

高压交流 断路器的 运行条件

曹荣江 顾霓鸿 著

北京工业大学出版社

高压交流断路器的 运行条件

曹荣江 顾霓鸿 著

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高压交流断路器的运行条件 / 曹荣江, 顾霓鸿
著. - 北京: 北京工业大学出版社, 1999. 12
ISBN 7-5639-0754-8

I. 高… II. ①曹… ②顾… III. 断路器-
运行条件-研究 N. TM561

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第
66992 号

高压交流断路器的运行条件

曹荣江 顾霓鸿 著

※

北京工业大学出版社出版发行

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

※

1999 年 12 月第 1 版 1999 年 12 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 32 开本 17 印张 425 千字

印数: 1~2000 册

ISBN 7-5639-0754-8/T·109

定价: 30.00 元

序

交流高压断路器是电网（输电网、配电网）的关键部件，它的安全可靠的动作和运行，对确保电力系统的安全稳定运行和可靠供电起着重要作用。当前市场上国内外有关高压断路器原理、结构等方面的书籍不少，但有关运行条件方面的书籍，特别是高水平的、内容详实的书则缺乏，不能满足使用要求。本书的出版能够满足这方面的需要。

本书总结了电力部电力科学研究院高压开关研究所近 20 年来在高压开关设备运行技术方面的研究成果。所列内容涉及到高压开关设备的共用条件，断路器、隔离开关、SF₆ 封闭式开关设备等方面有关运行条件的基础研究与论证。许多内容填补了我国在这方面的空白，已经成为我国制定本行业专业标准许多条款的依据，并被设计、运行、制造、科研及院校广泛采用。本书实事求是地反映有关问题，提出了正确的解决办法，代表了运行及制造双方的共同要求。

本书既总结了我国高压开关运行的丰富经验，又概括了作者多年来的科研成果，代表了我国电力运行部门在高压开关运行条件方面的研究当前所达到的国内水平。其中有些方面的论点与成就为国内外独创，如“燃弧时差”的论述、“潜供电弧的自灭特性”、“串联补偿保护断路器的试验方法及试验回路”、“开断空载变压器的机理”、“10kV 真空断路器电寿命判据”等。

本书作者多年从事高压断路器运行条件的研究，是我国电力系统的著名专家和高压断路器专业的学术带头人，有丰富的科研成果，其实践经验和论著在国内外有着广泛的影响。

本书的出版对提高高压断路器的制造、运行水平，提高设计、运行人员的素质和水平有着重要意义。

周孝信

电力部电力科学研究院总工程师

中国科学院院士

1997.10.13

作 者 的 话

1985年12月,水利电力出版社出版了我们写的一本著作《交流高压断路器的运行条件》。时隔20余年,电力部电力科学研究院高压开关研究所及电力部高压开关设备标准化技术委员会曾组织各方同仁完成了一系列的科研任务,其中也包含十余位研究生的硕士论文,获得了许多成果,这些结论多已进入了本行业的各类标准中。许多热心人建议,能否把它们集中起来,也表示我们这一年代技术人员在这方面所做出的努力,使后来者便于了解许多技术上规定的由来,至少,会方便一点吧!

我们搜集了历年来著作中的有关部分,在原书的基础上增加了相当多的内容。蒙曹荣江的同窗学友钟佐华老同志相约,由北京工业大学出版社协助出版本书。我们特此致谢。

在成书过程中,引用了下列同志的研究成果,例如:

盛勇同志:第九章~第十二章,第十五章;

秦文钝同志:第二十三章;

安婷同志:第二十七章,第二十八章;

曹隆建同志:第三十三章;

朱拱照同志:第三十四章;

张新育同志:第四十三章;

李斌同志:第四十四章;

范起明同志:第四十九章。

本书许多资料也来自电力部电力科学研究院的大功率试验站,他们为本书资料的积累提供了大量的原始试验资料。作者在此一并致谢。

本书第三十二章 2~7 节和第五十二章由顾霓鸿执笔,其余各章由曹荣江执笔;但是,许多科研任务是我们共同负责完成的。

本书在成书过程中,大部分手稿由范起明同志抄写,并协助整理辞句,特此致谢。

作者

1997. 10. 29

内 容 简 介

本书总结了电力部电力科学研究院高压开关研究所近二十年来在高压开关设备运行技术方面的研究成果。所列内容涉及到高压开关设备的共用条件,断路器、隔离开关、SF₆封闭式开关设备等方面有关运行条件的基础研究与论证。这些内容填补了我国在这方面的空白,已经成为我国制定本行业专业标准许多条款的依据,并被设计、运行、制造、科研、教学广为采用。本书实事求是地反映有关问题,提出了正确的解决办法,代表了运行和制造双方的要求。

