电压	高压电器、电压互感器和穿墙套管		母线支柱绝缘子	
		内外绝缘(干试与湿试)		湿试	干试
3	3.5	18		18	25
6	6.9	23		23	32
10	11.5	30		30	42
15	17.5	40		40	57
20	23.0	50		50	68
35	40.5	80		80	100
63	69.0	140		140	165
110	126.0	1200*		200	265
220	252.0	360		360	450
		395		395	495
330	363.0	460		/	/
		510		/	/
550	550.0	630		/	/
		680		/	/
		740		/	/

注:1. 对额定电压等于和大于 220kV 的高压电器,有两种或三种耐受电压可供选择。

2. 带“*”的数值仅用于电磁式电压互感器的内绝缘。

2. 施加表 1.5 所示的冲击试验电压(波形为 1.2/50 μ s)3 次,不发生绝缘击穿或沿绝缘表

面放电的现象;或施加 15 次,发生绝缘击穿或沿绝缘表面放电的次数不多于 2 次。

表 1.5 3~500kV 输变电设备的雷电冲击耐受电压

额定电压	最高电压	标准雷电冲击全波(内、外绝缘)		标准雷电冲击截波
		电压互感器	高压电器、母线支持绝缘子、穿墙套管	电流和电压互感器的内绝缘
kV(有效值)		kV(峰值)		
3	3.5	40	40	45
6	6.9	60	60	65
10	11.5	75	75	85
15	17.5	105	105	115
20	23.0	125	125	140
35	40.5	185/200*	185	220
63	69.0	325	325	360
110	126.0	450/480*	450	530
220	252.0	850	850	935
		950	950	1 050
330	363.0	1 175	1 050	1 175
		1 300	1 175	1 300
500	550.0	1 550	1 425	1 550
			1 550	
		1 675	1 675	1 675

注:1. 同表 1.4; 2. 带“*”的数值用于其内绝缘。

3. 对于户外式电器,除了应满足上述两项要求以外,还应在淋雨的情况下,加上表 1.4 中所示的工频湿试电压,在一分钟内不发生绝缘击穿和沿绝缘表面放电的现象。

4. 对于额定电压为 300kV 和 500kV 的高压电器,除满足第 2 项要求外,还应在干燥和淋雨的情况下,施加表 1.6 所示的操作冲击耐受电压(波形为 250/2 000 μ s)3 次,不发生绝缘击穿和沿绝缘表面放电的现象。

表 1.6 330~500kV 输变电设备操作冲击耐受电压

额定电压	最高电压	内、外绝缘(干试与湿试)	
		母线支柱绝缘子	其他设备
kV(有效值)		kV(峰值)	
330	363	850	850
		950	950
500	550	1 175	1 050
		1 240	1 175

注:对每一额定电压,有两种操作冲击耐受电压可供选择。

在高压电器中,处于大气中的绝缘称为外绝缘;处于密封容器或其他介质中的绝缘称为内绝缘。这两部分绝缘的破坏对电气设备所引起的后果是不相同的。敞露在空气中外间隙的放电对电器的损伤不大,而内绝缘的击穿将造成永久性的损坏,甚至引起爆炸和火灾。所以,在设计高压电器时,应使得内绝缘的耐压值稍高于外绝缘的耐压值,亦即当电气设备受到过高电压的作用时,可通过外绝缘的闪络以保护内绝缘不会被破坏。具体的方法是对不同绝缘的放电电压 U_f 给以不同的安全系数:

$$U_f = K_A U_s \quad (1.5)$$

式中 U_s ——表 1.4 或表 1.5 中规定的高压电器所属电压等级的工频耐受电压或雷电冲击耐受电压。

K_A ——安全系数,其数值见表 1.7。

表 1.7 计算不同情况下的绝缘时所取的安全系数 K_A

绝缘种类及其工作条件	工频电压时	冲击电压时
在空气中的外部间隙和瓷绝缘子的外表面	1	1
工作在击穿电压下的瓷	1.3	1.33~1.60
纸-油绝缘、油间隙以及其它工作在击穿电压下的绝缘	1.3	1.25
在多油断路器箱内的绝缘间隙	1.15~1.25	1.15~1.25
在少油断路器箱内的绝缘间隙	1.25~1.5	1.25~1.5
在瓷箱内油不受电弧作用时的绝缘间隙	1.15	1.15
在密闭而且充以空气的绝缘子内腔中的绝缘间隙	1.10	1.1~1.15

