

GUANGXIANDIANLIU  
CHADONGBAOHU  
YU TONGDAO SHIYAN JISHU

# 光纤电流差动保护 与通道试验技术

李瑞生 著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

GUANGXIANDIANLIU  
CHADONGBAOHU  
YU TONGDAO SHIYAN JISHU

# 光纤电流差动保护 与通道试验技术

李瑞生 著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

随着光纤通信技术的向前发展和光纤等通信设备的成本下降,我国的光纤通信发展很快,电力通信网络的发展和普及为分相电流差动保护的大规模应用提供了充足的通道资源,分相电流差动保护在电力系统应用越来越广泛,但在使用过程中由于运行经验积累少,以及保护人员对通信了解不够,在通道试验方面提供指导的资料不多。本书是作者从多年的工作中的总结而成,全书共分六章,主要内容包括:输电线路电流差动保护、光纤通信基础知识、光纤电流差动保护装置间的通信、差动保护光纤通道检测、光纤电流差动保护装置性能指标、现场异常处理。为便于读者使用,本书还在附录中给出了光纤电流差动保护通信接口常见问题、常用缩略语及词汇释义。

本书可供从事电力系统继电保护调试、运行的技术人员参考,也可供大中专院校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤电流差动保护与通道试验技术/李瑞生著. —北京:  
中国电力出版社, 2006

ISBN 7-5083-4515-0

I. 光... II. 李... III. ①光纤电流互感器-差动保护装置  
②光纤通信-通道-试验 IV. ①TN929.11②TM452

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 074127 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>)

航远印刷有限公司印刷

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

850 毫米 × 1168 毫米 32 开本 4.875 印张 126 千字

印数 0001—5000 册 定价 20.00 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)

## 序

纵联差动保护的動作原理是很好的，它具有绝对的选择性，但由于在输电线路两侧之间传送三相电流的困难，线路纵联差动保护长期以来未能获得应用。光纤技术的发展解决了这个问题。输电线路光纤分相电流差动保护不受系统振荡的影响，有天然的选相能力。在各种复故障如同杆并架双回线发生跨线故障，单回线区外同时故障，以及各种转换性故障时都能够有选择性地切除故障相。对单相高阻接地故障可以用零序电流差动保护切除故障而且可以有选择性地只切除故障相。可见光纤分相电流差动保护解决了方向距离纵联保护难以克服的一切难题。方向距离纵联保护的优点是通信简单，只需对载波电流实行键控，即传送开关量信号。现在光纤通道资源丰富，在完成了传送三相交流波形的任务以后，再传送一个开关量信号以满足方向距离纵联保护的要求也是很容易的事，这样以光纤通信实现的线路保护就可以有两种原理的主保护，这必将成为新一代高压输电线路保护的极佳保护方式。显然，这种新一代保护是以光纤通信技术为基础的，电网继电保护人员掌握好光纤通信技术是发挥这种优良保护作用的关键。

为了运行维护好光纤纵联差动保护，尤其是快速正确处理保护在运行中出现的异常情况，运行维护人员必须既能掌握好继电保护又能掌握好光纤通信技术。本书作者在这方面已累积了多年的工作经验，并为电网继电保护人员举办过多次培训班，本书是作者总结多年的工作、培训经验写成的，既有线路纵联差动保

护和光纤通信技术的基础理论，也有处理实际可能出现故障的方法，是一本为电网继电保护人员学习掌握光纤纵联保护的好读物，相信本书的出版对在电力系统中推广应用光纤分相电流纵联差动保护发挥良好的作用。

朱声石

2006年1月

## 前 言

近几年，随着光纤通信技术的向前发展和光纤等通信设备的成本下降，我国的光纤通信发展很快，以光纤通信为主干网的电力通信网络也在加速建设中。电流差动保护原理简单可靠，已广泛应用于电力系统的发电机、变压器、母线、大型电动机等元件的主保护中。电力通信网络的发展和普及为分相电流差动保护的大规模应用提供了充足的通道资源，分相电流差动保护是将来保护发展的必然趋势。随着光纤电流差动保护应用的普及，调试、投运、运行中由于通道原因暴露的问题愈来愈多。由于保护与通信属两个专业，有些问题分析不清，对保护装置及电网的稳定运行带来隐患，因此，光纤电流差动保护对通道应充分试验验证。