本书具有及时性、理论性、总结性、科学性,密切结合中国条件,其中在某些方面的论点与成就的论述为国内外独创。

本书供从事电力工程方面工作的工程技术人员、科研人员和教学人员参考。

目 录

前言	(1)
第一章 三相电路开断过程的波形和矢量解析方法	(6)
第二章 高压交流断路器中的灭弧过程	(24)
第三章 高压开关设备运行的环境条件	(33)
第四章 额定电压、额定电流、额定短路开断电流和额定 短路关合电流	(51)
第五章 短路电流及其直流分量	(55)
第六章 断路器的时间参量	(60)
第七章 断路器在“合分”操作中的合分时间（即金属短 接时间）	(68)
第八章 7.2 kV~550 kV 断路器的瞬态恢复电压特 性值 (TRV)	(76)
第九章 短路电流中只有交流分量时的高压交流断路器 燃弧时差的概率分布特性	(87)
第十章 短路电流中带有直流分量时的高压交流断路器 燃弧时差的概率分布特性	(107)
第十一章 蒙特卡罗法在求解燃弧时差概率特性中的 应用	(119)
第十二章 高压交流断路器合成试验中的燃弧时差和各种 试验方式下燃弧时间的确定	(129)
第十三章 高压交流开关设备（包括断路器）的绝缘水平 额定值	(141)
第十四章 我国 12 kV~40.5 kV 级开关设备的绝缘 水平	(145)

第十五章	关于高压开关设备的耐压试验·····	(149)
第十六章	高压开关设备外绝缘的公称爬电比距及 凝露·····	(159)
第十七章	额定短时耐受(热稳定)电流的通流时间 额定值·····	(167)
第十八章	峰值耐受电流和短路关合电流(峰值)·····	(169)
第十九章	机械稳定性试验·····	(184)
第二十章	断路器引线端子上的静负载试验·····	(188)
第二十一章	断路器的开断与关合工况分类·····	(194)
第二十二章	近区故障对断路器工作条件的影响·····	(196)
第二十三章	断路器带有并联电阻时近区故障暂态恢复 电压的计算·····	(212)
第二十四章	失步情况下的开断与关合条件·····	(230)
第二十五章	异相同时接地的开断与关合·····	(238)
第二十六章	发展性故障与并联开断·····	(240)
第二十七章	断路器开断空载变压器的机理·····	(244)
第二十八章	开断变压器二次侧的短路故障·····	(259)
第二十九章	电寿命试验和不经检修的连续开断能力·····	(273)
第三十章	12 kV 真空断路器电寿命的质量判据·····	(278)
第三十一章	IEC 关于增设 E2 类断路器的说明·····	(313)
第三十二章	关合条件和关合过程中诸因素的相互 关系·····	(315)
第三十三章	工频强电流电弧在充油非密闭容器中形成 的压力·····	(344)
第三十四章	单相自动重合闸的重合时间整定值、潜供 电弧自灭特性与断路器的分合时间·····	(363)
第三十五章	关于断路器参数选择的若干具体问题·····	(380)
第三十六章	开关柜对真空断路器开断特性的	

	影响 (12 kV 级)	(388)
第三十七章	关于充气开关设备的泄漏、含水量和凝露	(391)
第三十八章	自由脱扣和操动机构受电元件的额定电压	(399)
第三十九章	防止电气误操作——“五防”	(406)
第四十章	低温地区的 SF ₆ 断路器	(410)
第四十一章	大电流断路器	(413)
第四十二章	串联补偿装置保护断路器 (及其他保护元件) 的工作条件及试验方法	(440)
第四十三章	高压交流隔离开关开断母线转换电流工作条件的研究	(454)
第四十四章	GIS 中接地开关开断感性电流的技术要求	(470)
第四十五章	触头	(472)
第四十六章	瓷件的机械强度	(474)
第四十七章	无线电干扰水平、电晕、噪声干扰	(477)
第四十八章	断路器结构上的某些其他要求及试验条件	(481)
第四十九章	变压器油和新型断路器油	(485)
第五十章	断路器的型式试验及其试验项目	(488)
第五十一章	如何选用 12 kV 真空断路器	(491)
第五十二章	直流电源	(496)
附录一	巴黎国际大电网会议第 13 研究委员会的战略计划“开关装置”(摘录)	(520)
附录二	由电力部有关标准化技术委员会制定的高压开关设备类电力行业标准目录	(528)
参考文献		(530)

