



国际电气工程先进技术译丛

高压断路器 —— 理论、设计与试验方法

High Voltage Circuit Breakers

[波黑]米尔萨德·卡普塔诺维克 (Mirsad Kapetanović) 著

王建华 闫静 译

荣命哲 耿英三 刘志远 审校

以DNV·GL 集团下全球领先的KEMA 电气实验室之丰富经验，
著就行业权威技术专著！

Most complete book ever written from test experiences at the KEMA Laboratories of
DNV·GL, world leader in accredited testing and certification of equipment for transmis-
sion and distribution of electricity.

KEMA

Laboratories

DNV·GL



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

高压断路器

——理论、设计与试验方法

High Voltage Circuit Breakers

[波黑] 米尔萨德·卡普塔诺维克 (Mirsad Kapetanović) 著
王建华 闫静 译
荣命哲 耿英三 刘志远 审校



机械工业出版社

The English edition Copyright © 2011 by Author.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means whatsoever without written permission from the copyright holder. The Chinese edition Copyright © 2012 by China Machine Press.

本书中文简体字版由机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2012-7800 号

图书在版编目 (CIP) 数据

高压断路器：理论、设计与试验方法/（波黑）卡普塔诺维克著；
王建华，闫静译. -北京：机械工业出版社，2015.4

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：High voltage circuit breakers

ISBN 978-7-111-49602-1

I. ①高… II. ①卡…②王…③闫… III. ①高压断路器-研究
IV. ①TM56

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 047463 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：付承桂 责任编辑：张沪光

责任校对：陈延翔 封面设计：马精明

责任印制：李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 30.25 印张 · 589 千字

0001—3500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-49602-1

定价：99.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

本书作者是高压开关设备领域的国际知名专家，英文版由国际权威高压设备试验和认证机构——KEMA 组织出版，全面讲述了高压断路器的工作原理和技术现状，并介绍了国外实际产品的原理与设计，使读者能够更好地理解高压断路器的最新技术。

本书充分反映了近年来国际范围内高压断路器基础理论、工作原理、产品设计、试验技术方面的当前进展，对现代高压断路器及开关设备的设计、制造、运行和科技管理具有积极的推动作用。与同类书相比，本书内容丰富且反映了国外产品的最新发展，详尽地说明了 IEC 标准及其他标准，特别阐述了高压断路器的最新试验方法，包括很多 KEMA 独有、专有的试验技术和方法以及试验报告内容。

本书可为高压电器研究、设计、试验、运行和管理的广大工程技术人员提供很有价值的帮助，同时也可作为高等工科院校电气工程专业特别是电器、高电压技术方向的本科生、研究生教材。

译者序

2011年10月，第一届电力设备开断技术国际会议在西安交通大学成功举办，该会议是由中日韩联合创建的电力设备方面的系列国际会议，对该领域的学术研究和发​​展具有里程碑式的意义。在长达2年的筹备期间，国际、国内各方面专家、学者给予了热情的支持和积极的帮助。国际知名电力设备专家、荷兰KEMA实验站的Smeets教授从一开始就对此次会议充满了热情，不断从各个方面给予支持和帮助。在会议召开期间，作为重要的礼品，他向我赠送并郑重推荐了此书的英文版《High Voltage Circuit Breakers》，同时也希望能够在我国推广这本书。我当即被书中丰富的内容、深入而专业的题材所吸引，我感到这本书对于我国的电力设备领域专业人士必定会有极大的帮助，会有力促进我国高压电力装备在技术水平上进一步提高。我立即提出将此书翻译成中文出版的建议，Smeets教授给予了积极和热情的反馈。随后我们与机械工业出版社电工电子分社进行了沟通，得到了他们的积极支持。机械工业出版社与国外出版社进行了版权谈判，取得了在我国翻译出版的权利，并委托西安交通大学组织翻译。

本书内容十分丰富，从高压断路器的基本原理、结构，到开关电弧的物理模型，从各种工作状况，到全面的试验方法，对于电力装备开发制造领域的人士极具价值，对于相关专业的本科生和研究生也是极好的教科书。

