



国际电气工程先进技术译丛

# 配电网保护

(原书第3版)

**Protection of Electricity Distribution Networks  
3rd Edition**

[美] 胡安 M. 赫尔斯 (Juan M.Gers) 著  
[英] 爱德华 J. 霍姆斯 (Edward J.Holmes) 著  
郭丽萍 等译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

## 关于本书

本书覆盖了配电网保护的各个方面，从继保的基本原理、短路电流的计算、保护器件、整定方法，到最新的通信网络技术，以及实际应用中保护系统的安装、测试和维护。考虑到计算机技术、通信技术等的快速发展和应用，本书加入了数字继电器、IEC 61850等最新的技术发展。本书面向应用者，避免了繁琐的数学推导，采用深入浅出、循序渐进的方法系统介绍了配电网的保护知识，叙述严谨，基础坚实，实例与图表丰富，易于读者理解与掌握。另外，作者安排了大量习题，这些详细的案例和练习，有助于读者快速理解和掌握相关内容。

书中采用了大量实际工作中的案例和图示，能够为规划、设计及维护人员提供有价值的素材，尤其是那些从事配电网系统保护整定和设计的工作人员。



国际电气工程先进技术译丛

# 配电网保护

(原书第3版)

[美] 胡安 M. 赫尔斯 (Juan M. Gers)

[英] 爱德华 J. 霍姆斯 (Edward J. Holmes)

郭丽萍

著

等译



机械工业出版社

本书内容广泛,详细介绍了配电网保护的理论和主要方法,并结合当前配电网的最新发展趋势,对数字继电器、电力系统自动化的通信网络等进行了讨论。本书共14章,覆盖了电力系统配电网的各个部分:第1~3章介绍了继电保护的基本原理;第4~9章详细探讨了配电网中各种继电保护的整定方法和配合;第10、11章着重介绍了工业系统的保护;第12章主要讨论了变电站的保护方案;第13章则介绍了最新的电力系统通信协议标准 IEC 61850;第14章主要介绍了系统的保护的安装、测试和维护。

本书可供国内供电企业、科研部门从事配电网保护设计的工程技术人员和科研人员使用,也可作为高等院校相关专业大学生、研究生、老师的参考用书。

Original English Language Edition published by The IET, Copyright© 2011, All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 IET 授权机械工业出版社独家出版,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记图字:01-2013-3788号。

## 图书在版编目(CIP)数据

配电网保护:第3版/(美)赫尔斯(Gers, J. M.), (英)霍姆斯(Holmes, E. J.)著;郭丽萍等译. —北京:机械工业出版社, 2015. 3

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Protection of electricity distribution networks, 3rd edition

ISBN 978-7-111-49063-0

I. ①配… II. ①赫…②霍…③郭… III. ①配电系统—继电保护 IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第311789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:王欢 责任编辑:王欢

责任校对:肖琳 封面设计:马精明

责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2015年2月第1版第1次印刷

169mm×239mm·18.5印张·363千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-49063-0

定价:78.80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)88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:(010)68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

(010)88379203

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

# 译者序

配电网保护对于电网的正常运行起着至关重要的作用。而伴随着智能电网的推进，配电网保护也发生了很多的变化，受到越来越多的关注。

本书的两位作者在前两版的基础上，结合国外最新的技术发展，于2011年出版了本书。而我有幸可以尽我所能，将最新的译本奉献给读者。

本书覆盖了配电网保护的各个方面，从继保的基本原理、短路电流的计算、保护器件、整定方法，到最新的通信网络技术，以及实际应用中保护系统的安装、测试和维护。本书可供国内供电企业、科研部门从事配电网保护设计的工程技术人员和科研人员使用，也可作为高等院校相关专业大学生、研究生、老师的参考用书。

书中采用了大量实际工作中的案例和图示，能够为规划、设计及维护人员提供有价值的素材，尤其是那些从事配电系统保护整定和设计的工作人员。

考虑到计算机技术、通信技术等的快速发展和应用，本书新增了数字继电器、IEC 61850等最新的技术内容。结合书中继电保护（简称继保）的基本原理，读者可以更好地理解相关的内容。

本书是为应用者准备的，全书避免了烦琐的数学推导，采用深入浅出、循序渐进的方法系统地介绍了配电网的保护知识。本书叙述严谨、基础坚实、实例与图表丰富，便于读者理解与掌握。

在本书中，作者安排了大量的习题，这些详细的案例和习题，有助于读者快速理解和掌握相关内容。为方便读者自学，本书附录给出了所有习题的完整答案。

本书主要由郭丽萍负责翻译和整理，由高宁进行审校，参与本书翻译工作的还有崔丽波、赵大海、黄伟明、杨靖、朱文翔、李明、王磊、张崑、杨林。为了忠实原著，在翻译过程中对内容基本没做任何改动，并尽可能按照中文的文字习惯进行翻译。

我的本职工作主要涉及输配电产品的检测，虽然对配电保护比较熟悉，但本书的疏漏和差错在所难免，恳请读者批评指正。

此外，要特别感谢杨自佑老师的鼓励和崔强老师的推荐，以及来自家庭的支持，让我得以顺利完成本书的翻译。在此表示衷心的感谢。

郭丽萍

2014年12月于上海

# 原书第 3 版序

继电保护的基本原理一直以来都是一样的，但是软件、硬件和通信技术的发展极其迅速。这些技术都已经被引入了保护系统，并起着积极的作用，尤其在提高继保的可靠性和快速性方面。

全世界所有的电力公司都非常重视配电系统，因为它们的服务质量很大程度上取决于最终的运行状况。而继电保护对于配电系统的正常运行起着至关重要的作用，继保必须始终动作可靠、快速和有选择性。非常有趣的是，和所有计算机相关的电子设备一样，继电器价格已经大幅下降。当然，随着计算机技术的发展，现代的继电器也发生了巨大的改变。

为了实现配电网自动化，配电系统中增加了很多的设备，而继电器必须要适应目前可能有着多种方式的网络结构。适应性准则是很好的解决方法。但这要求对所有的运行方式进行研究，才能进行正确的继电保护整定。配电网继保整定变得更为有趣，但更为复杂和费时。

本书第 3 版对于继保基本原理方面的内容没有大的改动，但是在新技术应用方面增加了很多内容。为了增加可读性，以及方便与前两个版本内容进行对比，在章节安排上没有大的改动。另外，删除了“警报处理”部分，取而代之的是第 13 章“电力系统自动化的通信网络”，详细介绍了标准 IEC 61850。

很遗憾的是，我们的老朋友 Holmes 因病没能参与第 3 版的准备工作。我仍然非常怀念我们一起准备本书前两版的时光。那时，我们经常进行长时间且卓有成效的讨论。尽管如此，本书的基本理念和技术水平并没有因此而有一丝的改变。

首先要特别感谢 James Ariza 在通信网络这一章对我们的帮助，感谢 Cesar Gallego 在多个课题方面的建议，Francisco Pacheco 认真细致的制图，Francia Solis 对材料整体组织上的帮助，以及 GERS 公司的同事们长期以来在保护系统领域做出的贡献。

我还要感谢 IET 出版社对我们的信任，特别是 Lisa Reading 对新版的热情支持，以及 S. Ramya 对文字的细致修改。

最后，要始终感谢我的妻子 Pilar 和 Ted 的妻子 Maggie 长期以来对我们工作的理解和支持。

**J. M. Gers**

**Weston, 佛罗里达州, 美国**

**jmgers@gersusa.com**

## 原书第 2 版序

距离本书第 1 版发行已经有 6 年了。这 6 年里，继电保护设计发生了翻天覆地的变化。强大的数学算法和数字技术的进一步发展，大大拓宽了保护系统的含义和范围。最新的继保装置除了具备传统的保护功能以外，同时还将控制、测量、记录、警报等功能集于一身。此外，新的继保装置还配有良好的通信设备，使它们几乎可以应用于所有的自动化系统。因此，现代的继保装置保护功能更为强大，而且通过编程，现代的继保装置可以根据系统拓扑结构和操作方式的变化而自动调整，并互相配合。

本书的第 3 章和第 5 章对数字继电器进行了详细的介绍。第 12 章，保护设计方面的内容也根据新技术的发展进行了更新。而最后一章关于试验步骤的内容中增加了很多数字保护的内容。

我们对第 1 版中很多章节的内容也都进行了修改，并且增加了“警报处理”的内容。因为大量的警报信息会由电力系统网络进入控制中心，如何高效快速的处理这些警报信息，与整个系统故障处理的速度有着密切的关系。在此，非常感谢斯特拉斯克莱德（strathclyde）大学（位于苏格兰的格拉斯哥市）的 K. L. Lo 教授在警报处理内容方面对我们的有力帮助。

最后，要再次感谢我们各自的妻子 Pilar 和 Maggie 对我们工作的支持。

**J. M. Gers**

**Weston, 佛罗里达州, 美国**

**[jmgers@gersusa.com](mailto:jmgers@gersusa.com)**

**E. J. Holmes**

**Stourbridge, 英格兰, 英国**

**[ejholmes@compuserve.com](mailto:ejholmes@compuserve.com)**

# 原书第 1 版序和感谢

电源质量对于社会经济发展的任何一个领域来说，都是极其重要的。客户停电时间的 75% 都是由于配电网故障引起的，客户当然期望拥有安全而稳定的电源供给。尽管通过配电网设计优化并使用优质的设备，可以获得安全而稳定的电源，但是合理的继电保护配置和整定也是必要的。因为这样可以确保快速切除故障，尽可能缩短停电时间，并改善电源供给的连续性。

基于上述的想法，笔者完成了本书，为专业工程师或学生提供参考。在本书中，笔者采用了很多实际工作中的案例，希望这些详细的案例和练习，能够为规划、设计及维护人员提供有价值的素材，尤其是那些从事配电网系统保护整定和设计的工作人员。

Gers 先生提供了本书的原始资料，原为西班牙文，由 Holmes 先生将其翻译为英文。然后，基于原始资料，笔者大大扩展了主要的内容，并加入很多最新的信息。在完成本书的过程中，有着不同背景和经历的两位作者，经常进行讨论，使本书在“配电网保护”这个主题上有着更为深入的思考。

我们要感谢哥伦比亚瓦尔（Valle）大学和哥伦比亚科学院（COLCIENCIAS）的资助；还有英国文化协会长期以来对科研院所之间交流访问的支持；在初稿阶段 C. Delgado 先生提出了极其有价值的建议，GERS 公司的同事提供了有力的支持和帮助。我们还要感谢 F. Pacheco 负责制图，斯特莱斯克莱德大学的 K. L. Lo 教授给我们的指导，Stephen 和 Philip Holmes 无私分享他们的计算机专业知识。此外，还要特别感谢给予我们资料的各个机构，这些资料对我们帮助极大。最后，还要感谢我们各自的妻子 Pilar 和 Maggie，四年来对我们的理解和支持。

**J. M. Gers**

**Cali, 哥伦比亚**  
**gers@cali.cetcol.net.co**

**E. J. Holmes**

**Stourbridge, 英格兰, 英国**  
**ejholmes@compuserve.com**

# 目 录

译者序

原书第 3 版序

原书第 2 版序

原书第 1 版序和感谢

第 1 章 绪论	1
1.1 概况	1
1.2 电力系统基础知识	1
1.3 保护要求	3
1.4 保护范围	4
1.5 主保护和后备保护	5
1.5.1 主保护	5
1.5.2 后备保护	5
1.6 方向保护	6
1.7 习题	7
第 2 章 短路电流的计算	9
2.1 短路电流计算模型	9
2.1.1 系统阻抗影响	9
2.1.2 旋转电机的影响	11
2.1.3 故障种类	12
2.1.4 故障电流计算	13
2.2 计算短路电流的方法	15
2.2.1 各序网络的构建和重要性	18
2.2.2 使用对称分量法进行不对称故障计算	20
2.2.3 电力系统等效阻抗	20
2.3 保护系统的电流和电压信号	21
2.4 用计算机进行故障计算	22
第 3 章 继电器的类别和功能	24
3.1 分类	24

## VIII 配电网保护

3.1.1 按结构分类	24
3.1.2 按输入信号分类	24
3.1.3 按功能分类	24
3.1.4 电气继电器的国际分类	25
3.2 电磁继电器	26
3.2.1 吸引继电器	26
3.2.2 带移动线圈的继电器	27
3.2.3 感应继电器	27
3.3 保护继电器的发展	31
3.4 数字保护	31
3.4.1 概述	31
3.4.2 数字继电器的特点	31
3.4.3 数字继电器的典型结构	32
3.4.4 数字继电器的标准功能	33
3.5 继电器供电	34
<b>第4章 电流互感器和电压互感器</b>	<b>35</b>
4.1 电压互感器	35
4.1.1 等效电路	35
4.1.2 误差	35
4.1.3 负载	36
4.1.4 电压互感器的选择	37
4.1.5 电容式电压互感器	37
4.2 电流互感器	39
4.2.1 等效电路	39
4.2.2 误差	40
4.2.3 交流饱和	41
4.2.4 负载	41
4.2.5 电流互感器的选择	44
4.2.6 ANSI 标准定义的准确级	45
4.2.7 直流饱和	46
4.2.8 使用电流互感器的注意事项	47
<b>第5章 过电流保护</b>	<b>49</b>
5.1 简述	49
5.2 过电流继电器种类	49