前 言

高压开关设备的含义泛指一切操作装置及其组合体，其中包含与之组合在一起的控制、测量、保护、调整等功能元件，它们的附属装置、外壳和支持结构，以及各组合件之间的联结和闭锁等。高压开关设备包含两个主要范畴：其一是与发电、输电、配电和电能转换有关的操作设备，在英文叫做 switchgear，在俄文叫做 коммутационная аппаратура；其二是与消耗电能有关的操作设备，在英文叫做 controgear，在俄文叫做 аппаратура управления。在我国，前者称为开关设备，后者称为控制设备。习惯上又都混称为开关装置。

按照狭义的理解，高压开关就是能开断与关合高压回路（带电与不带电）的操作装置。它应包括断路器、隔离开关、负荷开关和接地开关。从广泛的意义来说，高压开关应包含除变压器等少数几种电力设备以外的几乎所有的高压电器。例如，除去上述几种开关外，还应包含熔断器、各式开关柜（金属封闭开关设备）、各类组合式电器、全封闭 SF₆ 组合电器（气体绝缘金属封闭开关设备）、重合器、分段器等。

在这些高压开关设备中，最基本、最重要的就是断路器。它的职能是能在带电与不带电情况下实现三种功能，即转换操作功能，承载系统中的额定电流持续供电的功能，在故障短路电流作用下实现各种转换与开断、关合操作的功能。

为了实现这些功能，断路器必须带有各种功能元件，这就是：

- 实现转换的本体（导流，灭弧）；
- 操作元件及其能源；

- 感知（测量）元件，控制元件；
- 外壳、支撑和联结（包括绝缘作用）。

断路器的分类是多种多样的：

- a) 按相数可分为：三相，单相，多相；
- b) 按安装地点可分为：户内，户外；
- c) 按操作能源可分为：手动，电动，气动，液动，或通过储能弹簧，永磁；
- d) 按照电压可分为：3.6 kV~72.5 kV，126 kV~252 kV，363 kV 及以上；
- e) 按照地区可分为：普通型，高原型，防震型，防污型与湿热型；
- f) 按照重合闸功能可分为：能自动重合的（单相自动重合或三相自动重合），不能自动重合的；
- g) 按照三相结构方式可分为：三相共箱式（或共用一个外壳），分相式（各相有自己的箱体或外壳）；
- h) 按照气象条件可分为：一般地区，湿热型，严寒型；
- i) 按频率性质可分为：直流，工频，高频；
- j) 按灭弧和绝缘介质可分为：空气式（产气、压气、磁吹），压缩空气式，油式，SF₆（或其他气体的混合体）式，真空式等；
- k) 按绝缘水平可分为：加强绝缘型，一般型和降低绝缘水平型；
- l) 按照操作对象还可分为：专用型（例如，专用于开、合电容器组，发电机断路器，厂用电断路器），非专用型；

此外，还有一些其他分类方法。

在本书写成之前，我国运行中台数最多的是多油型和少油型，而人们赋予更多注意力的是 SF₆ 型及真空型，以及由 SF₆ 型发展而成的组合系列——GIS。后者发展迅速。

高压断路器作为发电和用电之间的联系环节，其重要性不言

自明。仅就高压断路器的故障而言，近十年的统计数字表明，每次断路器事故平均损失电量达数百万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。近年来，最严重的一次断路器事故(仅为 12 kV 级小型断路器)导致电量损失达 1 亿 $\text{kW} \cdot \text{h} \sim 2$ 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。它所导致的损失为其本身价格的千倍、万倍。因此，从运行上来说，安全第一。

我国地域辽阔，各地条件差异很大。我国电力系统情况与世界各地区也并不一致。因此，在引用国外经验和国际标准时要结合地区情况。一方面要学习别人的长处，不要轻易否定别国长久形成的经验，但也不要不加鉴别地套用。引用国外的规定要照顾到本国实情。所谓实情，是指国内运行上的要求和我国制造能力的综合，不是单指一方。这种“实情”并不一定是先进的，但必须顾及。例如：

- a) 我国在一个不短的期限内，超高压级线路多为单线远距离的，因而过电压较高；
- b) 我国环境污染严重，户内也有污染；
- c) 我国材质较差；
- d) 我国广大农村正待发展；
- e) 我国较长期处于电力不足的发展阶段中或有电送不出；
- f) 我国财力有限。