在本书的翻译过程中，西安交通大学的闫静博士付出了大量时间和心血，他完成了本书的初稿翻译工作。西安交通大学的荣命哲教授、耿英三教授、刘志远教授也对书稿进行了审校，提出了很多宝贵的意见。他们对完成本书的翻译起到了十分重要的作用。

由于本书涉及内容十分广泛丰富，在高压断路器试验方面涉及大量国际标准和专门的试验方法，内容十分专业，在翻译过程中难免有错误和不当之处，敬请指正。在此也对所有长期以来支持和帮助西安交通大学电器学科的各位专家、学者和朋友们一并表示感谢！

王建华 博士
西安交通大学电气工程学院 教授
电力设备电气绝缘国家重点实验室 主任
2014年9月于西安

原 书 序

2003年，Mirsad Kapetanović教授在萨拉热窝举行的 CIGRE 研究委员会 A3（高压设备）会议上向与会国际专家介绍了他的著作“Visokonaponski Prekidaci”（波斯尼亚语，译为《高压断路器》）。

在近35年的时间里，Kapetanović教授为萨拉热窝的动力投资公司（Energoinvest）积极参与了高压断路器的研究、开发与试验，属于“热情的断路器爱好者”的核心圈成员。

虽然我并不精通波斯尼亚语，但还是立即被书中关于开断和关合内容的覆盖范围和深度所吸引。

2008年，KEMA邀请Kapetanović教授用英语编写本书的最新和扩展版本。由Lou van der Sluis教授（Delft大学）、P. Knol先生（KEMA）和我本人（KEMA）组成的编委会对这一过程进行管理。

该著作综述了断路器技术现状：涵盖其历史、开关电弧的相关物理现象、电力系统中开关操作的影响、技术以及最新但决非次要的试验技术。

另外，很多KEMA专有的试验技术和试验结果的展示方法在本版本中进行了描述。

由于经常依靠KEMA为其设计提供认证和研究试验，Kapetanović教授的团队已经与KEMA建立了数十年的关系。我们享受在许多场合热烈讨论，详细质询许多已广泛接受的试验原理，例如合成试验与直接试验的等效性。Kapetanović教授渴望采用KEMA提供的新技术，例如电流零区技术，用于检验在断路器设计中使用的模型。作为萨拉热窝大学电气工程系的教授，他将这方面的知识传授给他的学生并通过本书传授给更多的读者。

试验要坚实地建立在三个支柱上：标准、有能力的专家和充足的试验设备。只有通过这样的支持，试验才能为元件性能提供高质量的验证。

作为高压设备试验和认证领域中全球市场的领导者，自1927年起KEMA一直努力保持这一坚实地位。

本书旨在使读者认识到高压断路器并非“即插即用”设备，每一特定应用都有其独特性。

为这一涉猎广泛技术领域提供引导是作者、编辑委员会和KEMA的真正使命。

René Smeets 博士、教授
KEMA 输配电试验服务部
阿纳姆

2010年10月31日

致 谢

首先，也是最重要的，我想感谢 KEMA 和埃因霍芬大学的 René Smeets 教授为 KEMA 编写本书的想法和邀请。我真正享受在本书完成过程中与他的合作。我感谢他在这项工作中奉献的时间和精力。他的深入点评、重要贡献和最新信息，为我提供了非常宝贵的信息资源。

我还要向编辑委员会的另外两位成员，KEMA 的 Piet Knol 先生和 Delft 大学的 Lou van der Sluis 教授表达我的谢意，感谢他们为审阅我的著作而投入的时间以及给我提供的有价值的反馈。

我要感谢本书波斯尼亚语版的审阅人，萨拉热窝大学的 Kemo Sokolija 教授和 Mensur Hajro 教授。另外，我要特别感谢 Zoran Gajić 博士自愿为第 3 章进行的审阅。

我要感谢我的女儿 Maja，她完成了本书最初的英文翻译工作。我还要感谢编辑团队，他们在审阅中从技术角度对语言进行审查。最后，我要感谢先前在美国 KEMA 电力试验部工作的 Scott Wilson 先生，他作为以英语为母语的人士进行了校对工作。

