

21 世纪电力系统及其自动化规划教材

# 电力系统继电保护 原理及仿真

于群 曹娜 编著



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

21世纪电力系统及其自动化规划教材

# 电力系统继电保护 原理及仿真

于群曹娜 编著



机械工业出版社

编著者

本书将电力系统继电保护原理与 MATLAB/Simulink 仿真有机地结合起来,在讲解继电保护原理的同时,用 MATLAB/Simulink 的仿真实例来验证所讲保护的動作原理及故障特征,以帮助读者能够更为方便、直观地掌握较为抽象的继电保护原理及配合关系,较快地进入电力系统继电保护这一领域。

本书共 9 章。第 1 章为绪论,第 2 章为电流互感器与电压互感器,第 3 章为电网相间短路的电流电压保护与仿真,第 4 章为电网接地故障的电流电压保护与仿真,第 5 章为电网的距离保护与仿真,第 6 章为输电线路的纵联保护与仿真,第 7 章为自动重合闸与仿真,第 8 章为电力变压器的继电保护与仿真,第 9 章为发电机的继电保护与仿真。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业的本、专科教材,也可作为电气工程相关专业研究生、电力系统工程技术人员的参考书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

电力系统继电保护原理及仿真/于群,曹娜编著. —北京:机械工业出版社,2015.8

21 世纪电力系统及其自动化规划教材

ISBN 978-7-111-50129-9

I. ①电… II. ①于… ②曹… III. ①电力系统—继电保护—高等学校—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 091935 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新

版式设计:赵颖喆 责任校对:樊钟英

封面设计:张静 责任印制:刘岚

北京富生印刷厂印刷

2015 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13.75 印张·337 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-50129-9

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

# 前 言

电力系统继电保护原理是电气工程及其自动化专业的一门理论性和实践性很强的专业核心课程。该门课程以电路、电机学和电力系统分析为基础，还与电力电子、通信、计算机等新理论和新技术有着密切的联系，而且继电保护涉及电力系统的每个主设备及二次设备，这就要求学生对这些设备的原理、性能及故障状态有深刻的理解。正因为如此，对于初学者来说，往往感到电力系统继电保护原理难以入门。

在多年的电力系统继电保护原理教学实践中，笔者深深地感到，要想学好这门课程，不仅要学会对电力系统的故障情况和继电保护装置动作行为进行分析，而且还要掌握对保护装置进行实验室试验的技能以及对故障特征和保护原理进行仿真的方法。在笔者编写《MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真》时，就萌发了结合 MATLAB/Simulink 仿真来讲授继电保护原理的想法，在教学中进行了实施，并从 2013 年开始着手编写这本教材。

本书以电力系统继电保护的基本原理为主线，从最简单的继电保护基础知识入门，逐步引入到线路、主设备保护的主要原理。针对每一种保护，利用 Simulink 建立相应的电力系统的模型，对故障特征和保护原理进行分析和仿真，并为读者提供仿真源程序，以帮助初学电力系统继电保护的读者能够更为方便、直观地掌握较为抽象的继电保护原理及配合关系，较快地进入电力系统继电保护这一领域。需要说明的是，作为一本继电保护的入门教材，本书没有介绍如多相补偿式距离继电器、工频故障分量式距离继电器以及特高压长线路保护等更为复杂的保护原理。

本书共 9 章。第 1 章为绪论，第 2 章为电流互感器与电压互感器，第 3 章为电网相间短路的电流电压保护与仿真，第 4 章为电网接地故障的电流电压保护与仿真，第 5 章为电网的距离保护与仿真，第 6 章为输电线路的纵联保护与仿真，第 7 章为自动重合闸与仿真，第 8 章为电力变压器的继电保护与仿真，第 9 章为发电机的继电保护与仿真。

本书由于群和曹娜编写。第 1、3、4、5、8 章由于群编写，第 2、6、7、9 章由曹娜编写，全书由于群统稿。在本书的编写过程中，硕士研究生于梦瑶、冯知海、史文秀、曹爽爽、冯安强、杨亚丽等帮助完成了书中的部分算例、书稿的输入工作，在此谨对他们表示诚挚的感谢。

在本书的编写过程中，参阅了许多国内外出版的相关文献资料，在此谨向这些文献的作者致以衷心的感谢！

由于编者的理论水平和实践经验有限，书中难免有不当或错误之处，恳请读者批评指正。联系邮箱：yuqun\_70@163.com。

编著者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1	3.2.4 三段式电流保护装置 .....	35
1.1 电力系统继电保护的基本任务 .....	1	3.2.5 电流电压联锁速断保护 .....	35
1.2 电力系统继电保护的基本原理及组成 .....	2	3.2.6 反时限过电流保护 .....	37
1.2.1 电力系统继电保护的基本原理 .....	2	3.2.7 电流保护的性能分析 .....	39
1.2.2 电力系统继电保护的组成 .....	4	3.3 单侧电源网络相间电流保护的建模与仿真 .....	39
1.3 对电力系统继电保护的基本要求 .....	5	3.3.1 三段式电流保护的建模与仿真 .....	39
1.4 电力系统继电保护的发展简史 .....	6	3.3.2 电动机自启动对过电流保护的影响仿真 .....	46
1.5 电力系统仿真及 MATLAB 简介 .....	8	3.4 电网相间短路的方向电流保护原理 .....	50
<b>第 2 章 电流互感器与电压互感器</b> .....	10	3.4.1 方向电流保护的作用原理 .....	50
2.1 电流互感器 .....	10	3.4.2 功率方向元件的工作原理 .....	51
2.1.1 电流互感器简介 .....	10	3.4.3 相间短路功率判别元件的接线方式 .....	54
2.1.2 电流互感器的常用额定参数 .....	10	3.4.4 双侧电源网络中电流保护整定的特点 .....	55
2.1.3 电流互感器的常用接线方式 .....	12	3.4.5 对方向性电流保护的评价 .....	58
2.2 电压互感器 .....	12	3.5 电网相间短路的方向电流保护的建模与仿真 .....	58
2.2.1 电压互感器简介 .....	12	3.5.1 功率方向元件的建模与仿真 .....	58
2.2.2 电压互感器的常用额定参数 .....	13	3.5.2 分支电路对限时电流速断保护的影响仿真 .....	62
2.2.3 电压互感器常用的接线方式 .....	14	<b>第 4 章 电网接地故障的电流电压保护与仿真</b> .....	66
2.3 电流、电压互感器仿真示例 .....	15	4.1 电力系统中性点运行方式与接地故障概述 .....	66
2.3.1 电流互感器两相星形接线的建模与仿真 .....	15	4.1.1 电力系统中性点运行方式的分类 .....	66
2.3.2 考虑电流互感器饱和特性时的建模与仿真 .....	22	4.1.2 不同中性点运行方式下的接地故障 .....	67
2.3.3 电容式电压互感器的建模与暂态特性仿真 .....	24	4.2 大电流接地系统的接地短路保护 .....	68
<b>第 3 章 电网相间短路的电流电压保护与仿真</b> .....	27	4.2.1 中性点直接接地电网发生接地短路时的故障特征 .....	69
3.1 继电特性及运行方式 .....	27	4.2.2 零序分量的获取 .....	70
3.1.1 继电器的继电特性 .....	27	4.2.3 中性点直接接地电网的接地保护 .....	73
3.1.2 继电保护的运行方式 .....	28		
3.2 单侧电源网络的相间电流、电压保护 .....	29		
3.2.1 电流速断保护 (电流保护 I 段) .....	30		
3.2.2 限时电流速断保护 (电流保护 II 段) .....	31		
3.2.3 定时限过电流保护 (电流保护 III 段) .....	33		

