



国家电网公司
电力科技著作出版项目

换流变压器 及监造技术

郑劲 主编

HUANLIU BIANYAQI

JI JIANZAO JISHU



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

换流变压器 及监造技术

主 编 郑 劲

编写人员 万 达 聂定珍 凌 愍 李满元
刘福喜 李大广 于弘适



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是第一本系统介绍换流变压器及其监造全过程的专著。本书结合我国特高压直流工程实际建设情况,全面介绍了换流变压器设备的设计、制造、试验特点,内容涵盖换流变压器的性能参数、技术指标、型式结构、主要原材料组部件、制造工艺、工厂试验以及各阶段发生的典型案例等。

本书分为六章,包括换流变压器功能和参数,换流变压器内部结构,换流变压器主要原材料、组部件及监造要点,换流变压器制造工艺及监造要点,换流变压器试验和监造典型案例分析。本书通过对典型案例的剖析、计算,深入浅出地介绍了换流变压器在设计、制造及试验过程中易发生的问题。同时本书还注重结合已建工程项目,系统总结了特高压换流变压器的型式参数、结构、主要原材料组部件、制造工艺、工厂试验,从而提出把握产品质量的关键见证点。

本书可作为从事直流工程换流变压器质量监督人员技术培训用书,也可供从事换流变压器研究、设计、制造、运行、检修等工作的技术人员和管理人员使用,并可供相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

换流变压器及监造技术 / 郑劲主编. —北京: 中国电力出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-5123-8553-5

I. ①换… II. ①郑… III. ①换流变压器 IV. ①TM422

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 271971 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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 3 月第一版 2016 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.75 印张 572 千字

印数 0001—2000 册 定价 145.00 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



序

直流输电事业在我国经过近 30 年的高速发展，已具备高水平，应用规模也很大。从首条 $\pm 500\text{kV}/1200\text{MW}$ 葛洲坝—南桥直流输电工程建成以来，到最近的 $\pm 800\text{kV}/8000\text{MW}$ 溪洛渡—浙江特高压直流输电工程建成投运，已建成 20 多个超/特高压直流输电工程，在实现西电东送、北电南供、水火互济等能源资源大范围优化配置，促进我国西部、北部地区能源优势转化为经济优势，缓解东中部地区用电紧张和环境容量短缺等方面，发挥了重要的作用。期间，广大科技人员克服无数困难，实现了系统设计、设备研制、安装调试和运行维护国产化。目前，国家电网公司已建成投运 4 个特高压直流输电工程，首个特高压直流输电示范工程已安全运行 5 年。可以说，我国高压直流输电技术已步入世界领先行列。

随着国家《大气污染防治行动计划》的发布实施， $\pm 800\text{kV}/8000\text{MW}$ 的宁东—绍兴、酒泉—湖南、晋北—南京直流工程， $\pm 800\text{kV}/10000\text{MW}$ 的锡盟—泰州、上海庙—临沂直流工程已开工建设， $\pm 1100\text{kV}/12000\text{MW}$ 的准东—皖南、 $\pm 800\text{kV}/10000\text{MW}$ 的扎鲁特—山东、雅中—江西直流工程即将开工建设，我国又迎来直流工程建设的高潮。面对容量更大、电压更高，交流侧送端接入 750kV ，受端分层接入 1000kV 和 500kV 交流系统等新要求，技术难度又上了一个大台阶。在所有的技术挑战中，换流变压器的研制首当其冲，绝缘、电磁、温升、机械等各方面都面临介乎临界的挑战，但万变不离其宗，技术创新来源于扎实的基础，本书的出版，恰逢其时，它系统总结了国内以往直流工程换流变压器的型式参数、结构、主要原材料组部件、制造工艺和工厂试验，从直流换流变压器特点和功能等基本概念出发，阐述了不同工程换流变压器主要技术要求、技术参数有关的原理性问题。尤其是通过对典型案例的剖析、计算，深入浅出地介绍了换流变压器在设计、制造及试验过程中易发生的问题，从而提出把握产品质量的关键见证点。这对监造人员协助制造厂实现我们提出的“让一切质量问题都在厂内解决，不留待现场解决”的目标的实现，具有很强助益。

回顾我国发展高压直流输电技术，经历引进、消化吸收和自主创新的过程，凝聚了

我国电网和制造单位广大工程技术人员的辛勤劳动和智慧，表现出无比的创造力。相信在党和国家创新发展的精神指引下，通过大家的共同努力，未来会取得更大成就，在实现“互联互通”、建设全球能源互联网的征程中，贡献我们电力职工应尽的一份力量。