5.2.1	固定电流值继电器	49
5.2.2	定时限/定电流继电器或定时限继电器	51
5.2.3	反时限继电器	52
5.3	过电流继电器整定	52
5.3.1	速断单元整定	52
5.3.2	保护变电站间连接线路的速断单元覆盖范围	53
5.3.3	延时过电流继电器参数整定	54
5.4	继电器配合的限制条件	58
5.4.1	最小短路电流水平	58
5.4.2	发热限制	59
5.4.3	启动电流值	61
5.5	与 Dy 联结变压器的配合	69
5.5.1	三相短路故障	70
5.5.2	相间短路故障	70
5.5.3	单相接地故障	71
5.6	与熔断器的配合	78
5.7	与负序单元的配合	78
5.8	带电压控制的过电流继电器	79
5.9	用软件技术设置过电流继电器	80
5.10	数字继电器中数字逻辑的使用	81
5.10.1	简述	81
5.10.2	数字逻辑基础	81
5.10.3	逻辑关系图	82
5.11	群组整定变化的适应性保护	84
5.12	习题	85
<b>第 6 章</b>	<b>熔断器、重合闸和分段器</b>	<b>89</b>
6.1	设备	89
6.1.1	重合闸	89
6.1.2	分段器	92
6.1.3	熔断器	92
6.2	配电系统的时间/电流设备的配合原则	94
6.2.1	熔断器-熔断器的配合	95
6.2.2	重合闸-熔断器的配合	95
6.2.3	重合闸-重合闸的配合	98
6.2.4	重合闸-继电器的配合	98

## X 配电网保护

- 6.2.5 重合闸-分段器的配合 ..... 99
- 6.2.6 重合闸-分段器-熔断器的配合 ..... 99

### 第7章 方向过电流继电器 ..... 102

- 7.1 结构 ..... 102
- 7.2 动作原则 ..... 103
- 7.3 继电器的连接 ..... 103
  - 7.3.1 30°连接 (0°AMT) ..... 103
  - 7.3.2 60°连接 (0°AMT) ..... 104
  - 7.3.3 90°连接 (30°AMT) ..... 105
  - 7.3.4 90°连接 (45°AMT) ..... 105
- 7.4 接地故障方向继电器 ..... 106
- 7.5 速断单元的配合 ..... 111
- 7.6 方向过电流延时继电器的整定 ..... 114
  - 7.6.1 启动电流整定 ..... 114
  - 7.6.2 时间刻度整定 ..... 114
- 7.7 习题 ..... 119

### 第8章 差动保护 ..... 121

- 8.1 概述 ..... 121
- 8.2 差动保护的分类 ..... 123
- 8.3 变压器差动保护 ..... 123
  - 8.3.1 基本因素 ..... 124
  - 8.3.2 CT的选择和连接 ..... 125
  - 8.3.3 接地故障时差动继电器保护的绕组的百分比 ..... 130
  - 8.3.4 确定斜率 ..... 131
  - 8.3.5 电力变压器中的故障电流分布 ..... 132
- 8.4 发电机和旋转电机的差动保护 ..... 134
- 8.5 线路差动保护 ..... 137
- 8.6 母线差动保护 ..... 138
  - 8.6.1 多个制动线圈的差动保护系统 ..... 138
  - 8.6.2 高阻抗差动系统 ..... 138
- 8.7 习题 ..... 140

### 第9章 距离保护 ..... 142

- 9.1 概述 ..... 142

9.2 距离继电器的种类 .....	142
9.2.1 阻抗继电器 .....	144
9.2.2 方向继电器 .....	146
9.2.3 感抗继电器 .....	147
9.2.4 姆欧继电器 .....	148
9.2.5 完全极化的姆欧继电器 .....	149
9.2.6 透镜特性的继电器 .....	150
9.2.7 多边形特性的继电器 .....	150
9.2.8 混合特性继电器 .....	150
9.3 整定距离继电器的保护范围和动作时间 .....	151
9.4 距离继电器馈入电流的影响 .....	154
9.5 距离保护中的弧阻影响 .....	158
9.6 剩余补偿 .....	159
9.7 距离继电器测得的阻抗 .....	159
9.7.1 相单元 .....	159
9.7.2 接地故障单元 .....	160
9.8 电力系统振荡 .....	160
9.9 距离继电器的有效保护范围 .....	163
9.10 最大负载检查 .....	164
9.10.1 姆欧继电器 .....	164
9.10.2 多边形特性的继电器 .....	165
9.11 画出继电器整定值 .....	165
9.12 联锁跳闸 .....	174
9.12.1 欠范围直接跳闸 .....	174
9.12.2 允许的欠范围联锁跳闸 .....	174
9.12.3 允许的超范围联锁跳闸 .....	175
9.13 在串联补偿线路中的距离继电器 .....	175
9.14 在 T 形回路中距离保护的考虑因素 .....	177
9.14.1 两个端口有馈入电流的 T 形回路 .....	177
9.14.2 所有三个端口都有馈入电流的 T 形回路 .....	179
9.15 采用距离继电器发现发电机励磁故障 .....	179
9.16 习题 .....	181
<b>第 10 章 工业系统的保护 .....</b>	<b>184</b>
10.1 保护设备 .....	184
10.1.1 过电流继电器 .....	184

## XII 配电网保护

10.1.2 普通断路器和塑壳断路器的直接动作器件	184
10.1.3 热继电器、接触器和熔断器组合使用	184
10.2 电机相关过电流保护的整定原则	185
10.2.1 热继电器	185
10.2.2 低压断路器	186
<b>第11章 工业负载切除系统</b>	<b>194</b>
11.1 失电后的系统运行	194
11.2 自动减载系统的设计	195
11.2.1 简单发电机模型	195
11.2.2 建立减载系统的参数	195
11.3 整定频率继电器的原则	196
11.3.1 动作时间	196
11.3.2 确定频率波动	197
11.4 计算和整定某工厂的频率继电器的案例	197
11.4.1 过载计算	197
11.4.2 需要切除的负载	197
11.4.3 频率水平	197
11.4.4 负载切除阶段	197
11.4.5 确定频率继电器整定值	199
11.4.6 动作的验证	201
<b>第12章 保护方案和变电站设计图</b>	<b>204</b>
12.1 保护方案	204
12.1.1 发电机保护	204
12.1.2 电动机保护	205
12.1.3 变压器保护	209
12.1.4 线路保护	212
12.2 变电站设计图	213
12.2.1 单线图	214
12.2.2 变电站布置图	214
12.2.3 交流连接图	215
12.2.4 直流连接图	215
12.2.5 接线图	216
12.2.6 逻辑图	216
12.2.7 电缆列表	216

<b>第 13 章 电力系统自动化的通信网络</b> .....	218
13.1 IEC 61850 概述 .....	219
13.2 IEC 61850 的内容和特点 .....	220
13.3 系统配置语言 .....	224
13.4 IEC 61850 设备测试的问题 .....	225
13.5 GOOSE 信息的配置和验证 .....	227
13.5.1 系统配置 .....	229
13.5.2 系统验证试验 .....	229
13.6 变电站 IT 网络 .....	229
13.7 过程总线 .....	230
<b>第 14 章 保护系统的安装、测试和维护</b> .....	231
14.1 保护设备的安装 .....	231
14.2 测试保护方案 .....	232
14.2.1 工厂测试 .....	233
14.2.2 安装前测试 .....	233
14.2.3 周期性维护 .....	237
14.3 安装数字保护 .....	238
14.3.1 设置参数 .....	238
14.3.2 运行测试 .....	239
<b>附录 习题答案</b> .....	242
<b>参考文献</b> .....	277



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 概况

随着社会对电的依赖与日俱增，无论是在发展中国家还是发达国家，如何用较低的成本获得相对可靠、优质及安全的电源，对于所有的客户来说都是非常关键的。对于任何供电系统，合理的设计和规范的维护都是至关重要的，因为这样可以限制可能发生的故障数量。

配电网络中有很多辅助设备，这些设备的主要作用就是使电源满足安全、可靠、优质的要求。而其中最重要的就是保护系统，保护系统主要用来切除故障和限制故障对配电网的伤害。雷电、绝缘老化、人为破坏、树枝、动物接触电路网络等，是常见的故障原因。大部分的故障都是暂时的，不用停止供电就可以清除，或者只是极短时间的断电。但是永久性的故障会造成长时间的停电。因此，为了减小停电损失，所有的线路和电力设备都要安装可靠适合的保护装置。继保装置可以隔离网络中的故障段，使系统中其他部分正常供电。这样，用户就可以获得持续和优质的电源。

合理配置的保护装置，对于确保配电网的安全是至关重要的，包括电网中的各个设备、工作人员、公共设施及整个网络。保护装置的自动运行是很有必要的，因为这样可以快速隔离故障点并最大限度地降低损失。装置的成本和实际的益处也是必须认真考虑的，以便在允许的成本范围内设计最佳的保护方案。此外，如何减少供电不足的损失也受到了越来越多的关注。

在所有的供电网络中，继保装置必须遵循以下的基本原则。在发生故障或异常情况时，保护系统必须立即发现故障以便将其隔离，由此保证电网其他部分可以正常供电，并尽可能防止其他设备受到破坏。被隔离的设备数量应尽可能少。保护装置必须具有高灵敏度，在最小故障参数情况下可靠动作，而在相关设备最大额定电流（可能仅为短时）情况下不动作。保护装置还必须动作快速及可靠，以快速切除故障并最大程度减小故障对设备的损害。在多数系统中都采用了后备保护以提高保护系统的可靠性，因为后备保护在主保护失效时动作。在一些电网中，仍然还在使用电磁继电器，但是其整体的趋势是终将被微机和数字继电器所取代，尤其是在更为复杂的保护系统中。

## 1.2 电力系统基础知识

任何供电系统的主要目标都是满足所有客户的需求，为其提供电能。无论是

## 2 配电网保护

以最合理的价格卖出，电厂总是要发电的。输电系统用来将大量的电能传输至主要的负荷中心，配电系统将具有合适的电压水平的电能供给最终的用户。远距离传输大量的电能要采用超高压（Extra High Voltage, EHV）系统，有时也称作一次输电系统。这些系统额定电压在 300kV 以上，常见的为 400kV、500kV、765kV。

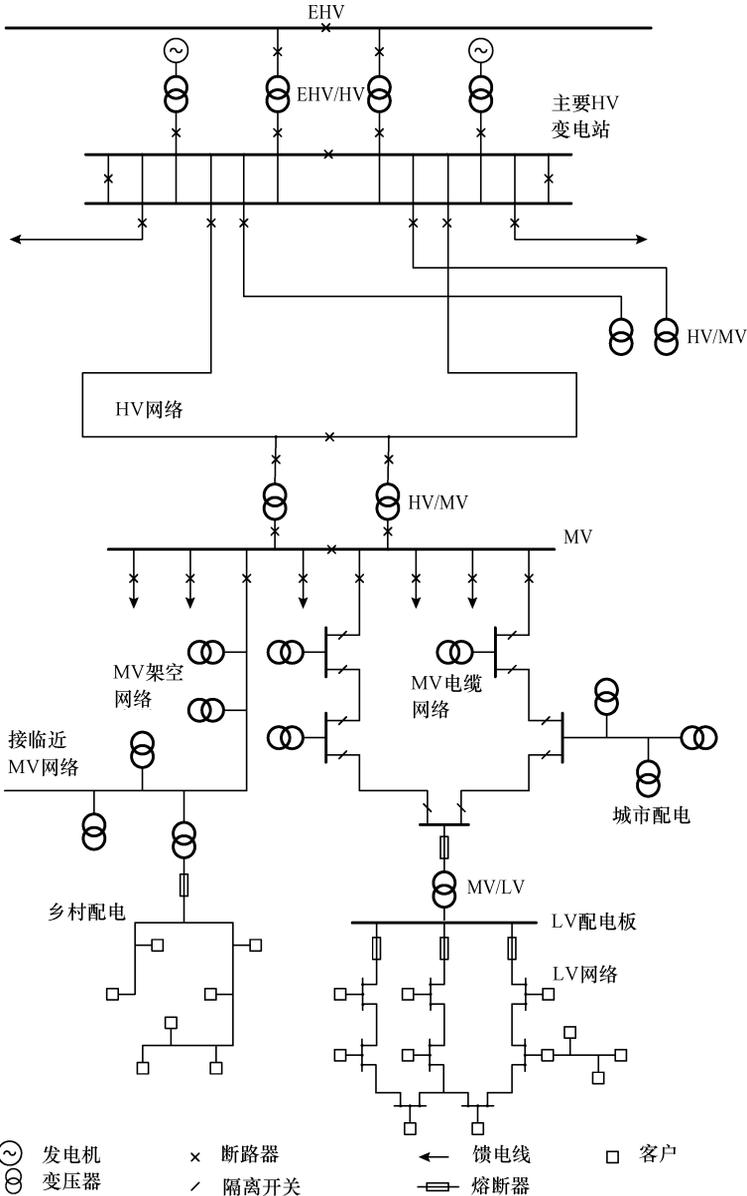


图 1.1 EHV/HV/MV/LV 网络布置 (LAKERVI, E. , and HOLMES, E. J. : “Electricity distribution network design”, Peter Peregrinus, 1995, 2nd Edn. ; revised 2003)

