

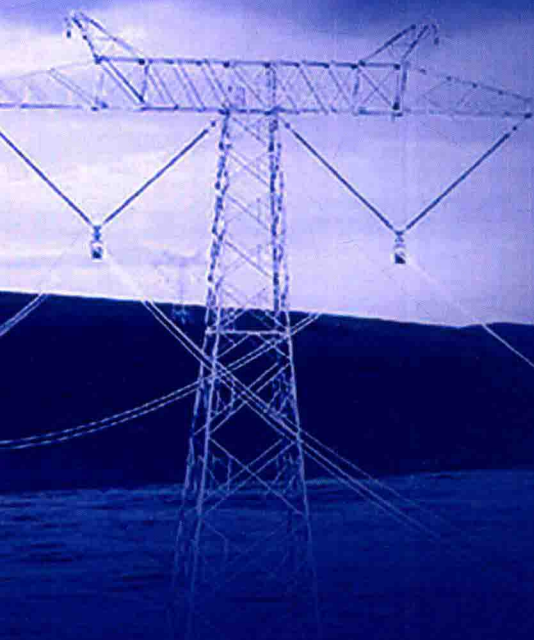
直流

ZHILIU

DIANNENG JILIANG JISHU

电能计量技术

林国营 潘 峰 等 编著



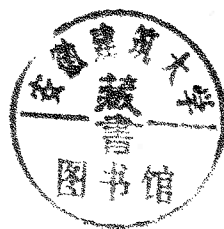
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

直流 电能计量技术

ZHILIU

DIANNENG JILIANG JISHU

林国营 潘 峰 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书的主要内容包括直流电能计量技术的发展及现状,直流电能计量系统的组成及作用,直流电能计量关键技术,直流互感器和直流电能表的分类、结构、工作原理及性能,直流互感器和直流电能表的校验技术,直流电能计量技术的典型应用等。

本书可供直流电能计量技术人员使用,还可供高等院校电气工程专业的师生参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

直流电能计量技术 / 林国营等编著. —北京: 中国电力出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-5198-0183-0

I. ①直… II. ①林… III. ①直流—电能计量 IV. ①TM933.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 297790 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 畅 舒 (010-63412312)

责任校对: 李 楠

装帧设计: 张俊霞·张 娟

责任印制: 石 雷

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2018 年 8 月第一版

印 次: 2018 年 8 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张: 7.25

字 数: 129 千字

印 数: 0001—1000 册

定 价: 40.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

近年来,随着高压直流输电、大功率直流技术的广泛应用,除了传统冶金行业使用的直流涡流电解技术以及大功率整流系统外,数量不断增多的大型换流站、电动汽车非车载充换电设施也成为了直流输配用电技术的应用典型,与之配套的直流电能计量技术成为了研究和应用的热点。为应对新形势,直流电能计量技术的研究受到高度关注。国内外正加快对新型材料与计算机、微电子、自动化等信息技术在直流电能计量系统中的应用研究,提出了多种适应不同工程应用的直流电能计量系统。直流电能计量系统是高压直流输电系统、大功率直流技术的核心环节,具有电量结算与系统安全控制作用,是实现系统安全、稳定、高效运行的重要保障。

直流电能计量系统应用直流传感器、信号处理、网络通信技术,包含了直流互感器、传输设备、直流电能表等单元。随着高压直流输电技术的快速发展,围绕高电压大电流传感器技术、互联网技术、直流电能计量算法等新技术,构建直流电能计量系统已成为研究热点。我国当前在高压直流互感器研究及应用、直流电能表产业化、工程应用及标准化建设等方面已走在世界各国前列。然而,由于直流的电力结算与计量体系的建立还并不完善,创建直流电能量值的溯源体系以及研制相关检测装置,成为直流电能计量技术发展中亟待解决的问题。

编者见证了近十年来我国直流电能计量技术的蓬勃发展以及相关设备技术水平的不断提升,长期致力于直流电能计量技术、检测与量值溯源体系研究。针对直流电能计量技术中互感器校准研究,提出了基于“数字采样同步测量法”的高压直流互感器现场校准技术,研制了适应多种信号类型、满足工程建设需求的高压直流互感器现场校准平台。针对静止式直流电能表,研制了校准平台,并应用于电动汽车用直流电能表的检测工作。本书中大量技术成果已得到应用和实践验证,为直流电能计量技术的研究和应用提供重要参考。

