



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电力系统继电保护 测试技术

王大鹏 主 编
吴璟岚 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等学校规划教材

Textbook Series of 21st Century

TM77

27

2006

电力系统继电保护 测试技术

主 编 王大鹏
副主编 吴璟岚
编 写 王艳丽 李 磊
主 审 陈立新



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书共分九章，主要内容有电磁型继电器的检验方法，各种保护测试的通用方法，微机保护测试仪的相关知识，线路保护、变压器保护、发电机保护以及母线保护的原理与测试方法。本书内容覆盖了电磁式继电器和微机保护装置两个方面，对于单个继电器和微机保护装置在介绍保护原理的同时对具体测试方法也进行了介绍。

本书可作为高等院校电力系统及其自动化专业的专业课教材，还可作为高职高专院校相关专业的教材，以及继电保护工作人员参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统继电保护测试技术/王大鹏主编. —北京:
中国电力出版社, 2006
21 世纪高等学校规划教材
ISBN 7 - 5083 - 4631 - 9

I. 电... II. 王... III. 电力系统—继电保护—测试技术—高等学校—教材 IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 093002 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)
北京市同江印刷厂印刷
各地新华书店经售

2006 年 9 月第一版 2006 年 9 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 320 千字
印数 0001—3000 册 定价 23.00 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

本书是针对继电保护装置的测试检验编写的。在简要介绍微机线路保护、变压器保护、发电机保护和母线保护原理的基础上,根据目前电力系统中广泛应用的微机保护装置,着重介绍继电器和各种微机保护装置的测试方法,是一本将理论与实践相结合的书。

本书共分九章:第一章,绪论;第二章,继电器校验通则;第三章,继电保护实验仪器及设备;第四章,常规继电器的检验;第五章,通用试验方法;第六章,微机型线路保护原理与调试;第七章,微机变压器保护的原理与测试;第八章,微机发电机保护的原理与测试;第九章,微机母线保护的原理与测试。

本教材前四章重点介绍了电磁型继电器的检验方法;第五章介绍了各种保护测试的通用方法以及现在所使用的微机保护测试仪的相关知识;第六章介绍了线路保护的原理与测试,针对目前电力系统广泛采用的微机线路保护装置,从装置特点、软件和硬件的组成、保护的原理与逻辑、整定说明以及测试方法等各方面进行了介绍;第七章重点介绍了变压器差动保护的的特殊性及在测试时应注意的问题;第八章重点突出发电机的定子接地保护、失磁保护、失步保护的测试方法。第九章介绍了母线保护的测试方法。

本教材第一章至第四章由福建电力职业技术学院吴璟岚编写,第六章由郑州电力高等专科学校王艳丽编写,第七章由山东电力研究院李磊编写,第五、八、九章由山东电力高等专科学校王大鹏编写并统稿。

本教材由山东电力高等专科学校陈立新主审,并提出许多宝贵意见,谨致谢意。

本教材在编写过程中得到了国电南自凌伊公司华伟的大力支持,山东电力研究院电气所刘延华、战杰及各位同事的帮助,在此一并表示感谢。

限于编者的经验与水平,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2006年6月

目 录

前言	
第一章 绪论	1
第二章 继电器检验通则	3
第一节 检验的种类、周期及目的	3
第二节 继电保护准确度和精密度的表示方法	4
第三节 试验电源及对其要求	6
第四节 畸变系数、纹波系数及其测量	9
第三章 继电保护实验仪器及设备	12
第一节 电秒表	12
第二节 工频移相设备	14
第三节 相位表	16
第四节 数字万用表	21
第四章 常规继电器的检验	27
第一节 继电器的一般性检验及基本试验方法	27
第二节 电流继电器检验	31
第三节 电压继电器检验	36
第四节 时间继电器	38
第五节 中间继电器	42
第六节 BCH-2型差动继电器检验	46
第七节 LCD-4型差动继电器检验	54
第八节 LZ-21型阻抗继电器	58
第五章 通用测试方法	66
第一节 继电保护测试装置的发展	66
第二节 微机继电保护装置的一般测试方法	69
第三节 微机保护装置通用校验项目	75
第六章 微机型线路保护原理与调试	79
第一节 概述	79
第二节 微机型线路保护原理及逻辑	82
第三节 微机型线路保护装置的硬件结构及外部接线说明	96