4.2.4 对零序电流保护的评价 .....	77	5.6 过渡电阻对距离保护的影响 .....	122
4.3 小电流接地系统的单相接地保护 .....	78	5.6.1 过渡电阻的特点 .....	123
4.3.1 中性点不接地电网单相接地时的故障特征 .....	78	5.6.2 单侧电源线路上过渡电阻的影响 .....	123
4.3.2 中性点经消弧线圈接地系统单相接地的故障特征 .....	81	5.6.3 双侧电源线路上过渡电阻的影响 .....	123
4.3.3 小电流接地系统的绝缘监视及单相接地故障选线方法 .....	84	5.6.4 防止过渡电阻影响的措施 .....	124
4.4 电网接地故障的建模与仿真 .....	85	5.7 距离保护的电压回路断线闭锁 .....	125
4.4.1 中性点直接接地电网接地故障的建模与仿真 .....	85	5.7.1 母线电压回路断线闭锁的措施 .....	125
4.4.2 中性点不接地电网接地故障的建模与仿真 .....	91	5.7.2 线路电压回路断线闭锁的措施 .....	125
4.4.3 中性点经消弧线圈接地电网接地故障的建模与仿真 .....	97	5.8 距离保护的建模与仿真 .....	126
<b>第5章 电网的距离保护与仿真 .....</b>	<b>101</b>	5.8.1 阻抗继电器的建模与仿真 .....	126
5.1 距离保护的作用原理 .....	101	5.8.2 双侧电源线路上过渡电阻对测量阻抗的影响仿真 .....	131
5.1.1 距离保护的基本概念 .....	101	5.8.3 电力系统振荡的仿真 .....	133
5.1.2 距离保护的时限特性 .....	102	<b>第6章 输电线路的纵联保护与仿真 .....</b>	<b>137</b>
5.1.3 距离保护的组成 .....	102	6.1 输电线路纵联保护的基本原理和构成方式 .....	137
5.2 阻抗继电器 .....	103	6.1.1 输电线路纵联保护概述 .....	137
5.2.1 阻抗继电器的分类 .....	103	6.1.2 输电线路纵联保护的基本原理 .....	137
5.2.2 圆特性阻抗继电器 .....	104	6.1.3 差动保护特性分析 .....	139
5.2.3 直线与四边形特性的阻抗继电器 .....	109	6.1.4 输电线路纵联保护的一般构成方式 .....	140
5.2.4 阻抗继电器的精确工作电流 .....	110	6.2 输电线路纵联保护的通信通道 .....	140
5.3 阻抗继电器的接线方式 .....	111	6.3 光纤分相电流差动保护 .....	144
5.3.1 故障时的母线电压 .....	111	6.3.1 光纤分相电流差动保护的基本原理 .....	144
5.3.2 0°接线方式分析 .....	111	6.3.2 取样同步问题 .....	146
5.3.3 带零序补偿的接线方式分析 .....	113	6.3.3 光纤分相电流差动保护原理框图 .....	146
5.4 距离保护的整定计算 .....	113	6.4 方向比较式纵联保护 .....	147
5.4.1 各段保护具体的整定原则 .....	113	6.4.1 闭锁式方向纵联保护 .....	147
5.4.2 采用四边形特性的阻抗继电器的整定计算方法 .....	115	6.4.2 闭锁式距离纵联保护 .....	149
5.5 距离保护的振荡闭锁 .....	115	6.5 纵联保护的建模与仿真 .....	150
5.5.1 电力系统振荡时电流、电压的变化规律 .....	116	<b>第7章 自动重合闸与仿真 .....</b>	<b>155</b>
5.5.2 电力系统振荡时测量阻抗的变化规律 .....	117	7.1 自动重合闸的作用及基本要求 .....	155
5.5.3 电力系统振荡对距离测量元件特性的影响 .....	119	7.1.1 自动重合闸的作用 .....	155
5.5.4 振荡闭锁措施 .....	119	7.1.2 对自动重合闸的基本要求 .....	156
5.5.5 振荡过程中再故障的判断 .....	122	7.1.3 自动重合闸的分类 .....	156
		7.2 三相一次自动重合闸 .....	156
		7.2.1 单侧电源线路的三相一次自动重合闸 .....	156
		7.2.2 双侧电源线路的三相一次自动重	

