

变压器 真空有载分接开关

BIANYAQI ZHENKONG YOUZAI FENJIE KAIGUAN

张德明 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

变压器 真空有载分接开关

BIANYAQI ZHENKONG YOUZAI FENJIE KAIGUAN

张德明 编著



中国电力出版社

内 容 提 要

全书共分3篇12章。第1篇真空有载分接开关的基础理论,包括真空有载分接开关基本概况、真空电弧的特性、真空有载分接开关过渡电路、真空有载分接开关调压电路、真空有载分接开关绝缘特性。第2篇真空有载分接开关的结构,包括真空有载分接开关结构特点、油浸式真空有载分接开关、干式真空有载分接开关、电动机构与附件。第3篇真空有载分接开关的使用,包括真空有载分接开关的选用与安装、真空有载分接开关运行状态监控与故障诊断、真空有载分接开关的运行维修。

本书可作为从事有载分接开关研究、设计、制造和使用运行的专业技术人员的参考书,也可用作高等工业院校电器和电力专业的参考教材以及相关专业人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

变压器真空有载分接开关/张德明编著. —北京:中国电力出版社, 2015. 4

ISBN 978-7-5123-5933-8

I. ①变… II. ①张… III. ①变压器-有载分接开关
IV. ①TM403. 4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第108650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>

责任编辑:杨淑玲 责任印制:蔺义舟 责任校对:郝军燕

北京市丰源印刷厂印刷·各地新华书店经售

2015年4月·第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·25.5印张·624千字

定价:69.80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

有载分接开关是变压器完成调压的核心组件。早期电力变压器所配都是非真空式有载分接开关,依靠铜钨触头进行负载转换,由此产生的触头烧损、油的碳化和污染较为严重,给用户增加了日常维修工作量。为解决上述问题行之有效的措施是用真空式有载分接开关来替代非真空式有载分接开关。

20世纪70年代末,全球范围掀起的电力设备无油化浪潮给真空开关技术带来了前所未有的发展机遇。凭借它自身巨大的技术优势,与气体(SF_6)绝缘的电力变压器配套的真空有载分接开关在日本得到迅速发展。与此同时,亚太地区(尤其是中国)随着干式配电变压器的迅速发展,研发出与其配套的空气绝缘的真空有载分接开关。进入21世纪后,随着真空开关技术在变压器有载分接开关领域的地位逐渐上升和有载分接开关真空技术研发的突破,国内外掀起了油浸式真空有载分接开关研发的热潮。

由于真空有载分接开关与中压真空开关相比有较大的特性差异,结构复杂,寿命要求高,加工的工艺性强,加上真空有载分接开关又是近来发展的免维修新产品,真空有载分接开关的结构、性能鲜为人知。因此,为了推动真空有载分接开关在电网上安全可靠运行,电力行业正在着手制定《真空有载分接开关使用导则》的行业标准。为了配合该标准推广应用,特撰写《变压器真空有载分接开关》一书,让电力用户和变压器制造单位了解真空有载分接开关的工作特性,选择好和使用好真空有载分接开关。

全书共计3篇、12章,第1篇真空有载分接开关的基础理论:其中第1章真空有载分接开关基本概况,第2章真空电弧的特性,第3章真空有载分接开关过渡电路,第4章真空有载分接开关调压电路,第5章真空有载分接开关绝缘特性;第2篇真空有载分接开关的结构:其中第6章真空有载分接开关结构特点,第7章油浸式真空有载分接开关,第8章干式真空有载分接开关,第9章电动机构与附件;第3篇真空有载分接开关的使用:其中第10章真空有载分接开关的使用与安装,第11章真空有载分接开关运行状态监控与故障诊断,第12章真空有载分接开关的运行维修。

本书可作为从事真空有载分接开关研究、设计、制造和使用运行的专业技术人员的参考书,也可用作高等工业院校电器和电力专业的参考教材以及电力、电气、化工、冶金等使用部门的专业人员的培训教材。

编写本书过程中,编者查阅了相关的资料和文献,也收集了各地近年来大量真空有载分接开关研发和运行维修资料,并进行了分析、编辑、加工和整理;参考了许多专业工作者和有关专家公开发表的文章、正式出版的书籍和非正式出版的资料;引用了有关作者的研究成果、试验数据。谨在此向他们表示衷心的感谢。承蒙遵义产品质量检验检

测院、浙江腾龙电器有限公司、贵州电力设备有限公司、宁波高新区甬江电力设备厂等提供技术资料，得到章宏仁、张翊堂、吕世斌、周联俊、吴选霞、杨波和陶波、丁本平、詹小明、朱春虎等诸位同仁的帮助，在此一并表示诚挚的谢意。