我要向允许使用其插图、证书和试验报告的公司表达我的谢意。

我很高兴地向 Mahir Sokolija 表达特别的谢意，感谢其出色的版面制作工作。

我要感谢在本书完成过程中在任何方面支持我的所有同事和朋友，以及在本书末尾的结束语中提到的所有人。

最后，我要感谢我的妻子 Muruveta，当我放弃了许多重要事情时，感谢她在几乎三年的时间里的支持和包容。我将这本书献给她、我们的孩子，以及我们的孙女 Ajša。

目 录

译者序
原书序
致谢

第 1 章 开关装置简介	1
1.1 开关装置的用途	2
1.2 开关装置的定义	3
1.2.1 隔离开关	3
1.2.2 接地开关	3
1.2.3 快速接地开关	4
1.2.4 负荷开关	4
1.2.5 合闸开关	4
1.2.6 接触器	4
1.2.7 熔断器	4
1.2.8 火花间隙	5
1.2.9 避雷器	5
1.2.10 故障电流限制器	5
1.2.11 起动器	5
1.2.12 开关稳定器	5
1.2.13 继电器	6
1.2.14 断路器	6
1.2.15 隔离断路器	6
第 2 章 气体中的电弧	7
2.1 电弧的基本过程和物理特性	8
2.1.1 金属表面电子发射机理	11
2.1.2 电弧中的载流子	13
2.1.3 触头上的能量平衡	14
2.1.4 触头侵蚀机理	15
2.1.5 触头侵蚀研究的实验结果	17
2.1.6 触头材料的分类	22
2.1.6.1 高导电率金属与合金	22
2.1.6.2 抗化学腐蚀的金属与合金	24

2.1.6.3	难熔金属	24
2.1.6.4	烧结材料	25
2.1.7	触头材料的特性	25
2.2	直流电弧	28
2.2.1	气体放电的伏安特性	28
2.2.2	直流电弧的熄灭	30
2.3	交流电弧	33
2.3.1	交流电弧的伏安特性	33
2.3.2	热击穿和电击穿区域	34
2.3.3	电弧电导率、功率与弧柱中的能量消耗	36
第3章	电弧建模	37
3.1	<i>P-T</i> (黑盒) 电弧模型	38
3.1.1	Mayr 与 Cassie 方程	39
3.1.2	动态电弧方程的普遍形式	41
3.1.3	电弧模型和相关参数概况	41
3.1.4	<i>P-T</i> 电弧模型的实际应用	46
3.1.5	电弧参数的求取	48
3.1.6	数值处理	50
3.1.7	有效性检验	52
3.1.8	电流零区测量	53
3.1.8.1	电流测量	53
3.1.8.2	电压测量	56
3.1.8.3	处理原始测量数据以转换为电弧电流和电弧电压	56
3.1.8.4	电流测量系统的性能	56
3.2	电弧物理模型	59
3.2.1	电弧物理模型的通用方程组	60
3.2.2	具有焓流的简化电弧物理模型	63
3.2.2.1	附加假定条件	63
3.2.2.2	方程组	63
3.2.2.3	SF ₆ 等离子体的热力学特性	66
3.2.2.4	电弧电流的时间关系式	66
3.2.2.5	横截面和电弧电压的确定	66
3.2.2.6	沿电弧轴线压力分布的确定	67
3.2.2.7	静止和稳定气流条件下的 SF ₆ 气体状态方程	71
3.2.2.8	SF ₆ 气体热力学特性的计算表达式	73
3.3	高压 SF ₆ 断路器操作的计算机仿真	74
3.3.1	计算机仿真程序	74
3.3.2	特征量	76