7.2.3 自动重合闸与继电保护的配合	159	8.5.3 变压器比率制动特性纵联差动保护的仿真	183
7.3 单相自动重合闸	160	8.5.4 变压器绕组内部故障的简单仿真	184
7.3.1 单相自动重合闸的故障选相元件	160	<b>第9章 发电机的继电保护与仿真</b>	188
7.3.2 单相自动重合闸时的潜供电流和恢复过电压	161	9.1 发电机的故障、不正常运行状态及保护配置	188
7.4 综合重合闸简介	162	9.1.1 发电机的故障、不正常运行状态	188
7.5 自动重合闸中的故障选相仿真	163	9.1.2 发电机的保护配置	188
<b>第8章 电力变压器的继电保护与仿真</b>	168	9.2 发电机的差动保护	190
8.1 变压器的故障、不正常运行状态及保护配置	168	9.2.1 比率制动特性纵联差动保护	190
8.1.1 变压器的故障、不正常运行状态	168	9.2.2 发电机的不完全纵联差动保护	191
8.1.2 变压器的保护配置	168	9.2.3 发电机的横联差动保护	192
8.2 变压器的气体保护	169	9.3 发电机的单相接地保护	193
8.3 变压器的纵联差动保护	170	9.3.1 反映基波零序电压和电流的定子绕组接地保护	194
8.3.1 构成变压器纵联差动保护的基本原则	171	9.3.2 三次谐波式定子接地保护	195
8.3.2 不平衡电流产生的原因及消除方法	171	9.3.3 100%定子绕组单相接地保护	196
8.3.3 具有比率制动特性的纵联差动保护	174	9.4 发电机励磁回路的接地保护	196
8.3.4 变压器差动速断保护	175	9.4.1 发电机励磁回路一点接地保护	196
8.4 变压器相间短路的后备保护	175	9.4.2 发电机励磁回路两点接地保护	197
8.4.1 变压器的过电流保护	175	9.5 发电机的负序电流保护	198
8.4.2 低电压起动的过电流保护	176	9.5.1 负序电流保护的基本原理	198
8.4.3 复合电压起动的过电流保护	177	9.5.2 负序电流保护原理框图	198
8.5 变压器保护的建模与仿真	178	9.6 发电机保护的建模与仿真	199
8.5.1 变压器仿真模型的构建	178	9.6.1 发电机纵联差动保护的仿真	199
8.5.2 变压器空载合闸时励磁涌流的仿真	180	9.6.2 基波零序分量的发电机定子单相接地保护仿真	204
		9.6.3 三次谐波式发电机定子单相接地保护仿真	208
		<b>参考文献</b>	212

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 电力系统继电保护的基本任务

电气设备内部绝缘的老化、损坏，或工作人员的误操作、雷击、外力破坏等原因，都可能使运行中的电力系统发生故障或处于不正常运行状态。

最常见的故障是各种形式的短路，如三相短路、两相短路、两相对地短路、中性点直接接地系统中的一相对地短路、电气设备绕组匝间短路等。各种短路均会产生很大的短路电流，同时使电力系统的电压水平下降，从而引发如下严重后果：

- 1) 故障点的短路电流和所产生的电弧，使故障元件损坏。
- 2) 短路电流的热效应和电动力效应使短路回路中的设备损坏或缩短设备的使用寿命。
- 3) 电力系统中部分地区电压值大大下降，影响用户的正常工作或产品质量。
- 4) 破坏电力系统运行的稳定性，引起系统振荡，甚至使整个系统瓦解。

若电力系统中电气元件的正常工作状态遭到破坏，但尚未发生故障，则属于不正常运行状态。例如，因负荷超过供电设备的额定值引起的电流升高（一般称为过负荷），就是一种常见的不正常运行状态。此外，系统中出现有功功率缺额而引起的频率降低、发电机突然甩负荷而产生的过电压及电力系统振荡等，都属于不正常运行状态。

电力系统中发生不正常运行状态和故障时，都可能引起事故。系统发生事故，就是指系统或系统的一部分的正常工作遭到破坏，造成了对用户少送电或使电能质量变坏到不能容许的程度，甚至造成了人身伤亡和电气设备的损坏。

在电力系统中，首要的是应采取各项积极措施消除或减少发生故障的可能性。但如果故障发生，则系统必须能迅速而有选择性地切除故障元件，这是电力系统安全运行的重要保证。由于切除故障的时间常常要求在数十毫秒之内，动作过程是不可能进行人为干涉的，因此只有在电气元件上装设自动保护装置才有可能满足这个要求。这种自动保护装置大多是由继电器与其附属装置构成的，故也称为继电保护装置。虽然现在装置中的继电器已被电子元件或计算机所替代，但这些保护装置仍然沿用了继电保护的名称。

继电保护装置，就是能反映电力系统中电气元件发生故障或不正常运行状态，并动作于断路器跳闸或发出信号的一种自动装置。为了保证安全可靠地供电，电力系统和主要电气设备及线路都应装设继电保护装置。

电力系统继电保护的基本任务如下：

- 1) 自动、迅速、有选择性地切除故障元件，使故障元件免于继续遭到破坏，并保证其他无故障部分迅速恢复正常运行。
- 2) 反映电气元件的不正常运行状态，并根据运行维护条件，有选择地动作于发出信号、减负荷或跳闸。此时一般不要求继电保护装置迅速动作，而是要求其根据不正常运行状态对电力系统及其元件的危害程度规定一定的延时，以免因短暂的运行波动造成不必要的保



护动作或因干扰而引起的误动作。

## 1.2 电力系统继电保护的基本原理及组成

### 1.2.1 电力系统继电保护的基本原理

要完成继电保护的任務，使继电保护装置能够正确地判断系统是处于正常运行状态还是处于故障或不正常运行状态，首先要找到电力系统发生故障或不正常运行时的特征。

以图 1-1 所示的单侧电源供电网络为例。

在正常运行时，如图 1-1a 所示，每条线路上都流过由它供电的负荷电流  $I_L$ ，越靠近电源端，线路的负荷电流越大。当系统在  $k_1$  点发生三相短路时（见图 1-1b），从电源到短路点之间均将流过很大的短路电流  $I_k$ ，因此，可以利用电流幅值增大这一特征来构成过电流保护。