刘泽洪

2015 年 12 月

前言



特高压直流输电是实现我国西电东送、北电南送、水火互济、能源资源大范围优化配置战略的重要措施。近年来，针对大气污染日益严重，国家发布实施《大气污染防治行动计划》，提出加快调整能源结构，增加清洁能源供应，全面淘汰和替代低效、重污染的传统用能方式，规划建设 12 条重点输电通道。特高压直流输电具有长距离、大容量、低损耗的优势，将发挥更为积极而重要的作用。

从首个特高压直流输电示范工程，向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}/6400\text{MW}$ 输电项目开始，国家电网公司在近 5 年内已陆续建成投运了数个 $\pm 800\text{kV}/7200\text{MW}$ 和 $\pm 800\text{kV}/8000\text{MW}$ 输电项目。目前，正在开工建设 $\pm 800\text{kV}/10000\text{MW}$ 输电项目， $\pm 1100\text{kV}/12000\text{MW}$ 特高压直流输电项目也进入实施阶段：一方面我们已经建成投运了一批特高压直流输电工程，积累了丰富的经验；另一方面，又面临工程输电容量、电压水平不断提升的大规模建设挑战。众所周知，保证系统的安全稳定运行，设备质量是基础，通常我们要求换流站设备的寿命为 30~40 年，如何才能高水平地实现这一目标，需要在设备的全寿命周期的每个环节加强质量控制，换流变压器是直流输电系统中最复杂、最昂贵、最庞大的设备，换流变压器的制造进度和质量状况已成为制约直流输电工程建设投产和安全稳定运行的最关键因素。因此，本书选择换流变压器，总结以往在设计、制造过程中暴露的问题和改进经验，掌握其关键技术，以期承前启后，促进提高设备质量，保证工程按期投运，提升系统安全运行水平。

随着特高压直流输电工程的不断发展，所采用的换流变压器，容量已从向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程的 321MVA 增加到现在输送容量为 10GW 直流工程的 510MVA，送端要接入 750kV 交流系统，受端低端接入 1000kV 交流系统，而运输尺寸、重量的限制条件并没有变化，这必然使换流变压器设计结构更紧凑、裕度更偏紧、工艺要求更高，质量风险增大。多年来，为了在理想的工期采购到理想质量的换流变压器，电网企业不惜成本，派出一支支专业队伍赴制造公司进行驻厂监造，督促、协助厂家生产制造，对保证设备质量发挥了作用。现在，面对新的形势和课题，质量监督人员只有

基本概念更清晰、技术功底更扎实、善于总结经验，才能举一反三、及时跟进，保持专业水准的适应性和科学性，使监督工作卓有成效。本书以换流变压器使用者的角度，从直流换流变压器特点和功能等基本概念出发，阐述有关直流特性的关键原理性问题，并通过特高压换流变压器的型式参数、结构、主要原材料组部件、制造工艺、工厂试验全过程的总结，以及对典型案例的计算、分析和研究，提出把握产品质量的关键见证点，期望对达成上述目标有所帮助。

国家电网公司直流建设分公司组织业内资深专家和多年亲身参加换流变压器监造的高级技术人员编写本书。按照从总体设计要求到制造细节过程，共分为六章：第一章由郑劲、万达、聂定珍编写，概述换流变压器的功能和参数以及关键技术特点；第二~四章由李满元、刘福喜编写，介绍换流变压器的内部结构、原材料、组部件和整体装配；第五章由李大广、凌愍编写，介绍换流变压器的试验；第六章由郑劲、万达、凌愍、刘福喜、于弘适编写，针对实际工程设计、制造和试验过程中遇到的典型案例进行深入分析；全书由郑劲统稿。

在本书编写过程中，得到陈维江、文闯成、陶喻、胡惠然、傅锡年、卢理成、党镇平等专家的指导帮助，还得到国家电网公司建设和运行部门，以及换流变压器制造厂商的大力支持。在此，表示衷心感谢！