如果开关电器一极的开断间隙由 n 个间隙(亦称断口)组成,则每一间隙的放电电压 U_{f1} 应按下式计算:

$$U_{f1} = K_A K_p \frac{U_s}{n} \quad (1.6)$$

式中 K_p ——电压在间隙上分布不均匀的系数(其定义及数值的求法见第六章)。

高压电器的外形尺寸在很大程度上决定于绝缘距离,因此,在满足给定的放电电压的情况下,希望尽量减小绝缘距离的尺寸。通常确定绝缘距离尺寸的方法有下列几种:

1. 按试验公式或试验曲线计算。当绝缘间隙或绝缘零件的形状和有关试验公式或试验曲线的条件相近时,采用这一方法可以获得满意的结果。一般地说,放电电压和极间绝缘距离的关系可用下式表示:

$$U_f = K_f l^\beta \quad (1.7)$$

式中 U_f ——放电电压,在工频和冲击波时均为千伏最大值。

l ——极间绝缘距离,cm。

K_f 和 β ——系数,其值如表 1.8 所示。

表 1.8 式(1.7)中的系数 K_f 和 β

介 质	电极形状	间隙范围 (cm)	工频电压		冲击电压(+1.5/40 μ s)	
			K_f	β	K_f	β
空气;气压 0.1MPa, 温度 25℃, 湿度 14.87g/m ³	球-接地球 $\phi 1m$	5~50	27	0.85	38	0.85
	针-接地针	2~20	10.5	0.7	23	0.62
	针-接地针	20~250	4.5	0.97	12.8	0.85
	针-接地板	20~250	5.6	0.97	7.8	0.92
变压器油	针-接地针	1~10	25	0.74	98	0.8
	针-接地针	10~50	29	0.68	73	0.64
	针-接地板	1~10	14.5	0.86		
	针-接地板	10~100	25	0.65		
	针-接地板	2~8			2.1	1.1
	针-接地板	8~120			56	0.64

当极间绝缘距离不太长时,也可用表 1.9 中所示的试验公式进行计算。

此法的缺点是,当找不到与某一实际情况相应的试验公式或试验曲线时,不得不采用偏严情况的公式或曲线进行计算,因而使得所选的电器尺寸过大。

2. 参照现有高压电器有关部分的绝缘距离进行选择。此法简便易行,但要具备一定的实际经验。

3. 按照所设计的绝缘间隙或绝缘零件制成模型进行高压试验。这一方法所得结果最为可靠,但所费人力物力较多。

表 1.9 放电电压 U_{fm} (kV 最大值)和极间距离(cm)的关系

绝缘类型	试验电压	试验条件	试验公式
在空气中	工频电压	均匀电场	$U_{fm} = 24.2\delta l \left(1 + \frac{0.25}{\sqrt{\delta l}}\right)$
		针-针电极, $l > 10\text{cm}$	$U_{fm} = 3.0 + 5l$
		针-平板电极, $l > 10\text{cm}$	$U_{fm} = 6.5l^{0.88}$
		沿圆柱形绝缘表面 $l < 45\text{cm}$	$U_{fm} = 14.6l^{0.7}$
	冲击电压	针-针电极, $l > 10\text{cm}$	$U_{fm} = 40 + 6.3l$
在变压器油中	工频电压	针-针电极, $l > 1\text{cm}$	$U_{fm} = 39l^{0.7}$
		针-平板电极, $l > 10\text{cm}$	$U_{fm} = 30l^{0.7}$