高压 (High Voltage, HV) 输电网络在一定范围内传输大量的电能, 这些网络可以各自独立运行也可以互相关联。在一个输电网络里, 可以有 2 种或 3 种配电电压, 以满足不同用户的需求。一般来说, 中压 (Medium Voltage, MV) 和低压 (Low Voltage, LV) 网络呈辐射状分布。

图 1.1 所示的 EHV/HV/MV/LV 网络布置说明了各种网络间的联系。HV 网络由 EHV/HV 变电站供电, 而 EHV/HV 变电站由 EHV 线路供电。HV/MV 变电站位于 HV 网络附近, 为 MV 网络供电。HV 和 MV 网络可直接为大客户供电, 而对于绝大多数的客户, 由 HV 和 MV 网络通过 MV/LV 配电变电站和相关网络, 为其提供低压电源, 如图 1.2 所示。

### 1.3 保护要求

所有电力系统的保护设计都必须考虑以下基本原则:

1. 可靠性, 即保护装置可正常动作。这包含两个含义——稳定性和安全性。即, 在其保护范围内发生故障时可以正常动作, 而保护范围外发生故障时不会误动。
2. 速动性, 以最短时间切除故障, 以避免故障对设备造成破坏。
3. 选择性, 隔离最小范围的故障段, 保持持续供电。
4. 经济性, 以最低的代价获得最完善的保护。

实际上, 保护系统不可能同时满足以上所有的原则, 所以不可避免地要有一个折中的最佳方案。

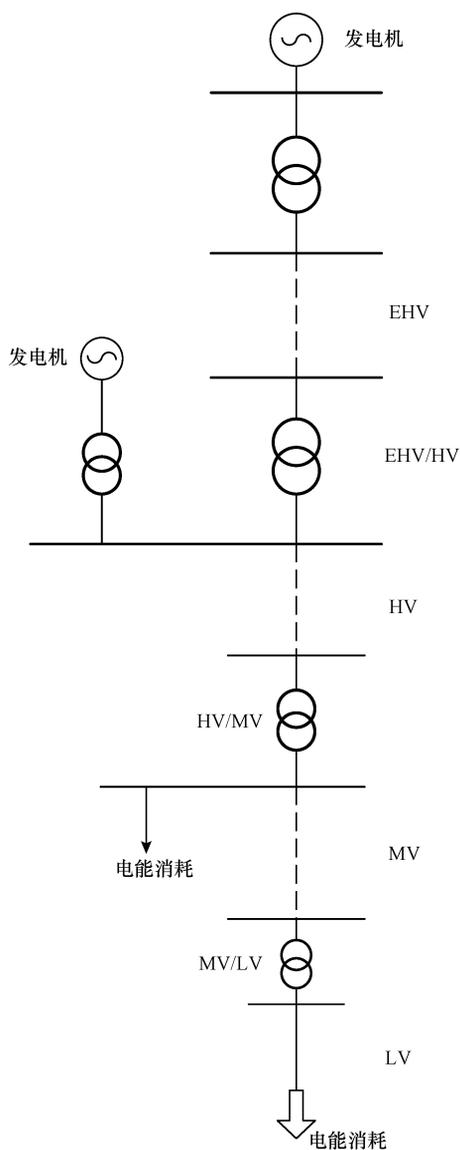


图 1.2 输配电系统块状图 (LAKERVI, E., and HOLMES, E. J.: “Electricity distribution network design”, Peter Peregrinus, 1995, 2nd Edn.; revised 2003)

## 1.4 保护范围

配置继电器的主要原则是将电力系统分为受保护的独立的区段，在发生故障时可以被隔离，以保证系统其他部分的正常供电。

大体上，一个电力系统可以划分为若干个保护区——发电机，变压器，发电机变压器组，电动机，母线和输电线。图 1.3 所示为一个具有多个保护区段的系统。值得注意的是，有些保护区段在一定范围内是互相重叠的，这就意味着若在重叠区段发生了故障，不止一个保护继电器要动作。选择合适的电流互感器与继电器相连，就可以使保护区段重叠，如图 1.4 所示。

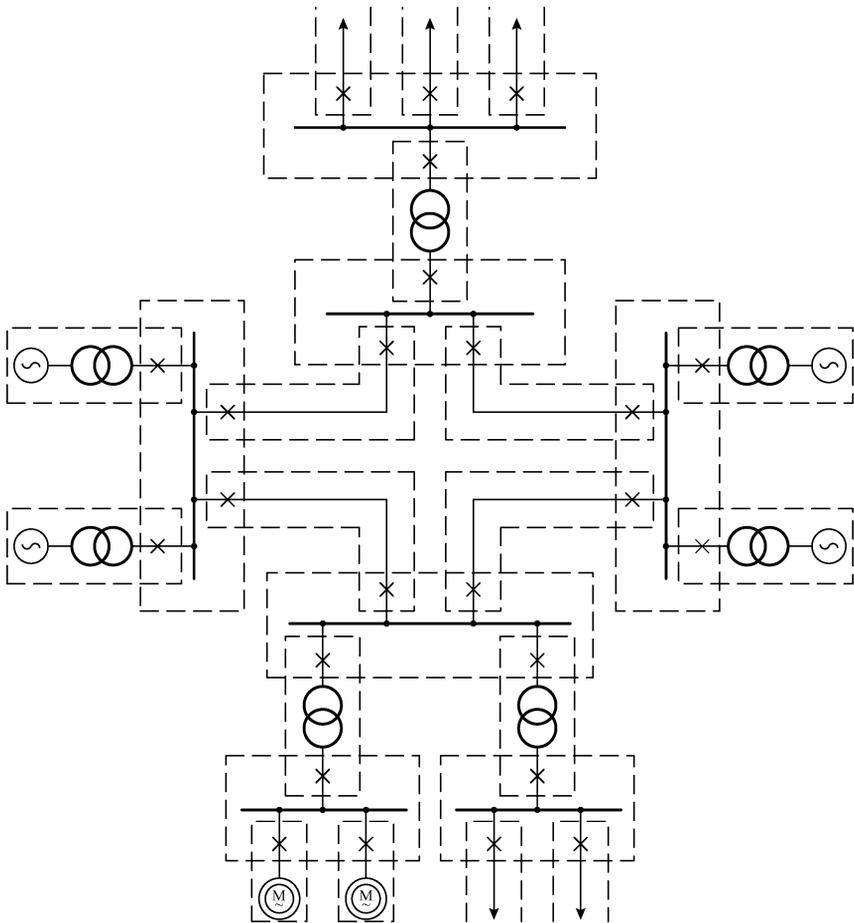


图 1.3 具有多个保护区段的系统

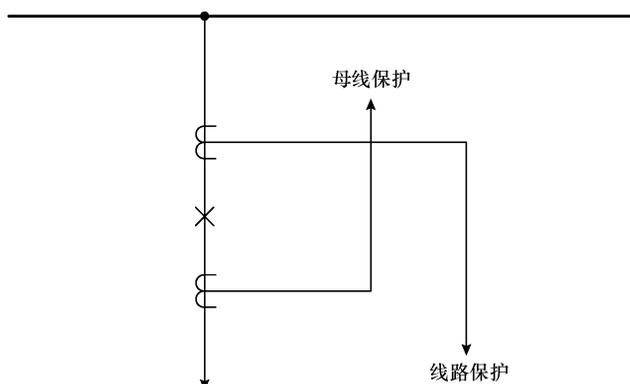


图 1.4 保护区段的重叠

## 1.5 主保护和后备保护

电力系统中所有的部分都应被可靠保护，因此继电器仅在发生故障时动作。有一些单项保护继电器，仅在保护区段内发生故障时动作。其他一些继电器则不仅可以发现特定区段内的故障，还可以发现相邻区段的故障，并作为相邻区段主保护的后备保护。这样，即使在相邻区段的主保护不动作时，故障段也可以被隔离。因此，只要有可能，电力系统中的每个部分都应配有主保护和后备保护。

### 1.5.1 主保护

保护单元发现故障时，主保护每次都应及时动作。一个保护单元的保护范围可以涵盖系统中一个或多个设备，如电动机、输电线、母线等。一个电力设备也可能配有多个主保护。但是，这并不意味着发生同一故障时这些保护都要动作。值得一提的是，系统中某一设备的主保护不一定和设备安装在一起；有些时候，保护设备也可能安装在附近的变电站中。

### 1.5.2 后备保护

主保护因故不动作时，后备保护动作。主保护和后备保护的传感器无论相同与否，后备保护都有延时装置来增加动作时间，以便主保护先行动作。一个继电器可以同时为多个设备提供后备保护。同样，一个电力系统设备也可以有多个后备保护继电器。一个继电器为某设备的主保护的同时，又是另一个设备的后备保护，这在电力系统中非常普遍。在这里解释一下与后备保护相关的术语——“冗余”。冗余是指保护系统的重复。后备保护则补充了主保护的不足，动作有适当的延时。

## 1.6 方向保护

一些保护装置的重要特性是可以分辨功率流向，当故障电流流向与继电器设定方向相反时，保护装置可以阻止相关开关设备开断。当故障电流形成双向环流时，具有这种特性的继电器非常适用于网状系统；或者是多个发电机电源的情况。在上述情况下，方向保护可以阻止开关设备不必要的开断，改善供电的安全性。在保护示意图上，方向保护一般在符号下面用箭头表示，箭头方向代表继电器动作的电流流向。

**例 1.1** 图 1.5 所示的电力系统示意图给出了多个故障情况，如保护装置和断路器没有正常动作而后备保护动作将故障隔离，继电器正确动作，继电器不必要动作等。图中，断路器符号下的箭头表示方向保护。

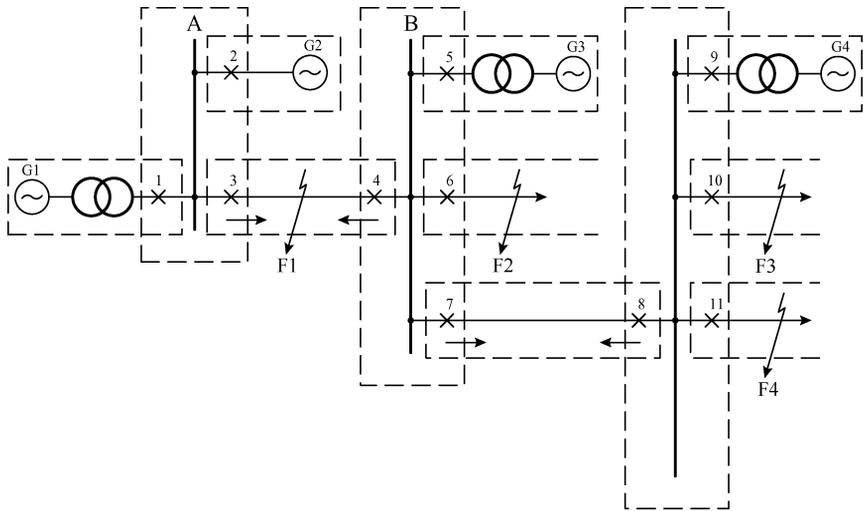


图 1.5 例 1.1 的电力系统示意图

表 1.1 给出了继电器/断路器的动作情况，包括断路器未断开、主保护和后备保护动作使断路器断开的情况。

表 1.1 例 1.1 的继电器/断路器的动作情况

故障情况	动作的断路器	误动或失灵的断路器	由主保护断开的断路器	由后备保护断开的断路器
F1	1, 2, 4	3	4	1, 2
F2	3, 5, 8	6	—	3, 5, 8
F3	10	—	10	—
F4	8, 11	8	11	—

对于故障情况 F1 来说，保护系统将断路器 4 正确断开，切断了故障电流馈入

的一端。断路器 3 没有正常动作，而由后备保护将断路器 1 和 2 断开，阻止故障电流由发电机 G1 和 G2 流向故障点。对于故障情况 F2，断路器 6 没有正常断开，断路器 3 和 8 的方向保护动作，断开由临近母线流向故障点的电流，断路器 5 的后备保护动作将断路器 5 断开，阻止发电机 G3 向故障点馈入电流。