第四节	微机型线路保护装置的整定值及其说明	107
第五节	微机型线路保护装置的检验	113
第七章	微机变压器保护的原理与测试	130
第一节	概述	130
第二节	变压器差动保护的原理	132
第三节	常用变压器差动保护的手动测试方案	138
第四节	常用变压器差动保护的自动测试方案	146
第五节	变压器的气体保护	157
第六节	变压器过激磁保护的测试	159
第七节	变压器的间隙电流、电压保护的测试	160
第八章	微机发电机保护的原理与测试	161
第一节	发电机保护概述	161
第二节	发电机差动保护的原理及测试	165
第三节	发电机定子接地保护的原理与测试	168
第四节	发电机失磁保护的原理与测试	173
第五节	发电机匝间短路保护的原理与测试	180
第六节	发电机失步保护的原理与测试	182
第七节	发电机负序电流保护的原理与测试	186
第八节	发电机逆功率保护的原理与测试	187
第九节	转子接地保护的原理与测试	188
第九章	微机母线保护的原理与测试	193
第一节	概述	193
第二节	母线差动保护的原理及测试	194
第三节	母联其他保护的原理与测试	197
第四节	断路器失灵保护	200
附录		203
参考文献		205

第一章 绪 论

一、继电保护测试技术的作用和内容

继电保护是保证电力系统安全可靠运行的主要措施之一，被誉为电力系统的“哨兵”，继电保护装置的正确工作是极其重要的。但要判断继电保护装置在运行中的工作状态却十分困难，因为长期安装在电力系统内的继电保护装置经受故障考验的机会是很少的，并且多数继电保护装置在运行中是不能检测的。因此，为了保证继电保护装置的正确工作，在研制、生产、安装验收、定值整定、定期和补充检验的各个阶段，都需要十分认真地对继电器和保护装置进行各种试验。

要进行试验，就离不开测量。虽然继电保护的存在和发展已有近百年的历史，但其试验和测量在较长的一段时间内，仍使用常规的机电型仪表和经典的电气测量方法。随着超高压电网的建立、大机组的投运、继电保护技术的发展、电子技术和计算机技术的运用，近年来继电保护的试验和测量方法也有了飞速发展，且已经形成了有别于经典电气测量的新的分支领域——继电保护测试技术。

继电保护测试技术包括继电保护试验及其特性参数测量的原理、方法和专用仪器仪表的使用，主要有以下几种。

- 1) 测量误差理论和测量数据处理；
- 2) 试验电源和测试信号；
- 3) 试验波形的记忆、录取、保存和判读；
- 4) 继电保护基本特性量测量原理；
- 5) 继电保护试验方法；
- 6) 电力系统的物理模拟和数字仿真；
- 7) 继电保护专用测试仪器和设备；
- 8) 继电保护在线试验、自动检测和故障诊断；
- 9) 继电保护计算机辅助试验（CAT）技术；
- 10) 继电保护试验标准的应用等。

合理的测试能保证继电保护正确工作。如果试验接线或试验步骤不对，或者模拟量取得不正确，或者仪表选型不当，或者影响因素考虑不周，都会使测试数据产生不应有的误差，甚至得出不正确的试验结果，从而导致继电保护装置投运后的误动或拒动，其后果是极其严重的。显然，掌握测试技术是从事继电保护工作的工程技术人员所不可缺少的。

近年来，我国继电保护测试技术发展相当迅速，颁布了新的国家标准、行业标准和检验规程，对继电保护准确度术语作了严格定义，对准确度作了统一要求，对继电保护试验的内容、方法和基准条件作了明确的规定；引进、研制并生产出多种继电保护专用的试验设备，如移动式静模试验车、新型高频电流表、智能毫秒计等，新型微机继电保护测试仪也已经问世。在国外，继电保护测试中不但广泛采用记忆示波器、数字存储示波器、逻辑示波器、频谱分析仪等电子仪器，而且研制并应用矢量示波器、可编程电源、微型继电保护试验系

统、继电器自动测试仪等继电保护专用设备。此外，国际电工委员会（IEC）还专门制定了各种试验标准。随着电力系统的发展、其他学科（如电子技术、微机技术等）的渗透、国际先进技术的引进和广大工程技术人员的研究开发，我国的继电保护测试技术必将有更进一步的发展。

