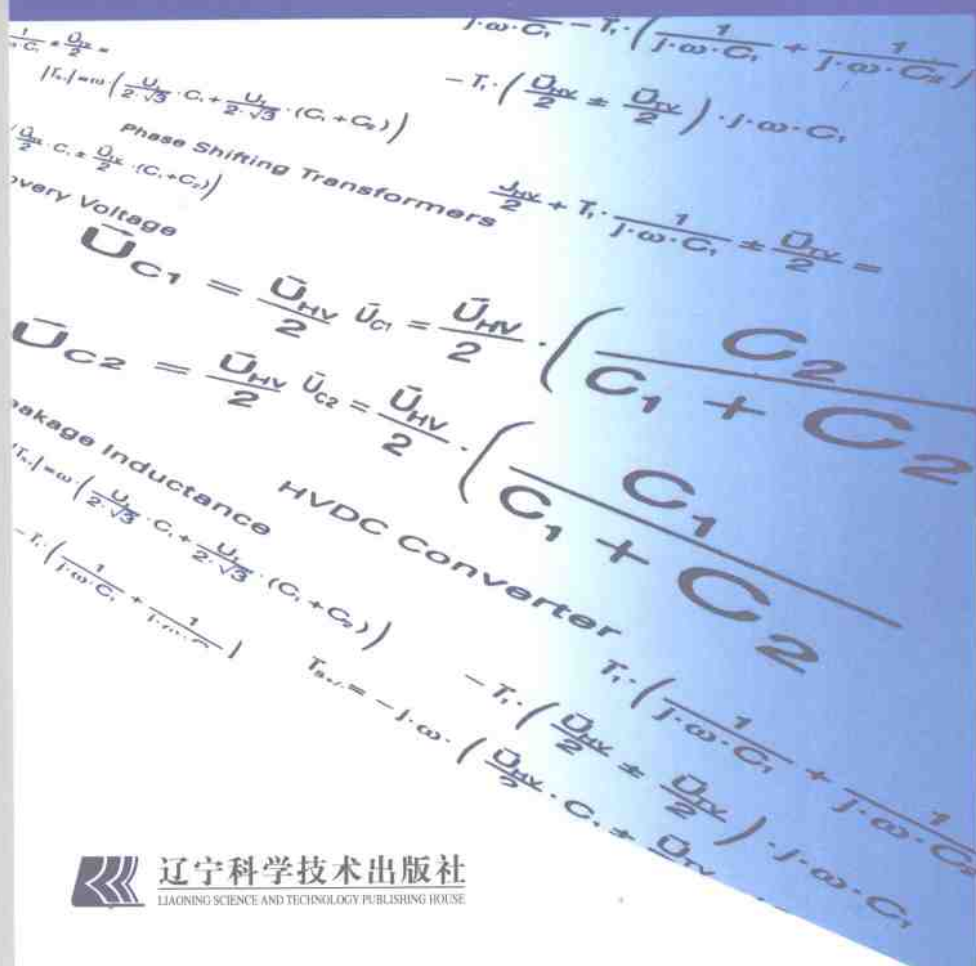


有载分接开关原理和应用

[德国] 科雷默尔 著
沈祖俊 译



有载分接开关原理和应用

[德国]·科雷默尔 著
沈祖俊 译

辽宁科学技术出版社

·沈阳·

图书在版编目 (CIP) 数据

有载分接开关原理和应用 / (德) 科雷默尔著; 沈祖俊译. - 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002. 8

ISBN 7-5381-3689-4

I. 有… II. ①科… ②沈… III. 负荷开关: 分接开关 IV. TM564.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 042334 号

出 版 者: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮编: 110003)