本书从实用的角度,系统介绍了直流电能计量系统架构、直流互感器与直流电能表基本知识、校验方法与装置设计实现、工程应用等。本书分为6章:第1章介绍了直流电能计量的发展及现状,阐述了直流电能计量关键技术与系统构架;第2、

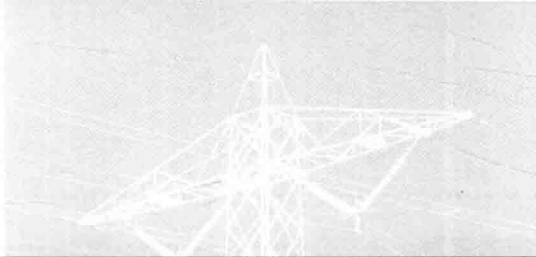
3 章分别介绍了直流互感器和直流电能表的工作原理及性能；第 4 章介绍了直流互感器的校验技术，包括校验方法和校验项目；第 5 章介绍了直流电能表的校验技术，介绍了直流电能表的校验原理；第 6 章列举了直流电能计量技术的应用，目的是让读者直观了解直流电能计量技术在实际生产实践中的应用情况。

在本书编撰过程中，林国营负责编写第 1 章、第 6 章部分内容及第 2 章，并负责全书统稿工作；潘峰负责编写第 1 章、第 6 章部分内容及第 4 章；赵伟、罗敏负责编写第 3 章；张永旺、孟金岭负责编写第 5 章。宋强负责对第 1、2、4 及 6 章内容进行校核，张鼎衢负责对第 3 及 5 章内容进行校核。华中科技大学徐雁、肖霞老师对本书的内容提出了宝贵意见，并在统稿过程中给予了大力支持，再次表示特别感谢。另外，李玲龙等同学在本书的编写过程中也给予了大力支持，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，兼作者水平有限，书中难免存有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

2016 年 12 月



目 录

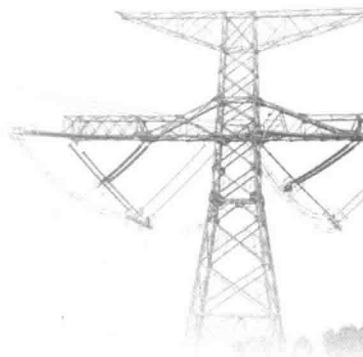
前言

第 1 章 直流电能计量技术概况	1
1.1 直流电能计量技术的发展及现状	1
1.2 直流电能计量系统的组成及作用	2
1.3 直流电能计量关键技术	5
第 2 章 直流互感器	8
2.1 概述	8
2.2 直流互感器的分类	8
2.3 直流互感器的性能	9
2.4 直流互感器的工作原理	12
第 3 章 直流电能表	27
3.1 概述	27
3.2 直流电能表的结构	29
3.3 直流电能表的工作原理	44
3.4 直流电能表的性能要求	59
第 4 章 直流互感器的校验	64
4.1 概述	64
4.2 直流互感器的校验方法	64
4.3 直流互感器的型式试验	72
4.4 直流互感器的现场校验	83
4.5 校验设备	87
第 5 章 直流电能表的校验	94
5.1 概述	94
5.2 校验条件	94
5.3 校验项目	96

5.4 校验方法	97
第 6 章 直流电能计量技术应用	103
6.1 电动汽车电能计量系统	103
6.2 工业直流大电流电能计量系统	106
参考文献	109

第 1 章

直流电能计量技术概况



1.1 直流电能计量技术的发展及现状

近年来,随着高压直流输电、大功率直流技术的广泛应用,除了传统冶金行业使用的直流涡流电解技术以及大功率直流电弧炉外,数量不断增多的大型换流站、电动汽车非车载充换电设施也成为了直流输配电技术的应用典型,与之配套的直流电能计量技术也渐渐成为了研究和应用的热点。