对于故障情况 F3，断路器 10 正常动作断开故障点。对于故障情况 F4，应由断路器 11 动作切开故障点，所以断路器 8 不应动作。断路器 11 断开以前，故障电流总是由断路器 7 的馈电母线流向断路器 8。继电器 8 是方向继电器，如果电流是由断路器 7 流向断路器 8，继电器 8 不会动作。因此，故障情况 F1 和 F2 下继电器误动，主要是说明保护的互相配合问题；故障情况 F4 下继电器误动，主要是说明保护需要考虑的安全问题。

## 1.7 习题

### 习题 1.1

根据图 1.6 所示，考虑每种故障时断路器的动作，完成表 1.2。请注意，例

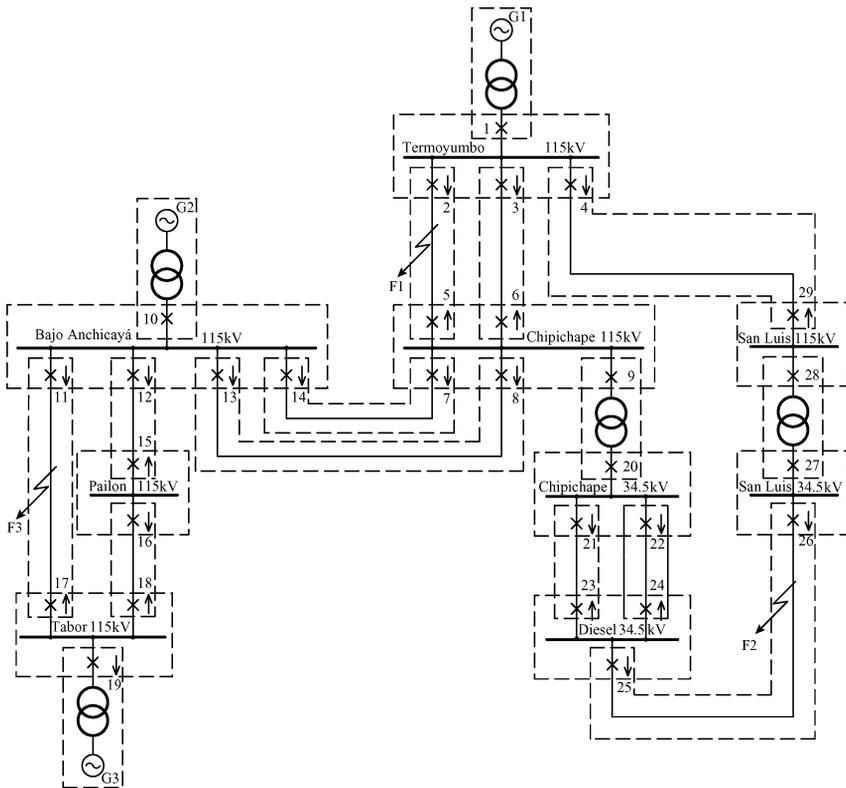


图 1.6 习题 1.1 的示意图

## 8 配电网保护

1.1 中，其中一些断路器是没有必要动作的。

表 1.2 习题 1.1 继电器/断路器动作情况

案例	动作的断路器	误动或失灵的断路器	由主保护断开的断路器	由后备保护断开的断路器
F1	2, 3, 4, 5		2, 5	
F2	21, 22, 23, 24, 27			
F3	10, 11, 17, 19			

## 第 2 章 短路电流的计算

电力系统发生短路故障时，电流会大大增加，因此电流可以用作检测系统是否发生故障的参数。鉴于此，本章将介绍关于短路电流计算的基本概念、过程及方法。尽管继电保护设置要仔细考虑短路电流计算，但要记住，这些计算还要满足其他条件，如变电站接地网计算、导体尺寸选择、断路器等设备的技术参数选择和计算等。

### 2.1 短路电流计算模型

电力系统发生故障时，由于等效系统阻抗的变化，电流中产生了衰减的直流分量，以及由电动机旋转产生的衰减的交流分量，从而使短路电流的幅值发生较大的变化。

#### 2.1.1 系统阻抗影响

由于故障点电阻和电抗的影响，故障发生时短路电流不会立即变化，而是有一个衰减的直流分量。衰减速度取决于故障发生时的电压值和故障点的功率因数。要进行相关计算，必须从故障发生的时刻  $t=0^+$  算起直至稳定状态，所以故障电流是随时间变化的，必须使用微分方程。要说明故障电流的瞬态情况，就要将配电网简化为  $RL$  回路。这种简化是非常重要的，因为要量化故障状态时的暂态参数，系统中所有的设备必须要建立等效的模型才能进行计算。

对于图 2.1 所示的回路，回路特性可用下式表示：

$$e(t) = L \frac{di}{dt} + Ri(t) \quad (2.1)$$

这是系数为常数的微分方程，其解分两部分：

$$i(t) = i_h(t) + i_p(t)$$

式中， $i_h(t)$  为对应于暂态过程的齐次方程的通解； $i_p(t)$  为对应于稳态过程的特解。

微分方程理论在这里不做详解，方程的完整解如下：

$$i(t) = \frac{V_{\max}}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{-(R/L)t}] \quad (2.2)$$

其中

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

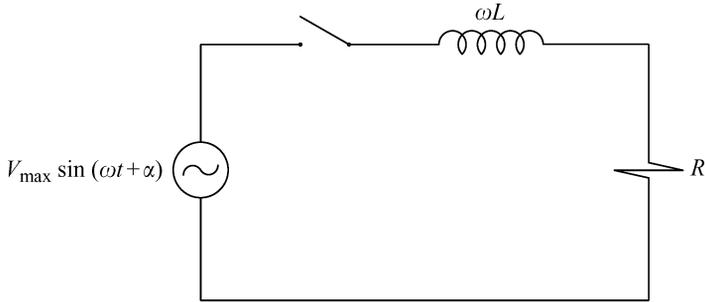


图 2.1 暂态分析学习的  $RL$  回路

式中， $\alpha$  为故障时相对于正弦电源电压的合闸角度。并且有

$$\phi = \tan^{-1}(\omega L/R)$$

由式 (2.2) 可以看出，第一个变量为正弦变化，第二个变量按时间常数  $L/R$  呈指数衰减。第一个变量对应于交流分量，第二个变量对应于电流的直流分量 ( $\alpha - \phi = \pm \pi/2$  时有最大的初始值， $\alpha = \phi$  时为 0，如图 2.2 所示)。而实际上是无法预知故障发生时的相角的，所以直流分量的幅值也是无法预知的。如果由于故障，正弦分量为负半周峰值时断路器动作，直流分量将在半个周波后达到理论上的最大值。

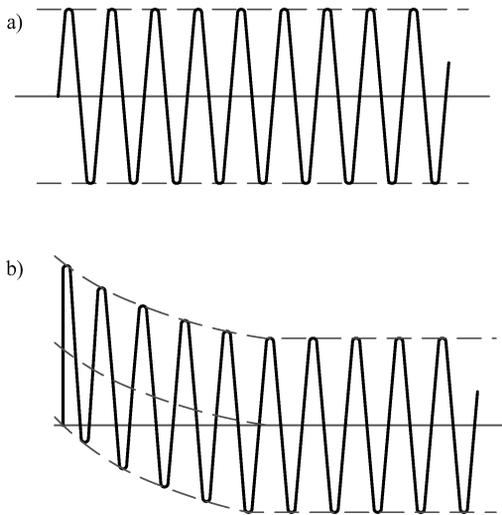


图 2.2 故障电流随时间变化曲线

a)  $\alpha - \phi = 0$    b)  $\alpha - \phi = \pi/2$

假设各分量为正交，可以用下面的近似公式来计算非对称电流（包括交直流分量）的有效值，且精度在可以接受的范围内。

$$I_{\text{rms, asym}} = \sqrt{I_{\text{rms}}^2 + I_{\text{DC}}^2} \quad (2.3)$$

### 2.1.2 旋转电机的影响

当故障接近于旋转电机端口附近时，会产生一个衰减的交流电流，和前面介绍的交流电压施加于  $RL$  回路时电流的特征相似。电流之所以会呈现衰减的趋势，是由于旋转电机中绕组的磁通量不可能立即改变。电流幅值之所以会降低，是由于感应电流产生的磁动势降低，引起磁通量减少，如图 2.3 所示。这就是所谓的电枢反应。

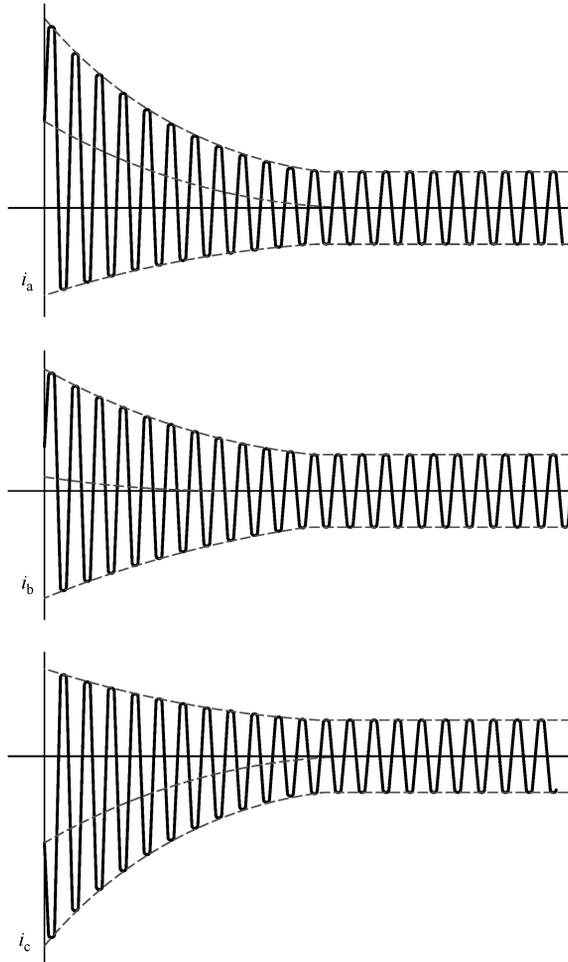


图 2.3 同步发电机的暂态短路电流

发电机的物理特性较为复杂，使得计算非常困难，但可以将发电机简单理解为一个随时间变化的感抗。在大多实际应用中，可以将发电机感抗的变化分为三个阶

段，这样并不会带来较大的计算误差。如图 2.4 所示，电流随时间变化的曲线  $I(t)$  可以大致分为三个阶段—— $I''$ 、 $I'$ 、 $I$ ，分别对应次暂态电流、暂态电流、稳态电流。在同一时间轴上对应的电抗值分别为  $X''_d$ 、 $X'_d$ 、 $X_d$ ，电抗随时间的变化曲线如图 2.5 所示。

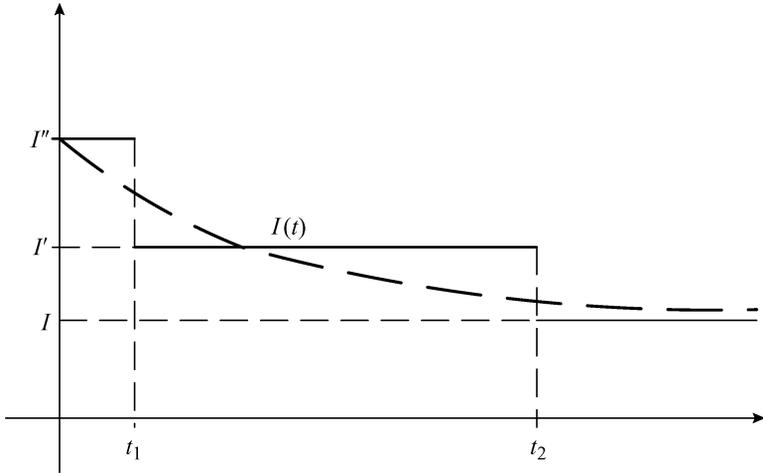


图 2.4 故障时电流随时间的变化曲线

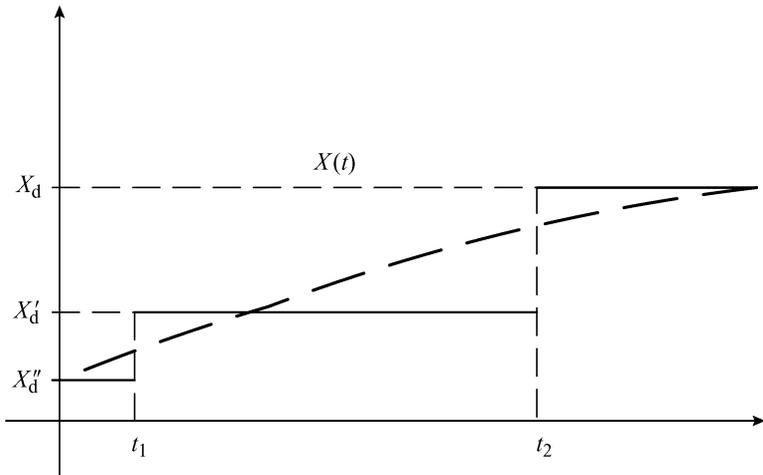


图 2.5 故障时发电机电抗随时间的变化曲线

### 2.1.3 故障种类

由于同步电机的电枢反应及电弧不可能立即熄灭的特性，在故障过程中短路电流变化很快。因此，要得到不同应用场合的正确电流值，必须认真计算短路电流。

下面的计算主要是针对开关设备和继保设备整定值的选择的，被称为正常整定

值。标准 ANSI/IEEE C37 和 IEC 6090 中定义了四个阶段的电流：第一周波/瞬时电流，峰值电流，开断电流，时延/稳态电流。

第一周波电流，也称为瞬时电流，是指故障开始后第一个半波的电流。在欧洲标准中用  $I_k'$  表示。这是故障发生时断路器保护设备测得的电流，因此也称为闭合和锁存电流。计算时采用电机次暂态感抗，计及直流分量，但不考虑交流分量的衰减。

