



交流电能（电功率）
测量综合误差的
测试计算及
改进技术

彭时雄 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



交流电能（电功率） 测量综合误差的 测试计算及 改进技术

彭时雄 著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书全面阐述电力网中电能测量的技术问题,全书共十二章。第一章和第二章介绍电力系统电压互感器实际运行负荷下误差的推算方法和推算公式。第三章介绍电压互感器的现场校验方法和测试技术。第四章介绍电容式电压互感器的原理、误差分析及现场校验测试技术。第五章介绍电流互感器的现场校验方法和测试技术。第六章介绍 500kV 高压线路计量用电流互感器的现场校验测试技术。第七章介绍大电流互感器的现场校验方法和测试技术。第八章介绍电压互感器二次回路压降及其带来电能计量误差的测试方法和计算方法。第九章介绍降低电压互感器二次回路压降及其带来计量误差的技术改进措施。第十章、第十一章和第十二章介绍强功率三相电路交流电能(电功率)和强功率整流系统整流效率测量综合误差的测试、计算、更正技术;电功率(电能)和整流效率在线测量不确定度的分析、计算技术以及减小测量不确定度的技术改进措施。

全书分析正确、计算严谨、方法科学、实用性强,具有较高的学术价值。

本书可供电力、电冶、电化等工业部门及大电力用户从事电磁测量、电能计量、强电在线测试、大型整流设备整流效率精密在线测试、大型汽轮机缸效率及输出电功率精密在线测试、大型电力设备改造后节能降耗效果评价试验的技术人员及工人阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

交流电能电功率测量综合误差的测试计算及改进技术/彭时雄著.

-北京:中国电力出版社,2002

ISBN 7-5083-0893-X

I. 交… II. 彭… III. 电压互感器-测量误差-计算方法
IV. TM451

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 097507 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 3 月第一版 2002 年 3 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 21.75 印张 577 千字
印数 0001—3000 册 定价 44.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

电能计量综合误差过大是电能计量存在的一个关键问题，它直接影响电业发电量、线损、煤耗、厂用电、供电量、用电量等各项电业技术经济指标的正确计算，营业计费的公正合理，影响电业部门和用户的经济效益。随着电力工业向大电网、大电厂、大机组、高电压、高参数、高度自动化的发展及将来全国联网的推进，输送的电力越来越大；随着电力工业的商业化运营，以省为实体，网厂分离，电厂与电网之间、联网线路之间，均要按电量计费结算，这一问题也越来越突出。因此，努力提高电能计量的综合准确水平，是一项刻不容缓的重要任务。

近代强电在线精密测试，对电能（电功率）测量综合准确水平，也提出了越来越高的要求。在电冶、电化工业中，当采用“输入—输出法”进行强功率整流系统整流效率的精密测试时，为保证整流效率在线测量的扩展不确定度不大于 $0.15\% \sim 0.2\%$ ，要求交流电功率（电能）在线测量的扩展不确定度不大于 $0.1\% \sim 0.15\%$ 。在电力工业中，为评价大型汽轮机低压缸通流部分改造后效率提高的效果而进行的缸效率精密测定，要求发电机输出电功率（电能）在线测量的扩展不确定度不大于 $0.1\% \sim 0.2\%$ 。为此，需采取一系列技术改进措施来减小测量不确定度。例如，选用高准确度的整流效率测量仪和功率电能表；采用更正技术，对用以扩展量程的运行中的电流、电压互感器以及电压二次回路压降引起的合成误差进行修正等。鉴于电力系统运行

中的电流、电压互感器，其准确等级不高，一般为0.5级，重要场所最高仅达0.2级；电压二次回路压降引起的计量误差亦往往不可忽视；由于经济特别是安全上的原因，不允许在带电运行的高压强电线路中临时接入需特制加强绝缘的精密级电流、电压互感器，在强电在线精密测试中，只能利用电力系统运行中的电流、电压互感器来扩展量程。因此修正由此引起的合成误差对提高交流电能（电功率）测量的综合准确度就极为关键。

本书的主题是高电压、强功率三相电力系统交流电能（电功率）测量综合误差的测试、计算及改进技术，是作者多年来从事这项技术研究的一个总结。

本书中心内容包括：

(1) 电力系统电压互感器实际运行负荷下误差的推算方法。分两章介绍了独创研究出的推算双绕组电压互感器和具有多个二次绕组的高压互感器实际运行负荷下误差的方法和推算公式，这一推算方法解决了不同电压等级包括高压、超高压、大容量电力系统实际工况下无法进行互感器误差测试的难题。