本书中内容涉及面广，但水平所限，恐有很多遗漏、不当之处，欢迎批评指正。

编 者
2015 年 11 月



目 录

序 前 言

第一章 换流变压器功能和参数	1
第一节 概述	1
第二节 换流变压器功能	2
第三节 换流变压器主要技术要求及评估	9
第四节 换流变压器型式和参数	52
第二章 换流变压器内部结构	64
第一节 铁芯结构	64
第二节 绕组结构	74
第三节 器身和引线结构	81
第四节 绝缘结构	92
第五节 油箱结构	102
第三章 换流变压器主要原材料、组部件及监造要点	106
第一节 主要原材料	106
第二节 主要组部件	131
第三节 主要非电量保护及监测装置	163
第四章 换流变压器制造工艺及监造要点	179
第一节 铁芯制作	179
第二节 油箱制作	188
第三节 绕组制作	196
第四节 器身装配和引线	218
第五节 器身干燥	229
第六节 总装配及处理	234
第七节 包装和发运准备	242

第五章 换流变压器试验 247

 第一节 概述 247

 第二节 试验前准备 249

 第三节 试验方法及监造要点 250

第六章 监造典型案例分析 300

 第一节 换流变压器设计典型案例 300

 第二节 换流变压器原材料、组部件典型案例 317

 第三节 换流变压器制造工艺典型案例 339

 第四节 换流变压器出厂试验及现场安装调试典型案例 351

索引 367

参考文献 371

换流变压器功能和参数

第一节 概 述

一、换流变压器技术发展过程

换流变压器技术是伴随着直流输电技术的需求而发展的,除 1906~1927 年在法国建成的穆迪尔—里昂的直流输电试验工程直接采用直流电机串联组成外,其他直流工程都采用了换流技术,即换流变压器与换流阀一起构成换流器的换流技术。

早期的换流变压器,多数安装在阀厅外的交流场,阀侧套管为户外式,如巴西伊泰普工程,既便于施工安装又便于运行维护。但是,随着工业的发展,污秽问题日益严重,阀侧套管易发生污秽闪络及不均匀受潮放电,使阀侧套管的外绝缘问题成为技术关键。因此,到三峡—常州 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电工程(简称三常工程)时,采用了阀侧套管直接插入阀厅的换流变压器技术,既较好地解决了外绝缘问题,又节省了从换流变压器回路进入阀厅回路的直流穿墙套管。目前这种技术得到了普遍的应用。

随着直流输电系统输送容量的不断提升,换流变压器的型式也在不断演变。当输送容量较小时,换流变压器采用单相三绕组,含两主芯柱和两旁柱,阀侧星形和三角形绕组分置于两主芯柱上。一个 12 脉动换流单元仅需 3 台换流变压器,1 个换流站加上 1 台备用,只需 7 台换流变压器。在系统输送容量相同的条件下,与单相双绕组换流变压器相比,单相三绕组换流变压器所需设备台数少,占地面积小,设备本身单位容量造价低,是最经济的方案选择。

但是,当直流系统输送容量增大时,受变压器单柱容量的限制,需采用 2 柱并联,因此换流变压器需采用单相双绕组型式。当容量进一步提升且又受到大件运输的限制时,就必须采用 3 柱并联的单相双绕组换流变压器。采用单相双绕组换流变压器时,一个 12 脉动换流单元需 6 台换流变压器,一个换流站加上 2 台备用,需要 14 台换流变压器。

二、我国掌握换流变压器技术历程

从 20 世纪 80 年代开始,我国先后引进法国阿尔斯通公司和日本日立公司交流 500kV 大型电力变压器的设计制造技术,并通过技术合作和项目合作等方式学习借鉴了瑞典 ABB、德国西门子、日本三菱和东芝、乌克兰扎布罗日变压器厂、奥地利伊林等国外主要变压器制造企业的设计制造技术,形成了自己的大型变压器设计、制造和开发能力,80 年代初我国制造出第一台 500kV 交流变压器。

三峡电力外送确定为直流工程时，我国并不具备换流变压器的设计制造能力，因此实行国际采购，并制订了“技贸结合、技术引进、联合设计、合作制造”的技术路线。明确规定中国制造企业分包额不低于总价合同的 30%（三常工程）、50%（三峡—广东±500kV 直流输电工程，简称三广工程）、70%（三峡—上海±500kV 直流输电工程，简称三沪工程），必须由中国制造企业为主制造 4 台（三常工程）、8 台（三广工程）、14 台（三沪工程）换流变压器。通过国际招标的方式引进关键技术后消化吸收再创新，逐步实现我国换流变压器的国产化，同时选择我国沈阳变压器厂（简称沈变）和西安变压器厂（简称西变）作为引进技术的受让方。从三常工程开始，沈变和西变在原已掌握 500kV 大型电力变压器的基础上，通过消化吸收引进技术，分别制造出合格换流变压器样品，填补了国内空白。