峰值电流是指故障发生后第一周波的最大电流，与第一周波电流不同。第一周波电流是完全不对称的电流有效值 (rms)。

开断电流，即触头分离电流，是指必须由开关设备开断的电流值。在欧洲标准中，一般按 3~5 个周波计算。开断电流包含直流分量并考虑了交流分量的衰减。

时延/稳态电流是指第 6~30 个周波的电流值，不包含直流分量，忽略电机的同步和感应效应，采用暂态感抗或更高的值来计算。

根据标准 IEEE399-1990，不同阶段故障电流计算中所采用的感抗值如表 2.1 所示。对于每种情况来说，对称或非对称的电流有效值取决于是否考虑直流分量。有效值乘以  $\sqrt{2}$  为峰值。

不对称电流为直流分量和交流分量有效值的二次方根，即

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_{\text{DC}}^2 + I_{\text{AC}}^2} \quad (2.4)$$

### 2.1.4 故障电流计算

描述开关闭合电流时使用瞬时电流的概念。通常，在第一个半波后，交直流分量衰减至初始值的 90% 左右，其电流有效值为

$$\begin{aligned} I_{\text{rms, asym. closing}} &= \sqrt{I_{\text{DC}}^2 + I_{\text{AC, rms, sym}}^2} \\ &= \sqrt{(0.9 \sqrt{2}V/X_d'')^2 + (0.9V/X_d'')^2} \\ &= 1.56V/X_d'' = 1.56I_{\text{rms, sym}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

国际标准和制造厂通常取 1.6，在类似计算中一般也应按 1.6 计算。

峰值电流是直接将交、直流分量相加，交流分量要乘以  $\sqrt{2}$ ，如下：

$$\begin{aligned} I_{\text{peak}} &= I_{\text{DC}} + I_{\text{AC}} \\ &= (0.9 \sqrt{2}V/X_d'') + (0.9 \sqrt{2}V/X_d'') \\ &= 2.55I_{\text{rms, sym}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

当考虑开关开断电流时，一般使用开断电流有效值，计算如下：

$$I_{\text{rms, asym. int}} = \sqrt{I_{\text{DC}}^2 + I_{\text{AC, rms, sym, int}}^2}$$

用指数表达式代入置换直流分量

$$\begin{aligned} I_{\text{rms, asym. int}} &= \sqrt{(\sqrt{2}I_{\text{rms, sym, int}} e^{-(R/L)t})^2 + I_{\text{rms, sym, int}}^2} \\ &= I_{\text{rms, sym, int}} \sqrt{2e^{-2(R/L)t} + 1} \end{aligned} \quad (2.7)$$

表 2.1 第一周波电流和开断电流计算所用感抗值<sup>①</sup> (摘自标准 IEEE 399-1990)

电流计算	系统元件		中高压系统计算所用的感抗值, 依据标准 IEEE C37.010-1979 和 IEEE C37.5-1979	低压系统计算 所用的感 抗值 <sup>②</sup>
第一周波 (瞬时电 流计算)	电力 公司 电源	所有涡轮发电机, 所有带阻尼绕 组的水轮发电机, 所有调相机	$X_s$	$X_s$
			$1.0X_d''$	$1.0X_d''$
		无阻尼绕组的水轮发电机	$0.75X_d''$	$0.75X_d''$
		所有同步电机	$1.0X_d''$	$1.0X_d''$
	感应 电动 机	1000hp 以上	$1.0X_d''$	$1.0X_d''$
		3600r/min 时 250hp	$1.0X_d''$	$1.0X_d''$
		其他 50hp 及以上	$1.2X_d''$	$1.2X_d''$
		50hp 以下 <sup>③</sup>	$1.67X_d''$	$1.67X_d''$
开断电流 计算	电力 公司 电源	所有涡轮发电机, 所有带阻尼绕 组的水轮发电机, 所有调相机	$X_s$	N/A
			$1.0X_d''$	N/A
		无阻尼绕组的水轮发电机	$0.75X_d''$	N/A
		所有同步电机	$1.5X_d''$	N/A
	感应 电动 机	1000hp 以上	$1.5X_d''$	N/A
		3600r/min 时 250hp	$1.5X_d''$	N/A
		其他 50hp 及以上	$3.0X_d''$	N/A
		50hp 以下	忽略	N/A

① 对于中高压设备来说, 第一周波电流为瞬时电流; 对于低压设备来说, 第一周波电流即为开断电流。

② 感抗值 ( $X$ ) 用于计算低压断路器的故障电流 (见标准 IEEE C37.13-1990 和 IEEE 242-1986)。

③ 在复杂的多电压系统计算中, 小于 50hp 的电动机按中高压系统中的感抗计算。(见标准 IEEE 141-1993 的第 4 章)

注: 1. 同步旋转电机的  $X_d''$  为额定电压 (饱和) 下的纵轴次暂态感抗。

2. 同步旋转电机的  $X_d'$  为额定电压 (饱和) 下的纵轴暂态感抗。

3. 感应电机的  $X_d''$  除以额定电压下的锁定转子电流标么值, 结果为 1。

4. hp, 马力。1hp = 735.4W。

$I_{\text{rms, asym, int}}/I_{\text{rms, sym, int}}$  的表达式, 是根据标准 ANSI C37.5-1979, 由开关触头不同的分断时间和不同的  $X/R$  的值推导而来的。三相线对地故障的电流倍数如图 2.6 所示。

假设一个断路器的触头分断时间为 2 个周波, 第一个周波是继电器动作时间, 第二个周波是断路器机构的动作时间。频率为 60Hz,  $X/R = 50$ ,  $t = 0.033\text{s}$  为两个周波, 那么

$$(X/R) = (\omega L/R) = 50$$

$$(L/R) = (50/\omega) = (50/2\pi f) = 0.132$$

得出

$$\frac{I_{\text{asym}}}{I_{\text{sym}}} = \sqrt{2e^{-(0.033 \times 2)/0.132} + 1} = 1.49$$

这个数值与图 2.6 给出的数据相符。

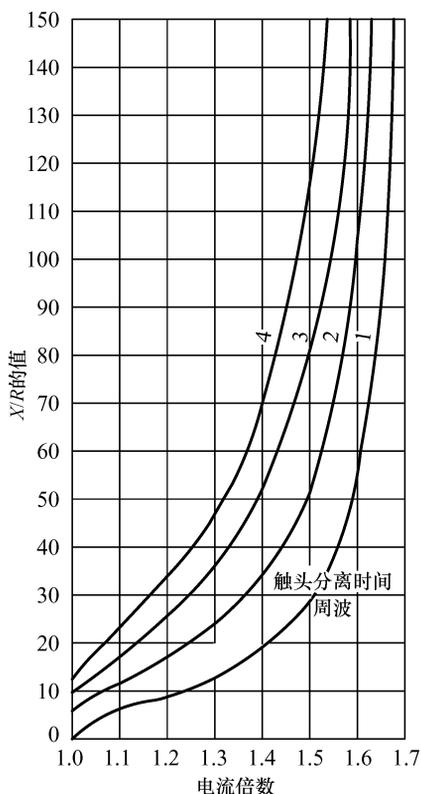


图 2.6 三相线对地故障的电流倍数 (总电流为基准)  
(见 IEEE C37.5-1979)

在设置时延继保的整定值时，一般都使用对称开断电流的有效值的概念。在设置瞬时整定值时，也要使用对称开断电流有效值的概念，但是要根据实际使用情况乘以一个系数，这将在后面讨论。

## 2.2 计算短路电流的方法

对称故障，如三相短路和三相接地，对故障点来说阻抗是对称的，系统仍然是平衡的，因此可以用单相回路来计算。不对称故障，如单相接地、两相短路、两相接地故障等，由于不能用单相回路来代替，计算较为复杂，因此需要一种简便的方法来进行不对称网络的计算。1918年提出了对称分量法，对于  $n$  相不对称系统，可以用原有相的对称分量组成的  $n$  相对称系统来代替。这种方法可以应用于任意相的不对称系统中，以下以三相不对称系统为例。

一个三相系统，每个矢量，如电压或者电流，都可以用三个分量来表示，这样

三相矢量就共有 9 个分量。三个对称相量如下表示：

1. 正序分量，包含三个等幅值的相差  $120^\circ$  的相量，顺时针方向旋转。
2. 负序分量，包含三个等幅值的相差  $120^\circ$  的相量，逆时针方向旋转。
3. 零序分量，包含三个等幅值的相量，相序相同，方向同正序分量。

如此，任意三相系统电压可表示为

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \\ V_c &= V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \end{aligned}$$

并可进一步表示为

$$\begin{aligned} V_b &= V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \\ V_c &= V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \end{aligned}$$

式中， $a$  为算子，使相量顺时针旋转  $120^\circ$ ，幅值不变，即  $a = 1 \angle 120^\circ$ 。 $a^2$  使相量顺时针旋转  $240^\circ$ ， $a^2 = 1 \angle 240^\circ$ 。

因此，可以列出如下关系矩阵

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

变换为

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

由此可以得出

$$\begin{aligned} V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\ V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\ V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \end{aligned}$$

以上推导对于电流同样适用

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_b &= I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \\ I_c &= I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} I_{a0} &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\ I_{a1} &= \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \end{aligned}$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c)$$

三相系统中，中线电流为  $I_n = (I_a + I_b + I_c)$ ，因此  $I_n = 3I_{a0}$ 。图 2.7 所示为三相不平衡系统的对称分量。

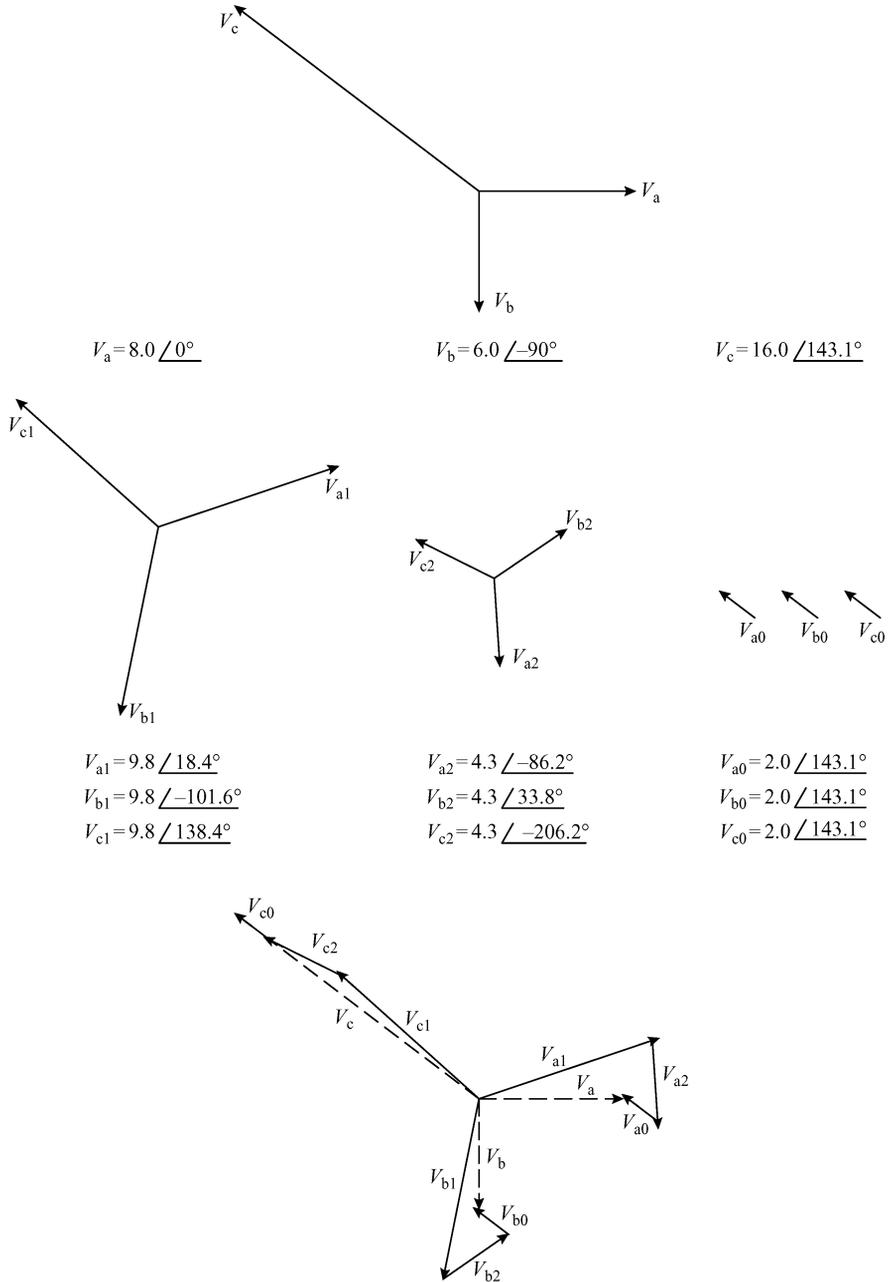


图 2.7 三相不对称系统的对称分量

### 2.2.1 各序网络的构建和重要性

顾名思义，仅流过正序电流的阻抗称为正序阻抗，仅流过负序和零序电流的阻抗称为负序和零序阻抗。在对称分量计算中，正序、负序和零序阻抗分别以  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_0$  表示。发电机提供三相平衡电压，出口电压仅有正序分量。因此正序网络中包含一个与正序阻抗串联的发电机电动势。负序和零序网络不包含发电机电动势，但包含负序和零序阻抗。