直流电能计量系统一般通过直流互感器及其二次回路,基于模拟量信号变换、传输,再结合直流电能表按照规定的接线方式实现电能计量。电压测量多采用电阻分压器,电流测量多采用分流器、霍尔传感器以及磁调制式直流比较仪等互感器,配合电动式或静止式电能表完成电能计量。电动式直流电能表的基本组成元件有驱动元件、转动元件、制动元件、轴承、计度器和误差调整装置等。电动式电能表受原理制约,其附加误差因素众多。随着模拟和数字电子技术的发展,出现了电子式电能表并得到了广泛应用。电子式电能表又称为静止式电能表,按照乘法器的原理分为模拟式和数字式。

随着信息技术的不断发展,直流电能计量技术有了新的发展,数字化、智能化以及网络化发展成为直流计量系统的发展趋势。

1. 数字化

直流电能计量系统中采用数字式计量芯片,与之相应的是直流互感器以及合并单元的使用,应用各种先进的技术对电子式电能计量系统进行研发,使得直流电能的计量过程向数字化发展,进一步提高计量系统的性能。数字式直流电能表的研究和开发,使得电能计量更加准确和可靠。

2. 智能化

直流电能表采用各种新技术,功能更加完善,可以实现事件记录、存储、冻结等多项功能,提高了直流电能计量智能化水平。

3. 网络化

为了更好地对直流电能计量装置进行统一调度管理，电能计量装置形成一个连通的网路，通过网路的操作，使得对各个电能计量装置的管理可以更加规范有序。电能计量装置的网路发展，使得各种信息资源得到广泛的应用，实现资源共享，极大提高了电能计量装置的运营管理水平。

1.2 直流电能计量系统的组成及作用

直流电能计量系统主要由直流互感器和直流电能表等装置组成。

1.2.1 直流互感器

根据被测对象的不同，直流互感器可分为直流电压互感器和直流电流互感器；根据二次输出形式不同，直流互感器可分为模拟量输出式直流互感器和数字量输出式直流互感器。

模拟量输出式直流互感器的一次传感器输出为电信号，利用电磁感应、分压等原理传感被测信号，信号的传输通过电缆实现。基于电磁感应原理的直流电压互感器通过并联于被测电压线路上的电阻器将被测直流电压 U_1 转换成电阻器的电流 I_c ，通过测量电流 I_c 实现直流电压的测量。基于分压原理的直流电压互感器采用电阻、阻容分压等方式实现直流电压的测量。零磁通式直流电流互感器一般采用磁势自平衡原理，二次转换器输出与被测直流电流的幅值成比例的直流电流，通过负载电阻将电流信号转换为电压信号。目前，西门子公司零磁通式直流电流互感器已经应用于我国的直流输电工程。

数字量输出式直流互感器根据其是否需要一次转换器，又可以分为无源式和有源式两种类型。

有源式直流互感器采用电磁感应、分压等原理传感被测信号，在一次转换器完成传感信号的采样，然后利用光纤将数字信号传送到二次转换器及合并单元。有源式直流互感器的一次信号传感输出为低电压信号，经过一次转换器转换成数字光信号，并通过光纤传输至控制室，供直流输电系统测量、保护和控制用。天广直流输电工程中采用了西门子公司有源式直流电流互感器，三峡—常州直流输电工程采用了ABB公司的有源式直流电流传感器。

无源式直流电压互感器采用线性电光效应（Pockels 效应）、逆电压效应或电致伸缩效应感应被测信号，基于 Pockels 效应的直流电压互感器还处于研制阶段。

无源式直流电流互感器多采用 Faraday 磁光效应感应被测信号,传感器部分有块状玻璃和全光纤两种形式。目前,NXCT 型无源直流电流互感器已经应用于 19 个国家的电力系统中,我国锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电工程同里(苏州)换流站和溪洛渡—浙西±800kV 特高压直流输电工程浙西换流站均安装 NXCT-F3 型无源式直流电流互感器。

1.2.2 直流电能表

直流电能表用于电压、电流、功率、正向与反向电能等电量的测量,可用于本地显示,又能与工控设备、计算机连接,组成测控系统,多采用 RS-485 通信接口,采用 MODBUS-RTU 协议。