本书编写时间仓促，且编者学识水平有限，欠妥之处在所难免，热忱地欢迎各位专家和读者批评指出。

张德明

目 录

前 言

第 1 篇 真空有载分接开关的基础理论	1
第 1 章 真空有载分接开关基本概况	1
1.1 真空有载分接开关发展概况	1
1.2 真空有载分接开关特点	3
1.3 真空有载分接开关分类	5
1.4 真空有载分接开关技术要求	7
1.5 真空管寿命	11
第 2 章 真空电弧的特性	16
2.1 开关电弧基本概念	16
2.2 真空电弧产生的机理	19
2.3 真空电弧的形态	22
2.4 真空电弧的伏安特性	25
2.5 交流电弧熄灭原理	27
2.6 真空截流与真空断路器操作过电压	30
2.7 真空有载分接开关操作过电压	32
2.8 真空后重燃现象	39
第 3 章 真空有载分接开关过渡电路	41
3.1 电阻式真空有载分接开关过渡电路特点	41
3.2 电阻式真空切换开关基本型过渡电路	44
3.3 电阻式真空切换开关单隔离转换的导变型过渡电路	48
3.4 电阻式真空切换开关双隔离转换的导变型过渡电路	51
3.5 电阻式真空选择开关过渡电路	54
3.6 电阻式真空多断口有载分接开关过渡电路	55
3.7 非真空型与真空型电阻式有载分接开关触头切换任务比较	58
第 4 章 真空有载分接开关调压电路	63
4.1 概述	63
4.2 基本调压方式	64
4.3 电力变压器有载调压电路	66
4.4 电炉变压器有载调压电路	72
4.5 整流变压器整流电路与移相电路	78
4.6 整流变压器有载调压电路	89
4.7 换流变压器调压电路	99

4.8	移相变压器调压电路	103
4.9	无功补偿与电网调压	107
4.10	电感调节电路	114
4.11	分接绕组电位连接	119
4.12	有载分接开关基本接线图和整定工作位置图	129
第5章	真空有载分接开关绝缘特性	133
5.1	概述	133
5.2	介质电气特性	135
5.3	介质电气强度	140
5.4	影响和提高介质电气强度因素	152
5.5	绝缘的电压负荷	158
5.6	绝缘配合与绝缘技术要求	168
第2篇	真空有载分接开关的结构	177
第6章	真空有载分接开关结构特点	177
6.1	真空管的结构与制造	177
6.2	真空管的技术参数选用	182
6.3	凸轮机构原理与应用	188
6.4	真空有载分接开关凸轮机构设计	194
6.5	真空有载分接开关触头切换机构	198
6.6	过渡电阻匹配与热容量设置	203
6.7	不同介质形式真空分接开关的结构差异	208
第7章	油浸式真空有载分接开关	211
7.1	概述	211
7.2	ZVM 系列组合式真空有载分接开关	211
7.3	SHZV 与 VCM 型组合式真空有载分接开关	228
7.4	VR 与 VM 系列组合式真空有载分接开关	234
7.5	VUC 系列组合式真空有载分接开关	238
7.6	VV 型复合式真空有载分接开关	242
7.7	VF 型复合式真空有载分接开关	248
第8章	干式真空有载分接开关	252
8.1	概述	252
8.2	BPK 型干式真空有载分接开关	254
8.3	ZVK 型干式真空有载分接开关	258
8.4	CVT 型与 CZ 型干式真空有载分接开关	261
8.5	AVT 型与 VT 型干式真空有载分接开关	264
8.6	SF ₆ 气体式真空有载分接开关	267
第9章	电动机构与附件	270
9.1	概述	270
9.2	机电结合有触点转换的电动机构	272

9.3 机电分开无触点智能转换的电动机机构	284
9.4 伞齿轮箱和传动轴	288
9.5 分接位置监控显示与自动调压装置	290
9.6 油（气）室安全保护装置	294
9.7 油（气）室安全保护装置的选用	300
第3篇 真空有载分接开关的使用	310
第10章 真空有载分接开关的选用与安装	310
10.1 真空有载分接开关的安装方式确定与选用	310
10.2 真空有载分接开关在变压器上安装	314
10.3 真空有载分接开关在变压器安装检查与试验	326
10.4 真空有载分接开关在现场安装检查和投运	330
第11章 真空有载分接开关运行状态监控与故障诊断	335
11.1 概述	335
11.2 真空有载分接开关工作介质的监控	337
11.3 真空管状态的监控	343
11.4 油中溶解气体的色谱分析	349
11.5 真空有载分接开关机械故障诊断与预防监控	355
11.6 真空有载分接开关电气故障诊断与监控	360
11.7 真空有载分接开关绝缘故障诊断与预防监控	368
11.8 真空有载分接开关油（气）室泄漏诊断与监控	371
第12章 真空有载分接开关的运行维修	375
12.1 概述	375
12.2 真空有载分接开关保养维护	377
12.3 真空有载分接开关定期检修	382
12.4 真空有载分接开关检修验收检查与试验	384
12.5 真空有载分接开关的故障检修与排除	388
12.6 电动机构及其附件的故障检修与排除	391
参考文献	395

第 1 篇 真空有载分接开关的基础理论

第 1 章 真空有载分接开关基本概况

早期电力变压器所配的有载分接开关（简称 OLTC）大都采用高速电阻切换原理，靠铜钨电弧触头进行负载转换。这类分接开关（以下简称非真空 OLTC）切换频繁，电弧触头烧损相应比较严重，油的碳化和污染速度较快，因此给供电部门增加了日常维护和定期检修工作量。正值 21 世纪初是真空技术和电力电子信息广泛推广应用的年代，OLTC 技术的发展也面临一次革命。为了满足电力系统现代化发展的需要，彻底解决油污染的问题，提高 OLTC 机械寿命和触头电气寿命，延长检修周期，显著降低检修成本，提高运行的可靠性和安全性，国内外 OLTC 制造企业相继研发油浸式和气体式真空熄弧的 OLTC（以下简称真空 OLTC），适应了当今 OLTC 技术创新式发展的新潮流。