在正常运行时，如图 1-1a 所示，各变电站母线上的电压一般都在额定电压的  $\pm (5\% \sim 10\%)$  范围内变化，且靠近电源端母线上的电压较高。当系统在  $k_1$  点发生三相短路时，各变电站母线上的电压在不同程度上会有很大的降低，而距短路点越近时降低得越多，短路点的电压  $U_k$  将降低到零，因此，可以利用短路时电压幅值降低这一特征来构成低电压保护。

同样的道理，在正常运行时，如图 1-1a 所示，线路始端电压与电流之间的相位角决定于由它供电的负荷的功率因数角和线路的参数。由电压与电流之比所代表的“测量阻抗”，则是在线路始端所感受到的、由负荷所反映出来的一个等效阻抗，其值一般很大，阻抗角较小。当系统在  $k_1$  点发生三相短路时，线路始端电压与电流之比反映的是该测量点至短路点之间线路的阻抗，其值较小，若忽略分布电容的影响则该阻抗一般正比于该线路段的距离（长度），阻抗角为线路的阻抗角，值较大。因此，可以利用短路时测量阻抗幅值的降低和阻抗角变大这一特征来构成距离（低阻抗）保护。

此外，对电力系统中的任一电气元件而言，例如图 1-2 中的线路 AB，在正常运行时，在某一瞬间，负荷电流总是从一侧流入而从另一侧流出，如图 1-2a 所示。如果统一规定电流的正方向是从母线流向线路（图 1-2 中所示电流方向是实际的方向，不是假定的正方向），那么，按照规定的正方向，AB 两侧电流的大小相等，而相位相差  $180^\circ$ 。当线路 AB 的范围以外的  $k_1$  点短路时，如图 1-2b 所示，由电源 I 所供给的短路电流  $I_{k1}$  将流过线路 AB，此时 AB 两侧的电流仍然是大小相等相位相反，其特征与正常运行时一样。如果短路发生在线路 AB 的范围以内（ $k_2$  点），如图 1-2c 所示，则由于两侧电源均分别向短路点  $k_2$  供给短路电流  $I'_{k2}$  和  $I''_{k2}$ ，因此，在线路 AB 两侧的电流都是由母线流向线路，此时两个电流的大小一般都不相等，在理想情况下（两侧电动势相位相同且全系统的阻抗角相等），两个电流同相位。

利用每个电气元件在内部故障与外部故障（包括正常运行情况）时，两侧电流相位或功率方向的差别这一特征，可以构成各种差动原理的保护，如电流纵联差动保护、相位纵联差动保护、纵联方向保护等。其中，电流差动原理的保护只能在被保护元件的内部发生故障