印 刷 者: 沈阳新华印刷厂

发 行 者: 各地新华书店

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

字 数: 280 千字

印 张: 15.25

印 数: 1801 ~ 2800

出版时间: 2002 年 8 月第 1 版

印刷时间: 2006 年 5 月第 2 次印刷

责任编辑: 枫 岚 素 馨

封面设计: 庄庆芳

版式设计: 于 浪

责任校对: 李 雪

定 价: 45.00 元

联系电话: 024-23284360

邮购咨询电话: 024-23284502

E-mail: lkzzb@mail.lnpgc.com.cn

<http://www.lnkj.com.cn>

内 容 提 要

本书共分三部分。第一部分（第1章到第3章）阐述切换开关的动作原理和开断强度，分接选择器的结构和绝缘配合；不同布置的分接绕组所要求的有载分接开关特性。第二部分（第4章）讨论选择有载分接开关时必须考虑的原则和事项，包括“分接绕组的电位连接”和“粗细调分接绕组布置的漏磁感应”等。第三部分（第5章）为有载分接开关的特殊设计和应用，如在移相变压器、高压换流变压器和电抗器中的特殊应用。本书可以作为变压器制造厂和分接开关制造厂以及电力系统设计和运行部门的技术参考资料，也适合作为大专院校相关专业教师和学生专业参考书。

中文本序

1926年德国杨森（Janssen）博士获得电阻式有载分接开关的专利之后，要寻一家具有技术实力的工厂实现工业生产。他来到了多瑙河畔的林根斯堡，选中了一家木工机械厂，即今天的莱茵豪森机械厂（通称MR公司），随即，电阻式有载分接开关产品在此问世。

19世纪末期，在远距离电力输送上是采用交流制式还是直流制式曾有长时间的争论，这就是电工技术发展史上著名的“交直论争”。它起源于美国，却终结于德国。1891年法兰克福国际电工博览会展出了劳芬—法兰克福三相交流输电线，将劳芬中心电站的发电，以15kV电压将75kW电力经175公里送达法兰克福，燃点了博览会的1000盏电灯，由电动机拖动参观用的水泵，扬起数米高水柱，灯光水花，交互辉映，一片辉煌，轰动全球。这个划时代的创举宣告了交流制式的全面胜利，“交直论争”由此全面结束。从此以后，电力系统进入高速发展时期。到了1910年，德国的三相变压器已经达到110/5.5kV，6.8MVA，并成功地在劳贺哈迈输电线入网。随着电网电压等级的提高和容量的增大，电力系统的运行稳定和提供电压质量问题开始突出。电力系统开始建立调压系统，首先是变压器采取调压手段。可以说，有载分接开关的问世是电力工业和变压器技术发展的产物，同时也推动了输变电系统和变压器的发展。

如今，世界工业发达国家的电力变压器和配电变压器乃至工业变压器几乎全部采用有载调压。在我们中国也不例外，在我国电力系统中有载调压变压器所占比例急剧增大，对有载分接开关的需求逐年上升。

在国际大电网会议变压器学术委员会（CIGRE SC12）1996年巴黎年会上，变压器组件列为三个优先论题之首。此次会议论文总数的2/3是关于变压器组件，足见各国对变压器组件的关注，其中更多的是集中于有载分接开关。由于有载分接开关是变压器调压的关键装置，它的可靠性和正确选用自然成为关注的焦点。

有载分接开关的正确选用、安装和运行离不开对其原理和应用的了解与掌握。但是这方面的专著却很难查到。前些时候，张德明先生写作的《变压器有载分接开关》出版，该书堪称填补空白的大作。不久之后，我在德国得到了科

雷默尔的《有载分接开关原理和应用》一书，惊喜地发现这正是《变压器有载分接开关》的姊妹篇。这本书的论述有深度也有广度，是变压器制造厂和分接开关制造厂以及电力系统设计和运行部门一份难得的技术资料，也是大专院校相关专业教师和学生的一本良好参考书。于是带回国内并推荐翻译出版。

本书译者沈祖俊先生（已退休）是我国第一代分接开关专家和变压器组件专家，国家标准 GB10230—1988《有载分接开关》和 GB/T10584—1989《有载分接开关应用导则》的主要起草人之一，也是最早到 MR 公司考察的中国变压器工程师之一。是位理想的译者。

德国 MR 有载分接开关进入中国已经二十多年了。我相信本书的出版对更好的掌握和使用有载分接开关会有很大帮助。

顺兴电力及输变电设备有限公司总经理

沈祖俊（沈纬中）

2001/10/21 于香港

原 序

有载分接开关是电力变压器在电力系统中调节电压所不可缺少的操作设备，它的重要性在逐年稳步增长。例如在德国，现在的发电机、变压器和电力变压器几乎全部装备有载分接开关。其他工业化国家电力系统中的电力变压器的情况大体相似，不仅如此，发展中国家的供电系统也越来越多地要求使用有载调压电力变压器。可以说，有载调压变压器的应用需求正随着网络容量和互联程度的增长而增加。