直流电能表经历了电动式到静止式的发展历程。电动式直流电能表是利用固定线圈产生的磁场使可动载流线圈受力而偏转的机械式指示电能表。由电动式电能表演变而来的机电式直流电能表,将电动式的转盘和计度器利用光电转换器代替,输出为电脉冲,而计量部分不变。此电能表可以视为一种非完全形式的电子式电能表,是一种过渡形态的产品。电动式直流电能表与机电式直流电能表已经逐渐被淘汰。全电子式直流电能表是由直流电流(或代表直流电流的电压)和电压作用于固态电子元件而产生与被测电能成正比的输出量的仪表,也称为静止式直流电能表。早期的静止式直流电能表多采用模拟乘法器,主要有霍尔效应模拟乘法器、时分割乘法器等,后来发展起来的数字乘法器主要采用 A/D 采样计算型乘法器。随着现代电子产业的高速发展,测量电路的集成化、模块化成为发展趋势,计量芯片的推出使得电子式直流电能表的设计变得非常简单,其功能也变得更加多样齐全。计量集成芯片不仅准确度高,而且硬件、软件设计简单,性价比高。基于模拟乘法器原理的计量芯片已经逐渐被淘汰,市面上的静止式直流电能表都采用基于数字乘法器原理的计量芯片。虽然没有针对直流电能表的特定计量芯片,但是很多交流的单相电能计量芯片可用于直流电能表的设计。国内出现多款静止式直流电能表,如湖南威胜集团有限公司生产的直流电能表(PD1056-2N 单相电子式直流多功能电能表、PD1056-2 系列嵌入式直流电力仪表)、深圳市科陆电子科技股份有限公司生产的直流电能表(DJSF719-NZ1/DJSF719-NZ2 单相直流电能表)等。

1.2.3 直流电能计量系统应用

1. 工业大电流电能计量

在工业方面,大功率整流系统是电锌、电铜、电解铝等有色冶炼、氯碱化工等

行业生产过程中的关键设备,系统交直流侧各电参量(电能)、直流大电流和直流效率的实时在线计量技术研究一直受到高度重视,直流电能计量技术是关键技术之一,承担着动态计量、统计分析等重担,为整流系统的能源管理、程控操作等提供相应数据。在工业应用中,对直流计量技术的研究需要考虑以下因素:

(1) 大功率系统通常工作运行在腐蚀性气体较浓、电磁场干扰较强、电气冲击较大的工业环境中,计量仪表很难实现长期可靠运行。

(2) 系统工作在数百兆瓦的大功率状态下,输出直流电流从几万安培到十几万安培,受直流变换器原理、防磁性、安装位置及在线校准等技术局限,很难保证和判断出大直流长期在线准确计量。

(3) 系统整流元件造成交直流系统波形严重畸变,含有丰富的谐波成分,系统还出现功率因数低现象,从而对计量仪表的频响、低功率因数性能要求较高。

(4) 整流系统整流效率测量要求多点交直流信号同步采样/控制、信号/数据远传处理。涉及的环节多,要求高,任一环节都可能导致计量失去准确性。

(5) 传统的能源计量管理和节能意识薄弱,影响了技术发展。

2. 电动汽车电能计量

进入新世纪以来,“节能减排”的理念在全世界范围内不断深入,能耗低、能效高、清洁环保的电动汽车正在大力研发和慢慢地走进人们的日常生活,电动汽车充电技术也成为研究的热点。电动汽车充电站是指为电动汽车充电的站点,与现在的加油站类似。充电站给汽车充电一般分为三种方式:普通充电、快速充电、电池更换。其中快速充电多采用直流方式,作为关键技术之一,直流电能计量系统主要用于计量充电消耗的电能以结算相应费用。电动汽车直流电能计量系统只是电动汽车充电站的一部分,为了实现充电站综合自动化,除了电能计量系统之外,还需要对充电站的供电状况、站内设备运行状态、环境监视及报警等信息进行采集,实现对充电站的监视、控制和管理。因此,充电站最终处理、显示和监测都由充电站监控系统来完成。

3. 高压直流输电系统电能计量

随着电力电子技术的突飞猛进,高压直流输电技术正飞速发展,它在长距离输电、电网互联等方面有独特优点,已作为高压交流输电技术的有力补充而在全世界广泛应用。在高压直流输电系统中,换流站内电能计量系统占据着十分重要的地位,可以完成数据采集、计量管理、运行管理、统计分析、线损管理等多种功能,为电力运营管理部门进行电量计量、电费核算、用电分析、网损线损统计以及在电