光纤电流差动保护在定检投运前应做保护性能试验、通道的试验及检查。常规的保护装置做保护性能试验较多，检查得也充分，但对通道检查少，或者由于条件限制，对通道检查不充分，给保护装置的安全运行带来隐患。具体体现在：

(1) 保护装置提供的技术指标，如光收发功率、接收灵敏度、光收发模块的稳定性，由于接触不良、老化等原因，不能满足技术指标。装置若不检查这些指标，在运行过程中，由于接触不良、接头有灰尘、器件老化而降低通道指标，会造成误码率增大，影响保护动作。

(2) 目前光纤电流差动保护定检都是基于通道完好情况下，如采用尾纤连接定检试验，误码率很低。实际随着装置的运行，光器件老化、通道接触原因、光纤老化，通道衰减增大，误码率

增大，应考虑在正常误码及许可误码的情况下保护装置的动作行为，确保装置在许可误码下装置正确动作。

(3) 光纤电流差动保护由于是基于通道的纵联保护、通道的时延、间断对保护性能有影响。采用双通道的光纤电流差动保护，应检查双通道保护动作情况及单通道的动作情况。采用复接设备时，有条件时应检查其他业务对光纤电流差动保护的影响。这些影响在目前的光纤电流差动保护定检中均未考虑。

本书是在应南方电网公司专题讲座所写讲稿的基础上补充修改而成的，是本人多年工作的经验总结，随着光纤电流差动保护运行经验的积累及运行的成熟，会有相应更好的试验方法及手段。本书通过探索实践总结对通道的试验方法，希望有助于设备运行及检验，由于本人水平有限，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。本书在出版过程中，得到朱声石教授、姚晴林教授、赵曼勇高工、柳焕章高工等专家的鼓励及大力支持，给本书内容提出了许多宝贵的意见，在此谨向他们表示衷心的感谢！

李瑞生

2006年1月

# 目 录

序

前言

|                            |    |
|----------------------------|----|
| <b>1 输电线路电流差动保护</b> .....  | 1  |
| 1.1 TA 极性与电流方向 .....       | 4  |
| 1.2 输电线路纵联差动保护的基本原理 .....  | 5  |
| 1.3 输电线路电流差动保护判据 .....     | 6  |
| 1.4 差动保护中的特殊问题 .....       | 17 |
| <b>2 光纤通信基础知识</b> .....    | 23 |
| 2.1 光纤通信系统概述 .....         | 24 |
| 2.2 光源与光发射器 .....          | 25 |
| 2.3 光纤与光缆 .....            | 30 |
| 2.4 光检测器和接收器 .....         | 41 |
| 2.5 光纤连接器 .....            | 45 |
| 2.6 调制、编码和复用 .....         | 48 |
| 2.7 PCM 及数字复接技术 .....      | 51 |
| 2.8 PDH/SDH .....          | 53 |
| 2.9 误码与误块 .....            | 58 |
| <b>3 光纤电流差动保护及通信</b> ..... | 61 |
| 3.1 参考端、同步端确定 .....        | 62 |
| 3.2 同步调整方法 .....           | 63 |
| 3.3 差动保护的通信方式及接口 .....     | 68 |
| 3.4 误码及校验机制 .....          | 83 |