现在的有载分接开关，其主要部分还是和几十年前按 Janssen 博士 1926 年专利所作的设计一样。在此领域的许多发展，着重考虑的还是材料的使用、可靠性及切换机构。

大多数工业企业的老工程师已换为年轻人，致使许多用户对有载分接开关的了解似有淡薄，而且，有载分接开关又不是大专学校的中心教学课程之一，因此，在制造者和使用者之间的日常业务中便出现沟通不畅，甚至产生不必要的误解。在这种经历的激励下，决心从基础知识开始，探讨有载分接开关的技术及特点，为经常反复提出的问题提供一个全面的解答。

本书内容共分三部分。第一部分（第 1 章到第 3 章）阐述有载分接开关的基本的技术基础知识，并且将切换开关和分接选择器分开单独讲述。首先介绍电阻式分接变换和电抗式分接变换两种不同的有载分接变换原理和它们的一些导变类型，并就它们的动作原理和开断强度作了详细解释。接着是阐述各种分接选择器的结构，特别着重于它们的绝缘配合。最后是变压器分接绕组多种可能布置的综述和各种布置所要求的有载分接开关特性。这些基础知识对掌握调压技术和为不同用途的设备选择合适的有载分接开关是很重要的。

第二部分（第 4 章）进一步讨论在选择有载分接开关时必须考虑的各个方面。通过举例说明了各种特性，并针对用户在变压器设计乃至方案可行性研究中已采用的有载分接开关可能出现的问题，提供了一些计算准则或判定准则；明确地提出了有载分接开关选用的基本细则，如绝缘和开断能力的评估等，还阐述了某些方面的计算和评价准则，便于变压器制造者判定一些关键课题，如“转换选择器操作时分接绕组的电位连接”和“粗细调分接绕组布置的漏磁感应”等，这些问题可能对有载分接开关的选用有实质性的影响。

第三部分（第 5 章）是关于有载分接开关的特殊应用。主要讨论特殊类型的有载分接开关设计以及一些调压要求特殊的变压器的最适用的成套解式。一些大型设备如移相变压器和高压直流用变压器或分接开关在电抗器中的特殊应用等，都对有载分接开关有极高的要求。在变压器设计阶段及早地审定能否选用某种分接开关，这也意味着极大地节省成本。本部分最后一节讲述有载调压变压器在不同分接位置上的并联运行；而且，有助于读者判定此种运行的可行性。

本书写于 1996 ~ 1999 年，主要是针对日常业务中遇到的问题而编写的。近几年，作者在 MR 公司一直担任试验部门主管，除新开发试验外，职责范围还包括为公司内部有关部门和外部用户提供技术支持，主要是从事有载分接开关配置在单一应用或大型项目的设备中的功能和选用方面的咨询。

在这里，笔者要感谢为本书编写给予帮助的先生们，特别是 MR 公司的 Burkhard Herrmann 先生和 Julius Ruff 先生（退休），感谢他们在本书论及的问题讨论中给予的帮助。笔者也很感谢 MR 公司的 Karl Stenzel 先生（退休）对书原稿的审阅，并感谢在美国田纳西州 Humboldt MR 公司的 Bernhard Kurth 先生对英文译本的校对。最后，还要诚挚地感谢他的夫人 Sabine 女士在校对全书的过程中所表现的无限耐心和支持。

科雷默尔博士
1999 年 12 月于累根斯堡

目 录

1 历史综述	1
2 有载分接开关的设计概念	5
2.1 快速电阻式有载分接开关	7
2.1.1 分合动作顺序	8
2.1.2 主通断触头和过渡触头的任务	12
2.1.2.1 旗循环操作（切换开关）	12
2.1.2.2 旗循环操作（选择开关）	17
2.1.2.3 对称尖旗循环操作（切换开关）	19
2.1.2.4 非对称尖旗循环操作（选择开关）	23
2.1.2.5 多电阻器循环操作（切换开关）	26
2.2 电抗式有载分接开关	33
2.2.1 分合动作顺序	34
2.2.1.1 电弧开关和分接选择器组合的有载分接开关	34
2.2.1.2 电弧分接开关式有载分接开关	36
2.2.1.3 真空开关式有载分接开关	36
2.2.2 通断触头的任务	37
2.2.2.1 电弧开关和分接选择器组合的有载分接开关	40
2.2.2.2 电弧分接开关式有载分接开关	44
2.2.2.3 真空开关式有载分接开关	44
2.3 分接选择器	48
2.3.1 埋入型有载分接开关的分接选择器	48
2.3.2 分隔型有载分接开关的分接选择器	50
3 有载调压变压器的调压线路	53
3.1 调压的基本原理	53
3.2 中性点调压的调压线路	58
3.3 角结绕组的调压线路	59
3.4 增压变压器的调压线路	62
3.5 自耦变压器的调压线路	64