二、本课程的任务

本课程是电力系统继电保护专业的一门专业课，其主要任务是：通过本课程的学习，使学生明确测试技术对继电保护正确工作的重要意义；比较系统地掌握专业测试原理；了解常用测量仪表、专用仪器和设备的构造、工作原理及使用方法和注意事项；掌握电力系统参数、继电器特性量、继电保护特性和有关参数的测量方法；在掌握继电保护基本原理的基础上，能够对各种继电保护装置进行测试。掌握波形记录、信号调节和系统模拟的技能；具备一定的测量误差分析和测量数据处理能力；能够快速适应继电保护工作岗位，胜任继电保护工作。对新技术在继电保护测试领域中的应用有一定的了解，为今后的工作和学习打下一定的基础。

如前所述，继电保护测试技术的内容广泛、繁多，并且发展很快。因此本课程不可能涉及继电保护测试技术的全部内容。凡是在“电工基础”、“电子技术基础”、“电力系统继电保护原理”等课程的实验课中已经学习过的电工测量原理、电工电子仪表和电力参数测量方法，除个别外，本课程不再重复。至于科研部门及制造厂家为新型继电器和保护装置的研制与定型所需的专门测试技术，例如机械、热、声、磁场参数测量、抗干扰试验、振动冲击试验、寿命试验和人工短路试验等，已超出教学大纲的要求，本课程未予考虑。

第二章 继电器检验通则

第一节 检验的种类、周期及目的

一、检验种类

通常，继电保护装置的检验分为以下三种。

1. 新安装装置的验收检验

新安装装置的验收检验，在下列情况下进行：

- (1) 当新安装的一次设备投入运行时；
- (2) 当在现有的一次设备上投入新安装的装置时。

2. 运行中装置的定期检验（简称定期检验）

运行中装置的定期检验又分为全部检验、部分检验、用装置进行断路器跳合闸试验三种。

3. 运行中装置的补充检验（简称补充检验）

运行中装置的补充检验又分为以下五种。

- (1) 对运行中的装置进行较大的更改或增设新的回路后的检验；
- (2) 检修或者更换一次设备后的检验；
- (3) 运行中发现异常情况后的检验；
- (4) 事故后检验；
- (5) 已投运行的装置停电一年以上，再次投入运行时的检验。

二、定期检验周期

1. 线路保护

(1) 新投入运行的保护运行后第一年内必须进行一次全部检验，并应按照新安装装置的检验项目进行。

(2) 微机型线路保护每 6 年进行一次全部检验，每 2~3 年进行一次部分检验。每年随一次设备检修用 80% 的额定直流电压做一次用装置进行实际断路器的跳合闸试验（若当年一次设备不检修，可不做此跳合闸试验）。

2. 发电机（包括调相机）保护、变压器保护、母线保护及失灵保护

(1) 新投入运行的保护运行后第一年内必须进行一次全部检验，并应按照新安装装置的检验项目进行。

(2) 每 4 年进行一次全部检验，每年进行一次部分检验。

三、检验目的

1. 进行新投检验的目的

(1) 检查新安装的继电保护装置的产品质量是否符合厂家技术说明书的要求，为此进行必要的检查性试验与测定；

(2) 检查新安装的继电保护装置是否按照继电保护管理部门的规定定值进行整定；

(3) 检查整个二次回路的接线与电压互感器、电流互感器二次与继电保护装置的相对极

性关系是否正确。

2. 进行定期检验的目的

- (1) 检查保护装置是否一直处于完好, 可以可靠地执行任务的状态;
- (2) 检查原来整定的定值是否有所变化。

因而, 进行定期例行检验, 原则上只需要有针对性地安排少量测试项目, 重要之点在于与前一次的检测结果进行比较。有比较就容易作出演变情况的正确判断。

3. 补充检验

对于继电保护装置发生异常或事故后的补充检验工作来讲, 则需要具备一定的现场运行和试验工作经验, 最重要的是做好检验前的研究分析和制订出细致的试验方案。

第二节 继电保护准确度和精密度的表示方法

一、测量误差的表示方法

在测量中, 被测量本身所具有的真实大小称为该量的真值。在一定的时空条件下, 被测量的真值是一个客观存在的确定数值。但在测量中, 由于各种原因, 使测量结果仅是近似值, 与真值并不一致。这种测量结果对被测量真值的偏差称为测量误差。