2006 年我国提出建设±800kV 特高压直流工程，高端换流变压器制造难度较大，所以仍采用了“技贸结合、技术引进、联合设计、合作制造”的技术路线，但是改为我方总承包。2009 年 12 月 6 日沈变为向家坝—上海±800kV 特高压直流输电工程（简称向上工程）奉贤换流站提供的±800kV 换流变压器顺利通过关键绝缘试验。12 月 2 日西变为向上工程复龙换流站提供的±800kV 换流变压器通过全部出厂试验。我国已有向上、云南—广东、锦屏—苏州、哈密南—郑州、溪洛渡左岸—浙江金华±800kV 特高压直流工程（分别简称为云广、锦苏、哈郑、溪浙工程）成功投运，输送容量从 6400MW 发展到 8000MW。国内成功的生产厂也由西变、沈变扩大到保定天威保变电气股份有限公司（简称保变）、山东电工电气集团有限公司（简称山东电工）、特变电工衡阳变压器有限公司（简称衡变）等变压器厂，重庆 ABB 和广州西门子作为合资厂也能独立供货。

三、换流变压器监造的必要性

换流变压器价格昂贵、设计特殊、工艺复杂，对绝缘材料一致性要求高，加上大量手工制作，使产品质量较难保持高度稳定，其可靠性和可用率对整个直流工程的建设工期、安全稳定运行至关重要。鉴于换流变压器的质量和工期是制约直流工程建设的关键，对换流变压器实行全过程监造非常必要。

第二节 换流变压器功能

一、换流变压器主要作用、接线及其配置

（一）换流变压器主要作用

换流变压器是直流输电系统中的核心设备，与换流阀一起作为交流和直流系统的连接枢纽，在整流和逆变侧实现直流和交流的转换。换流变压器主要作用：① 隔离交、直流系统，避免直流电压进入交流系统；② 提供换流阀所需的可调节交流电压；③ 用于对 12 脉动换流阀的两个串联 6 脉动阀桥提供相差 30°电气角的电源，除去低次的 5 次和 7 次特征谐波；④ 限制故障时的短路电流和控制换相期间换流阀电流的上升陡度。

（二）直流换流系统接线和换流变压器配置

我国直流输电系统的换流器接线有背靠背联网，±400、±500、±660kV 单 12 脉动，

$\pm 800\text{kV}$ 双 12 脉动等型式，换流变压器的型式和参数由成套设计综合考虑直流输电容量、交直流系统电压、设备制造能力、运输条件以及换流站布置等因素确定。

1. 背靠背直联网工程

除灵宝背靠背直流工程（简称灵宝工程）Ⅰ期输电容量选为 360MW 外，其余的背靠背工程，如灵宝工程Ⅱ期及高岭背靠背直流工程（简称高岭工程）Ⅰ、Ⅱ期、中俄直流背靠背（黑河）联网工程均选择为 750MW。灵宝工程Ⅰ、Ⅱ期的系统主接线采用单 12 脉动接线、末端接地方式，直流电压分别为 120、167kV；高岭工程Ⅰ、Ⅱ期和黑河工程的系统主接线采用单 12 脉动接线、6 脉动中点接地方式，直流电压为 $\pm 125\text{kV}$ 。后一种接线方式的优点是能降低换流变压器阀侧绝缘水平，缺点是极线上多配 1 个平波电抗器，6 脉动中点不接地侧需配置避雷器。除灵宝工程Ⅱ期直流电流达 4500A（首次试验了 6 英寸晶闸管可用性）外，其他背靠背工程直流电流均为 3000A。

换流变压器容量一般按送、受两端相同设计，除灵宝工程Ⅰ期为 144MVA 外，其他均选择 300MVA 左右，都采用单相三绕组型式，联结组别为 YNyn0d11，每个背靠背单元需配备 7~8 台换流变压器，其中 1~2 台为备用。