|      |                          |     |
|------|--------------------------|-----|
| 3.5  | 通道延时及对保护影响 .....         | 86  |
| 3.6  | 装置自环 .....               | 91  |
| 3.7  | 装置交叉接线 .....             | 91  |
| 3.8  | 双通道方式 .....              | 93  |
| 3.9  | 接口与通信终端设备的连接要求 .....     | 96  |
| 4    | 差动保护光纤通道检测 .....         | 99  |
| 4.1  | 光纤电流差动保护通信检测的必要性 .....   | 100 |
| 4.2  | 试验准备 .....               | 100 |
| 4.3  | 差动保护光纤通道检测 .....         | 102 |
| 5    | 光纤差动保护装置性能指标 .....       | 111 |
| 5.1  | 保护功能性能指标 .....           | 112 |
| 5.2  | 双通道自适应性指标 .....          | 113 |
| 5.3  | 其他通道性能指标 .....           | 114 |
| 6    | 现场异常处理 .....             | 115 |
| 6.1  | 异常信息 .....               | 116 |
| 6.2  | 现场事例 .....               | 117 |
| 附录 A | 光纤差动保护通信接口常见问答 .....     | 122 |
| A.1  | 线路光纤电流差动保护装置 .....       | 122 |
| A.2  | 64k/2M 数字复接通道及接口装置 ..... | 124 |
| A.3  | 光纤及其附件 .....             | 127 |
| 附录 B | 常用缩略语及词汇释义 .....         | 133 |
| B.1  | 光通信专业术语 .....            | 133 |
| B.2  | 词汇释义 .....               | 139 |
| 参考文献 | .....                    | 145 |

光纤电流差动保护与通道试验技术

1

# 输电线路电流 差动保护

电力系统继电保护与控制装置作为电力系统重要组成部分，对电力系统的安全稳定运行起着非常重要的作用。电流差动保护的原理是在 20 世纪初提出的，迄今为止，已约有 90 年的历史。由于其原理简单可靠而被广泛的用作电力系统的发电机、变压器、母线和大型电动机等元件的主保护。电流差动保护的原理在电力线路上的应用，最早就是传统的导引线保护，鉴于导引线的敷设距离限制和导引线中的过电压问题，它只可作为高、中压电网中的短距离输电线路的全线速动主保护。对于中、长距离的输电线路，由于难以传送对端的电流，因而在相当长的时间内，难以应用电流差动保护原理。随着微波通信技术及光纤通信技术的发展及其在电力系统通信中的逐渐应用，先后出现了输电线路的微波电流差动保护和光纤电流差动保护。在国外 20 世纪 80 年代有很多相应的科研报告发表，如日本在 20 世纪 70 年代就有分相电流差动微波保护。我国也较早地开展了输电线路的分相电流差动微波保护的研究，1979 年就有相应的科研报告发表。这一阶段，主要是研究采用频率调制方式的模拟式电流差动微波保护。进入 20 世纪 80 年代，日本出现了采用 PCM 调制方式的数字式电流差动微波保护。80 年代末以来，GE 公司和 ABB 公司也相应研制出各自的数字式电流差动微波保护。我国于 80 年代末开始研制数字式电流差动保护。当时由于光纤通信在电力通信系统的使用较少，需为光纤电流差动保护敷设专用光缆，所以光纤电流差动保护通常用于短距离输电线路。由于我国电力通信设备的相对落后，我国高压输电线路的主保护仍然是传统的高频保护占主导地位，微波、光纤电流差动保护在我国电力系统继电保护中的实际应用一直非常之少。投入运行的电流差动保护装置基本上是国外公司如东芝公司、GE 公司和 ABB 公司的数字电流差动保护装置。在国外，数字式电流差动保护的应用较多，尤其在日本和英国，数字式电流差动保护是输电线路主保护中应用最多的保护。

近几年，随着光纤通信技术的向前发展和光纤等通信设备的成本下降，我国的光纤通信发展很快，以光纤通信为主干网的电

力通信网络也在加速建设中。到 2005 年底，我国主网通信已紧密联系起来，如三峡到北京采用 24 芯 15 制式光缆通信，三峡到武汉到上海采用双 SDH 自愈式微波通道。通过光纤通信联网，2005 年全国实现 4 横 3 纵的骨干通信网。与此同时，目前国内生产继电保护的主要公司都相继推出了 32 位机高性能的微机线路光纤电流差动保护装置，并在系统中得到了应用。