测量误差按表示方法来分, 通常分为绝对误差和相对误差两种。

(一) 绝对误差

绝对误差是被测量的测得值与真值之间的差值。设被测量的测得值为 X , 真值为 X_0 , 则绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = X - X_0 \quad (2-1)$$

在大多数情况下, 由于测量中存在不可避免的误差, 要确切地说出真值的大小是很困难的。准确度高的仪器比准确度低的仪器测得的值更接近于真值, 因此在一般测量中, 通常用高一级以上的标准仪器测得的值代替真值。为区别起见, 把这种由高一级以上的标准仪器测得的非常接近真值而且能够代替真值的数值称为被测量的实际值。实际值用 A 表示, 则绝对误差可表示为

$$\Delta x = X - A \quad (2-2)$$

绝对误差是具有量纲的量, 其单位与测量值相同。绝对误差是有符号的量: 如测量值比实际值大, 绝对误差符号为正, 反之为负; 如只知测量误差的范围而不知是偏大还是偏小, 则可用符号“ \pm ”表示。

在实际测量中, 还常用到修正值这一概念, 它与绝对误差大小相等、符号相反, 用 C 表示

$$C = -\Delta x = A - X \quad (2-3)$$

在高准确度级仪器的出厂检定单上, 常给出对应于不同测量值的修正值或修正曲线。由式(2-3)移项可得

$$A = X + C \quad (2-4)$$

式(2-4)说明, 含有误差的测得值 X 加上修正值 C 后, 就可求出被测量的实际值 A 。这是经常采用的一种减小误差影响的方法。

绝对误差可以说明测得值偏离实际值的程度, 但不能很好地反映测量的准确程度。例如

测量两个频率，其中一个为工频， $f_1 = 50\text{Hz}$ ，其测量绝对误差 $\Delta f_1 = \pm 1\text{Hz}$ ， Δf_1 为 f_1 的 2%，显然此误差太大而不能允许；另一个频率， $f_2 = 10000\text{Hz}$ ，测量绝对误差 $\Delta f_2 = \pm 10\text{Hz}$ ， Δf_2 为 f_2 的 0.1%。由上可见，尽管 Δf_1 小于 Δf_2 ，却不能由此而得出对 f_1 的测量较对 f_2 的测量准确度高的结论。应该将绝对误差与被测量示值并列在一起，才能看出测量的准确程度。例如，测量工频得 $50 \pm 1\text{Hz}$ ，表明测量误差较大，测量频率得 $(10000 \pm 10)\text{Hz}$ ，表明测量误差较小。

(二) 相对误差

相对误差有相对真误差、示值相对误差两种。

1. 相对真误差

测量的绝对误差与被测量的真值的百分比，称为相对真误差，简称相对误差，记为

$$\gamma = \frac{\Delta x}{X_0} \times 100\% \quad (2-5)$$

例如前例中，对 f_1 的测量相对误差为 2%，而对 f_2 的测量相对误差为 0.1%。可见，用相对误差可以恰当地表征测量的准确程度。相对误差是一个只有大小和符号而没有量纲的量。

2. 示值相对误差

在一般的工程测量中，式 (2-5) 中的真值 X_0 也可以用测得值 X 代替，这时的相对误差称为示值相对误差，记为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{X} \times 100\% \quad (2-6)$$