背靠背换流变压器系统接线图和外形图如图 1-1~图 1-4 所示。

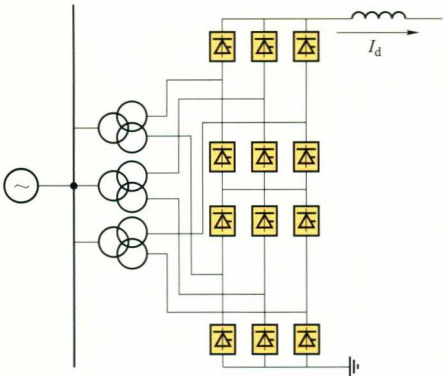


图 1-1 末端接地背靠背换流系统接线

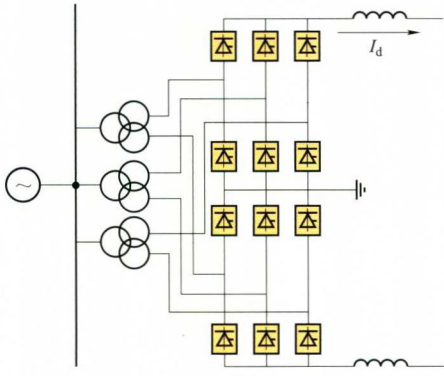


图 1-2 12 脉动中点接地换流系统接线



图 1-3 高岭背靠背换流站换流变压器（型式一）



图 1-4 高岭背靠背换流站换流变压器（型式二）

2. ± 400 、 ± 500 kV 和 ± 660 kV 高压直流工程

± 400 、 ± 500 kV 和 ± 660 kV 高压直流工程均采用单 12 脉动双极系统接线，其中，葛洲坝—上海南桥 ± 500 kV 直流输电工程（简称葛南工程）输送容量为 1200MW 外，三常、三广及三沪工程 I、II 期、呼伦贝尔—辽宁、宝德 ± 500 kV 直流输电工程（分别简称呼辽、宝德工程）工程全部采用 3000MW，这也成为该电压等级直流输电工程的标准配置。柴达木—拉萨 ± 400 kV 直流输电工程（简称青藏工程）和宁东—山东 ± 660 kV 直流输电示范工程（简称宁东工程）是特殊环境和当时发展条件下的特例，输电容量分别为 600MW 和 4000MW。

青藏、葛南工程换流变压器容量（送/受端）为 118/118MVA、244/224MVA，采用单相三绕组型式，联结组别为 YNyn0d11，每工程配备 14 台换流变压器，其中 2 台为备品。三常、三广等工程换流变压器容量为 298/285MVA 左右，宁东工程最大，达到 403/386MVA，采用单相双绕组型式，联结组别为 YNyn0 或 YNd11，每工程配备 28 台换流变压器，其中 4 台为备用。

单 12 脉动换流变压器系统接线和外形分别如图 1-5 和图 1-6 所示。

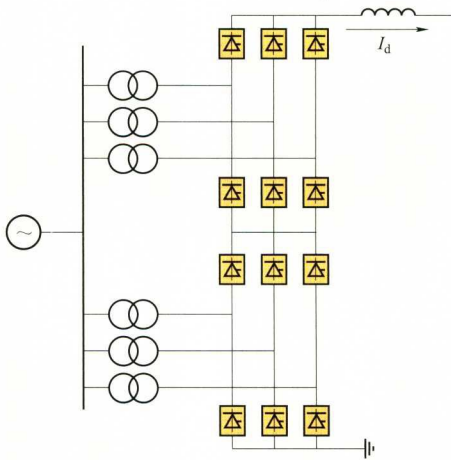


图 1-5 单 12 脉动直流换流系统接线



图 1-6 宁东换流站 660kV 换流变压器

3. ± 800 kV 特高压直流工程

± 800 kV 特高压直流工程采用 $(400+400)$ kV 等电压双 12 脉动双极系统接线、双 12 脉动对称接线，加上平波电抗器极线 and 中性母线对等布置，有利于平衡上下 12 脉动换流单元中点处谐波电压，降低高压换流单元阀侧绝缘电压水平。特高压直流工程输电容量从向上工程的 6400MW，到锦苏工程的 7200MW，再到哈郑工程和溪浙工程的 8000MW；换流变压器容量从（送/受端）321/297MVA、363/341MVA 到 405/377MVA 和 404/382MVA，都采用单相双绕组型式，联结组别为 YNyn0 或 YNd11。每工程配备 48 台换流变压器和 8 台备用，共 56 台。目前，受端低压端 400kV 和 200kV 换流变压器接入 1000kV，高压端 800kV 和 600kV 换流变压器接入 500kV 交流系统的“分层接入”式的锡盟—泰州（简称锡泰）、上海庙—临沂（简称上临）工程已完成可研、初设阶段，已经开工建设。这种接线方式，可降低换流变压器制造难度，实现了直流系统直接接入