注: $\delta = 0.386 \frac{P}{T}$, P 为绝对大气压力, T 为绝对温度。

思考题和习题

1. 高压电器的四个基本技术参数各适用于哪些高压电器?
2. 为什么一般高压开关电器的额定电流没有小于 200A 的?
3. 高压电器导体的截面积大小由什么基本技术参数决定?
4. 如何不看铭牌就能大致估计出一个高压电器的额定电压?
5. 为什么高压电器有的要进行工频电压和雷电冲击电压试验,有的还要进行操作冲击电压试验?
6. 试用公式(1.7)计算额定电压为 10, 35, 110 和 220kV 的高压电器空气间隙的绝缘距离,电极形状按针-接地板考虑。

第二章 开关电器关合和开断时电路中的电流变化过程

如前所述,开关电器的功用在于关合和开断电路。所谓关合,就是通过开关电器触头的接触,使触头间的电压由电源电压迅速降低到趋近于零;所谓开断,就是通过触头的分离,使触头间的电压由趋近于零的数值迅速增至电源电压。触头两端电压的这一剧变,必然要在高压电路中引起能量的重新分配,亦即将产生一电磁的暂态过程。开关电器在工作过程中,应能承受这一由本身操作或别的开关电器操作引起的暂态过程的作用。在关合和开断的过程中,从对于开关电器的触头损伤和迅速熄弧而言,最困难的任务莫过于关合和开断短路电流。但对于开关电器和与之相联的设备的绝缘而言,开断电容性或小的电感性电流却是最危险的。为此,在介绍具体高压开关电器之前,有必要先对其操作时引起的电路暂态过程进行分析,以便了解其实际工作条件,从而为深入领会每一开关电器的结构、工作原理和技术参数等打下理论基础。

这一章,先介绍开关电器关合和开断交流电力电路时的电流变化过程,以下几章再介绍开断交流电力电路时引起的电压变化过程。

§ 2.1 电力系统中短路电流的暂态波形

电力系统中可能由于下列原因发生短路而使开关电器中流过短路电流:

1. 由于雷击、操作过电压、绝缘的自然老化或人为的过失造成正在运行的设备或线路发生短路。

2. 在规定的运行条件下将接地短路器接地。

3. 当设备或线路由于某种原因已被短接的情况下,误将开关电器关合。

按照短路的相数以及电源中点和短路地点是否接地的情况,可以分为单相接地短路、两相接地短路、两相不接地短路、三相接地短路和三相不接地短路五种。它们分别如图 2.1 所示。

按照短路电流各相数值和波形的不同,它们又可分为两大类:

1. 远离发电厂的输配电网中短路;
2. 发电厂附近电网中短路。

前者的单相和三相短路电流基本相等,而两相短路电流较小;后者则单相短路电流最大,两相短路电流次之,三相短路电流最小。但是,由于一般开关电器的设计和试验标准都是按三相短路制订的,所以对后一种情况,运行部门都是采取措施将单相短路电流的数值降低到三相短路电流的水平。为此,下面我们将只对三相不接地短路的情况进行分析。在分析时并采用下列假定:

1. 三相同时发生短路,没有先后的时差。

2. 短路过程是理想的,即短路地点相当于金属短接,电路中不存在电弧。

一、输配电网中短路电流的特点

按上述假定,当三相交流电路中发生三相短路时,短路电流的变化过程可用一相中的短路电流进行分析,其余两相短路电流的变化过程,只要将时间 t 换以 $t-2\pi/3$ 和 $t+2\pi/3$ 即可。