架空线和电缆的正序及负序阻抗相同，在供电电压平衡的情况下与相序无关。由于磁场产生的正序和负序电流与零序电流不同，零序阻抗和正负序阻抗有所区别。在没有详细参数的情况下，零序阻抗可以采用下面的系数：单回路线无接地线时  $Z_0/Z_1=2$ ，有接地线时为 3.5；双回路线  $Z_0/Z_1=5.5$ ；单芯电缆取 1~1.25，三芯电缆取 3~5。

由于在静态回路中，若供电电压对称，变压器的正序和负序阻抗与相序无关，因此正、负序阻抗相同。变压器接法不同，零序阻抗或与正负序阻抗相等，或为无穷大。而变压器绕组电阻很小，一般情况下在短路电流计算中可以忽略。

在为小型发电机和电动机建立短路计算模型时，可能要考虑电阻。但是，多数情况下仅考虑同步电机的感抗。正序感抗有三个值，分别为次暂态  $X_d''$ 、暂态  $X_d'$  和同步电抗  $X_d$ 。在短路计算中，必须根据电机特性和故障清除时间近似考虑发电机和电动机的暂态和次暂态电抗。次暂态电抗适用于短路发生起始阶段，在 0.1s 内故障水平变化，此时由暂态电抗决定，然后短路电流呈指数衰减至稳态，这一阶段由同步电抗决定。典型的三相同步电机感抗的标幺值如表 2.2 所示。

表 2.2 典型的三相同步电机感抗的标幺值

电机类型	$X_d''$	$X_d'$	$X_d$	$X_2$	$X_0$
汽轮机 (2 极)	0.09	0.15	1.20	0.09	0.03
发电机 (4 极)	0.14	0.22	1.70	0.14	0.07
凸极 (带阻尼绕组)	0.20	0.30	1.25	0.20	0.18
发电机 (不带阻尼绕组)	0.28	0.30	1.20	0.35	0.12

在综合考虑各序网络时，正序和负序网络的参考母线即为发电机中性点，因为正序和负序网络中发电机中性点为地电位，所以只有零序电流流过中性点到大地间的阻抗。零序网络的参考母线为发电机的接地点。流过中性点和大地之间的阻抗  $Z_n$  的电流为零序电流的 3 倍。图 2.8 所示为同步发电机的等效各序网络和电流，零序网络中每相仅有零序电流流过，零序阻抗为  $Z_0=3Z_n+Z_{e0}$ 。

每相电压电流分量由各序网络的公式得到。如图 2.8 所示，由 a 相相对于参考母线的 a 点，可以推导出该系统 a 相的电压分量，即

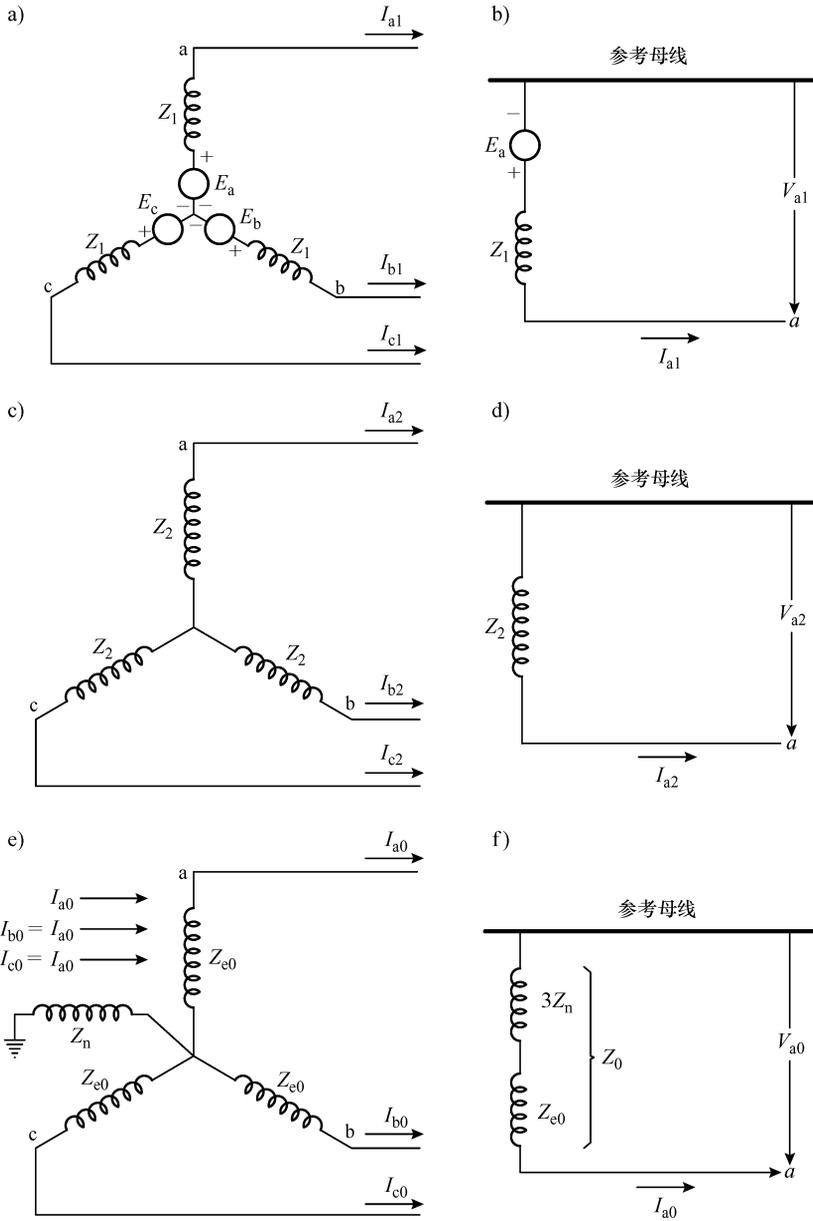


图 2.8 同步发电机的等效各序网络和电流

a) 正序电流 b) 正序网络 c) 负序电流 d) 负序网络 e) 零序电流 f) 零序网络

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1$$

$$V_{a2} = -I_{a2} Z_2$$

$$V_{a0} = -I_{a0} Z_0$$

式中,  $E_a$  为正序网络的空载对地电压;  $Z_1$  为发电机正序阻抗;  $Z_2$  为发电机负序阻抗;  $Z_0$  为发电机零序阻抗 ( $Z_{g0}$ ) + 3 倍对地阻抗。

以上各公式适用于任一流过不平衡电流的发电机, 也是进行各种类型故障电流计算的基础。等效的电力系统或有载发电机也可以使用以上方法, 那么  $E_a$  就表示故障发生前感抗后面的电压。

## 2.2.2 使用对称分量法进行不对称故障计算

正序、负序和零序网络, 分别流过电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_0$ , 按一定方式组合起来, 就可表示一个不平衡故障的情况。为了使用对称分量法进行故障水平计算, 首先要确定各序阻抗, 将它们组合成正确的阻抗网络。然后针对每种故障种类, 选择相应的阻抗网络, 以确定故障电流和电压的关系。

### 2.2.2.1 单相接地故障

单相接地故障一般为永久故障, 如果 a 相接地, 则  $I_b = 0$ ,  $I_c = 0$ ,  $V_a = 0$ 。由上述公式可以推出,  $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = E_a / (Z_1 + Z_2 + Z_0)$ , 因此各序网络为串联, 如图 2.9a 所示。当 b 相和 c 相开路故障时电压和电流情况与 a 相接地时类似, 各序网络的组成和连接也是类似的。

### 2.2.2.2 相间短路故障

若永久故障, 如 b 和 c 相间短路, 则  $I_a = 0$ ,  $I_b = -I_c$ ,  $V_b = V_c$ 。同样, 可以推出  $I_{a0} = 0$ ,  $I_{a1} = E_a / (Z_1 + Z_2) = -I_{a2}$ 。此种情况, 没有零序电流和零序网络, 整个等效网络由正序和负序网络并联而成, 如图 2.9b 所示。

### 2.2.2.3 两相接地故障

若永久故障, 如 b 和 c 同时接地, 则  $I_a = 0$ ,  $V_b = V_c = 0$ 。同样, 可以推出下式:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + [(Z_0 Z_2) / (Z_0 + Z_2)]}$$

各序网络并联连接, 如图 2.9c 所示。

## 2.2.3 电力系统等效阻抗

要研究系统发生变化后产生的影响时, 首先必须将系统用各序阻抗表示。等效的正序和负序阻抗要用下式来计算:

$$Z = V^2 / P$$

式中,  $Z$  为等效正序和负序阻抗;  $V$  为额定相电压;  $P$  为三相短路功率。

等效零序网络可以由单相故障时各序分量的表达式推导, 如  $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = V_{LN} / (Z_1 + Z_2 + Z_0)$ ,  $V_{LN}$  为线对中性点电压。

对架空线和电缆来说, 正序和负序阻抗相等。在大多数配电网故障中, 发电

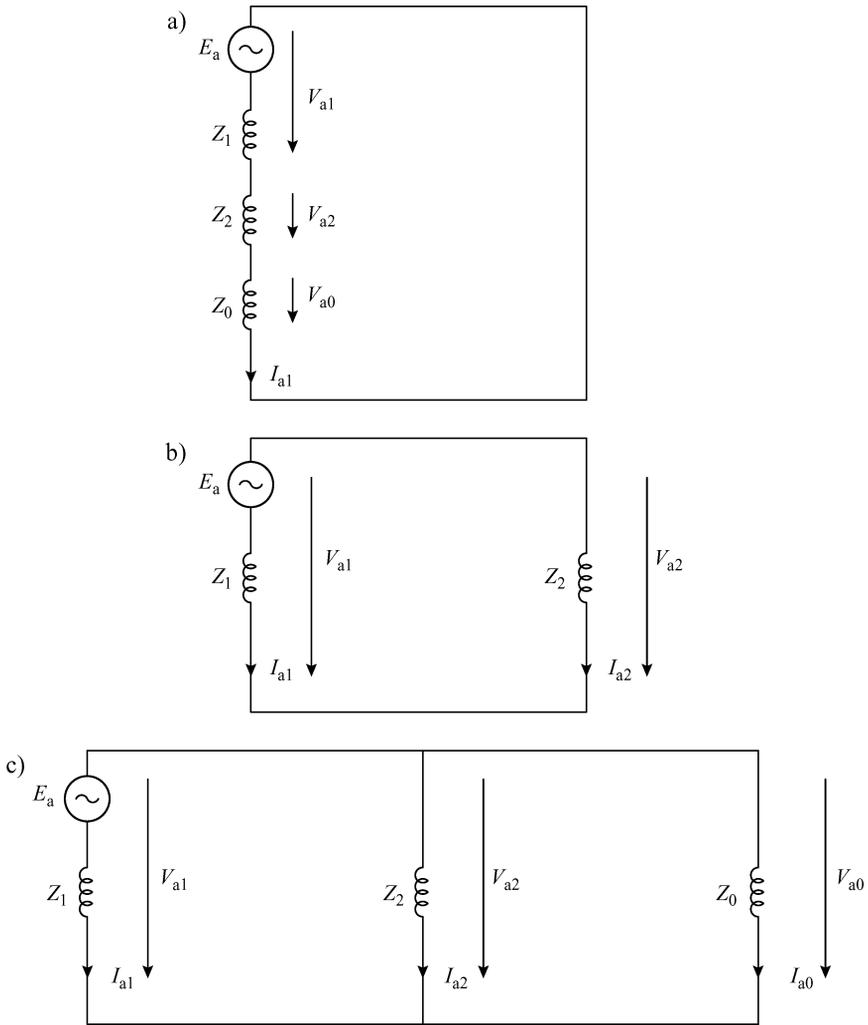


图 2.9 不对称故障的各序网络连接

a) 单相接地故障 b) 相间短路故障 c) 两相接地故障

机阻抗所占比例不大，因此可以假设  $Z_2 = Z_1$ ，这样可以大大简化计算。公式就简化为  $I_a = 3I_{a0} = 3V_{LN} / (2Z_1 + Z_0)$ ， $V_{LN}$  为线对中性点电压， $Z_0 = (3V_{LN} / I_a) - 2Z_1$ 。