这些特点导致：

- a) 某些电压等级所要求的绝缘水平较高；
- b) 某些户内设备要求的爬电比距有可能与户外一样；
- c) 某些户内元件的尺寸、相间距离在一定时期不但不能缩小，反而要求加大；
- d) 某些在世界上看来即将淘汰的产品在我国还将继续起作用，如少油断路器；而在一些国家已广为采用的一些产品在我国则正在逐步推广。

但是，从总的趋势来看，我国技术总在不断发展与进步，力

求跟上先进的步伐。新技术、新设计、新材料、新产品不断出现。因此，既要强调本国的特点，也要力求发展。本书力求从这一观点出发来论述高压交流断路器的工作条件。

高压交流断路器的运行条件和技术要求是开发这类产品的依据，是其一切特性的基础，是制定有关产品的国家标准和行业标准的根据。但是有关这方面的科研成果和论证多散见于一些技术文件中，这对于刚从事此专业的人员，甚至多年工作的人员，也难于全面掌握这些专业知识。我们虽然多年从事这一工作，对这些专业知识的了解也还有局限性。国际上和国内的专业标准仍在逐年修订和完善。为了适应近年来专业人员变动频繁和培训的需要，综合地较全面地论述这一命题实属必要。

本书阐明了运行条件和技术要求的理论和实验依据，供科研、设计、制造、运行和教学参考。

下列各点为本书独具的科研成果论述¹⁾：

- 燃弧时间与燃弧时间差^{①②③④}；
- 开断空载变压器的机理^{⑤⑥}；
- 工频大电流在充油非密闭容器中形成的压力^{⑥⑦}；
- 关合条件、关合过程^{⑧⑨}；
- 开关设备的耐压试验方法^⑩；
- 表征真空断路器电寿命能力优劣的判据^⑪；
- 开断时间的论述^⑫，近区故障条件分析^{⑬⑭}；
- 潜供电弧特性及其自灭时限^{⑮⑯⑰⑱}；
- 我国配电电压等级开关设备的耐压水平^⑲；
- 开关柜的柜内绝缘及“火烧连营”事故的基本对策；
- 封闭开关设备的泄漏率与受潮（含水量）；
- 串联补偿保护断路器的工作条件和试验方法^{⑳㉑}；

1) 右上标的①、②、③、④等表示参考文献的序号。

——隔离开关开断母线转换电流的技术要求^②。

这些论述已经进入相应的标准。

对于进入各类开关设备标准的其他论述，本书也一并尽可能列入。

本书能代表电力部近二十年来在本专题领域中的科研成就。

本书也一定存在缺点、不足和谬误。一个论点在当时看来是合理的，随着时间的推移，认识深化，又需要修正。本书也为后来人起着抛砖引玉的作用。

本书曾于1985年12月由水利电力出版社出版，书名相同。时隔12年，技术上取得许多进展。本书对原书作了大量的补充及更正。许多论点，以这次版本为准，特此说明。此外，将名称“交流高压断路器”改为“高压交流断路器”，以便与国际上的称呼一致。

第一章 三相电路开断过程的波形和矢量解析方法^{②③}

常见的三相电路开断过程的计算方法是对称分量法。对称分量法将电路分解为正序、负序和零序，再按照一定的规律处理。本章在零序回路中引入一定的阻抗值，按回路方程求解，能得到同样的结果。此法简便、直观，介绍如下。

1.1 中性点接地、无直流分量时的开断过程

三相回路如图 1-1 所示，其中设正序阻抗等于负序阻抗 ($x_1 =$

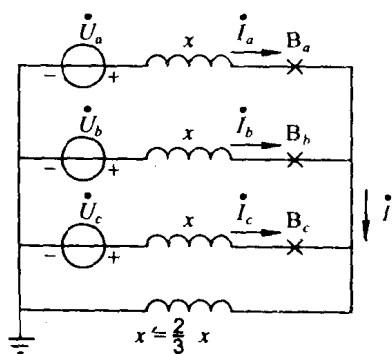


图 1-1 末端三相接地短路
且中性点接地的回路

$x_2 = x)$ ，且零序阻抗 $x_0 = 3x$ 。忽略线路电阻。求中性线上的电抗。设电源电压三相对称。

对零序回路而言，

$$\dot{U}_0 - 3\dot{I}_0j\frac{x}{3} - 3\dot{I}_0jx' = 0 \quad (1-1)$$

由式 (1-1) 得

$$x' = \frac{2}{3}x \quad (1-2)$$

设首先开断相为 a 相。在 B_a 断开后，余下如图 1-2 所示的两相回路。由图 1-2 得 (其中上角号 “(2)” 表示两相运行期中的电流)。