4 有载分接开关的选用	71
4.1 绝缘水平	75
4.1.1 内绝缘和外绝缘	75
4.1.2 变压器冲击试验时分接开关内绝缘的电压梯度	79
4.1.3 不同结构的分接选择器上的内绝缘间距	82
4.1.4 切换开关的内绝缘间距	87
4.2 开断容量	90
4.2.1 功率因数	91
4.2.1.1 对电阻式分接开关的影响	92
4.2.1.2 对电抗式分接开关的影响	96
4.2.2 有载分接开关在油浸电力变压器中的允许过负载	100
4.2.2.1 正常连续负载	103
4.2.2.2 周期性负载	104
4.2.3 过渡电阻器设计	108
4.2.4 采用并联提高通过电流	113
4.2.4.1 用强制分流的并联切换开关	114
4.2.4.2 分接开关并联	122
4.3 分接绕组电位联接	123
4.3.1 引言	123
4.3.2 开断电流和恢复电压的计算	124
4.3.2.1 带极性选择器的调压	124
4.3.2.1.1 星结线中性点分接开关	124
4.3.2.1.2 角结线的分接开关	128
4.3.2.1.3 自耦变压器用的分接开关	132
4.3.2.1.4 移相变压器用的分接开关	135
4.3.2.1.5 极性选择器的恢复电压和开断电流计算的典型化	139
4.3.2.2 带粗级选择器的调压	142
4.3.2.2.1 星结线中性点分接开关	142
4.3.2.2.2 角结线的分接开关	146
4.3.2.2.3 粗级选择器的恢复电压和开断电流计算的典型化	148
4.3.3 克服恢复电压问题的方法	150
4.3.3.1 两路转换选择器	151
4.3.3.2 电容控制	153
4.3.3.3 控制电阻器	156

4.4 粗细调分接绕组布置的漏磁感应	161
5 有载分接开关的特殊应用	172
5.1 有载分接开关的特殊设计	172
5.1.1 A-B-C 轮流变换	173
5.1.2 线性调压用分接开关	175
5.1.3 带角星转换选择器的分接开关	177
5.1.4 多粗级的粗细调分接绕组布置	178
5.1.5 带偏压线圈的分接绕组布置	180
5.2 带分接开关的移相变压器	183
5.2.1 相角调整的基本原理	184
5.2.2 单芯结构（直接在线端调压）	188
5.2.2.1 电路原理	188
5.2.2.2 分接开关的选择	194
5.2.3 双芯结构（用串联和励磁机组调压）	196
5.2.3.1 电路原理	196
5.2.3.2 分接开关的选择	201
5.2.4 相角和同相电压的单独变化	203
5.3 高压直流用换流器变压器	207
5.4 带分接开关的电抗器	209
5.4.1 开断强度的基本分析	211
5.4.2 在限流电抗器上的应用（电流为主负载）	216
5.4.3 在并联电抗器上的应用（电压为主负载）	218
5.5 变压器的并联运行	222
5.5.1 并联变压器的负载分配	222
5.5.2 并联变压器的分接不同级	224
参考文献	230

1 历史综述

变压器通过绕组的分接头来改变电压比的方法几乎和变压器同时问世。从早期阶段起,能在一定限度内变化匝数比的变压器,已被用于电力传输。因为这是控制电网电压水平和有功及无功功率的最简单方法。在发展初期,按电网的需要将各个分接头连接到变压器油箱的出线套管上就足够应用了。但是,更方便的方法还是把分接头接到一个分接开关,即现今所谓的无励磁分接开关上,这种开关只能在变压器无励磁的情况下操作。显然,这种简单装置只能对变压器的电压比作适时的校正。它不能控制电网中因负载变化引起的压降变化。在那个阶段这些参数只能由发电厂控制。