1000kV 交流电网。另外，(550+550) kV 双 12 脉动 1100kV 直流输电工程，以准东—皖南为试验示范工程，已纳入建设计划，输送容量将达到 12 000MW，满足 2 000km 以上远距离大容量输电需求。

±800kV 换流变压器系统接线和外形如图 1-7~图 1-9 所示。

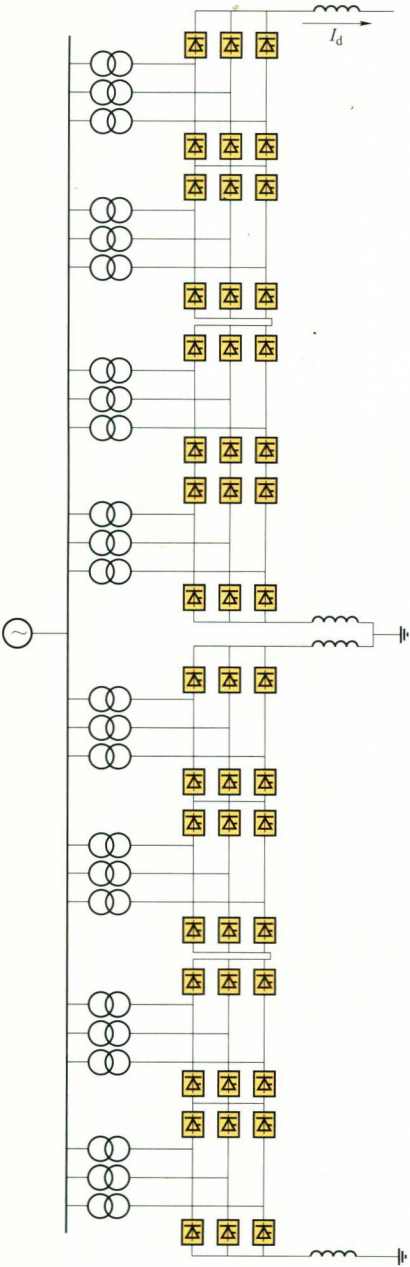


图 1-7 ±800kV 特高压直流换流系统接线



图 1-8 向上工程复龙换流站 800kV 换流变压器



图 1-9 向上工程奉贤换流站 800kV 换流变压器

二、换流变压器特点

与一般的交流变压器相比，换流变压器具有以下特点。

(一) 稳态电压电流

以单相双绕组换流变压器接入 6 脉动整流器为例，图 1-10 所示为 6 脉动整流器原理接线图，图 1-11 给出正常工作时整流器相关的电压和电流波形示意图。

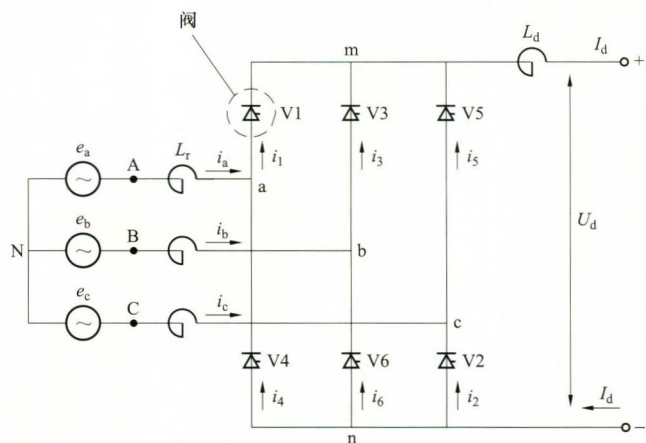


图 1-10 6 脉动整流器原理接线图

6 脉动整流器通过换流阀三相桥式连接的 6 个桥臂（阀）V1~V6 按序通断，将交流电变为直流电（数字 1~6 为阀的导通序号）。通常每个阀由多个晶闸管元件串联构成，具有晶闸管的特点且满足直流电压的设计要求。图 1-10、图 1-11 中 e_a 、 e_b 、 e_c 为等值交流系统工频基波正弦相电动势（通常由换流变压器提供）， L_r 为每相等值换相电抗（主要为换流变压器的漏抗）的电感， L_d 为平波电

抗器的电感，等值交流系统的线电压 e_{ac} 、 e_{bc} 、 e_{ba} 、 e_{ca} 、 e_{cb} 、 e_{ab} 为阀的换相电压。

A 相换流变压器将承受阀 V1 和 V4 导通时 m 点（120°电角度）和 n 点（120°电角度）的对地直流电压，承受阀 V1 和 V4 不导通时 a 点对中性点 N（2 个 60°电角度）的交流电压，如图 1-11 中（a）、（b）所示，承受的电流 i_a 如波形图（e）所示。