输电线路采用分相电流差动保护作为纵联保护解决了采用纵联距离、纵联方向原理难以解决的问题。采用纵联差动保护有以下优点：

(1) 保护与电压量无关，解决了与电压有关的相关问题，在 TV 断线时能正确反映故障。

(2) 选择性好、灵敏度高。

(3) 系统振荡不误动，振荡中故障能灵敏地、有选择性地动作。

(4) 有天然选相能力。

(5) 可用于同杆并架线路，解决了跨线故障选相问题。

(6) 可用于串补线路。

(7) 解决了高阻接地问题：高阻接地零序电压很低，解决了灵敏度、选相问题。

(8) 解决了短线路问题：过渡电阻大对短线路距离保护的影响；采用 CVT 对短线路距离保护的影响；精工电流对距离保护的影响。

(9) 解决了弱电源故障问题。

目前关于差动保护的研究主要集中在两个方面，一是解决差动保护在可靠性和灵敏度之间的矛盾，同时提高差动保护的灵敏度和可靠性；另一方面是进一步提高差动保护的動作速度。这两个方面的问题是既互相影响，又密不可分的。研究的基本原则是在保证差动保护的可靠性基础上，提高保护的灵敏性和動作速度。

为了解决第一个方面的问题，研究工作从两个方向进行，一是提出了基于故障分量电流的差动保护原理，从根本上消除了负

荷电流的影响，彻底解决了灵敏度和可靠性的矛盾，简化了动作判据，使差动保护获得了原理上的飞跃；但由于故障分量不能长期获取，因此进行了另一个方向的研究，采用自适应的方法对全电流差动保护判据进行修正，即所谓自适应差动保护。

为了解决第二个方面的问题，主要研究差动保护的算法和对采样数据的利用方法上，提出了基于小矢量算法的差动保护，基于电流采样值的采样值差动和基于相关分析的相关差动保护等。

尽管差动保护的原理相对比较成熟，但仍有几个根本因素影响超高压线路电流差动保护的性能：

(1) TA 传变特性的影响，主要是区外故障 TA 饱和的影响，这对短线路和多端线路的差动保护影响最大。

(2) 故障暂态过程的影响，这也涉及到了保护算法的选择。

(3) 超高压长线分布电容电流的影响，对于超高压和特高压线路，电容电流的数值很大，若判据不考虑分布电容电流的影响，则从原理上违反了基尔霍夫电流定律。

(4) 负荷电流对稳态量电流差动保护的影响。

## 1.1 TA 极性与电流方向

输电线路电流差动保护和两个相量电流的加减、电流的正负以及 TA 极性的位置密切相关，此问题极为重要，但在一些资料中往往回避 TA 极性的位置，而只是人为地规定电流为正，这极易造成概念混乱。为此本书先简要的分析此关键问题，然后再论述电流差动保护。

首先分析一个基本概念，如图 1-1 (a) 所示，一次电流  $\dot{I}_1$  自母线流向线路，自 TA 正极性端流入，二次电流  $\dot{I}_2$  从正极性端流出，如图示的极性联结， $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_j$  三个电流同相位， $\dot{I}_j$  就是保护装置进行计算的电流，保护装置规定从变流器 BL 正极性端流出的这个电流  $\dot{I}_j$  为正，所以一次电流  $\dot{I}_1$  自母线流向线路时，

$\dot{I}_1$  本身就规定为正值；反之， $\dot{I}_1$  自线路流向母线时，则  $\dot{I}_j$  流入 BL 的正极性端，此时的  $\dot{I}_j$  自然为负，见图 1-1 (b)，所以与之相对应的一次电流  $\dot{I}_1$  (自线路流向母线) 就规定为负。

也就是只有当差动保护 TA、BL 的极性连接如图 1-1 所示时，TA 一次侧电流  $\dot{I}_1$  的正负规定才是：当  $\dot{I}_1$  自母线流向线路时  $\dot{I}_1$  为正，当  $\dot{I}_1$  自线路流向母线时  $\dot{I}_1$  为负。