力市场情况下制订电量计划、发布实时电价信息提供了系统优化基础数据；同时实现了输电网电能量的自动采集、分析、计费及与其他系统信息交换的功能，为面向商业化运营的电力市场提供准确、可靠、安全的电量数据；使输电企业实现在线监控电网设备（变电站、母线、主变压器、线路）的运行和各种故障信息，为电网运行和管理提供决策依据。

1.3 直流电能计量关键技术

1.3.1 直流电能计量量传体系

直流电能计量装置包括直流互感器和直流电能表等，其可靠性和长期稳定性直接关系到直流电能计量系统的安全稳定运行。为了提高直流互感器和直流电能表的可靠性和长期稳定性，需要从原理、方法、选材、制造工艺及管理上开展研究，同时应对影响产品稳定性、可靠性的各种因素，进行可靠性评估，将产品的可靠性量化，为产品的实用化提供理论及试验依据。

目前，直流电能计量溯源基准装置、直流电能表的量值传递体系及型式评价方法、直流电能计量现场用标准装置，均是亟待深入研究和解决的问题，具体包括：

(1) 建立直流电能计量的量值传递体系。在建立直流电能计量溯源国家基准的基础上，需要考虑在规定的准确度范围内，大量不同准确度等级的直流电能计量装置如何与国家基准保持一致，形成不间断的溯源和量传链路，这就是计量量值传递系统需要完成的任务。量值传递是将计量基准所浮现的单位量值，通过计量检定校准传给下一等级的计量标准，并依次逐级地传递到工作计量器具，以保证被测对象的量值准确一致的过程。为了保证直流计量量值传递过程的合理性和经济性，需要根据直流计量装置的特点，对其按等级进行分类，制定出直流互感器和直流电能表的国家检定规程，编制出直流电压、电流和电能国家量传系统表。

(2) 研究型式评价方法，制定国家型式评价大纲。我国的计量法规定，由制造计量器具的企业或事业单位生产的计量产品，必须依照型式评价大纲对其进行型式评价，方可投入生产。对于静止式直流电能表，需根据静止式直流电能表的特点，研究型式评价方法，制定或完善国家型式评价大纲。

目前，对于电动式直流电能表，已有型式试验的规范化要求，但对于静止式直流电能表，缺乏相应的型式试验评价体系。

(3) 直流电能计量标准装置的研制。为了配合从直流电能溯源国家基准装置向下的量值传递,满足计量部门和相关部门有关电能计量装置检定校准的需求,需要研制相关的标准装置。这些标准装置可分为以下几种。

- 1) 标准功率源:对安装式直流电能表进行检定或校准。
- 2) 标准直流电能表:对直流电能表及直流电能表检定装置进行检定或校准。
- 3) 直流互感器校验装置:对直流互感器进行检定或校准。

1.3.2 直流电能计量装置的检定和校准

直流电能计量装置的检定和校准分为两部分,包括直流互感器的检定和校准、直流电能表的检定和校准。

1. 直流互感器的检定和校准

目前,国外一些生产直流输电设备的公司,如 ABB、西门子等,均建立了直流互感器的企业标准。我国于 2010 年发布了高压直流互感器的国家标准如下:

GB/T 26216.1—2010《高压直流输电系统直流电流测量装置 第1部分:电子式直流电流测量装置》;

GB/T 26216.2—2010《高压直流输电系统直流电流测量装置 第2部分:电磁式直流电流测量装置》;

GB/T 26217—2010《高压直流输电系统直流电压测量装置》。

其他相关企业标准如下:

Q/GDW 111—2004《直流换流站高压直流电气设备交接试验规程》;

Q/GDW 259—2009《±800kV 高压直流输电用传感器通用技术规范》;

Q/CSG 11618—2007《±800kV 直流输电用直流电压测量装置》。

目前,国内由于缺乏相关试验设备,针对直流互感器开展的型式试验、例行试验及现场试验并不十分完善,无法完全满足超高压、特高压直流互感器的试验需求,应加快相关实验室建设和试验设备研制,规范健全直流互感器型式试验、验收试验和定期例行试验体系,促进直流输电系统中直流互感器安全、可靠运行。