3.3.3 熄弧窗口	76
3.4 电弧建模的其他工具	77
3.4.1 电弧直径和电弧温度	78
3.4.2 气体和真空中的电弧电压	78
3.4.3 冷态电压特性	81
3.4.4 极限曲线	84
3.4.5 截流系数	87
3.4.6 断路器的电寿命	89
第4章 真空电弧	97
4.1 真空电弧简介	98
4.1.1 阴极和阳极鞘层	98
4.1.2 扩散型与集聚型真空电弧	100
4.1.2.1 扩散型电弧	101
4.1.2.2 集聚型电弧	103
4.2 通过磁场控制真空电弧	104
4.2.1 横向磁场原理	104
4.2.2 纵向磁场原理	106
第5章 灭弧介质	110
5.1 空气	113
5.1.1 在空气中拉长灭弧	114
5.1.2 磁吹灭弧	117
5.1.3 压缩空气灭弧	120
5.2 矿物油	121
5.2.1 多油断路器的灭弧	122
5.2.2 少油断路器的灭弧	125
5.3 六氟化硫 (SF ₆)	126
5.3.1 物理特性	127
5.3.2 SF ₆ 分解物	130
5.3.3 SF ₆ 对环境的影响	134
5.3.3.1 臭氧损耗	134
5.3.3.2 温室效应	135
5.3.3.3 生态病理学和对健康的潜在影响	138
5.3.4 SF ₆ 替代物	139
5.4 SF ₆ /N ₂ 混合气体	141
5.5 真空	143
5.5.1 保持高真空	147

5.5.2	更高电压等级下真空的应用	148
5.5.3	真空中的触头材料	149
第6章	开合方式与暂态过程	153
6.1	负载类型	154
6.1.1	阻性负载	155
6.1.2	容性负载	155
6.1.3	感性负载	156
6.1.3.1	大电感电流: 短路	157
6.1.3.2	小电感电流	158
6.2	短路电流	159
6.2.1	短路电流与电压之间的关系	160
6.2.2	直流分量百分数	161
6.2.3	非对称电流的有效值和峰值	163
6.3	瞬态恢复电压 (TRV)	165
6.3.1	TRV 的定义	165
6.3.2	单频瞬态恢复电压波形	166
6.3.3	双频瞬态恢复电压波形	167
6.3.4	瞬态恢复电压的两参数包络线	168
6.3.5	瞬态恢复电压的四参数包络线	170
6.3.6	分布参数电路中的瞬态恢复电压	170
6.3.7	IEEE/ANSI 规定的瞬态恢复电压波形	173
6.3.8	三相电网中的瞬态恢复电压	174
6.3.9	首开极系数	177
6.3.10	近区故障的瞬态恢复电压	178
6.3.11	起始瞬态恢复电压 (ITRV)	184
6.3.12	瞬态恢复电压、起始瞬态恢复电压和近区故障	185
6.3.13	失步条件下的瞬态恢复电压	187
6.3.14	短路电流非对称性对瞬态恢复电压的影响	190
6.3.15	电弧电压对瞬态恢复电压的影响	193
6.3.16	截流对瞬态恢复电压的影响	193
6.3.17	弧后电流对瞬态恢复电压的影响	194
6.3.18	阻尼对瞬态恢复电压的影响	194
6.4	电容电流开合过程中的暂态现象	195
6.4.1	电容电路	195
6.4.2	成功的电容电流开断的实例	196
6.4.3	重击穿情况下电容电流开断的实例	197
6.4.4	连续重击穿引起的电压级升	199
6.4.5	小电容电流的截流	199