目前，真空 OLTC 不仅在油浸式变压器中获得推广及应用，而且在干式变压器或气体绝缘（如 SF_6 气体）的变压器中也广泛地获得应用。

1.1 真空有载分接开关发展概况

真空 OLTC 是随着真空灭弧室（简称真空管）的发展而发展的，两者有密不可分的关系。要研究真空 OLTC 的发展概况，就必然要了解真空管的发展历程。

1. 真空管的发展历程

人类从事将真空作为灭弧和绝缘介质的应用研究，到现在已有 100 多年的历史。早在 1893 年，美国的里顿豪斯（Rittenhause）就首先制造出真空管模型，进行了开断电弧的研究。1920 年，瑞典佛加（Birka）公司研制出世界上第一台真空开关；1926 年，美国加利福尼亚工学院的索伦森（Sornsen）教授发表了真空开关的试验结果，并预言应用真空管开关的时代不久就会到来。由于当时的真空技术还很落后，使得真空管在工业上的实际应用被大大推迟了。从 20 世纪 40 年代开始，科学技术进步促使真空技术的研究工作有了较快的进展。冶金技术的提高和真空触头新材料的发现给真空管研发带来了突破性进展，掀起了真空管在工业领域上应用的研究热潮。20 世纪 60 年代初，美国通用电气公司在总结前人经验的基础上首先研制成功中压真空断路器，从此真空开关正式进入电力系统的运行。真空开关技术已经成为中压断路器和大电流接触器的主导技术。在其真空开关技术影响和推动下，北美地区也相继开始真空电抗式 OLTC 的研制工作。

美国是世界上最早开始生产和使用真空管的国家，目前生产真空管的主要有通用电气（GE）、西屋（WH）、库柏（Cooper）和杰宁（Jenning）等公司。其中 GE 公司是全球最早开始系统研究真空管和真空电弧理论的公司。20 世纪 60 年代初，GE 公司提出横向磁场熄

弧原理,并据此研制出基于螺旋槽横磁触头结构和 CuBi 触头材料的真空管,大大提高真空管的开断能力,从而使真空管真正具有了商业实用意义。在此后的 20 余年里,GE 公司在灭弧机理、触头材料、试验方法和试验设备方面都做了大量的工作,其技术在 20 世纪 80 年代中期及以前一直在全球处于领先地位,并曾出口到德国、日本等国。WH 公司从 1960 年开始研制真空管,是美国另一家主要的真空管制造商。目前,该公司无论是技术水平、制造工艺还是产量,均已超过 GE 公司,是全球最大的真空管制造商之一。1994 年,WH 公司的控配电分部并入伊顿(Eaton)公司,并于 2000 年在我国苏州成立伊顿电气(苏州)有限公司,主要生产真空管。德国西门子和日本东芝等公司虽然起步较晚,但在吸收别国经验的基础上不断研究和创新,因此发展很快,都成为全球主要的真空管制造商。

我国真空管的研制工作始于 20 世纪 50 年代末,基本与美国同步,略早于日本。1958 年,由西安交通大学和西安高压开关整流器厂联合研制出我国第一只真空管。1968 年我国开始真空管的实用化研制,第一只商用真空管于同年诞生在国营华光电子管(777)厂。1975 年,由原国营宝光电工(4401)厂研制的 ZKBD-1000/10-20 型真空管在苏州通过了原机械工业部、电子工业部组织的两部鉴定,标志着我国的真空管已经进入到实用化阶段。20 世纪 80 年代中期,宝光电子厂和华光电子管厂分别从德国西门子公司和美国西屋公司引进了全套真空管的制造技术,大大缩小了我国真空管产业与国外企业的差距,为此后我国真空管行业的腾飞奠定了坚实的技术基础。近年来,我国真空管的设计理论、制造工艺、质量水平都有了质的飞跃,真空管制造技术水平日趋成熟。

目前,真空管正向大容量、小型化、低过电压、高可靠性、多品种、长寿命、免维护和智能化迈进。尤其是品种的扩展,除能适应大容量的高低压真空断路器外,还应能适应操作频率高和开断额定负载的真空接触器、真空负荷开关和真空 OLTC。由于真空管的最大缺点是开断小电流时容易发生截流而产生过电压,过去抑制过电压普遍采用的方法是加装过电压吸收装置(如 RC 回路、ZnO 避雷器),但使真空电器设备复杂化,增加了成本和事故隐患,且电压越高抑制过电压越难。实践证明,采用低过电压触头材料(如 AgWC)来抑制过电压的方法是十分有效的,可以使过电压降低到 1/10,满足使用需要。因此,应加速真空管低过电压触头材料的研制。