由于测得值 X 中也含有误差，所以示值相对误差 γ_x 只适用于误差较小，要求不太严格的场合，用作近似计算。

二、继电器准确度的表示方法

在国家标准《电工名词术语 继电器及继电保护装置》中规定，对量度继电器和定时限继电器的准确度用下列术语来表示。

(一) 绝对误差

继电器特性量或时间量的实测值与它的整定值的代数差，即

$$\Delta x = X - X_0 \quad (2-7)$$

式中 X ——继电器特性量或时间量的实测值；

X_0 ——继电器特性量或时间量的整定值。

式 (2-7) 与式 (2-1) 完全相同，但意义并不完全一样。在一般测量中， Δx 通常表示测得值比实际值（或真值）大还是小多少，即 Δx 的符号是以实际值（或真值）为参考来讨论测大了还是测小了。若测大了，则 Δx 为正值。例如，某电压的实际值 U 为 5V，测得值 U_x 为 5.1V，则 ΔU 为 +0.1V，而对继电器来说， Δx 表示调试过程中继电器特性量的实测值比整定值是偏高了还是偏低了，即 Δx 的符号是以整定值为参考来讨论的。若偏高，则 Δx 为正。例如，电压继电器整定值为 $U_{\text{set}} = 60\text{V}$ ，实测动作电压 $U_{\text{op}} = 58\text{V}$ ，则 $\Delta U = -2\text{V}$ 。

(二) 相对误差

绝对误差与整定值之百分比，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \quad (2-8)$$

(三) 平均误差

在相同规定条件下,对同一继电器所进行的规定测量中,每次测量所得误差值(绝对误差、相对误差)的代数和的平均值。

(四) 刻度准确度

刻度准确度是指继电器刻度值与实测值之间的误差,其表示方法有绝对刻度准确度和相对刻度准确度两种,分别表示如下

$$\text{绝对刻度准确度} = \text{最大(或最小)实测值} - \text{整定刻度值} \quad (2-9)$$

$$\text{相对刻度准确度} = \frac{\text{最大(或最小)实测值} - \text{整定刻度值}}{\text{整定刻度值}} \quad (2-10)$$

三、继电器动作值测量精密度的表示方法

在继电器动作值的测量中,通常采用变差和离散度来说明测试数据的精密度。

(一) 动作值的变差

n 次试验中动作值的最大值与最小值之差称为动作值的变差,其表示方法有绝对变差和相对变差两种。绝对变差 v_{Δ} 为

$$v_{\Delta} = X_{\text{op. max}} - X_{\text{op. min}} \quad (2-11)$$

式中 $X_{\text{op. max}}$ —— n 次试验中动作值的最大值;

$X_{\text{op. min}}$ —— n 次试验中动作值的最小值。

相对变差 v_r 为

$$v_r = \frac{X_{\text{op. max}} - X_{\text{op. min}}}{\bar{x}} \quad (2-12)$$

式中 \bar{x} —— n 次试验中动作值的平均值。

(二) 动作值的离散度

n 次试验中与平均值之差最大的动作值减去 n 次动作值的平均值,再与 n 次动作值的平均值之比称为动作值的离散度 D ,记为

$$D = \frac{(x_i - \bar{x})_{\text{max}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2-13)$$

式中 X_i ——第 i 次测量值。

最近,随着微机智能仪表的使用,在继电保护测试中已开始尝试采用方差估计法以更严密地衡量测量数据的精密度,并对测量数据的坏值进行判别和剔除。

测量值的方差估计值为

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)} \quad (2-14)$$

式中 n ——测量次数。

坏值判别准则为

$$|x_i - \bar{x}| \geq 2\hat{\sigma} \quad (2-15)$$

第三节 试验电源及其要求

一、对工频试验电源的基本要求

继电保护试验准确度与试验电源质量有着密切关系,电源质量下降不仅影响测量仪器仪

表的误差，而且还影响被试继电器及继电保护装置的基本特性，从而导致测量结果失去准确性。为了保证检验质量，在国际电工委员会 IEC 试验标准中，对不同类型继电器的试验电源作了不同规定。我国也对继电保护装置的试验电源作了相应的技术规定。例如，《继电器及继电保护装置基本试验方法》、《静态继电保护及安全自动装置通用技术条件》和《继电保护及电网安全自动装置检验条例》（以下简称《检验条例》）等。这些标准对继电保护装置试验电源的质量有如下要求。

(1) 波形良好

交流试验电源和相应调节设备应有足够容量，以保证在最大试验负载情况下，供给被测试验保护装置的电压、电流均是正弦波，无畸变现象。《检验条例》规定，现场试验电压和电流的畸变系数应不超过 5%。