X 高压断路器——理论、设计与试验方法

6.4.6	断路器特性对电容电流开合的影响	200
6.4.7	负载和电源侧阻抗的影响	202
6.4.8	三相电路中的电容电流开断	203
6.4.9	电容器组的关合	205
6.4.10	架空线的关合与重合闸	207
6.5	小电感电流开合过程中的暂态现象	209
6.5.1	小电感电流的截流	209
6.5.2	空载变压器的开合	210
6.5.3	并联电抗器的开合	212
6.5.4	复燃现象	214
6.5.5	并联电抗器开合过程中的过电压	216
6.5.6	虚拟截流	218
6.6	非标准开合方式	220
6.6.1	变压器和串联电抗器限制故障	220
6.6.1.1	变压器限制故障	220
6.6.1.2	串联电抗器限制故障	222
6.6.2	无电流零点的短路电流	224
6.6.3	发展性故障——感性工况	226
6.6.4	发展性故障——容性工况	227
6.6.5	短路电流的并联开断	228
6.7	过电压的防护方法	230
6.7.1	合闸电阻及其作用	232
6.7.2	避雷器	233
6.7.2.1	阀式避雷器	234
6.7.2.2	金属氧化物避雷器	235
第7章	断路器的工作原理与设计	238
7.1	断路器的要求	239
7.2	断路器的分类	240
7.2.1	油断路器	245
7.2.2	空气断路器	248
7.2.3	SF ₆ 断路器	250
7.2.3.1	双压力式 SF ₆ 断路器	252
7.2.3.2	单压力(压气)式 SF ₆ 断路器	252
7.2.3.3	自能单压力式 SF ₆ 断路器	258
7.2.3.4	双动原理	262
7.2.3.5	倍速原理	267
7.2.3.6	旋弧式 SF ₆ 断路器	269
7.2.4	真空断路器	269

7.3 操动机构	274
7.3.1 气动操动机构	276
7.3.2 液压操动机构	277
7.3.3 弹簧操动机构	279
7.3.4 电磁驱动机构	281
7.3.5 电动机驱动机构	282
7.4 断路器的维修和状态监测	283
7.4.1 监测参数的选择	285
7.4.2 监测特性的解释	287
第8章 选相开合	290
8.1 选相开合的原理	291
8.1.1 选相分闸	292
8.1.2 选相合闸	293
8.2 对断路器的功能要求	294
8.2.1 机械特性	294
8.2.2 电气特性	295
8.3 选相开合的实际应用	296
8.3.1 并联电容器组的选相开合	297
8.3.2 空载架空线的选相开合	298
8.3.3 并联电抗器的选相开合	300
8.3.4 空载变压器的选相开合	302
8.4 可靠性问题	305
8.5 优势与经济因素	307
第9章 短路与开合试验	310
9.1 大容量实验室	311
9.2 直接与间接试验	313
9.2.1 三相直接试验	314
9.2.2 单相直接试验	315
9.3 合成试验	318
9.3.1 开断过程的几个阶段	319
9.3.2 关合过程的几个阶段	320
9.3.3 合成试验方法的类型	322
9.3.3.1 电流引入法	322
9.3.3.2 电压引入法	325
9.3.3.3 三相合成试验方法	326
9.3.3.4 对特高压断路器进行试验的合成回路	327

9.3.4	延弧回路	330
9.3.5	电流回路的电压	331
9.4	短路和开合试验的实例	331
9.4.1	试验文件中包括的信息	334
9.4.2	短时耐受电流和峰值耐受电流试验	334
9.4.3	出线端故障试验	337
9.4.3.1	试验方式 T10	338
9.4.3.2	试验方式 T30	340
9.4.3.3	试验方式 T60	344
9.4.3.4	试验方式 T100s	347
9.4.3.5	试验方式 T100a	360
9.4.4	临界电流试验方式	367
9.4.5	单相和异相接地故障试验	368
9.4.6	近区故障试验	370
9.4.6.1	试验方式 L90	371
9.4.6.2	试验方式 L75	380
9.4.6.3	试验方式 L60	381
9.4.7	失步试验	383
9.4.7.1	试验方式 OP1	384
9.4.7.2	试验方式 OP2	384
9.4.8	容性电流开合试验	391
9.4.8.1	线路充电电流开合试验	393
9.4.8.2	电缆充电电流开合试验	394
9.4.8.3	电容器组电流开合试验	398
9.4.9	感性负载开合试验	400
9.4.10	电寿命试验	408
9.4.11	试验后的状态评估	412
9.4.11.1	空载操作	412
9.4.11.2	检查	413
第 10 章	高压断路器的选型	415
10.1	额定特性的选择	416
10.1.1	额定电压	417
10.1.2	额定绝缘水平	418
10.1.3	额定频率	420
10.1.4	额定电流	421
10.1.5	额定短时耐受电流	424
10.1.6	额定峰值耐受电流	424
10.1.7	额定短路持续时间	424