2. 真空 OLTC 发展概况

(1) 国外真空 OLTC 发展状况。国外真空 OLTC 研发要上溯到 20 世纪 60 年代。在那时期,电抗式 OLTC 占主导地位。由于电抗式 OLTC 触头切换电流与恢复电压相位差 90° ,电弧易重燃,触头寿命低,油污染大,维护检修频繁,因此,北美地区采用真空管替代铜钨触头的负载转换,大幅度提高触头寿命,减少 OLTC 的维护检修。这使真空管在 OLTC 的应用上得到认同和发展。20 世纪 70 年代末,全球范围掀起的电力设备无油化浪潮给真空管带来了前所未有的发展机遇。凭借自身巨大的技术优势,与气体(SF_6)绝缘的电力变压器配套的真空 OLTC 在日本得到迅速发展。与此同时,亚太地区(尤其是中国)随着干式配电变压器的迅速发展,研发出与其配套的空气绝缘的真空 OLTC。

德国 MR 公司对于真空 OLTC 的研发始于 20 世纪 80 年代初期,先后为北美地区开发 RMV-II 和 RMV-A 型真空电抗式 OLTC。这种形号真空电抗式 OLTC 采用“外置”(背包)式安装结构形式,真空 OLTC 本体置在背包的箱体内,箱内充有绝缘油,用过渡电抗器替代过渡电阻器。1995 年,MR 公司研制出第一台 VT 型快速电阻式真空 OLTC,这种形式

真空 OLTC 是为干式变压器配套而设计的, 在空气环境中运行。随后还为中国市场研发了 AVT 型快速电阻过渡的柜式真空 OLTC, 这种形式真空 OLTC 适用于容量较低的干式配电变压器调压。根据真空管所取得优秀的运行经验, MR 公司将真空切换技术陆续地应用于其他产品上。21 世纪初, MR 公司先后推出 VV 型复合式、VR 型和 VM 型组合式电阻过渡的油浸真空 OLTC。

与此同时, ABB 公司也推出 VUC 型组合式电阻过渡的油浸真空 OLTC。

(2) 国内真空 OLTC 发展状况。我国的真空 OLTC 的研发始于 20 世纪 70 年代末, 当时沈阳变压器厂已经着手真空切换技术的研究。1981 年首台由沈阳变压器厂研制的油浸电阻式真空 OLTC 在沈阳冶炼厂投入运行。1983 年, 黑龙江双城 OLTC 厂研发的与干式变压器配套的电阻式真空 OLTC 投入运行。20 世纪 90 年代, 遵义长征公司先后研发与干式变压器配套的 KY1 (圆筒式) 和 KY2 (柜式) 型电阻过渡的真空 OLTC, 并成功投入运行, 随后进入批量生产。

进入 21 世纪初, 上海华明公司研发与干式变压器配套 CVT 型和 CZ 型电阻式真空 OLTC 先后投入运行。2005 年, 上海华明公司研发出国内首个适用于大容量油浸式变压器的 SHZV 型真空 OLTC, 该真空 OLTC 经型式试验考核, 各项性能指标均符合 IEC 60214-1: 2003 标准的要求, 产品填补了国内空白, 2007 年通过了机械与电力两行业的专家产品鉴定, 目前已投入批量生产。2007 年, 华明公司还研发出了 VCV 型真空 OLTC, 该真空 OLTC 是 CV 型油浸式非真空 OLTC 的更新换代产品。

遵义长征公司结合 OLTC 引进技术的消化吸收再创新, 借鉴国内外同类真空 OLTC 的特点, 扬长避短, 研发出技术性能较先进的、符合国情和具有较为完善后备保护的组合式 ZVM 系列 (包括 ZVMM/ZVMB 和 ZVM/ZVMD/ZVMG/ZVMT 六种形式) 真空 OLTC。与此同时, 也研发了 ZVV 型和 ZK 型 (干式) 真空 OLTC, 作为国产 V 型非真空 OLTC 和 KY2 型 (干式) 真空 OLTC 的升级换代产品。

总之, 国产的真空 OLTC 制造技术水平和产品质量有了很大提高, 能够满足国内电力发展的需要。随着真空 OLTC 产品投入市场, 不仅为电力系统提供了在传统的油浸式非真空 OLTC 之外的另一种选择, 而且大量的运用往往是一种比较经济的方案。

1.2 真空有载分接开关特点

1. 真空 OLTC 的优势

在 OLTC 中, 采用真空管替代铜钨电弧触头, 具有非常显著的优势:

(1) 真空管是密封的系统, 尽管它也要灭弧, 但是它不与周围的介质发生作用。因此, 灭弧引起的油的碳化和污染现象可完全消除。油不需要净化, 能长期保持高的绝缘强度, 延长油的使用年限, 降低寿命周期成本, 无须在线净油装置, 减少了设备投资。

(2) 真空管开断能力强, 断口介质恢复快 (图 1-1), 熄弧可靠, 在许多苛刻条件的应用中能显著改善开断容

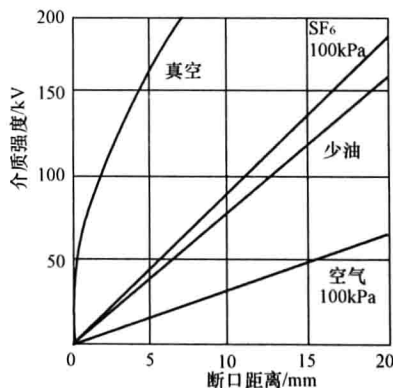


图 1-1 不同介质断口绝缘恢复强度

量。真空管灭弧是瞬间完成的,处理陡峭过零具有优越性能,这对高电流上升率也很有利。例如在移相变压器、HVDC 和可变电抗(电容与电感)应用中,真空 OLTC 比非真空(铜钨触头) OLTC 更适用。