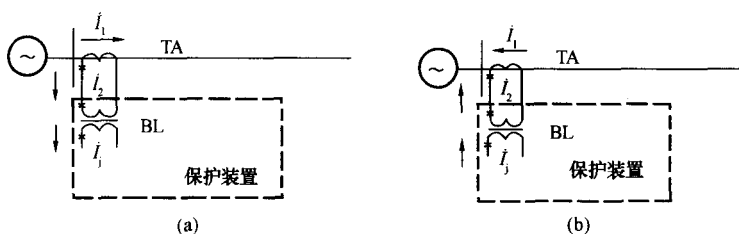


图 1-1 电流流向

(a) 一次电流自母线流向线路；(b) 一次电流自线路流向母线

## 1.2 输电线路纵联差动保护的基本原理

按照图 1-1 中规定的电流正方向，如图 1-2 所示，在正常运行或外部故障时由基尔霍夫电流定律有： $\dot{I}_{m\phi} + \dot{I}_{n\phi} = 0$  ( $\dot{I}_{m\phi}$ 、 $\dot{I}_{n\phi}$  为相电流， $\phi = A, B, C$ )，在内部故障时有： $\dot{I}_{m\phi} + \dot{I}_{n\phi} = \dot{I}_F$ 。

差动保护取差动电流  $I_d = |\dot{I}_{m\phi} + \dot{I}_{n\phi}|$ ，不考虑 TA 误差、

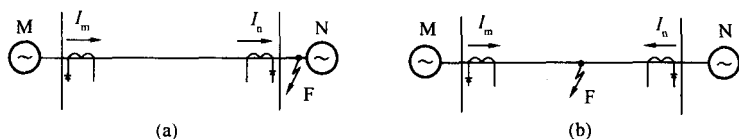


图 1-2 正常运行及故障电流示意图

(a) 正常运行或外部故障；(b) 内部故障时示意图

保护装置误差和线路分布电容，在正常运行或外部故障时  $I_d = 0$ ，差动保护可靠不动作；在内部故障时  $I_d = I_F$  ( $I_F$  为流入故障点电流)，差动保护可靠动作，该基本原理对每一相都成立。

### 1.3 输电线路电流差动保护判据

输电线路电流差动保护采用启动判据（非比率制动）与比率制动判据组成“与”门出口，如图 1-3 所示，比率制动判据的特征是动作电流的整定值  $I_{op}$  自适应地随制动电流  $I_r$  的增大而增大，保护按相构成。

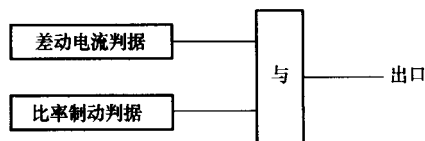


图 1-3 电流差动保护框图

线路电流差动保护判据经常采用的有两种：①判据一：制动量基于被保护线路两侧电流相量和；②判据二：制动量基于被保护线路两侧电流绝对值之和。

差动判据一：

$$\text{启动判据} \quad I_d \geq I_{op0} \quad (1-1)$$

$$\text{比率制动判据} \quad I_d \geq k I_r \quad (1-2)$$

式中  $I_d$ ——差动电流， $I_d = |\dot{I}_{m\phi} + \dot{I}_{n\phi}|$ ；

$I_{op0}$ ——启动判据的整定值；

$I_r$ ——制动电流， $I_r = |\dot{I}_{m\phi} - \dot{I}_{n\phi}|$ ；

$k$ ——比率制动系数，一般取  $k \geq 0.6$ 。

差动判据一在  $I_d - I_r$  平面上的动作特性见图 1-4。

差动判据二：

$$\text{启动判据} \quad I_d \geq I_{op01}$$

比率制动判据

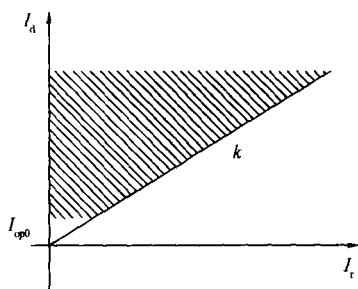


图 1-4 判据一的动作特性曲线

$$\text{当 } I_r \leq I_{r0} \text{ 时 } I_d \geq k_1 I_r + I_{op01} \quad (1-3)$$

$$\text{当 } I_r > I_{r0} \text{ 时 } I_d \geq k_2 (I_r - I_{r0}) + I_{op02} \quad (1-4)$$

$$\text{当 } I_r > I_{r0} \text{ 时 } I_d \geq k_2 I_r + (k_1 - k_2) I_{r0} + I_{op01} \quad (1-5)$$