因此，在一个交流电周期 360°电角度内，换流变压器阀侧有 240°电角度由于对应阀导通而承受直流电压和电流；有 120°电角度由于对应阀不导通而承受本身的空载交流电压，不承受负载电流。

(二) 绝缘及电场分布

换流变压器阀侧绕组既要承受交流电压产生的应力，又要承受直流电压产生的应力与极性反转的应力，这使换流变压器的绝缘结构比交流变压器复杂。

交流变压器的主绝缘设计是基于薄纸筒、小油隙理论，即在交流电场中纸板主要起分隔油隙的作用，基本上不具备单独耐压的功能。所以，纸筒厚度薄，也就比较轻。但在换流变压器中，由于存在直流电场，主绝缘中需要更多的绝缘纸板来承担大部分的直流电场强度。所以，阀侧绕组要被多层纸板筒和角环所包绕，主绝缘中纸板筒的厚度和用量远大于交流变压器。同样，阀侧引线处的绝缘件数量也有所增加，出线装置要综合考虑交流场、直流场、极性反转场等因素，比交流变压器更复杂。

换流变压器内绝缘介质在交直流电压下的电场分布从电流密度的角度分析有下式

$$J = \sigma E + dD/dt = \sigma E + \varepsilon_0 \varepsilon_r dE/dt = E (\sigma + \varepsilon_0 \varepsilon_r \omega) \quad (1-1)$$

$$\varepsilon_r = 1 + \chi$$

式中 J ——介质的电流密度，A/m²；

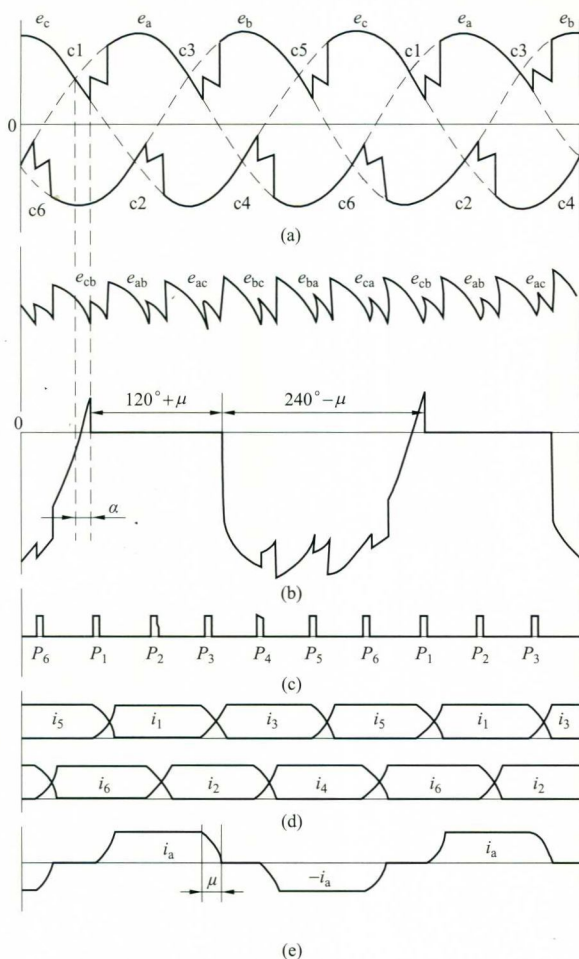


图 1-11 6 脉动整流器电压和电流波形示意图

(a) 交流电动势和直流侧 m 和 n 点对中性点的电压波形；(b) 直流电压和阀 1 上的电压波形；
 (c) 触发脉冲的顺序和相位；(d) 阀电流波形；(e) 交流侧 A 相电流波形

σ ——介质的电导率，S/m；

E ——介质的电场强度，V/m；

D ——电通量，Vm；

ϵ_0 ——真空中的介电常数，F/m；

ϵ_r ——介质的相对介电常数；

χ ——电极化率；

ω ——角频率。

绝缘纸类材料电导率 σ 典型值约 10^{-15} S/m，变压器油的 σ 约 10^{-12} S/m，该数值随温度变化剧烈，可达 10^5 量级，温度越高电导率越高。绝缘纸类材料介电常数 ϵ 典型值约 4.5，变压器油的 ϵ 约 2.2，气体 ϵ 为 1，该数值随温度变化相对稳定。