要解决这个问题,就需要一种开关装置允许在负载下,即在不中断负载电流的条件下,改变变压器匝数比。这种开关装置,即现在称为的“有载分接开关”,在 70 多年前已用于变压器。到了 20 世纪 20 年代,用电量急剧上升,电力网需要互联和扩大,这时,有载分接开关就成为急需的设备。在高速发展中,也就是短短几年之间,就在操作的安全和效率方面得到了十分满意的结果。由于输电电压和功率的稳定增长,有载分接开关在许多年内一直在加速发展。

有载分接开关的应用显著地提高了电力系统的运行效率,从而,这个技术得到世界广泛采纳。现在,在德国,几乎所有的发电机变压器和电力变压器都配置有载分接开关。其他一些工业化国家,情况也大体相似。总之,采用有载调压的变压器所占的百分比正随着电网的负载密度和互联程度的增长而增加。此外,有载分接开关用在特种变压器上,例如作为化工和冶金工业生产用的调压设备,则是另一个重要的应用领域。

表 1-1 是不同应用领域中有载分接开关典型操作次数的汇总。在额定电流 50~3000A 范围内,每年的操作次数大约在几百次到 30 万次之间。[Breuer, Stenzel 1982]

当前有载分接开关可靠性所达到的高水平,可以肯定地说,它的预期机械寿命是和变压器的预期寿命相同的。在特种变压器的应用领域中也许有例外。但是,即使在那种应用领域中,经验也表明,只要有完善的维护,操作次数照样可以达到几百万次。

表 1-1 各种用途所需操作次数的综合数据

电力变压器 MVA	变压器数据			有载分接开关 每年的操作次数		
	容量	电压	电流			
	kV	A		最小	平均	最大
发电机变压器	100 ~ 1300	110 ~ 765	100 ~ 2000	500	3000	10000
联络变压器	200 ~ 1500	110 ~ 765	300 ~ 3000	300	5000	25000
配电变压器	15 ~ 400	60 ~ 525	50 ~ 1600	2000	7000	20000
电解变压器	10 ~ 300	20 ~ 110	50 ~ 3000	10000	30000	150000
化工变压器	1.5 ~ 80	20 ~ 110	50 ~ 1000	1000	20000	70000
电炉变压器	2.5 ~ 150	20 ~ 230	50 ~ 1000	20000	50000	300000

在负载下进行分接变换时，要解决的问题是如何把变压器绕组的各个分接头逐位地连接到同一输出端子上而不中断负载电流。在相邻分接头之间调换负载的过程中，两个分接头必定短暂地接在一个输出端子上。为避免该段绕组短路，要插入过渡阻抗，它可以是电抗器，也可以是电阻器。已经发明了两种基本原理，即电抗式的慢速切换原理和电阻式的快速切换原理，并且应用至今。如今这两种原理都已发展成为运行可靠的有载分接开关。

电抗式有载分接开关起源于美国，但在德国也有一些发明申请了 1905 年和 1906 年的专利。电抗式的切换原理使得开断电流与断口上升起的恢复电压之间有 90° 的相位差，因此，对于级电压高的场合，电抗式有载分接开关就不太适宜了。除此之外，过渡电抗器的价格也会随着级电压的增大而大幅上升。因此，电抗式切换原理经过一些年之后就失去了它在有载分接开关发展初期所具有的显要性。在 20 世纪 40 年代后期，许多有载分接开关的制造者就不生产基于这种切换原理的有载分接开关了。然而在美国，这种电抗式原理仍在大范围使用，电抗式有载分接开关仍在继续生产。

快速电阻式有载分接开关起源于 Jansen 博士发明的切换开关和分接选择器，这个发明在 1926 年获得专利。过渡阻抗使用欧姆电阻器。用这个原理，开断的电流和断口上的恢复电压是同相的，有利于电流过零时熄灭电弧。确定过渡电阻器的尺寸只需从短时负载考虑，使有载分接开关在级电压较高、功率较大的条件下的使用能经济合理。

电抗式原理本身证明了它只适用于低电压场合，而电阻式原理则在变压器领域或特殊应用，如在高压直流用变压器、移相变压器或特高压变压器中占主导地位。电抗式有载分接开关在这些场合中只有借助增压变压器才能应用，这使变压器在运输重量、运输尺寸、总体外型与全面的经济性等方面，和采用电阻式有载分接开关的变压器相比差别很大，因此它就更难于适用。