设短路电流周期分量的幅值为 I_m ,短路发生瞬间电源电压的相角为 α ,每相电路的电阻为

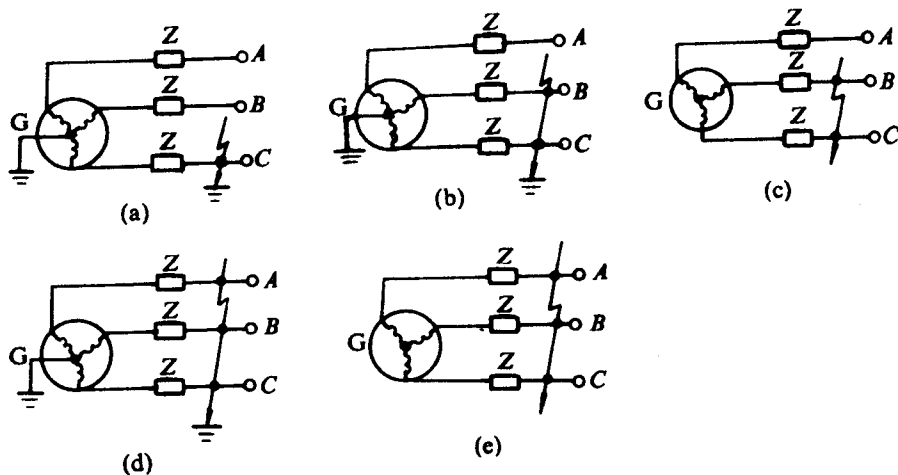


图 2.1 电力系统中的几种短路情况

- (a) 单相接地短路; (b) 两相接地短路; (c) 两相不接地短路;
 (d) 三相接地短路; (e) 三相不接地短路

R , 电感为 L , 阻抗的功率因数角 $\varphi = \text{tg}^{-1}\omega L/R$ (ω 为电源角频率), 则短路电流 i 按下列公式变化:

$$i = i_{\sim} + i_{-} = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (2.1)$$

由此可见, 在此情况下的短路电流有下列特点:

1. 一般地说, 短路电流 i 由周期分量 i_{\sim} 和非周期分量 i_{-} 两部分组成, 后一分量是一随时间衰减的指数函数。图 2.2 表示当 $\alpha - \varphi$ 为 $0 \sim \pi$ 之间某一数值时 i_{\sim} , i_{-} 和 i 的波形。由图可见, 从短路开始经过一定时间后 (通常认为经过 $4L/R$ 秒以后), 非周期分量 i_{-} 已衰减到零, 短路电流进入稳定状态。

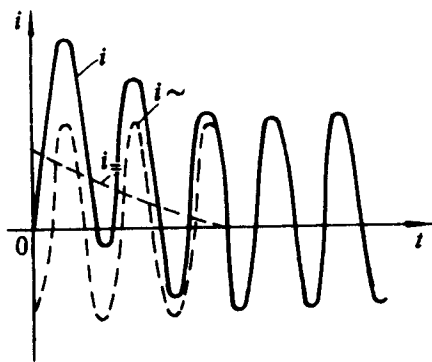


图 2.2 短路电流 i 及其分量 i_{\sim} 和 i_{-} 的波形

2. 当 $\alpha - \varphi = 0$ 和 π 时, i 仅有周期分量; 当 $\alpha - \varphi = \pm \pi/2$ 时, i 的非周期分量的数值为最大。

3. 当 α 改变时, 由于非周期分量的改变, i 的峰值也发生变化。在给定 φ 值的情况下, 由于 α 改变而可能产生的最大电流峰值称为冲击电流 I_c , 它的求法如下:

$$\text{令 } \frac{\partial i}{\partial \alpha} = 0$$

$$\text{得 } \cos(\omega t + \alpha - \varphi) + \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\text{tg}\varphi} e^{-\frac{\omega t}{\text{tg}\varphi}} = 0 \quad (2.2)$$

$$\text{令 } \frac{\partial i}{\partial \alpha} = 0$$

$$\text{得 } \cos(\omega t + \alpha - \varphi) - \cos(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t}{\text{tg}\varphi}} = 0 \quad (2.3)$$

联解此二式, 有

$$\text{tg}(\alpha - \varphi) = -\text{tg}\varphi \quad (2.4)$$

于是

$$\alpha = 0 \text{ 或 } \pi \quad (2.5)$$

由此可见, 不论 φ 为何值, 只有在开关电器关合时电源电压瞬时值为零的情况下, 才获得最大的短路电流峰值。