### 2.3 保护系统的电流和电压信号

故障时，流过电流互感器的电流正比于被保护设备的故障电流，而不需区分各序分量的相量幅值。因此，多数情况下，继电器主要是根据故障电流和/或电压动作的，而不考虑各序分量。然而需要强调的是，对称分量法的优点主要是易于计算

故障水平，虽然多数情况下继电器动作并不用区分对称分量的各序值。

图 2.10 给出了各种故障情况下电流和电压的正序和负序值，以及总幅值。继电器动作一般都是按图中右侧的总幅值来整定。但是，也有继电器动作是按各序分量值整定的。这种情况下，要获得各序分量值，就要通过数学计算，使用合适的滤波器，得到相应各序分量的电压电流值。滤波器可以采用电磁器件，但是随着电子技术的发展，越来越多的逻辑电路中都开始使用电子器件。在接地故障保护中负序分量的获得就需要采用电子滤波器。

a)				b)					
故障	正序网络 网络电流	负序网络 网络电流	零序网络 网络电流	故障 电流	故障	正序网络 网络电压	负序网络 网络电压	零序网络 网络电压	故障 电压
a, b, c					a, b, c				零 a <sub>1</sub> 故障
a, b					a, b				
b, c					b, c				
c, a					c, a				
a, b, e					a, b, e				
b, c, e					b, c, e				
c, a, e					c, a, e				
a, e					a, e				
b, e					b, e				
c, e					c, e				

图 2.10 各种故障情况下的电压和电流

a) 各种故障情况下的各序电流分量 b) 各种故障情况下的各序电压分量

## 2.4 用计算机进行故障计算

计算故障水平的步骤如下：首先，通过分析画出系统示意图；确定所有设备的各序阻抗；计算临近系统的戴维南等式；确定背景数据，包括电机阻抗、导体直径和长度、电源特征、接地阻抗值等。获得了以上所有数据后，可以更新系统示意

图，标出各个基本设备的正序阻抗值。然后，正序、负序和零序网络就可以建立起来，以计算故障电压和电流。

已经获得了所有的基本信息后，对于计算机来说，进行复杂的电力系统故障计算的过程都是一样的。但是，小系统仍然可以通过手工计算，因为短路计算并不需要迭代过程。目前很大一部分软件都采用了互动算法，其主要特点就是人机会话。这种方法大大优于以前使用的批处理方法。互动程序将计算结果打印或显示在屏幕上，用户可以检查计算结果并选出其中较为重要的一些数据。这种方法大大加快了故障计算，用户仅需要懂得如何使用和控制程序即可（如什么时候停止/检查、查询文件、打印等）。此外，程序还允许用户改变参数，如故障类型、故障母线和阻抗值等。

现代的软件包可以实现以下功能：

- 不仅可以计算标准故障类型，如三相短路、两相短路、两相接地短路、单相接地短路等；还可以计算特殊故障，如不同电压水平的系统间故障。
- 通过计算结果分析各个不同因素是否与故障点有关，显示故障影响（各序和各相值）。
  - 涵盖故障前的系统参数。
  - 可根据 IEEE 和 IEC 的标准计算各种故障水平，而由于基于不同的标准故障前的电压水平可能有所不同。
  - 计算瞬时故障水平。
  - 计算不同线路长度的故障水平。

## 第 3 章 继电器的类别和功能

继电器就是可以感知信号（通常来自电压和/或电流源）变化的设备。如果输入信号的幅值超过预先设置的整定值，继电器将动作，通常会闭合或打开触头以执行下一步的动作，如断开断路器。

### 3.1 分类

继电器可以按结构、输入信号和功能的不同来进行分类。

#### 3.1.1 按结构分类

- 电磁型
- 固态
- 微机/微处理器
- 数字
- 非电量（热、压力等）

#### 3.1.2 按输入信号分类

- 电流
- 电压
- 功率
- 频率
- 温度
- 压力
- 速度
- 其他

#### 3.1.3 按功能分类

- 过电流
- 方向性过电流
- 距离
- 过电压
- 差动

- 反向功率
- 其他

### 3.1.4 电气继电器的国际分类

下面列出了国际标准中常用继电器的通用类别，这些继电器在后面的章节也会用到。

- 21 距离继电器
- 24 电压/频率
- 25 同步或同步检查设备
- 26 热设备
- 27 欠电压继电器
- 32 反向功率继电器
- 37 欠电流或欠功率继电器
- 40 励磁继电器
- 41 场断路器
- 43 人工转接或选择设备
- 46 负序电流继电器
- 47 负序电压继电器
- 49 热继电器
- 50 瞬时过电流继电器
- 51 过电流延时继电器
- 52 断路器
- 55 功率因数继电器
- 59 过电压继电器
- 60 电流或电压平衡继电器
- 62 延时继电器
- 63 压力继电器（用于液体或气体的位置或流动）
- 64 接地保护继电器
- 67 方向过电流继电器
- 68 闭锁继电器
- 74 报警继电器
- 78 失步继电器
- 79 重合闸继电器
- 81 频率继电器
- 85 载波或导引线接受继电器
- 86 联锁继电器

87 差动继电器

94 辅助脱扣继电器

在有些情况下，在数字前加一个字母，表示使用位置，如 G 表示发电机，T 表示变压器。本书不涉及非电量继电器。

## 3.2 电磁继电器

电磁继电器由电气元件、磁性元件和机械元件组成，有一个操作线圈和多个触头，结构结实且工作可靠。之所以称为电磁继电器主要是由于其磁性元件。根据结构不同，电磁继电器可以分为三类。

### 3.2.1 吸引继电器

吸引继电器可由交流或直流供电，由线圈产生的磁场吸引一个金属片来实现操作。吸引继电器主要有两类。一类是衔铁式继电器，如图 3.1 所示，当金属片（衔铁）被线圈吸引时，转轴动作使动静触头吸合。衔铁部分还与动触头连动，衔铁被吸住时不同结构的继电器可打开或闭合。另外一类是螺线管式继电器，如图 3.2 所示，当活塞被螺线管的磁场轴向吸引时，可实现动静触头的吸合或断开，而活塞与动触头连动。

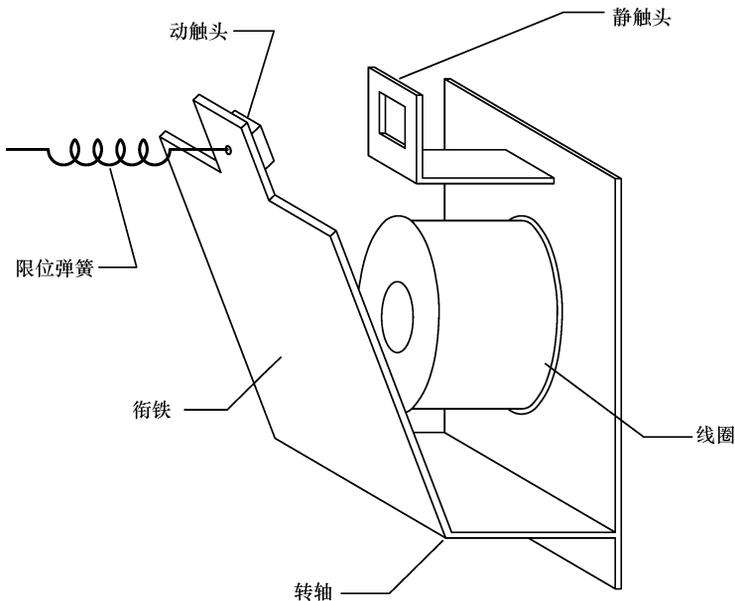


图 3.1 衔铁式继电器

由图 3.2 可知，活塞所受的力为  $K_1 I^2 - K_2$ ， $K_1$  取决于螺线管的线圈匝数、气

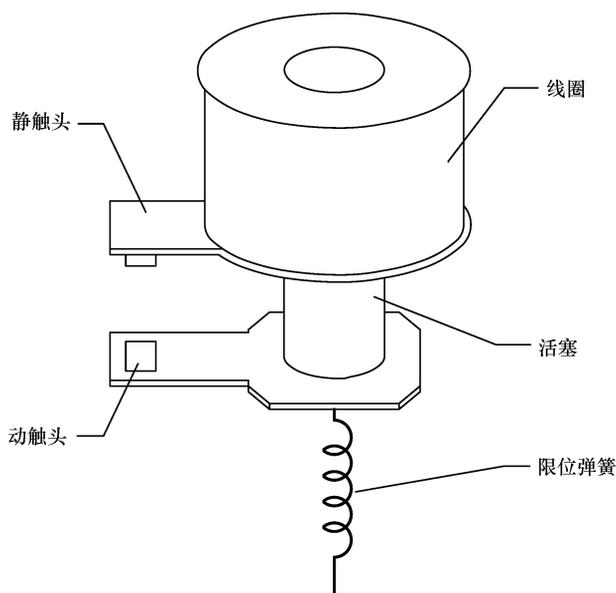


图 3.2 螺线管式继电器

隙、有效截面、磁场回路的磁阻等。 $K_2$  为保持力，通常由弹簧提供。继电器平衡时，活塞所受的合力为 0， $K_1 I^2 = K_2$  因此  $I = \sqrt{K_1 / K_2} = \text{常数}$ 。为了控制继电器动作值，弹簧保持力或者螺线管电阻可以调节，这样就可以改变活塞所受的力。吸引继电器没有时延，因此广泛用于要求瞬时动作的场合。

### 3.2.2 带移动线圈的继电器

此类继电器包含一个永磁体，一个小的转动线圈可以在永磁体的两极间自由旋转或固定。线圈由两个弹簧提供电流，并限制线圈位置。

线圈产生的力矩为

$$T = BlaNi$$

式中， $T$  为力矩； $B$  为磁通密度； $l$  为线圈长度； $a$  为线圈直径； $N$  为线圈匝数； $i$  为线圈电流。

由以上公式可知，线圈产生的力矩正比于电流。运动的速度由阻尼运动控制，又与力矩成正比。这样，此种继电器就具有类似图 3.3 所示的反时限特性，线圈可能旋转较大的角度，如  $80^\circ$ 。

### 3.2.3 感应继电器

感应继电器仅在交流电源下工作，主要由电磁系统构成。感应继电器包含一个可动导体，通常为圆盘状或杯状，在交变磁场中感应出寄生的福柯电流（Foucault

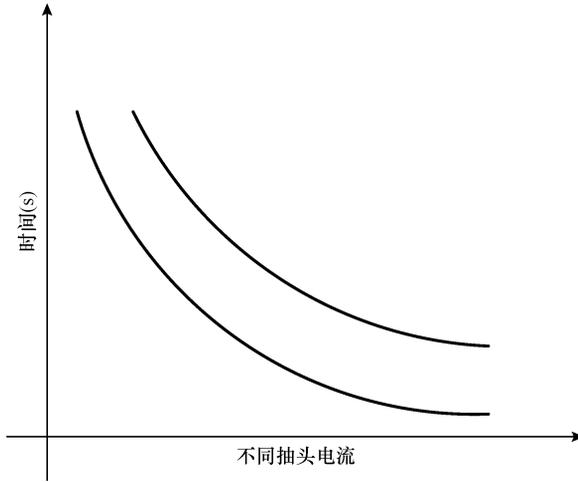


图 3.3 反时限特性

current), 与交变磁场相互作用而使继电器动作。在工作过程中涉及两个磁通量: 一个为交变磁场磁通, 一个为感应磁通。两者相互作用, 改变对方的角度和位置, 并产生一个力矩, 可表示为  $T = K_1 \Phi_1 \Phi_2 \sin \theta$ 。其中,  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  为相互作用的磁通;  $\theta$  为  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  间的夹角。磁通异相夹角为  $90^\circ$  时力矩最大, 磁通同相夹角为  $0^\circ$  时力矩最小。