10.1.8	额定短路关合电流	425
10.1.9	额定短路开断电流	425
10.1.10	与额定短路开断电流相关的瞬态恢复电压	427
10.1.11	近区故障的额定特性	431
10.1.12	失步的额定特性	431
10.1.13	额定操作顺序	432
10.1.14	额定时间参量	432
10.1.15	辅助和控制回路的额定电源电压和频率	434
10.1.16	机械寿命 (M1 和 M2 级)	434
10.1.17	重击穿性能和容性电流开合额定值 (C1 和 C2 级)	435
10.1.18	感性负载电流开合额定值	436
10.1.19	电寿命 (E1 和 E2 级)	437
10.2	使用条件的选择	438
10.2.1	正常使用条件	438
10.2.1.1	户内装置的正常使用条件	438
10.2.1.2	户外装置的正常使用条件	439
10.2.2	特殊使用条件	440
10.2.2.1	海拔	440
10.2.2.2	污秽	441
10.2.2.3	环境温度	442
10.2.2.4	空气湿度	442
10.2.2.5	覆冰	443
10.2.2.6	风速	443
10.2.2.7	地震	443
10.3	断路器类型的选择	444
参考文献		446
结束语		464
缩略语表		467

第 1 章 开关装置简介



早在 1799 年，当 Alessandro Volta 发明了首个能够在闭合电路中提供持续电流的电源时^[1]，控制电流的需求便应运而生了。因此，对于开合（开断与关合的总称）电路、关合或开断电流的需求便一直存在。

用于控制电流的电气装置称为开关装置。“开关装置”这一术语用来描述所有能够改变电流路径、使电气装置投入或退出运行、接通或断开电路以及关合或开断电流的电气装置。

在大气中分开触头是最简单的开断电路的方法，在此过程中会出现电弧。当外施电压低于电弧压降时，两金属电极间的空气电弧将会自动熄灭。当外施电压较高时，则需要通过拉长电弧来提高电弧电压，直到系统电压不能维持此电弧电压而使电弧熄灭。

在电气时代的早期阶段，电路的开断就是通过这种方式来实现的。然而，随着电力系统容量的快速增长，这种开断电路的方法很快就不能胜任了，能够满足电力系统发展要求的多种类型的开关装置被相继开发出来。

在实际应用中需要多种形式的开关元件，例如在电话服务领域，传统的机械开关很早就被可实现智能控制和自动操作的半导体开关所取代。但是，半导体技术目前尚不具备足够大的电流开合能力来作为电力系统的高压开关装置使用，传统的机电开关技术仍无法被取代。

1.1 开关装置的用途

由于需要在差异很大的环境和条件下开合电路，因而推动发展了不同用途的开关装置：

- 空载条件下的开合（隔离开关、接地开关）；
- 正常运行条件下的开合（负荷开关、接触器）；
- 短路条件下的开合（断路器、快速接地开关、合闸开关、熔断器、故障电流限制器）；
- 过电压条件下的开合（火花间隙、避雷器）。

除按其用途外，开关装置还可以根据某些基本特征来进行分类。例如，根据额定电压的高低开关装置可被分为低压（LV： $U_n \leq 1\text{kV}$ ）和高压（HV： $U_n > 1\text{kV}$ ）。输电系统电压等级的不断提高又引出了超高压（EHV： $245\text{kV} \leq U_n < 800\text{kV}$ ）和特高压（UHV： $U_n \geq 800\text{kV}$ ）设备的定义。

开关装置可根据其承载的电流类型分为直流（DC）开关装置和交流（AC）开关装置，也可根据其安装地点分为户内式和户外式。

另外，根据开关装置的操作是依赖于电路控制还是仅取决于操作者的主观意愿，可将其分为自动开关装置和非自动开关装置。

最常用的分类方式是根据开关装置所采用的灭弧介质：空气（大气）、油、压