(2) 三相电压平衡

如果三相电压和电流的负序分量、零序分量均不超过正序分量的 1%，则可认为该三相系统是实际平衡的系统。

(3) 相序正确

(4) 频率稳定

交流试验电源的频率应稳定于额定频率 50Hz。

(5) 直流分量小

(6) 电压、电流稳定并且有足够的调节范围

不论是轻载，还是最大负载情况下，试验电源提供的电压都应稳定，且能在 $(0 \sim 1.2) U_N$ 范围内变化。 U_N 是被试继电器或保护装置的额定交流电压。对于复杂保护的检验，《检验条例》还规定：电源及其辅助调节设备构成的试验回路提供的试验电压、电流的相对相位，应使其能在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内变化，单相试验电流值能在 50A 内均匀调节，三相试验电流不小于 20A。

继电保护试验时，对试验电源的允许偏差，如表 2-1 所示。

表 2-1 试验电源及允许偏差

试验电源	基准条件	允许偏差
交流电源频率	50Hz	$\pm 0.5\%$ ($\pm 0.5\text{Hz}$) ^①
交流电源波形	正弦波	畸变系数 5% (2%) ^②
交流电源中直流分量	零	峰值的 2%
三相平衡电源中相电压或线电压	大小相等	差异应不大于电压平均值的 1%
三相平衡电源中相电流	大小相等	差异应不大于电流平均值的 1%
三相平衡电源中各相电压与该相电流间夹角	相等	2°
直流电源中交流分量(纹波)	零	6% ^③ 或 3% ^④

注 ① $\pm 0.5\%$ 为量度继电器试验电源的频率允许偏差， $\pm 0.5\text{Hz}$ 为有或无继电器试验的频率允许偏差。

② 5% 为单输入量量度继电器的试验电源畸变系数的允许偏差，2% 为多输入量量度继电器试验电源畸变系数的允许偏差。

③ 用峰值纹波系数表示的允许偏差，可按式 (2-30)、式 (2-31) 计算。

④ 用下式计算的纹波系数表示的允许偏差

$$\text{纹波系数} = \frac{\text{峰值} - \text{直流分量}}{\text{直流分量}} \times 100\%$$

二、交流试验电源的种类

继电保护用交流试验电源有取自电网的厂用电或所用电、电动-发电机组、工频（低频）振荡器和微机型可编程试验电源四种。

厂用电和所用电最易取得，且容量大，但其频率、电压波形及三相平衡度等均随电网变化而波动，试验人员不能控制，当波动较大时将无法满足试验要求。但一般情况下，波动不大，能满足试验要求，故目前大多数现场试验电源均来自厂用电、所用电。

电动-发电机组供给的电压幅值和频率稳定性高，波形正弦性好，三相平衡，频率可以随意调整，容量大，但投资多，维护工作量大，需大容量专用直流电源，因此只在研制部门实验室中使用，现场不采用。

工频振荡器输出波形正弦性好，频率可调，价格便宜，但输出功率小，仅几瓦或几十瓦，且单相输出，只能供少数电压型的继电器作变频电源之用。

近几年开发的微机型可编程试验电源能输出三相正弦电压、电流，其幅值、频率和相位均可调，还可在三相正弦电压、电流上叠加高次谐波，输出功率大，能满足各类机电及静态保护装置的检验。

三、改善交流试验电压、电流波形的办法

继电保护试验电源大多取自电力系统本身，而实际电力系统供给的交流电压、电流的波形往往是一种畸变失真了的非正弦波，除基波分量外，还包含有高次谐波。引起失真的原因是多方面的，大体上有以下几种：交流发电机气隙磁感应密度在空间非正弦分布和电枢有槽、齿而表面不平滑引起发电机电势的非正弦；系统中大容量变压器、电气列车负载等设备具有一定的非线性特性；试验接线中的调节设备容量不足。前两个原因引起的波形畸变系数一般不超过3%，若再考虑第三个原因，则波形畸变系数可能大大超过5%。

通过观察电源波形和测量畸变系数，可发现波形畸变，以便采取措施来改善。例如，当试验电源相电压波形差，三次谐波分量较大时，可改用电电压，当移相器过载或负载不对称而引起波形严重畸变时，可变更接线；当由于定子和转子间隙不对称而引起移相器输出波形畸变时，应更换性能良好的移相器，当发现含某次谐波时，可增设带阻滤波器滤除它。