(3) 由于真空管开断燃弧时间短、弧压低、电弧能耗小和触头金属氯化物的重凝,触头烧损腐蚀可以降到最低限度,触头电气寿命长达 50 万~60 万次,从而不会发生常见的触头严重烧损腐蚀或触头更换。

(4) 真空 OLTC 中因无油碳化污染,也无须更换触头,降低了保养维护需求。免维护操作次数可高达 30 万次,完全无须按操作时间的长短来确定何时进行维修。从而大幅度降低维修成本;真空 OLTC 两次检修之间的操作次数比使用非真空式 Cu-W 电弧触头 OLTC 要多 3~5 倍,这就提高了变压器的使用率,显著降低了运行成本。

现以 110kV 有载调压电力变压器为例,Cu-W 电弧触头切换的 OLTC 平均每天动作 20 次,5 万次变换操作的检修周期为 $50\,000 / (20 \times 365) \approx 6.85$ 年;真空熄弧 OLTC 30 万次变换操作的检修周期为 $300\,000 / (20 \times 365) \approx 41.1$ 年。这就意味着在整个电力变压器使用周期内,真空 OLTC 可实现免维修。

(5) 真空管触头间隙小(4mm 左右),合闸能量小,切换机构简单可靠,操作真空管的动导杆惯性小,适用于频繁操作。因洁净的变压器油仍维持润滑性能,可显著降低复杂系统的机械磨损。因而,真空 OLTC 机械寿命可增至 120 万次以上。

(6) 大容量真空 OLTC 设计中,真空管只起着瞬间载流与负载转换(开断)作用,长期载流由机械旁路主触头承担。因而,真空 OLTC 的接触电阻小、损耗小、温升低、抗短路能力和过载能力强。

(7) 真空管的硬性同步动作使所有相的真空触头同时被开断,这种独特的特性意味着单相真空 OLTC 中无须变压器绕组强制分流。

(8) 气体介质绝缘与真空熄弧结合的 OLTC 适用于各种不同场合,尤其适用于高层建筑等防火要求较高的场所,可以频繁操作,无火灾和爆炸的危险。

(9) 空气绝缘的真空 OLTC,其真空管的触头为完全密封结构,不会因潮气、灰尘、有害气体等影响而降低其性能,性能稳定,工作安全可靠。

(10) 真空管作为独立的熄弧元件,安装调试简单方便。

2. 真空 OLTC 不足之处

由于真空 OLTC 的熄弧原理与 Cu-W 电弧触头油中自由开断的 OLTC 熄弧不同,则它有其独特的技术问题。因此,真空 OLTC 在设计、制造、选型和安装调试过程中应予以考虑。

真空 OLTC 存在以下三个主要问题:

(1) 真空管熄弧时截流过电压及其影响程度。

(2) 真空管合闸的机械弹跳和分闸反弹。

(3) 运行中真空管性能的监测。

对于真空 OLTC 的截流过电压和触头合闸弹跳、分闸反弹的问题,要引起足够的重视。只有在真空管的选用、过电压保护装置和弹簧储能释放机构的缓冲装置设计上采取行之有效的措施,方能消除这些不足之处。

真空 OLTC 在运行过程中也会出现性能劣化,如真空管泄漏,如不及时发现和检修,

最终将导致故障的发生。真空管性能特点、触头超程与真空度的监测和真空 OLTC 触头变换程序的检示，构成真空 OLTC 有别于非真空式铜钨触头 OLTC 的特点，这些特点将分别在后面章节中予以讨论。

1.3 真空有载分接开关分类

真空 OLTC 按下述方式分类：

(1) 按结构方式分，有复合式和组合式两类。例如，油浸式 VV 型真空 OLTC 属于复合式；油浸式 VM 型真空 OLTC 和干式（空气绝缘）真空 OLTC 均属于组合式。

1) 组合式真空 OLTC 由分接选择器和真空切换开关组合而成。分接选择器动触头是在无负载状况下选择分接头之后，真空切换开关触头（真空管）把负载电流转换到已选的另一分接头上。

2) 复合式真空 OLTC 是把分接选择和切换功能结合在一起组成真空选择开关，其功能类似于组合式 OLTC。选择触头在无载下预选相邻分接头，随后真空管闭合已选分接的电路。

变压器真空 OLTC 形式见图 1-2 和表 1-1。

表 1-1 变压器真空 OLTC 形式

序号	变压器种类	OLTC 类别	遵义长征	上海华明	德国 MR	ABB
1	电力变压器与工业变压器	油浸式真空切换	ZVM、ZVV	SHZV、VCV	VV、VM、VR	VUC、VUL
2	干式变压器	空气介质真空切换	ZK	CZ、CVT	AVT、VT	—