2. 直流电能表的检定和校准

对直流电能表的检定类似于交流电能表,由于直流电能表的应用领域相对于交流电能表而言比较狭窄,针对直流电能表开展的检定工作很少。直流电能表的适用场合主要集中于电动汽车充电站的直流充换电设施,以及金属冶炼企业等工业领

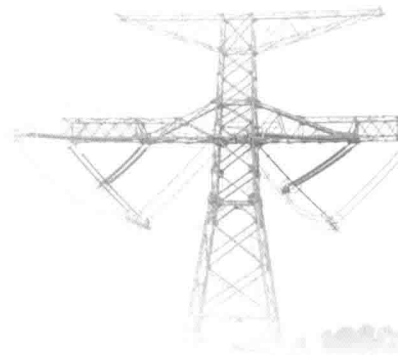
域，分别属于贸易结算和企业内部经济指标考核范畴。随着电动汽车充电站的逐步普及、高能耗企业计量工作的快速推进，以及高压直流输电系统的快速发展，直流电能表的计量性能考核和检定工作受到重视。

根据 JJG 842—1993《直流电能表》要求，新生产、修理后、使用中的直流电能表需要开展检定工作。

直流电能表检定装置与交流电能表检定装置类似，分为标准功率源、标准电能表和校验仪三个部分，标准功率源对标准电能表和被检电能表施加相同的电流、电压，两者同步计量直流电能，由校验仪计算得出校验误差。

第 2 章

直流互感器



2.1 概 述

直流电流互感器主要包括零磁通式直流电流互感器、基于分流器的直流电流互感器以及基于光学传感原理的直流电流互感器等。

直流电压互感器主要包括基于电压/电流转换原理的直流电压互感器、基于 Pockels 效应的直流电压互感器以及基于分压原理的直流电压互感器。

2.2 直流互感器的分类

根据二次输出形式不同，直流互感器可分为模拟量输出式直流互感器和数字量输出式直流互感器。

模拟量输出式直流互感器的一次传感器的输出为电信号，利用电磁感应、分压等原理传感被测信号，信号的传输通过电缆实现。基于电磁感应原理的直流电压互感器通过并联于被测电压线路上的电阻器将被测直流电压 U_1 转换成电阻器的电流 I_C ，通过测量电流 I_C 实现直流电压的测量。基于分压原理的直流电压互感器采用电阻、阻容分压等方式实现直流电压的测量。零磁通式直流电流互感器一般采用磁势自平衡原理，二次转换器输出与被测直流电流的幅值成比例的直流电流，通过负载电阻将电流信号转换为电压信号。

数字量输出式直流互感器根据其是否需要一次转换器，又可以分为无源式和有源式两种类型。无源式直流互感器的传感部分采用光学传感原理，一次传感器不需要一次转换器，传感器的信号直接由光纤传输至二次转换器；而有源式直流互感器的一次传感器输出为电信号，需要一次转换器将其转换成数字信号再经过光纤远传至二次转换器，并且一次转换器需要工作电源。

有源式直流互感器采用电磁感应、分压等原理传感被测信号，在一次转换器完

成传感信号的采样，然后利用光纤将数字信号传送到二次转换器及合并单元。有源式直流互感器的一次信号传感输出为低电压信号，经过一次转换器转换成数字光信号，并通过光纤传输至控制室，供直流输电系统测量、保护和控制用。

无源式直流电压互感器采用线性电光效应（Pockels 效应）、逆电压效应或电致伸缩效应感应被测信号。基于 Pockels 效应的直流电压互感器还处于研制阶段。直流电流互感器多采用 Faraday 磁光效应感应被测信号，传感器部分有块状玻璃和全光纤两种形式。

2.3 直流互感器的性能

针对目前直流输电工程中常用的几种传感原理的直流互感器，下面简要介绍其内部结构和外部结构。

2.3.1 直流电压互感器

目前，直流输电系统中的直流电压互感器多采用分压器原理。图 2-1 是基于阻容分压器原理的直流电压互感器的外观和结构示意图。分压器主体为高压桥臂、低压桥臂和传输电（光）缆。直流分压器的高压桥臂封装在环氧树脂绝缘子内，内充绝缘介质，一般采用 SF_6 作为绝缘介质。低压桥臂输出信号经采样后通过光纤远传，信号传输抗干扰能力强。高压桥臂和低压桥臂具有相同的时间常数，使互感器具有很好的频率特性和暂态特性。