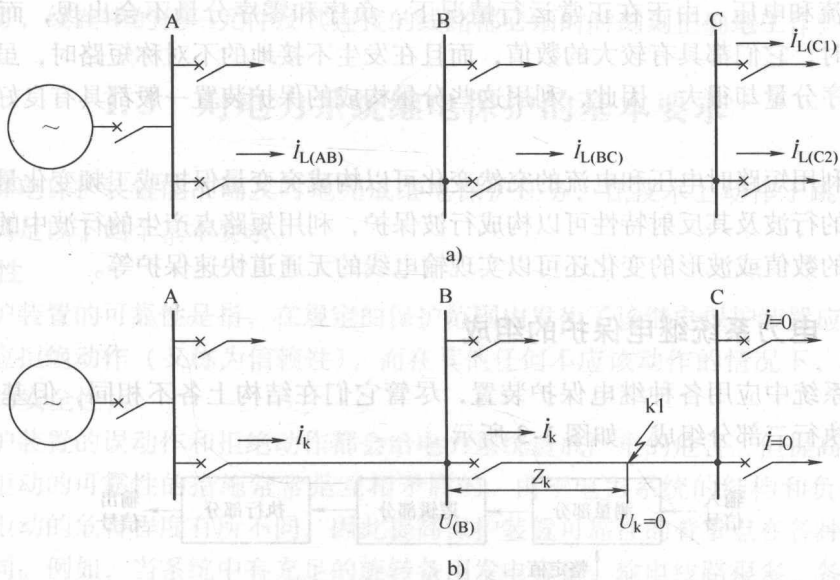


图 1-1 单侧电源供电网络

a) 正常运行 b) 三相短路

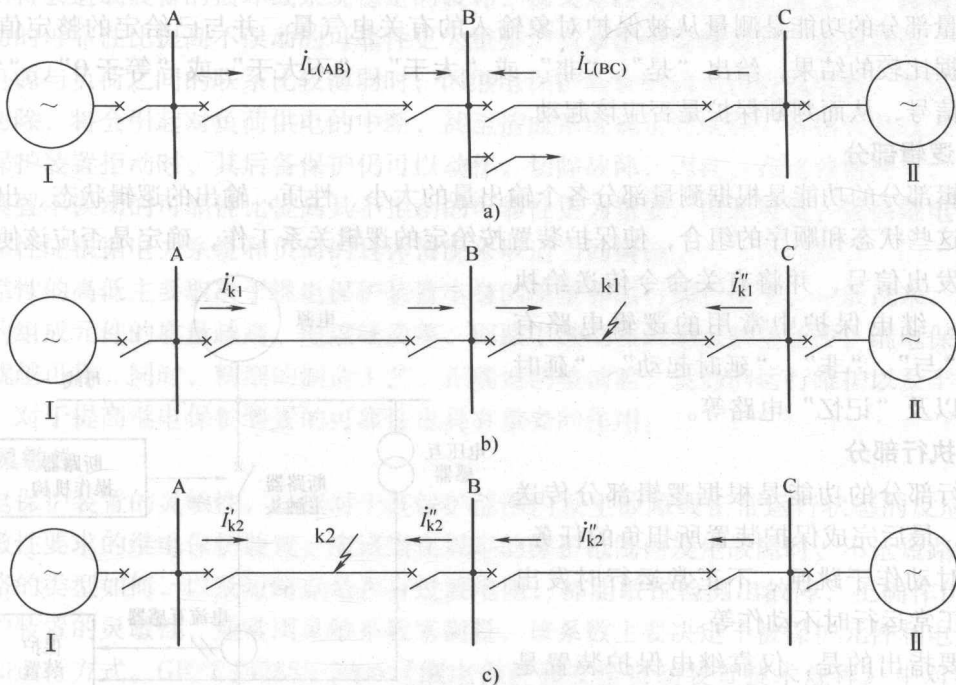


图 1-2 双侧电源供电网络接线

a) 正常运行 b) k1 点短路时的电流分布情况 c) k2 点短路时的电流分布情况

时动作，而不反映外部故障，因而被认为具有绝对的选择性。

在按照上述原理构成各种继电保护装置时，既可以使其参数反应于每相中的电流和电压（如相电流、相或线电压），也可以使之仅反应于其中的某一个对称分量（如负序、零序或

正序)的电流和电压。由于在正常运行情况下,负序和零序分量不会出现,而在发生不对称接地短路时,它们都具有较大的数值,而且在发生不接地的不对称短路时,虽然没有零序分量,但负序分量却很大,因此,利用这些分量构成的保护装置一般都具有良好的选择性和灵敏性。

此外,利用短路时电压和电流的突然变化可以构成突变量保护或工频变化量保护,利用短路时产生的行波及其反射特性可以构成行波保护,利用短路点产生的行波中的暂态分量通过阻波器时的数值或波形的变化还可以实现输电线的无通道快速保护等。

### 1.2.2 电力系统继电保护的组成

在电力系统中应用各种继电保护装置,尽管它们在结构上各不相同,但基本上是由测量、逻辑、执行三部分组成,如图1-3所示。

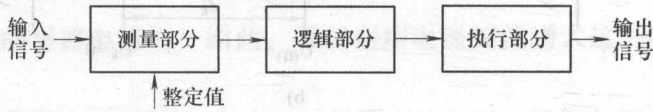


图 1-3 继电保护装置的原理结构

#### 1. 测量部分

测量部分的功能是测量从被保护对象输入的有关电气量,并与已给定的整定值进行比较,根据比较的结果,给出“是”、“非”或“大于”、“不大于”或“等于0”、“等于1”等逻辑信号,从而判断保护是否应该起动。

#### 2. 逻辑部分

逻辑部分的功能是根据测量部分各个输出量的大小、性质,输出的逻辑状态、出现的顺序以及这些状态和顺序的组合,使保护装置按给定的逻辑关系工作,确定是否应该使断路器跳闸或发出信号,并将有关命令传送给执行部分。继电保护中常用的逻辑电路有“或”、“与”、“非”、“延时起动”、“延时返回”以及“记忆”电路等。

#### 3. 执行部分

执行部分的功能是根据逻辑部分传送的信号,最后完成保护装置所担负的任务,如故障时动作于跳闸、不正常运行时发出信号、正常运行时不动作等。

需要指出的是,仅靠继电保护装置是不能达到保护电力设备的目的,只有通过互感器、断路器(含操作机构)、继电保护装置、工作电源及其相互间的连接电缆的协调配合,才能实现继电保护的工作任务。图1-4展示了一个简单的输电线路继电保护的示意图,由图可见,为了实现继电保

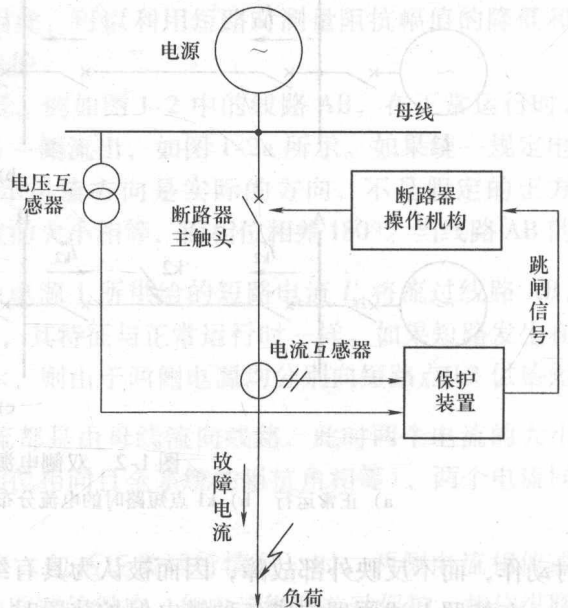


图 1-4 简单的输电线路继电保护的示意图

护的工作任务，线路中的任一元件及其连接的线路都必须时时刻刻正确地工作。

### 1.3 对电力系统继电保护的基本要求

为了使继电保护装置能准确及时地完成继电保护任务，在技术上动作于跳闸的继电保护，一般应满足以下四个基本要求。

#### 1. 可靠性

继电保护装置的可靠性是指，在规定的保护范围内发生了该继电保护装置应该动作的故障时，其不应拒绝动作（又称为信赖性），而在其他任何不应该动作的情况下，都不发生误动作（又称为安全性）。

继电保护装置的误动作和拒绝动作都会给电力系统造成严重的危害。但提高其不误动的可靠性和不拒动的可靠性的措施常常是互相矛盾的。由于电力系统的结构和负荷性质的不同，误动和拒动的危害程度有所不同，因此提高保护装置可靠性的着重点在各种具体情况下也应有所不同。例如，当系统中有充足的旋转备用发电容量、输电线路很多、各系统之间和电源与负荷之间联系很紧密时，因继电保护装置的误动作使发电机、变压器或输电线路切除而给电力系统造成的损失可能很小，但如果发电机、变压器或输电线路故障时继电保护装置拒绝动作，则将会造成设备的损坏或系统稳定的破坏，损失是巨大的。在此情况下，提高继电保护不拒动的可靠性比提高不误动的可靠性更为重要。当系统中旋转备用发电容量小、各系统之间和电源与负荷之间的联系比较薄弱时，因继电保护装置的误动作将发电机、变压器或输电线路切除，将会引起对负荷供电的中断，甚至造成系统稳定的破坏，其损失是巨大的，而当继电保护装置拒动时，其后备保护仍可以动作、切除故障，因此，在这种情况下，提高继电保护装置不误动的可靠性比提高其不拒动的可靠性更为重要。由此可见，提高继电保护装置的可靠性应根据电力系统和负荷的具体情况采取适当的措施。