(2) 电压互感器现场校验测试技术。分两章介绍了电力系统各种接线方式电磁式和电容式电压互感器实际二次负荷下误差的正确现场校验方法和测试线路。鉴于常规校验方法测得的往往不是电压互感器实际二次负荷下的误差，同时存在需用设备多、劳动强度大等缺点，为此特地研究出“简化的三相校验法”、“单相校验推算法”、“电磁式电压互感器‘低校高’的间接测量法”等现场校验新方法，克服了上述缺点，解决了现场校验的难题。

(3) 电流互感器现场校验测试技术。分三章介绍了电力系统各种接线方式电流互感器、500kV高压线路计量用电流互感器、大电流互感器实际二次负荷下误差的正确现场校验方法和测试线路。研究出“简化的三相校验法”、“特殊接线的单相校验法”、“用负荷箱模拟实际二次负荷的单相校验法”、“用仿真电流负荷箱模拟实际二次负荷的单相校验法”、“用特殊接线及仿真电流负荷箱模拟实际二次负荷的单相校验法”5种现场校验测试的新方

法和新线路，消除了常规单相校验线路中由于二次负荷与三相实际运行时不同所引起的误差。研究出的“采用特殊接线模拟实际二次负荷的单相逐台校验法”，克服了 500kV 高压线路计量用电流互感器（一次设备采用一台半断路器的接线方式，每相配置有两台套管式电流互感器，按并联方式运行）现场校验的困难。为克服大电流互感器现场校验的难题，介绍了“利用发电机为电源，现场校验发电机出口大电流互感器的方法”、“等安匝校验法”、“安装特制的双级大电流互感器，通二次电流测定其误差的方法”，此外还研究出“通小电流测定大电流互感器误差的间接测量法”。此种通小电流检定法的优点是简便易行，与常规通大电流的比较法相比，可节省昂贵与笨重的大电流比例标准和升流设备，节省人力，减轻劳动强度，且易于实现现场检定。

（4）电压互感器二次回路压降误差的测试技术。研究出基于测差原理的互感器校验仪法、零位误差修正技术、消除电容误差影响的屏蔽技术，有效地解决了电压互感器二次回路压降及其引起的比差、角差、计量误差的准确测试计算。

（5）降低电压互感器二次回路压降带来电能计量误差的改进技术。推导出各种常见接线方式和负荷情况下电压互感器二次回路压降及由它带来的计量误差与回路参数间的关系及其计算方法和计算公式、电压互感器二次回路电缆线的容许电阻值及所需截面，可供电力设计部门设计计算电压互感器二次回路时参考之用。介绍了 7 种降低电压互感器二次回路压降引起电能计量误差的技术措施和改进方法，包括：对重要电能表装设专用的电压互感器二次回路；加粗电压互感器二次导线截面、减小接点接触电阻；双母线供电情况下，尽可能缩短 b 相公共电缆的长度；将电能表调快 $-\epsilon_r\%$ ，以抵消二次回路压降所引的负误差 $\epsilon_r\%$ ；将电能表安装在靠近电压互感器的开关室；利用多功能电能表的软件修正功能，对电能计量装置综合误差实时动态自动补偿；采用电压误差补偿器来补偿电压二次回路压降引起的比差和角差。这些技术改进措施，简便易行，具有实用价值。

(6) 研究出对不平衡对称和平衡对称电力系统普遍适用的“强功率三相电力系统交流电能（电功率）测量综合误差通用测试、计算、更正的新方法、新公式和在线测量扩展不确定度通用计算方法”以及减小测量不确定度的技术改进措施，克服了一般计算方法仅适用于平衡对称电路的局限性，提高了计算和更正的准确度，具有通用性和可操作性。