不同厂家已经制造出多种型式的有载分接开关,近几年来曾对埋入型和分隔型有载分接开关举行过多次讨论。在英国,传统的和流行的作法是采用分离室将变压器、分接选择器的油和切换开关的油彼此隔离。一种观点认为,有时候例如已经采用气体分析检测器来探测早期故障的场合,或者当分接开关内出现故障不得不更换变压器的时候,分隔型结构是有利的。另一种观点认为,由于分接开关的质量优良,无需把变压器主油箱的油与分接开关的油分开,以免增加变压器的价格和体积。[Fyvie et al. 1996]

随着有载分接开关重要性的增长,对标准化的需要日益迫切,于是产生了第一个有载分接开关的 IEC 标准,于 1966 年出版 (IEC 出版物 214)。该标准于 1976 年和 1989 年曾两次修改。IEC 出版物 214 的第 3 版,从 1989 年起至今是一直有效的,现在所用编号为 IEC 出版物 60214。计划在 2000 年作新的修改,改版后它将不仅包括有载分接开关,也包括无励磁分接开关。新标准 (第 4 版) 将编号为 60214-1。

在 IEC 出版物 214 作版 2 修改的同时,还制定了“有载分接开关应用导则”标准,编号为 IEC 出版物 542,于 1976 年出版。这个标准的第 1 号补充在 1988 年出版。这个标准也重新编号为 60542。在 IEC 出版物 60214 最近改版的同时,应用导则也将改版,编号将为 IEC 出版物 60214-2。

欧洲电工技术标准化委员会 (CENELEC) 已采用了 IEC 60214 标准并作了几处修改,于 1992 年出版,编号为 HD 367 S2; 1992。该文件在欧共体国家中有效。这个协调文件 (HD) 于 1998 年成为欧洲标准,编号为 EN 60214。在美国,于 1995 年出版了 IEEE 标准 C57.131.1995。这个标准是以 IEC 标准为基础加进了一些小的改动形成的,主要是为了把电抗式有载分接开关包括进去。与 IEC 标准有较大的差别出现在日本国家标准 JEC 2220/1988 (参见表 1-2)。[Goosen 1996]

表 1-2 有载分接开关标准差异对照

	操作次数	
	IEC 60214/1989	JEC 2220/1988
工作负载切换试验 IEC60214 第 8.2.1 条	50000 次	200000 次
开断容量试验 IEC60214 第 8.2.2 条	在 2 倍额定通过电流下 40 次	在 1.5 倍额定通过电流下 10 次, 3 次无间断
机械寿命试验 IEC60214 第 8.5.1 条	500000 次	800000 次

除了上述的 IEC 60214 和 IEC 60542 之外,经常使用的标准或在上述标准中引用的标准如下:

60060	高压试验技术
60076-1	电力变压器 第1部分 总则
60076-3	电力变压器 第3部分 绝缘水平和绝缘试验
60076-4	电力变压器 第4部分 分接与接法
60076-5	电力变压器 第5部分 承受短路的能力
60137	交流 1000V 以上套管
60947-1	低压开关装置和控制装置外壳的保护等级
60270	局部放电测量
60296	变压器和开关装置用未使用过的矿物油的规范
60354	油浸变压器的负载导则

国际大电网会议第 12 小组 (CIGRE SC12) 于 1995 年 6 月在瑞典 Malmö 召开讨论会期间,举行了一次有载分接开关专题研讨会。全世界许多专家参加了会议,并作了如下一些结论。[Gausen 1996]

- 当前的分接变换技术仍然是可以采用的。
- 对未来发电和输变电工程的分析结果表明,现有的有载分接开关在未来的变压器兆伏安容量和最高系统电压方面是充分满足需要的。
- 有几个国家使用绝缘隔板把分接开关和主油箱两者的油分开。这种隔离型分接开关可以用到最高系统电压 275kV 的线端调压。变压器采用油中气体分析时为避免干扰的影响,单独的切换开关油室必须是密封的,如 IEC 60214 的规定。
- 变压器和有载分接开关的制造者多年来在变压器内部使用氧化锌 (ZnO) 压敏电阻作为过电压保护是成功的。
- 一些新的绝缘和冷却液体用于中型电力变压器,例如作为聚氯联苯替代品,还在讨论,但在调压变压器中一般不用它们作为绝缘介质。研讨会一致认为没有必要普遍使用或试运行。
- 六氟化硫 (SF₆) 气体绝缘的调压变压器在日本已有生产,在约旦和几个东南亚国家也有运行。