(2) 按过渡阻抗分，有电抗式和电阻式两类，这两类的性能比较见表 1-2。

表 1-2 电抗式和电阻式真空 OLTC 性能比较

序号	项 目	电抗式真空 OLTC	电阻式真空 OLTC
1	分接变换时间	慢速变换，变换时间 5~6s	快速变换，变换时间约 60~80ms
2	过渡阻抗	电抗器：按连续额定负载设计，体积大、耗料多、成本高	电阻器：按短时负载设计，体积小、耗料少、成本低
3	综合功能的优缺点	优点：①可利用桥接中间位置作为分接位置，在分接位置多时更有利；②切换回路每相只要两个或一个真空管即可；③电抗器可在额定条件下连续运行，无须快速切动作，机构简单 缺点：①造价高；②真空 OLTC 对地绝缘等级高时，电抗器就得增大体积；③真空截流熄弧易产生过电压，易造成级间绝缘损坏	优点：①电阻式造价低；②整个切换芯体紧凑，体积小；③电阻器对地绝缘易解决；④切换电流与恢复电压同相位，触头寿命更长，油无污染，少维修或免维修 缺点：每相需要设置 2~4 个真空管，若要设置 3 个以下真空管亦可，但需设置辅助的隔离转换触点或选择触头（带熄弧功能），动作机构相应较复杂
4	应用地域	逐渐被电阻式所替代，现仅在北美地区应用	电阻式真空 OLTC 逐渐在全球推广应用