可靠性的高低主要取决于继电保护装置本身的质量和运行维护水平。一般说来，继电保护装置的组成元件的质量越高、电路越简单、回路中继电器的触点数量越少，继电保护装置的工作就越可靠。同时，精细的制造工艺、正确地调整试验、良好的运行维护以及丰富的运行经验，对于提高继电保护装置的可靠性也具有重要的作用。

#### 2. 灵敏性

继电保护装置的灵敏性，是指对于其保护范围内发生故障或正常运行状态的反应能力。满足灵敏性要求的继电保护装置，应该当在规定的保护范围内发生故障时，不论短路点的位置、短路的类型如何，以及短路点是否有过渡电阻，都能敏锐检测出故障，正确作出反应。继电保护装置的灵敏性，通常用灵敏系数来衡量，该系数主要决定于被保护元件和电力系统的参数和运行方式。GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》中对各种继电保护装置的灵敏系数的最小值都作了具体的规定。

#### 3. 选择性

继电保护装置动作的选择性是指，其动作时仅将故障元件从电力系统中切除，使故障范围尽量缩小，以保证系统中的无故障部分仍能继续安全运行。

例如在图 1-5 所示的网络中，当 k1 点短路时，由距短路点最近的保护 1 和保护 2 动作跳闸，将故障线路切除，变电站 B 由另一条无故障的线路继续供电，而当 k3 点短路时，保

护6动作跳闸,切除线路CD,此时只有变电站D停电。由此可见,继电保护有选择性地动作可将停电范围限制到最小,甚至可以作到不中断向用户供电。如果当k3点短路时,保护6未能动作用于跳闸,但其上级线路的保护5能动作,则故障也能切除。这时,保护5起到了保护6的后备保护的作用。

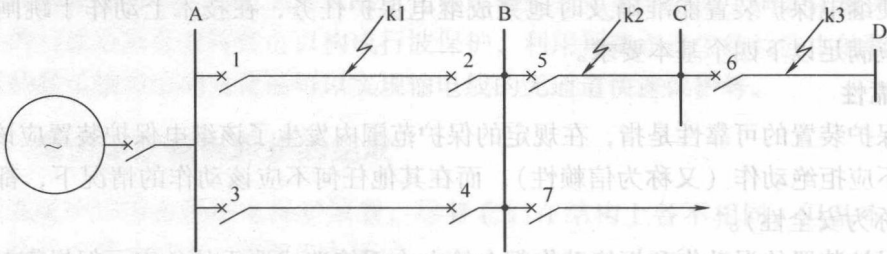


图 1-5 继电保护的选择性

#### 4. 速动性

继电保护装置的速动性,是指其尽可能快地切除故障的能力。快速地切除故障可以提高电力系统并列运行的稳定性,减少用户在电压降低的情况下工作的时间,缩小故障元件的损坏程度。因此,在发生故障时,应力求继电保护装置能迅速动作。

切除故障的总时间为继电保护装置和断路器动作时间之和。一般的继电保护装置的动作为  $0.04 \sim 0.08\text{s}$ ,最快的可达  $0.01 \sim 0.02\text{s}$ ,一般的断路器的动作时间为  $0.06 \sim 0.15\text{s}$ ,最快的可达  $0.02 \sim 0.06\text{s}$ 。

动作迅速且同时能满足选择性要求的继电保护装置结构一般都比较复杂,价格也比较贵,而在许多情况下,可以允许继电保护装置有一定时限地切除发生故障的元件,因此,对继电保护装置速动性的要求,应根据电力系统的接线以及被保护元件的具体情况来确定。

以上四个基本要求是分析研究继电保护装置性能的基础,它们之间,既有矛盾的一面,又有在一定条件下统一的一面。同时,对继电保护的科学研究、设计、制造和运行的绝大部分工作也是围绕着如何处理好这四个基本要求之间的辩证统一关系而进行的,在学习继电保护时应注意学习和运用这样的思考和分析方法。

选择继电保护方式除应满足上述基本要求外,还应该考虑经济因素。首先应从国民经济的整体利益出发,按被保护元件在电力系统中的作用和地位来确定保护方式,而不能只从降低继电保护装置本身的投资来考虑,这是因为保护的不完善或不可靠给国民经济造成的损失,一般都远远超过即使是最复杂的保护装置的投资。但要注意,对较为次要的、数量很多的电气元件(如小容量电动机等),则不应装设过于复杂和昂贵的保护装置。

### 1.4 电力系统继电保护的发展简史

继电保护技术是随着电力系统的发展而发展起来的。电力系统中的短路是不可避免的,短路必然伴随着电流的增大,因此,首先出现了防止电流超过一预定值的过电流保护。熔断器就是最早的、最简单的过电流保护,时至今日,这种保护方式仍广泛应用于低压线路和用电设备中。随着电网的接线日益复杂,仅靠熔断器已不能满足选择性和快速性的要求,于是19世纪90年代又出现了装于断路器上并直接作用于断路器的一次式的电磁型过电流继电

器。到20世纪初,随着电力系统的发展,二次式继电器开始广泛应用于电力系统的保护。这个时期可认为是继电保护技术发展的开端。

1901年,出现了感应型过电流继电器。1908年,提出了比较被保护元件两端电流的电流差动保护原理。1910年,方向性电流保护开始得到应用。20世纪20年代初,距离保护装置开始出现。随着电力系统载波通信的发展,在1927年前后,出现了利用高压输电线路高频载波电流传送和比较输电线路两端功率方向或电流相位的高频载波保护装置。在20世纪50年代,微波中继通信开始应用于电力系统,从而出现了利用微波传送和比较输电线路两端故障电气量的微波保护。在20世纪70年代末,经过20余年的研究,利用故障点产生的行波实现无通道快速继电保护的行波保护装置开始应用。21世纪以来,随着光纤通信在电力系统中的普及,利用光纤通道的继电保护,如光纤差动保护、光纤距离保护等,已得到了广泛的应用。