装有复杂保护装置的现场（如220kV变电所），应先直接由所用变压器的低压侧（380V），经专用线接到一组电压为380/110V，接线为D，yn，容量不小于10kV·A的专用试验变压器上，再由该试验变压器引出三相四线作为保护装置的试验电源。装设一般保护装置的现场，最好也设置专用试验变压器，以保证试验电源三相平衡、波形良好并具有较为稳定的电压幅值。

四、对直流试验电源的要求

试验用直流电源的额定电压应与被试保护装置所用直流额定电压相同。试验电源应独立，不允许用运行中设备的直流支路电源作为检验用直流电源。直流试验电源的电压调节范围应大于额定电压的80%~115%，峰值纹波系数应不大于±6%，《静态继电保护及安全自动装置通用技术条件》还规定，对静态保护装置，试验直流电源的峰值纹波系数应不大于±2%。

五、直流试验电源的种类

现场直流电源有蓄电池、带电容储能的硅整流电源和复式整流电源三种。蓄电池供给的直流电源平滑、纹波系数很小，可自直流电源总母线引出供试验用的独立支路（试验支路应

设专用的安全开关, 所接熔断器必须保证选择性), 提供额定值和 80% 额定值两种电压。带电容储能的硅整流装置的电容容量有限, 因而所供的直流电压是时间的函数, 会随着电容器的放电而下降, 并且与试验前交流电源电压有关, 纹波系数较大。复式整流装置输出电压不够稳定, 没有采用滤波措施, 纹波系数大, 其速饱和变压器空载输出电压可能短时很高, 要采取稳压措施。

一般来说变电所有什么直流电源, 试验就用什么电源。当然也可变通 (除整组试验外), 但应充分估计纹波和电压不稳给试验结果带来的影响。保护装置整组试验时, 试验电源应是装置投运时的实际直流电源, 并接入该电源的最大模拟负载, 以同时考核其供电质量和可靠性。

第四节 畸变系数、纹波系数及其测量

畸变系数、纹波系数是衡量继电保护试验电源品质的重要指标, 因而了解畸变系数、纹波系数的概念并掌握其测量方法是十分必要的。

一、交流电源波形的畸变系数及其测量

由电工基础可知, 非正弦周期电压、电流的总有效值为

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (2-16)$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2-17)$$

式中 U_0 、 I_0 ——直流分量;

U_n 、 I_n —— n 次谐波分量的有效值。

当不存在直流分量时, 非正弦周期电压、电流的总有效值为

$$U = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (2-18)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2-19)$$

对非正弦周期量的畸变程度常用畸变系数 ν 来描述。畸变系数为非正弦周期量各次谐波的总有效值与非正弦周期量的总有效值之比, 通常用百分值表示。电压、电流的畸变系数分别为

$$\nu_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}} \times 100\% \quad (2-20)$$

$$\nu_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \times 100\% \quad (2-21)$$

交流电源的畸变往往使继电保护装置的特性发生变化,同时影响测量数据的准确性。简单的例子是三次谐波具有零序性质,对零序保护动作值肯定有影响;五次谐波具有负序性质,对所有负序量动作的保护会有影响。因此,在继电保护装置调试中,为了使测量结果准确,应该用示波器观察试验电源的波形,最好还能测量波形的畸变系数。一般来说,波形失真而畸变系数在5%以下时,在示波器荧光屏上用眼睛是难以觉察出来的。如果能观察到波形明显失真,畸变系数一定相当大了,应采取必要的措施。

测量畸变系数 ν 的专用仪器称为失真度测量仪。目前国内外的失真度测量仪,大部分采用基波抑制法,即将被测信号中基波分量滤除,测出其总谐波分量的有效值,再测出被测信号总的有效值,然后按式(2-20)、式(2-21)计算,就可得出该信号的畸变系数 ν 。失真度测量仪的原理框图如图2-1所示。