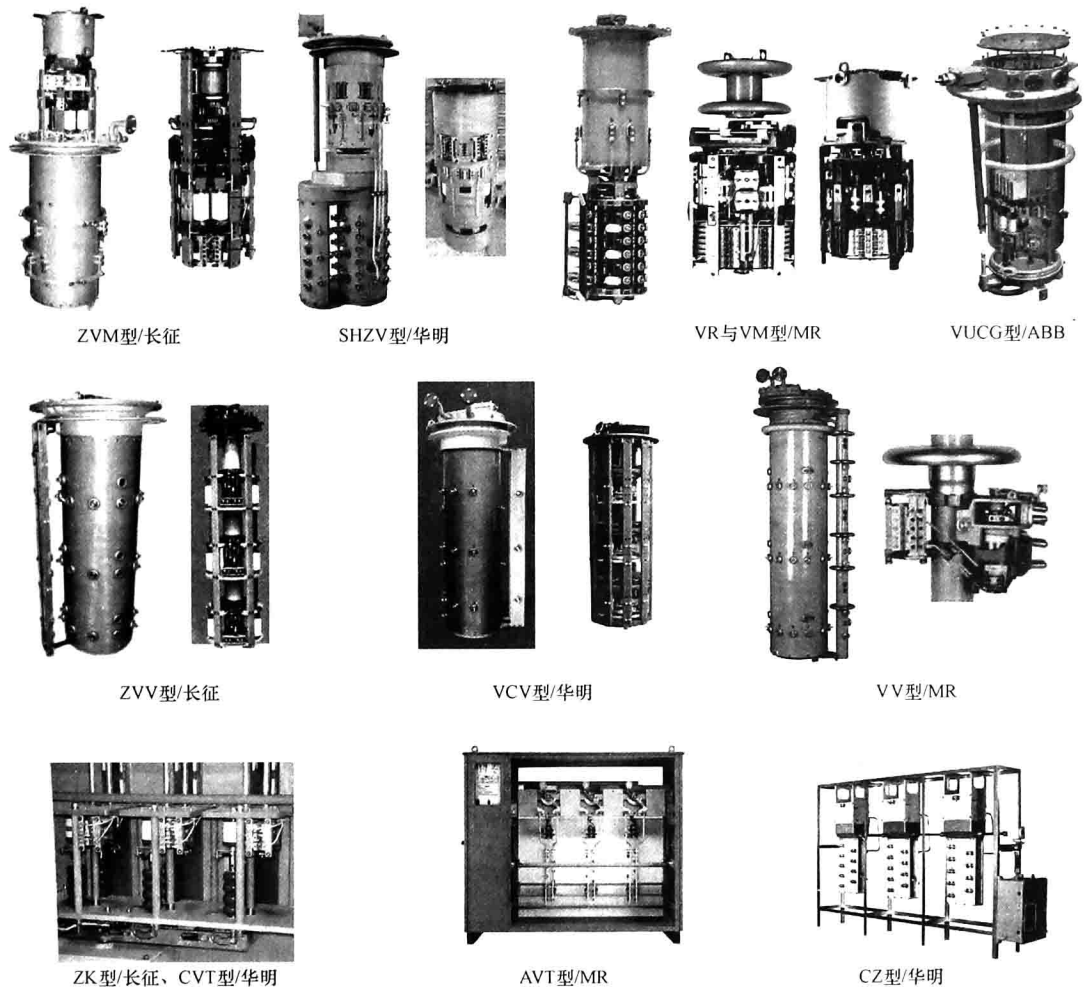


图 1-2 真空 OLTC 形式概观

注：图中第一排为油浸组合式 OLTC，第二排为油浸复合式 OLTC，第三排为干式 OLTC。

(3) 按工作介质分，有油浸式、空气式（或称干式）、SF₆ 气体式三类。

1) 油浸式：真空 OLTC 在油介质中进行切换，适用于与油浸式电力（或工业）变压器配套。

2) 空气式：真空 OLTC 在空气介质中进行切换，适用于与干式配电变压器配套。

3) SF₆ 气体式：SF₆ 气体作为绝缘介质，真空管为切换元件，适用于与 SF₆ 气体电力变压器配套。

(4) 按相数分，有 Ⅲ相、Ⅰ相和特殊要求 Ⅱ相。

(5) 按连接方式分，有 Y 和 D 两种连接方式。

1) Y 联结：三相调压绕组经真空 OLTC 接成 Y 联结，此类真空 OLTC 用于中性点调压。

2) D 联结：三相调压绕组经真空 OLTC 接成 D 联结，此类真空 OLTC 往往用于线端调压或中部调压。

(6) 按调压部位分，有线端调、中部调和中性点调三种。

- (7) 按调压电路分，有线性调、正反调或粗细调三种。
- (8) 按安装方式分，有埋入型与外置型、平顶式（连箱盖）与钟罩式等安装方式。

1.4 真空有载分接开关技术要求

1. 使用条件

(1) 除用户规定更严酷条件外，真空 OLTC 适于表 1-3 所规定温度范围内工作。

表 1-3 真空 OLTC 的环境温度

真空 OLTC	最低温度/℃	最高温度/℃
外置间隔式 OLTC	-25	40
埋入式 OLTC	-25	105

注：1. 对真空 OLTC 的差异，见 GB/T 10230.2—2007 中 5.2.2.2 和 5.2.2.3 的叙述。
2. 本表所列的 105℃ 的值，是基于 GB 1094.1—1996 规定标准循环负载下的顶层最大油温。

(2) 电动机构的环境温度：除用户规定更严酷的条件外，最低温度 -25℃，最高温度 40℃。

2. 额定值

(1) 额定通过电流：通过真空 OLTC 流向外部电路的电流，这个电流在相关级电压下，能被真空 OLTC 从一个分接转移到另一个分接，并能被真空 OLTC 连续负载的。额定通过电流与一个相关级电压相联系。所以，一台真空 OLTC 可以有各种不同的额定通过电流与对应的相关级电压的组合。

(2) 最大额定通过电流：真空 OLTC 设计的最高额定通过电流，它是用于进行触头温升、短路试验和负载切换试验的基准电流。

(3) 额定级电压：对于每个额定通过电流，与变压器相邻两个分接连接的真空 OLTC 端子间的最高允许电压。

(4) 最大额定级电压：真空 OLTC 设计的额定级电压的最大值。

(5) 额定级容量：级容量定义为级电压与负载电流的乘积，即 $P_S=U_S I$ 。

额定级容量 $[P_{SN}]$ 是真空 OLTC 在连续工作条件下最大级容量。它被最大额定级电压和负载电流所界定，表示成一范围曲线，如图 1-3 所示。在此界定的曲线内负载是真空 OLTC 的额定值。

(6) 额定频率：真空 OLTC 设计的交流频率。

(7) 相数：真空 OLTC 本身结构相数，有单相（Ⅰ）、三相（Ⅲ）和特殊设计两相（Ⅱ）。

(8) 额定绝缘水平：有主绝缘和内部绝缘两种，这两种绝缘水平与变压器分接绕组绝缘水平的要求相同。

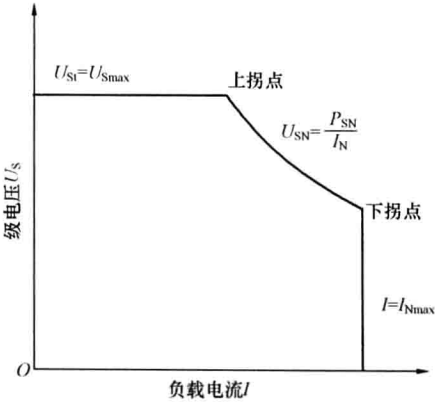


图 1-3 级电压与负载电流关系

3. 性能要求

(1) 触头温升。真空 OLTC 运行中连续载流的各式触头通以 1.2 倍最大额定通过电流，温度上升率 $\leq 1\text{K/h}$ ，即认为达到稳定状态；用热电偶法测量触头对周围环境介质的温升不超过表 1-4 所列的规定值。

表 1-4 真空 OLTC 的触头温升限值

触头材料	空气中/K	SF ₆ 气体中/K	液体（油）中 /K
裸铜	35	40	20
表面镀银的铜/合金	65	40	20
其他材料	协商	协商	20

(2) 切换试验。包括工作负载试验和开断容量试验在内的切换试验，应模拟真空 OLTC 在额定参数下所依据的最严酷的工作条件。

如果某真空 OLTC 有几种额定通过电流和额定级电压的组合，则至少应进行两种开断容量试验：一种是在最大额定通过电流 I_{um} 和它的相关级电压 U_s 下；另一种是在最大额定级电压 U_{sm} 和它的相关额定通过电流 I_u 下。

除另有规定外，试验布置应使开断电流值、恢复电压值或它们的乘积，在任何情况下应不小于与切换循环相适合的计算值之 95%。

1) 工作负载试验。真空切换开关或真空选择开关触头（即真空管触头），在承载电流至少相当于最大额定通过电流和相关额定级电压下应承受相当于正常运行 5 万次的分接变换操作。