与此同时,构成继电保护装置的元件、材料,保护装置的结构形式和制造工艺也发生了巨大的变革。20世纪50年代以前的继电保护装置都是由电磁型、感应型或电动型继电器组成的。这些继电器经历了数次重大的改进,积累了丰富的运行经验,工作比较可靠,因而在电力系统中曾得到广泛应用。但这种继电保护装置体积大,消耗功率大,动作速度慢,机械转动部分和触点容易磨损或粘连,调试维护比较复杂,不能满足超高压、大容量电力系统的要求。自20世纪50年代开始,出现了晶体管式继电保护装置。这种保护装置体积小,功率消耗小,动作速度快,无机械转动部分,称为电子式静态保护装置。此后,出现了体积更小、工作更加可靠的集成运算放大器和其他集成电路元件,促进了静态继电保护装置向集成电路化方向的发展。20世纪80年代后期,是静态继电保护从第一代(晶体管式)向第二代(集成电路式)的过渡时期,20世纪90年代开始则是向微机保护过渡的时期。目前,微机保护装置已取代集成电路式继电保护装置,成为静态继电保护装置的唯一形式。

微机保护装置具有巨大的计算、分析和逻辑判断能力,有储存记忆功能,因而可用于实现性能完善且复杂的保护原理。微机保护装置可连续不断地对本身的工作情况进行自检,其工作可靠性很高。此外,微机保护装置可用同一硬件实现不同的保护原理,这使装置的制造大为简化,也容易实行保护装置的标准化。微机保护装置除了保护功能外,还兼有故障录波、故障测距、事件顺序记录和与调度计算机交换信息等辅助功能,这对简化保护装置的调试、事故分析和事故后的处理等都有重大意义。微机保护装置由于其巨大优越性和潜力而受到运行人员的欢迎,进入20世纪90年代以来在我国得到大量应用,已成为继电保护装置的主要形式,并已成为电力系统保护、控制、运行调度及事故处理的统一计算机系统的组成部分。

随着计算机技术、信息技术、微电子技术的不断发展,微机继电保护装置的体积会更小,功能会更强、性能会更优,而且基于计算机网络提供的数据信息共享,微机保护装置可以占有全系统的运行数据和信息。微机保护装置的应用,将使继电保护向网络化、智能化、自适应化和保护、测量、控制、数据通信一体化方面快速发展。

继电保护学科是电力学科中最活跃的分支,电力系统的快速发展,以及超大型机组和特高压交、直流输电线路的出现,对继电保护提出了更高的要求,赋予了更艰巨的任务,可以预计,继电保护学科必将向更高的理论技术高度发展。

## 1.5 电力系统仿真及 MATLAB 简介

随着电力工业的发展,电力系统的规模越来越大,许多大型的电力科研实验已经很难进行。其原因,一是受系统的规模和复杂性的限制;二是从系统的安全角度来讲不允许进行实验。因此,寻求一种最接近于电力系统实际运行状况的数字仿真工具十分重要。目前,比较常用的电力系统仿真工具有邦纳维尔电力局开发的 BPA 程序和 EMTD 程序、曼尼托巴高压直流输电研究中心开发的 PSCAD/EMTDC 程序以及中国电力科学研究院开发的 PSASP 电力系统分析综合程序等。1998 年 Mathworks 公司推出了电力系统模块集 (Power System Block) 之后,该功能逐渐被电力系统的研究者所接受,使得 MATLAB/Simulink 在电力系统方面的应用日趋完善。

MATLAB 这个名称是分别由英文单词 Matrix 和 Laboratory 的前三个字母组成。20 世纪 70 年代后期,美国新墨西哥大学计算机系主任 Cleve Moler 教授为了便于教学,减轻学生编写 Fortran 程序的负担,给代数软件包 LINPACK 和特征值计算软件包 EISPACK 编写了接口程序,这也许就是 MATLAB 的第一个版本。1984 年, Cleve Moler 和 John Little 等人合作成立了 Mathworks 软件公司,并将 MATLAB 正式推向市场。在 30 多年来的发展和竞争中, MATLAB 不断推出新的版本,现在最新的版本是 7.0 版 (Matlab 2014a),运行环境也从早期的在 DOS 环境下运行到如今可以在包括 Windows、UNIX 及 Mac OSX 等多个操作平台上运行。目前, MATLAB 已成为国际认可的最优秀的科技应用软件,在大学里,它已是用于初等和高等数学、自然科学和工程学的标准数学工具,在工业界,它已是一个高效的研究、开发和分析的工具。随着科技的发展,许多优秀的工程师不断地对 MATLAB 进行完善,使其从一个简单的矩阵分析软件逐渐发展成为一个具有极高通用性,并带有众多实用工具的运算操作平台。

Simulink 是 MATLAB 提供的实现动态系统建模和仿真的一个软件包,是基于框图的仿真平台。Simulink 挂接在 MATLAB 环境中,以 MATLAB 的强大计算功能为基础,以直观的模块框图进行仿真和计算。Simulink 提供了各种仿真工具,尤其是它不断扩展的、内容丰富的模块库,为系统的仿真提供了极大便利。在 Simulink 平台上,拖拉和连接典型模块就可以绘制仿真对象的模型框图,并对模型进行仿真。仿真模型的可读性很强,避免了在 MATLAB 窗口使用 MATLAB 命令和函数仿真时需要熟悉大量 M 函数的麻烦,对广大工程技术人员来说,这无疑是最好的福音。