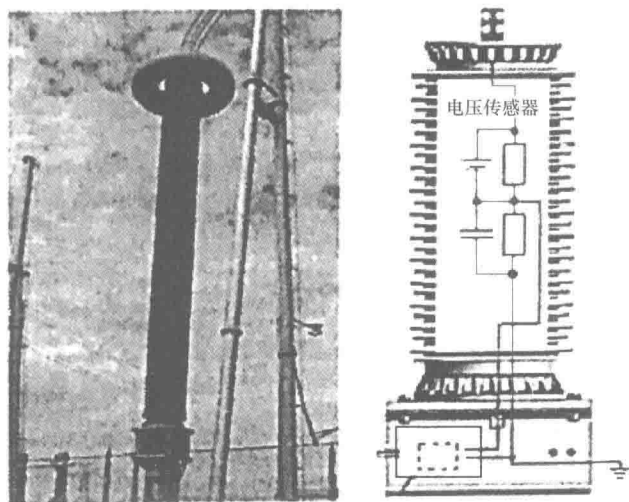


图 2-1 直流分压器外观和结构示意图

2.3.2 直流电流互感器

1. 零磁通式直流电流互感器

目前, 西门子公司的零磁通式直流电流互感器已经应用于我国的直流输电工程中, 如图 2-2 所示。

中国电力科学研究院于 2010 年研制了 50kV 零磁通式直流电流互感器样机, 如图 2-3 所示。样机在额定电流 (3000A) 及持续热电流工作条件下各点测量误差均小于 0.2%, 在 18kA 下测量误差小于 0.3%。此外, 样机具有良好的暂态性能且通过了电磁兼容试验。

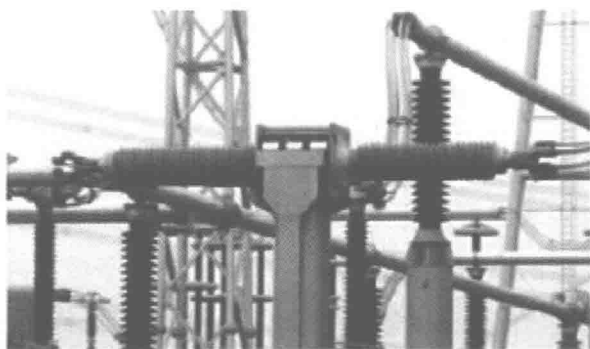


图 2-2 $\pm 800\text{kV}$ 零磁通式直流电流互感器

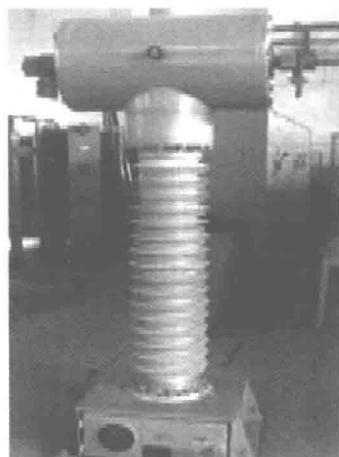


图 2-3 零磁通式直流电流互感器

零磁通式直流电流互感器具有宽测量范围、高准确度、较好的稳定性和动态性能, 但其绝缘结构复杂, 绝缘成本较高。因此, 零磁通式直流电流互感器多用于测量电压等级较低的换流站中性线上的直流电流, 其二次输出信号通常为模拟电流或电压。

2. 有源式直流电流互感器

我国直流输电工程中采用了进口的有源式直流电流互感器。例如, 天广直流输电工程中采用了西门子公司的有源式直流电流互感器, 如图 2-4 所示, 频带范围为 0~5kHz, 测量准确度优于 0.75%。三常直流输电工程采用了 ABB 公司的有源式直流电流传感器, 如图 2-5 所示, 在 10%~134% 额定电流 (3000A) 范围内的测量准确度为 0.5%, 在 134%~300% 额定电流范围内的测量准确度为 1.5%, 在 300%~600% 额定电流范围内的测量准确度为 10%, 阶跃响应最大上升时间为 400 μs , 超调小于 20%。