2) 开断容量试验。在两倍最大额定通过电流和相关额定级电压下进行 100 次操作试验。应不会危及设备操作。

(3) 抗短路能力。真空 OLTC 连续承载电流各式结构触头，都应承受每次持续时间为 2s（ $\pm 10\%$ ）的短路电流试验。

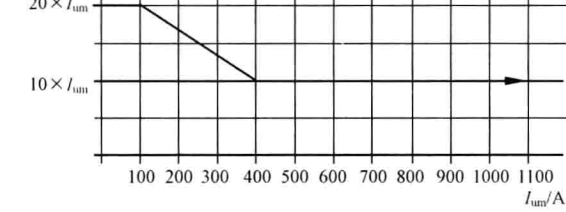


图 1-4 用最大额定通过电流倍数表示的短路试验电流

三次试验中每次的起始峰值电流应为额定短路电流方均根值的 2.5（ $\pm 5\%$ ）倍。当无波形定点合闸装置时，增大短路试验电流方均根值，以使 3 次试验均能得到所要求的峰值电流，减少试验的持续时间为 $t \leq 2/n^2$ （ n 为试验电流增加的倍数）。

施加的短路试验电流值符合图 1-4 的规定。

(4) 过渡电阻器温升。在 1.5 倍最大额定通过电流和相关额定级电压下连续操作半个循环，电阻器对周围介质的温升：对于空气环境的真空 OLTC，应不超过 400K；对于油介质的真空 OLTC，应不超过 350K。

(5) 机械寿命试验。真空 OLTC 机械寿命大于 80 万次，其中转换选择器至少 8 万次操作。此外，真空切换开关或真空选择开关应在 -25°C 下进行 100 次操作。

(6) 密封性能。真空切换开关或真空选择开关的油（气）室应能耐受 $6 \times 10^4 \text{Pa}$ 压力，24h 的压力试验无渗漏，133Pa、1h 的真空试验无机械损坏或无油室渗漏。

(7) 绝缘水平。真空 OLTC 绝缘分为主绝缘和内部绝缘两种。

1) 主绝缘。主绝缘的耐受电压已经标准化, 且纳入我国国家标准和 IEC 标准。用于变压器绕组中性点调压的为 1 类真空 OLTC, 用于变压器绕组其他位置调压的为 2 类真空 OLTC, 两者的区别在于相间绝缘水平不同。

对于 1 类真空 OLTC, 主绝缘即为对地绝缘; 对于 2 类真空 OLTC, 主绝缘为对地绝缘和相间绝缘, 两者都决定于设备最高电压 U_m , 见表 1-5。

表 1-5 真空 OLTC 的主绝缘水平 (对地或 2 类相间)

设备最高电压 /kV (有效值)	额定外施耐受电压/kV (有效值) (50Hz, 1min)	额定全波冲击电压/kV (峰值) (1.2/50 μ s)	额定截波冲击电压 /kV (峰值) (3~6 μ s)	额定操作冲击耐受电压 /kV (峰值) (250/2500 μ s)
12	35	110	121	—
17.5	45	125	138	—
24	55	150	165	—
40.5	95	250	275	—
72.5	160	350	385	—
126	230	550	605	460
170	325	750	825	620
252	460	1050	1155	850
363	510	1175	1290	950
550	680	1675	1845	1390

2) 内部绝缘。对于真空 OLTC 的内部绝缘水平, 按绝缘距离上所呈现的冲击电压负荷, 根据使用频次和概率统计规律, 综合考虑绝缘配合的要求。通常把真空 OLTC 内部绝缘水平划分为 4~5 个绝缘等级, 即可经济地满足整个使用范围。不同型号的真空 OLTC 有着不同的内部绝缘水平, 其内部绝缘水平的数据见各自真空 OLTC 的技术数据和使用说明书。

3) 试验电压的施加。为了进行耐压试验, 真空 OLTC 组装、布置和干燥处理应与运行时一样, 但不必包括真空 OLTC 与变压器的连接引线。允许在分开的组件上分别进行试验, 但应能表明其绝缘条件相同。

真空 OLTC 的绝缘水平是以工频电压和冲击电压的耐压试验来验证的。对于 1 类和 2 类真空 OLTC, 应进行以下顺序的电压试验项目:

- ① 全波雷电冲击试验。
- ② 截波雷电冲击试验。
- ③ 操作冲击试验 (若要求时)。
- ④ 工频耐压试验。
- ⑤ 局部放电测量 (若要求时)。

4) 全波雷电冲击试验。试验波形应采用符合 GB 311.1—2012 标准规定的 (1.2 μ s $\pm$ 30%/50 μ s $\pm$ 20%) 标准冲击波。试验电压值的允差为 $\pm$ 3%。每项试验应按规定的电压值, 正负极性各冲击 3 次。

5) 截波雷电冲击试验。在全波波形满足项 4) 条件下, 截波雷电冲击有截断时间 3~6 μ s, 电压瞬间截断后的第一次过零时间应尽可能短, 每项试验在要求的试验电压值下用正