(1) 纯交流电压情况下： $\sigma \ll \epsilon_0 \epsilon_r \omega$ ，介电常数起控制作用，串联回路中电压分配与介电常数成反比，油纸串联则电压主要加在介电常数小的油中。

(2) 纯直流电压情况下： $\sigma \gg \varepsilon_0 \varepsilon_r \omega$ ($\omega = 0$)，电导率起控制作用，串联回路中电压分配与电导率常数成反比，油纸串联则主要加在电导率小的纸类绝缘材料中。

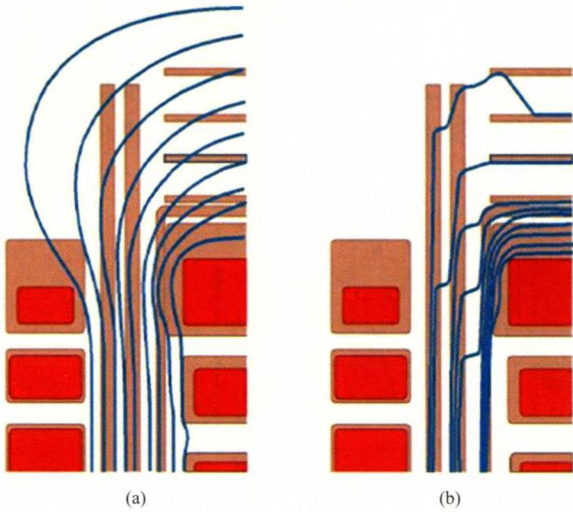


图 1-12 交流场和直流场电位分布谱图
(a) 交流场；(b) 直流场

交流场和直流场具有不同的电位分布谱图，如图 1-12 所示。对交流场，应力主要集中于油介质；对直流场，应力主要集中于固体介质。

总之，变压器中主要绝缘材料为变压器油和绝缘纸，交流电场按照容性分布规律分布在这两种介质中，介电常数大的绝缘介质承受较小的交流电场强度，而介电常数小的绝缘介质承受较大的交流电场强度。变压器油的介电常数约为绝缘纸板的一半，所以变压器油隙中的交流电场强度约为绝缘纸板中的一倍。可以说，变压器中交流电场的

分布比较均匀。

直流电场却是遵循与交流电场完全不同的规律进行分布的，它按照阻性分布规律分布在变压器油和绝缘纸中。也就是说电导率小的绝缘介质承受较大的直流电场强度，电导率大的绝缘介质承受较小的直流电场强度。绝缘纸板中的直流电场强度约为变压器油中的 100 倍。可见，变压器中直流电场的分布非常不均匀。

在实际运行中，直流电压是有波动的，温度也是变化的，特别是直流电压在系统启动、停止或出现故障等情况时：

(1) 初始场强分布由 ε_r 决定，式 (1-1) 变为 $J \approx \varepsilon_0 \varepsilon_r dE/dt$ 。

(2) 一段时间后，建立起稳定的（直流）场强，由 σ 决定，式 (1-1) 变为 $J = \sigma E$ 。

从初始状态到稳态形成间的暂态过程的长短由时间常数 $\tau = \varepsilon/\sigma$ 决定，但 τ 不是唯一的。根据绝缘材料规格、型式以及温度的不同，由 τ 决定的暂态持续时间，即场强分布的变化时间，可能从典型的数小时直至数周。

综上所述，换流变压器在长时直流电压作用下，绝缘中的电场为静态直流电场，电场分布只取决于介质的电导率和几何形状。因为油和纸的电导率相差悬殊，电场集中在纸和不连续的纸板端部油中。动态直流电场分布既取决于介电系数，也取决于电导率。由于静态和动态直流电场的分布都与电导率密切相关，而电导率受温度、杂质、原材料和作用场强等因素影响而在很大范围内变化，使直流绝缘的设计存在很大的不确定性。故直流绝缘设计的安全系数取值必须大大高于交流设计的取值，因而换流变压器的设计制造，也比普通交流变压器要复杂和困难得多。

(三) 其他特点

(1) 短路阻抗。换流变压器的阻抗通常高于交流变压器，这不仅是为了根据换流阀承受短路的能力限制短路电流，也是为了限制换相期间阀电流的上升率。但换流变压器短路阻抗太大会增加无功损耗和无功补偿设备，并导致换相压降过大。短