(7) 研究出强功率整流系统整流效率测量综合误差的计算方法、计算公式和更正技术；整流效率在线测量扩展不确定度的分析、计算方法和计算公式以及减小测量扩展不确定度的技术改进措施。借助研究出的测量综合误差的测试计算和修正方法，对已测定的系统误差进行修正，有效地降低了在线测量的不确定度，解决了强电在线测试的关键技术问题，使高电压强功率三相电路交流电功率（电能）在线测量扩展不确定度不大于 $0.1\% \sim 0.15\%$ （包含因子 $K=2$ ）；强功率整流系统整流效率在线精密测试的扩展不确定度不大于 $0.15\% \sim 0.2\%$ （包含因子 $K=2$ ），上述技术指标具有国际先进水平。

“交流电能（电功率）测量综合误差改进技术”是国家技术监督局组织研究开发的国家重大计量科技研究项目、八五国家科技成果重点推广项目、九五国家重点推广节能科技成果——“强功率交直流电能在线综合测试技术”的重点内容之一。20 世纪 90 年代以来该技术已在全国大型铝厂、冶炼厂、化工厂、发电厂等 26 个大中型企业推广应用，取得显著经济效益和社会效益，并已被纳入 GB/T 18293—2001《电力整流设备运行效率的在线测量》之中。经技术鉴定，该成果具有国际先进水平，多项技术均属国内外首创。“强功率交、直流电能在线综合测试技术（推广类）”获 1999 年国家科学技术进步奖二等奖和国家技术监督局 1996 年计量科技进步奖一等奖；而“交流电能（电功率）测量综合误差改进技术”获电力部 1995 年科技进步奖二等奖。这本专著将反映我国在强电在线测试技术方面取得的重大成果，反映我国在提高电能综合计量准确水平方面取得的重大成就。

本书在内容的安排上，本着先易后难、先简后繁的原则，实用的内容在前，理论分析及公式推导在后，并每讨论完一种测试计算方法都举例说明其实际应用。

由于水平所限，书中难免存在缺点甚至错误，欢迎读者批评指正。

作 者

2001.6

目 录

前言

第一章

电力系统双绕组电压互感器实际运行负荷下误差的推算方法

1

第一节	概述	1
第二节	根据任意两种负荷下电压互感器的误差，推算实际运行负荷下误差的通用计算公式	3
第三节	几种常见测试负荷下的简便推算公式	8
第四节	根据相电压误差推算线电压误差	11
第五节	推算法的误差分析	15
第六节	推算法应用举例	16

第二章

具有多个二次绕组的高压电压互感器实际运行负荷下误差的推算方法

26

第一节	概述	26
第二节	具有三个二次绕组的电压互感器实际运行负荷下主二次误差的推算方法和通用计算公式	27
第三节	推算法通用计算公式的推导	29

第四节	具有三个二次绕组的电压互感器在几种常见测试 负荷下误差的简便推算公式·····	35
第五节	具有四个二次绕组的电压互感器实际运行负荷下 主二次误差的推算方法和通用计算公式·····	38
第六节	具有四个二次绕组的电压互感器在几种常见测试 负荷下误差的简便推算公式·····	45
第七节	推算法的误差分析·····	50
第八节	推算法应用举例·····	52

第三章

电压互感器现场校验测试技术

62

第一节	概述·····	63
第二节	三相电路中电压互感器的接线方式·····	66
第三节	电压互感器实际二次负荷导纳的测量与计算·····	72
第四节	电压互感器现场校验方法的选择·····	79
第五节	常规单相校验法·····	82
第六节	三相校验法·····	87
第七节	简化的三相校验法·····	99
第八节	单相校验推算法·····	105
第九节	用仿真电压负荷箱模拟实际二次负荷的单相校验法·····	120
第十节	“低校高”的间接测量法·····	122
第十一节	电压互感器合成误差的计算方法·····	146

第四章

电容式电压互感器误差分析及现场校验测试技术

150

第一节	概述·····	150
第二节	原理简介·····	151
第三节	等值电路·····	155
第四节	误差计算公式·····	157
第五节	误差分析和特性改进·····	159

第六节	现场校验测试技术	164
第七节	电容式互感器出现误差偏大的原因分析	217

第五章

电流互感器现场校验测试技术

222

第一节	概述	222
第二节	三相电路中电流互感器的接线方式	227
第三节	电流互感器二次负荷的计算及模拟实际二次负荷的方法	229
第四节	电流互感器现场校验方法的选择	246
第五节	常规的单相校验法	247
第六节	三相校验法	250
第七节	简化的三相校验法	254
第八节	特殊接线的单相校验法	258
第九节	用负荷箱模拟实际二次负荷的单相校验法	263
第十节	用仿真电流负荷箱模拟实际二次负荷的单相校验法	272
第十一节	用特殊接线及仿真电流负荷箱模拟实际二次负荷的单相校验法	275
第十二节	电流互感器合成误差的计算方法	282