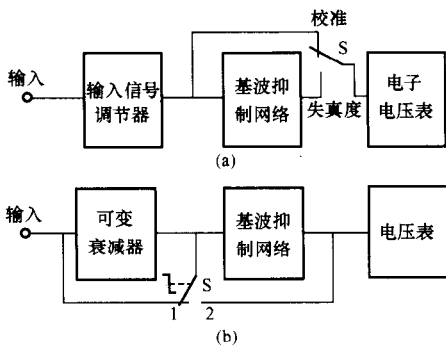


图 2-1 失真度测量仪框图

(a) 原理框图一; (b) 原理框图二

按图 2-1 (a) 测量时,首先将测量选择开关 S 置于“校准”位置,被测信号直接送入电子电压表。电压表测出的是包括基波和全部谐波在内的被测信号总的电压有效值。然后将开关 S 改置于“失真度”位置,被测信号通过基波抑制网络,调节基波抑制网络的中心频率,直至电子电压表的示值达到最小,即表示基波被滤除,电压表示值等于滤除基波后的所有谐波电压的总有效值。将电压表前后两次读数相比,可得出畸变系数 ν 的值。在成品失真度测量仪中,这种相比用以下方法来实现:第一次测量时,调节输入信号调节器的放大量(可转动面板上的校准控制旋钮),使得电压表的第一次读数为 1V,且满标度,这个操作称为校准。校准后,第二次测量时便可从电压表的度盘直接读得畸变系数 ν 。这种测量方法的准确度除与选频网络特性有关外,主要决定于电子电压表的准确度,要求它具有高灵敏度、多量程,并能真实地测出被测信号的有效值。按框图 2-1 构成的国产失真度测量仪有 BS-1 型和 SZ-3 型等。

按图 2-1 (b) 测量时,先将开关 S 置于位置“1”,使被测信号中的基波成分被抑制,电压表示出全部谐波电压的总有效值为

$$U = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (2-22)$$

调节该电压表的灵敏度调节器,使电压表指针达到适当的示值,然后保持电压表灵敏度调节器不动,将开关 S 转换到位置“2”,使被测信号的全部频率成分均通过可变衰减器加到电压表。电压表示值为经衰减 A 后的被测信号电压的总有效值

$$U = A \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (2-23)$$

调节可变衰减器,使电压表示值与 S 置于位置“1”时的示值相同,即

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} = A \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (2-24)$$

移项得

$$\nu = A \quad (2-25)$$

式(2-25)说明,被测电压波形的畸变系数 ν 等于衰减器度盘上读出的衰减值 A (为便于

直接读出畸变系数，衰减器度盘上的衰减值 A 除了按 dB 刻度外，还按百分值刻度)。此法中的电压表仅作为相等电压的指示器，因此不必具有准确的刻度，但对衰减器的刻度准确度有较高的要求。

二、直流电源的纹波系数

整流电源，特别是可控整流电源，虽经滤波，但实际加于负载的电压或电流仍有脉动，不平滑，其中包含多种交流分量。工程上常用纹波系数 γ 来表示负载上电压或电流的平滑程度，大多数文献推荐按下式计算纹波系数

$$\gamma_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}}{U_0} \times 100\% \quad (2-26)$$

$$\gamma_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}{I_0} \times 100\% \quad (2-27)$$

式中 U_0 、 I_0 ——负载上的直流分量。

式 (2-26)、式 (2-27) 可改写成

$$\gamma_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_0^2}}{U_0} \times 100\% \quad (2-28)$$

$$\gamma_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_0^2}}{I_0} \times 100\% \quad (2-29)$$

式中 U 、 I ——负载上电压、电流总有效值。

而《继电器及继电保护装置基本试验方法》和《静态继电保护及安全自动装置通用技术条件》规定，可计算峰值纹波系数为

$$q_U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_0} \times 100\% \quad (2-30)$$

$$q_I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_0} \times 100\% \quad (2-31)$$

式中 q_U 、 q_I ——电压、电流峰值纹波系数；

U_{\max} 、 I_{\max} ——瞬时电压、电流最大值；

U_{\min} 、 I_{\min} ——瞬时电压、电流最小值；

U_0 、 I_0 ——直流分量。

纹波系数 γ 测试接线如图 2-2 所示。

从交流电压表上可读得交流分量的有效值，从直流电压表上可读得直流分量，两者相比可求出纹波系数 γ 。峰值纹波系数可采用示波器测量。

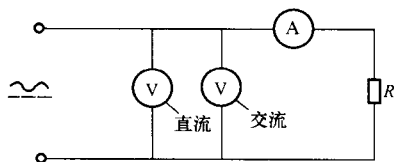


图 2-2 纹波系数测试接线