式中  $I_d$ ——差动电流,  $I_d = |\dot{I}_{m\phi} + \dot{I}_{n\phi}|$ ;

$I_r$ ——制动电流,  $I_r = |\dot{I}_{m\phi}| + |\dot{I}_{n\phi}|$ ;

$k_1$ 、 $k_2$ ——比率制动系数,  $k_1$ 一般取  $1/6$ ,  $k_2$ 一般取  $1$ ;

$I_{r0}$ ——制动量拐点, 整定按外部故障时由 TA 饱和引起的最大不平衡电流及内部故障时最大流出电流考虑;

$I_{op01}$ 、 $I_{op02}$ ——当比率制系数分别为  $k_1$ 、 $k_2$  时对应的启动值。

式 (1-4) 等同于式 (1-5), 其中  $I_{op02} = k_1 I_{r0} + I_{op01}$ 。差动判据二在  $I_d - I_r$  平面上的动作特性见图 1-5。

差动判据动作电流相同, 根据制动量选取不同, 差动动作特性有所不同。差动判据一为制动量基于被保护线路两侧电流的相量差的绝对值, 国内保护普遍采用, 适用于双端差动。差动判据二为制动量基于被保护线路两侧电流的标量

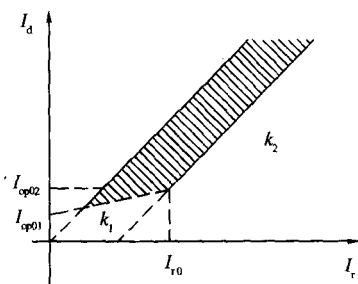


图 1-5 判据二的动作特性曲线

和，国外保护普遍采用（如 ABB 公司的 REL561、GEC 公司的 LFCB102/103、TOSHIBA 公司的 GRL-100），可适用于多端差动。

当差动保护在区外故障或正常运行时，见图 1-2 (a)，差

动电流  $I_d = |\dot{I}_{mf} + \dot{I}_{nf}| \approx 0$  (理论上)，实际上为不平衡电流。不平衡电流指两侧 TA 二次侧电流的相量和的绝对值，因两侧 TA 误差特性不完全相同及电容电流影响，故有一个不平衡电流  $I_{unb}$ ， $I_{unb}$  值随外部短路电流的增大而增大；制动电流  $I_r = |\dot{I}_{mf} - \dot{I}_{nf}| = 2I_{mf}$ ，其物理意义是：区外故障或正常运行时，两侧的 TA 一次侧电流是相等的一个电流，而两侧 TA 二次侧电流大小相等相位相反（假设两侧的 TA 变比误差、角度误差相等），为穿越性的短路电流或负荷电流，其值很大，比率制动判据不动作。

当差动保护区内故障（包括相间短路和接地短路）时，见图 1-2 (b)，短路相的电流都由母线流向线路，它们本身都为正值。 $I_d = |\dot{I}_{mf} + \dot{I}_{nf}|$ ，为短路相两侧的短路电流相量和的绝对值，其值很大，对差动判据一， $I_r = |\dot{I}_{mf} - \dot{I}_{nf}|$  小，差动判据一动作；对差动判据二， $I_r = |\dot{I}_{mf}| + |\dot{I}_{nf}|$ ，与动作电流相等，由式 (1-3)、式 (1-4) 可知短路相的继电器动作。

判据一、判据二动作电流相同，制动电流选取不同。区内故障判据二的制动电流远远大于判据一的的制动电流，区外故障判据二的制动电流与判据一的制动电流相同。区内故障判据一比判据二的灵敏度高。区外故障判据二比判据一的抗 TA 不平衡防卫度要高。实际上区外故障时，差动电流不为零，存在不平衡电流。在小差流区，可以认为差动回路误差电流不变，动作电流很小，判据二采用小比率制动（ $k$  取 1/6）的差动特性可以较好的防御区外不平衡差流。对于大差流（过拐点  $I_{d0}$  后）比率制动区，随着区外故障电流增加，抬高  $k$  值，提高大电流抗区外故障能