第六章

500kV高压线路电能计量用电流互感器的现场校验测试技术

284

第一节	引言	284
第二节	500kV丰沙线计量用电流互感器的接线方式和技术参数	284
第三节	并联运行电流互感器的误差分析	286
第四节	校验测试方案的选择	289
第五节	采用特殊接线模拟实际二次负荷的单相逐台校验法	291

第七章

大电流互感器现场校验测试技术

293

第一节	引言	293
第二节	利用发电机为电源,对发电机出口大电流互感器 进行现场校验	294
第三节	采用等安匝法校验大电流互感器	298
第四节	安装特制的埋设有等安匝试验绕组、便于用等安 匝法在降低的一次电流下校验的大电流互感器	300
第五节	安装特制的采用双级补偿原理和磁屏蔽结构、允 许从二次侧通小电流测定误差的新型双级大电流 互感器	301
第六节	采用间接测量法校验大电流互感器	311
第七节	590C 电流互感器校验仪	334
第八节	通小电流检定大电流互感器的新方法	336
第九节	采用电容补偿,以降低调压器所需容量;采用组合 式升流器,使之便于搬运	340

第八章

电压互感器二次回路压降误差的测试技术

343

第一节	概述	343
第二节	对测试计算方法的要求	345
第三节	几种测试计算方法的优缺点比较	347
第四节	提高测量准确度的方法	349
第五节	互感器校验仪法(或电压互感器二次回路压降 校验仪法)	351
第六节	小量限高内阻电压表法	378
第七节	关于电压互感器二次回路电压降测试中出现正值 比差的原因分析	385

第九章

降低电压互感器二次回路电压降带来 电能计量误差的改进技术

389

- 第一节 电压互感器二次回路电压降及其引起的比差、角差、电能计量误差与回路参数间的关系 389
- 第二节 电压互感器二次回路电缆线的容许电阻值及所需截面 408
- 第三节 降低电压互感器二次回路电压降带来计量误差的方法 418
- 第四节 对重要电能表装设专用的电压互感器二次回路 418
- 第五节 加粗电压互感器二次导线截面、减小接点接触电阻 431
- 第六节 双母线供电情况下, 尽可能缩短 b 相公共电缆线的长度 432
- 第七节 将电能表调快 $-\epsilon_r\%$, 以抵消二次回路电压降所引起的负误差 $\epsilon_r\%$ 433
- 第八节 将电能表安装在靠近电压互感器的开关室 433
- 第九节 利用多功能电能表的软件修正功能, 对电能计量装置综合误差实时动态自动补偿 434
- 第十节 采用电压误差补偿器来补偿电压二次回路电压降引起的比差和角差 441

第十章

强功率三相三线电路交流电能(电功率) 测量综合误差的测试、计算、更正技术及电功率(电能) 在线测量不确定度的分析和计算技术

466

- 第一节 概述 466
- 第二节 不平衡对称三相三线电路交流电功率(电能)测量综合误差的测试、计算和更正技术 467
- 第三节 平衡对称三相三线电路交流电功率(电能)测量综合误差的测试、计算和更正技术 479
- 第四节 不平衡对称三相三线电路交流电功率(电能)在线测量不确定度的分析和计算技术 494

第五节	平衡对称三相三线电路交流电功率(电能)在线测量不确定度的分析和计算技术	508
第六节	减小测量不确定度的技术改进措施	523
第七节	应用举例	525

第十一章

强功率三相四线电路交流电能(电功率)测量综合误差的测试、计算、更正技术及电功率(电能)在线测量不确定度的分析和计算技术

540

第一节	不平衡对称三相四线电路电功率(电能)测量综合误差的计算和更正技术	541
第二节	平衡对称三相四线电路电功率(电能)测量综合误差的计算和更正技术	553
第三节	不平衡对称三相四线电路电功率(电能)在线测量不确定度的分析和计算技术	559
第四节	平衡对称三相四线电路交流电功率(电能)在线测量不确定度的分析与计算	569
第五节	应用举例	575