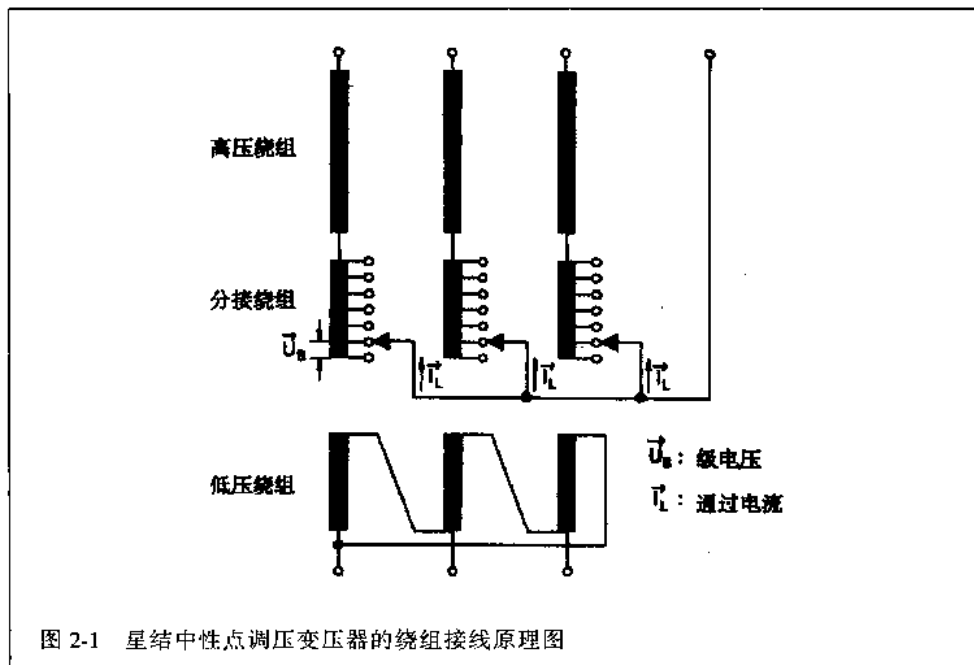
从这些情况我们可以认为,当前的分接变换技术原理和基本制造技术在未来也是可以使用的。

2 有载分接开关的设计概念

利用有载分接开关来增加或减少匝数能够逐级地改变变压器的电压比。为此目的，变压器必须提供带分接头的绕组并且要把这些分接头接到分接开关的端子上。分接开关有两项基本功能，第一是在开路情况下“选择”一个分接头，第二是在不中断通过电流的情况下把功率“切换”或“调换”到所选的分接头上。简易式有载分接开关（即选择开关）是把两种功能结合在一个装置中，而分接选择器与切换开关或调换开关互相分开的分接开关则是用于功率较高的场合。

分接绕组可以有多种布置形式。选择功能可以不带转换选择器（线性调）或者带转换选择器（极性性或粗级）。图 2-1 为星结中性点线性调压的基本接线图。分接选择器能按单多路或双多路的机械形式来设计。

负载电流从接通分接到预选分接的调换可通过电阻过渡或者另一种主要是美国使用的电抗器过渡来完成。在调换中，要求切换开关或调换开关能在恢复电压下接通和开断电流。恢复电压与两个分接头之间的电压是同一个数量级。



功率调换的动作可以是对称的或非对称的。前者对从变压器流出的超前或滞后功率提供相似的切换条件。切换开关或调换开关的动作方式可以是旋转式或摆动式。

所有分接开关的设计在分接选择器、转换选择器和切换开关或调换开关之间都要保持准确的机械同步。

功率调换时生成的电弧处于油中，从而污染了绝缘油（用真空开关作开关装置的有载分接开关除外）。所以开关装置要放在它本身的油室中，以便把污染的油与变压器主油箱的油分开。满足这个要求的设计已有好几种。

选择开关已设计成放在油箱中一个封闭的筒内操作的埋入型或者用螺栓固定在主油箱外面的单独油室内操作的分隔型。