Simulink 最初是为控制系统的仿真而建立的工具箱,由于其在使用中易编程、易扩展,可以解决 MATLAB 不易解决的非线性、变系数等问题,而且能支持连续系统和离散系统的仿真,也能支持线性和非线性系统仿真,还能支持多种采样频率系统的仿真,也就是不同的系统能以不同的采样频率组合,可以仿真较大、较复杂的系统。因此,不同的科学领域根据自己的仿真要求,以 MATLAB 为基础,开发了大量的专用仿真程序,并把这些程序以模块的形式都放入 Simulink 中,形成了模块库。Simulink 的模块库实际上就是用 MATLAB 基本语言编写的子程序集。现在 Simulink 模块库有三级树状的子目录,在一级子目录下包含了 Simulink 最早开发的数学计算工具箱、控制系统工具箱的内容,之后开发的信号处理工具 (DSP Blocks)、通信系统工具箱 (Comm) 等也并行列入了模块库的一级子目录,逐级打开

该模块库浏览器 (Simulink Library Browser) 的目录, 就可以看到这些模块。

从 Simulink 4.1 版开始, 有了电力系统模块库 (Power System Blockset), 该模块库主要由加拿大 HydroQuebec 和 TECSIM International 公司共同开发。在 Simulink 环境下, 用电力系统模块库的模块可以方便地进行 RLC 电路、电力电子电路、电力系统和电机控制系统等的仿真。本书中对继电保护原理的仿真就是在 MATLAB/Simulink 环境下, 主要使用电力系统模块库进行的。

由于 Simulink 和 MATLAB 的密切依存关系, 在利用 Simulink 进行仿真之前, 必须要学习和掌握 MATLAB 和 Simulink 的一些基本命令和函数, 尤其是 MATLAB 的绘图功能。由于本书主要是介绍电力系统继电保护的基本原理及其仿真, 加之当前有大量的 MATLAB 和 Simulink 的入门书籍, 因此本书没有对 MATLAB 的入门知识进行介绍, 有需要的读者可以阅读相关书籍。

### 3. 准确度

变 (非变频) 电压互感器由大电压变为小电压, 其原理主要基于电磁感应原理。电压互感器在额定电压下工作时, 二次侧所接的负载阻抗应尽可能小, 以保证电压互感器的准确度。电压互感器的准确度等级分为 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级、3.0 级、5.0 级。电压互感器的准确度等级可采用 0.5 级, 计量回路可采用 0.2 级。电压互感器的准确度等级以其额定电压与二次侧开路电压之比表示, 其后标以字母 "P" 表示保相用的电压互感器。图 2-1 为电压互感器的符号。图 2-1 中, 电压互感器的符号由一个圆圈和两个端子组成, 圆圈上方标有 "PT" 字样, 下方标有 "P" 字样。

图 2-1 电压互感器的符号

电压互感器的准确度等级与其二次侧所接的负载阻抗有关。电压互感器的准确度等级越高, 其二次侧所接的负载阻抗应越小。电压互感器的准确度等级与其二次侧所接的负载阻抗有关。电压互感器的准确度等级越高, 其二次侧所接的负载阻抗应越小。电压互感器的准确度等级与其二次侧所接的负载阻抗有关。电压互感器的准确度等级越高, 其二次侧所接的负载阻抗应越小。

电压互感器的准确度等级与其二次侧所接的负载阻抗有关。电压互感器的准确度等级越高, 其二次侧所接的负载阻抗应越小。电压互感器的准确度等级与其二次侧所接的负载阻抗有关。电压互感器的准确度等级越高, 其二次侧所接的负载阻抗应越小。电压互感器的准确度等级与其二次侧所接的负载阻抗有关。电压互感器的准确度等级越高, 其二次侧所接的负载阻抗应越小。



## 第2章 电流互感器与电压互感器

本章介绍电流互感器与电压互感器的特点及其在继电保护中的常用接线方式。本章第2.1节介绍电流互感器的常用额定参数和接线方式。第2.2节介绍电压互感器的常用额定参数和接线方式。第2.3节给出电流互感器接线方式的仿真方法、电流互感器饱和特性的仿真分析，以及电容式电压互感器的建模及其暂态特性的仿真。

### 2.1 电流互感器

#### 2.1.1 电流互感器简介

电流互感器又称仪用变流器，其主要作用是将一次侧的大电流按电流比（即变比）转换为二次侧的小电流，供继电保护装置及其他测量装置使用，以保证设备及人身安全。

在电力系统中，现场工作人员通常将电流互感器称为CT（Current Transformer），而电流互感器的国际标准名称为TA（其中“T”为主文字符号，代表“变压器”大类，而“A”是辅助文字符号，代表“电流”）。

在图2-1中给出了某一单相电流互感器的示意图。电流互感器制造商常用L1、L2标记一次绕组的始端和末端，用K1、K2标记二次绕组始端和末端，通常用“\*”或“·”标记于L1与K1上或L2与K2上，来表明它们是同极性端。图2-1中， $Z_{L0}$ 为电流互感器二次侧负载阻抗，其值较小。电流互感器的参考方向规定如图2-1所示，一次侧以流入极性端为正方向，二次侧以流出极性端为正方向。这样规定电流互感器的正方向后，当忽略传变误差时，在正确接线条件下，其一次电流与二次电流相位相同。

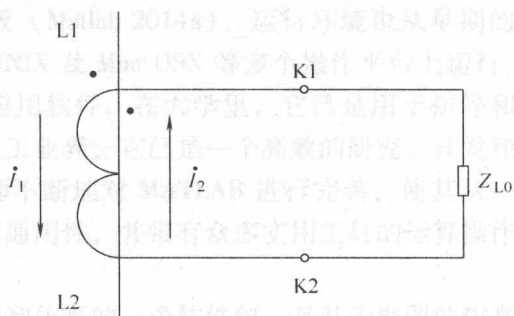


图2-1 单相电流互感器的示意图

#### 2.1.2 电流互感器的常用额定参数

##### 1. 额定电流

在选择电流互感器时，其一次额定电流，应大于一次设备的最大负荷电流。国家标准推荐的电流互感器的一次额定电流值为10A、12.5A、15A、20A、25A、30A、40A、50A、60A、75A以及它们的十进位倍数或小数，标注有下划线的为优先推荐值。

电流互感器的二次额定电流有5A及1A两种。

电流互感器的电流比等于一次额定电流与二次额定电流之比，电流比参数是继电保护进行定值整定的重要依据。