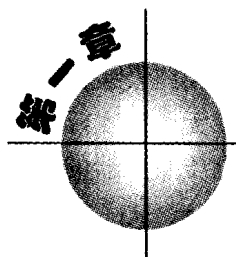
第十二章

强功率整流系统整流效率在线测量综合误差及不确定度的分析和计算技术

581

第一节	概述	581
第二节	直流功率电能测量综合误差的计算	582
第三节	交流功率电能测量综合误差的计算	585
第四节	整流效率测量综合误差的计算	591
第五节	整流效率测量综合误差的更正	605
第六节	交流侧为三相三线接线方式情况下整流效率在线测量不确定度的分析和计算	608
第七节	交流侧为三相四线接线方式情况下整流效率在线	

测量不确定度的分析和计算	624
第八节 减小测量不确定度的技术措施	636
第九节 应用举例	638
附录 A 电压互感器二次回路电压降及其引起的比差、角差、 电能计量误差与回路参数间关系式的推导	656
附录 B 利用对称分量法分析三相电压不对称度对采用变压器 移相式角差补偿线路的压降补偿器准确度的影响	670
参考文献	681



电力系统双绕组电压互感器 实际运行负荷下误差的 推算方法

电力系统运行中电压互感器的现场校验，是在母线停电的情况下，带实际二次负荷进行校验。但有时由于用户不能停电或无法带实际二次负荷进行校验，从而无法得出实际运行条件下电压互感器的误差值。为解决这一难题，特地研究出一种简便的推算电力系统运行中双绕组电压互感器实际二次负荷下误差的方法。借助于这一推算方法，只需测出电压互感器任意两种负荷下（当不能停电时，则根据制造厂家给出的或安装前测出的任意两种负荷下）的误差值，并在电压互感器接入电网实际运行的条件下，用相位伏安表测出其实际二次电流值及其相位，即可用推算公式计算得出电压互感器实际运行负荷下的误差值。这一测试推算方法新颖实用，简便易行，具有较强的可操作性和广泛的适应性，解决了不同电压等级包括高压、超高压、大容量电力系统实际工况下无法进行互感器误差测试的难题。

第一节 概 述

若已测出某单相电压互感器（或三相电压互感器某相）在任意两种负荷下的误差，则其在实际运行负荷下的误差，可用推算

公式计算得出。这种推算实际负荷下误差的方法，称为推算法。它对各种单相和三相电压互感器均是适用的。

采用推算法，具有下述优点：

(1) 在双母线供电的情况下，当一路母线停电进行该路电压互感器现场校验时，由于该路电压互感器的二次回路及表计已倒接到另一路运行着的母线电压互感器的二次上，无法带实际二次负荷进行校验，从而无法得出实际运行条件下电压互感器的误差值，采用推算法则可解决这一难题。

(2) 对由三台单相电压互感器按 YN, y 接线组成的互感器组或由两台单相电压互感器按 V, v 接线组成的互感器组以及三相五柱式电压互感器，均可采用单相校验法（即通单相电源的方法）测出电压互感器各相（或各相电压互感器）在任意两种负荷下的误差，并用相位伏安表测出三相实际运行条件下电压互感器二次电流值及其相位，即可利用推算公式计算得出三相使用状况下的误差。与三相校验法相比，单相校验法的优点是：出差携带的设备较少（三相法需三台自耦调压器及三台升压器；单相法则只需一台自耦调压器及一台升压器。当校验由两台或三台单相电压互感器组成的互感器组时，可用被校电压互感器做升压器，则只需一台自耦调压器），只需单相电源（有的农村用户，停电检修时无三相电源）。

(3) 对于基建新装的电压互感器，只需安装前在试验室内测出被校电压互感器在任意两种负荷（额定负荷及 $1/4$ 额定负荷或空载及某负荷）下的误差，并在安装后用相位伏安表测出现场实际运行条件下电压互感器各相二次电流的大小及其与该相电压之间的相角，即可计算得出现场三相实际运行状况下的误差。因而无需携带笨重的仪器设备到现场进行校验，省去了繁重的体力劳动。

(4) 互感器因无停电机会无法进行现场校验，而该互感器在安装前或大修后在试验室内已作相应的误差试验，均可用推算法算出现场三相实际运行状况下互感器的误差。