已知  $\Phi_1 = \Phi_1 \sin \omega t$ ,  $\Phi_2 = \Phi_1 \sin(\omega t + \theta)$ ,  $\theta$  为  $\Phi_2$  领先于  $\Phi_1$  的相角, 那么可知

$$i_{\phi_1} \propto \frac{d\Phi_1}{dt} \propto \Phi_1 \cos \omega t$$

以及

$$i_{\phi_2} \propto \frac{d\Phi_2}{dt} \propto \Phi_2 \cos(\omega t + \theta)$$

图 3.4 所示的感应继电器的电磁力给出了电流和反向力的关系。因此, 有

$$\begin{aligned} F &= (F_2 - F_1) \propto (\Phi_2 i_{\phi_1} - \Phi_1 i_{\phi_2}) \\ F &\propto \Phi_2 \sin(\omega t + \theta) \Phi_1 \cos \omega t - \Phi_1 \sin \omega t \Phi_2 \cos(\omega t + \theta) \\ F &\propto \Phi_1 \Phi_2 [\sin(\omega t + \theta) \cos \omega t - \sin \omega t \cos(\omega t + \theta)] \\ F &\propto \Phi_1 \Phi_2 \{ \sin[(\omega t + \theta) - \omega t] \} \\ F &\propto \Phi_1 \Phi_2 \sin \theta \propto T \end{aligned}$$

感应继电器可以分为以下三类:

(i) 屏蔽磁极继电器

一部分的电磁线圈被铜环或铜线圈短路, 引起短路部分的磁通发生变化, 使之

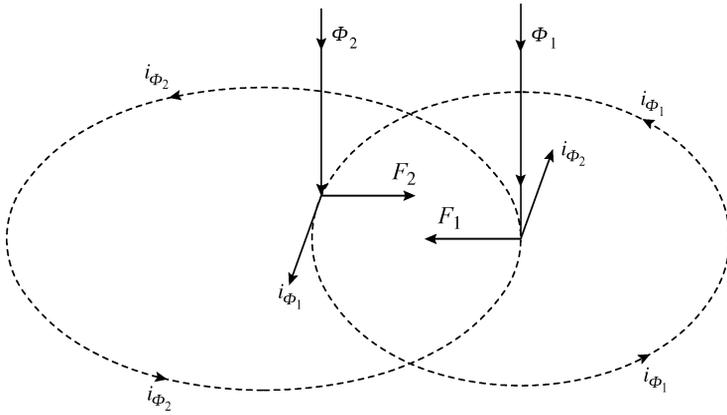


图 3.4 感应继电器的电磁力

滞后于没有屏蔽的部分的磁通（见图 3.5）。

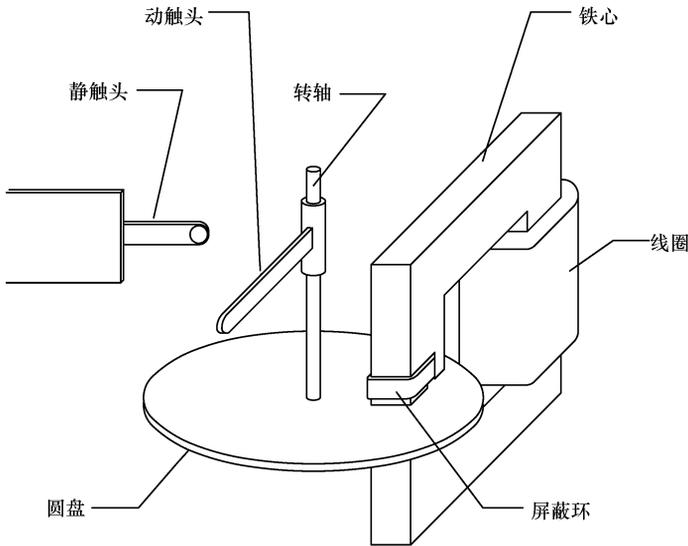


图 3.5 屏蔽磁极继电器

(ii) 瓦特式继电器

瓦特式继电器常见的结构是在圆盘上下方都有线圈，接入不同的电流，或者仅给上部线圈供电，由于存在气隙下部线圈中就感应出一个异步的磁通，图 3.6 所示为瓦特式继电器。

(iii) 杯式继电器

杯式继电器有一个柱状结构和一个固定的中部铁心，杯状结构可以在各极线圈间和环装气隙中旋转（见图 3.7）。

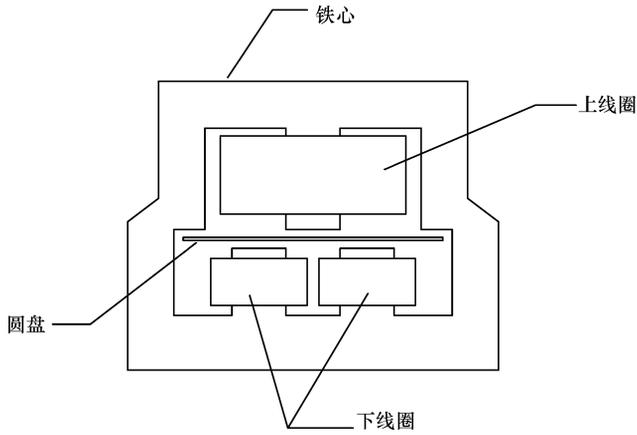


图 3.6 瓦特式继电器

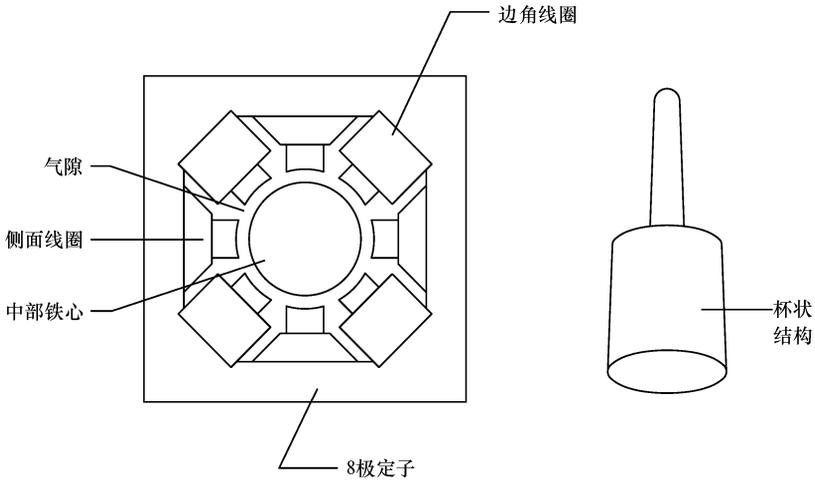


图 3.7 杯式继电器

这种继电器很像凸极感应电机，在杯状结构的周围对称分布 4 个或 8 个极，杯状结构的运动可以被触头和限位器轻度限制。一个特殊的弹簧提供限位力矩，限位力矩可表达为流过两个线圈的电流及两者夹角余弦值的公式，即

$$T = [K_1 I_1 I_2 \cos(\Theta_{12} - \Phi) - K_s]$$

式中， $K_1$ 、 $K_s$  和  $\Phi$  为设计常数； $I_1$ 、 $I_2$  为流过两个线圈的电流； $\Theta_{12}$  为  $I_1$ 、 $I_2$  的夹角。

前面提到的头两种继电器，如瓦特式继电器中圆盘的惰性使继电器具有时延特性，且增加永久磁铁可延长时延。杯式继电器惰性较小，大多用在快速动作的情况，如瞬时单元中。

### 3.3 保护继电器的发展

继电保护是由早期吸引式的继电器发展起来的。然而，由于近年来微处理器和信号处理技术的快速发展，继电保护在设计上发生了巨大的变化。随着电子技术的进步，从20世纪60年代起，使用晶体管和类似电子器件的电子或静态继电器开始逐步取代电磁继电器。集成电路的发展促进了静态继电器设计的进一步扩展和改进。20世纪80年代首次出现了可编程微处理器继保，或称为微机控制多功能继保。紧接着，20世纪90年代，随着微处理器和数学算法的改进，数字继电器由于其强大的功能、低廉的价格和良好的可靠性而被大量使用。

### 3.4 数字保护

#### 3.4.1 概述

数字继保的基本原理就是采集输入信号，通过控制输出信号来保护或者控制被监控的系统。比如说，对于系统电流和/或电压，采集的信号并不是连续的，而是一次采集一个数值。在得到输入波形的采样值后，根据一定的算法将采样值处理和计算，得到一个可以代表输入量的值。一旦输入量值确定，就可以和整定值或参考值比较，或采取其他必要的一些行动。由于使用的算法和系统设计不同，一个采样周期可能会多次计算输入量值，或者在很多采样周期内仅计算一次。

多数数字继电器都有很多功能，可以被视为智能电子设备（Intelligent Electronic Device, IED）。要正确实现所有功能，就要求为用户提供一个灵活的可编程逻辑平台，使用户可以灵活应用现有功能，并可以专门设置参数以满足特定系统的要求。多数数字继电器都植入了可编程I/O、可扩展的通信功能、先进的人机接口（Human Machine Interface, HMI），可以轻松实现各种功能。

#### 3.4.2 数字继电器的特点

如前所述，数字继电器技术上是优于传统继电器的。它们的主要特点如下：

- 运行可靠性。数字继电器误动作的概率要低一些。
- 自我诊断功能。数字继电器有看门狗电路，可以不间断地进行系统自我诊断，包括存储检查和模拟输入模块检查。若保护内部发生故障，继电器会根据故障类型，自动闭锁或尝试自行恢复。
- 事故和干扰记录。数字继电器可进行事故记录，如保护动作情况、状态输入或任何硬件的故障。此外，状态输入、继电器输入信息、模拟量通道都可能产生干扰记录。
- 集成的数字系统。如今的变电站中可能包含很多其他的功能，如通信、测

量和控制。这些功能可以集成在一个数字系统中，这样变电站就可以运行得更为可靠，动作更为迅速。现在光纤广泛应用在系统元件间的通信连接上，可以避免使用金属导体带来的干扰问题。

- 广泛的保护适应性。数字继电器具备可编程和通信能力，可以满足各种情况的保护要求。继电器整定值可以根据网络运行情况改变，确保了最适合的实时继保整定值，而不是根据系统最严重情况进行整定。因为实际上，根据系统最严重情况进行保护整定往往不是最佳的方案。由于保护需要快速响应，继保整定的算法语言往往都是低级编程语言，如 Pascal 或者 Fortran，而不是采用高级编程语言。

### 3.4.3 数字继电器的典型结构

数字继电器由多个功能模块组成。图 3.8 所示为典型的数字继电器结构。

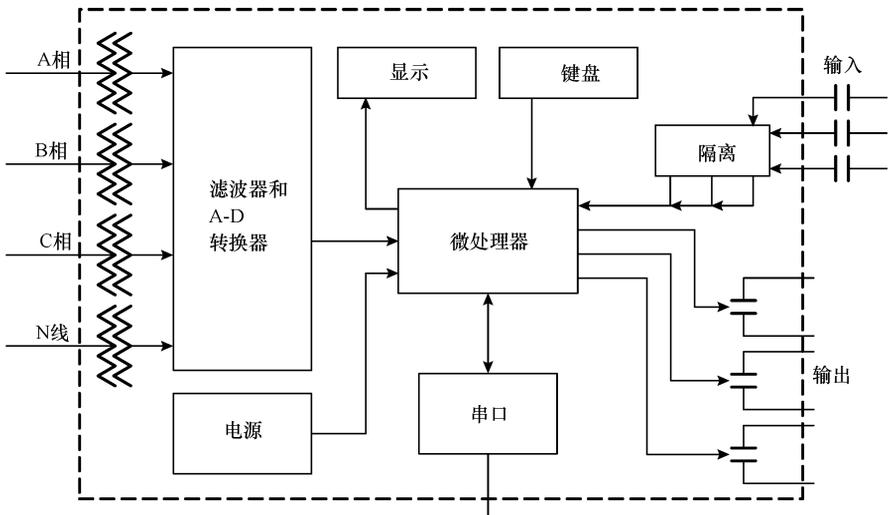


图 3.8 典型的数字继电器结构

数字继电器的主要模块如下：

- 微处理器。负责保护算法的处理。其存储模块包含两个部分。
  - RAM（随机存储器），保存进入处理器的输入数据和完成保护算法所必需的信息。
  - ROM（可读存储器）或 PROM（可编程可读存储器），用于永久保存程序。
- 输入模块。接收由变电站而来的模拟信号，并将信号送入微处理器。输入模块通常包含以下元件：
  - 模拟滤波器，为有源低通滤波器，消除电源线上感应的背景噪声。
  - 信号转换器，将电流互感器的信号转换为标准的直流信号。
  - 模数（A-D）转换器，将标准直流信号转换为二进制数字信号，进入微处理

器或通信缓冲器。

- 输出模块。转换微处理器的响应信号，并将信号传送至外部控制元件。主要由一个数字输出接口和一个信号转换器组成，数字输出口产生一个脉冲作为响应信号，信号转换器将信号放大并将脉冲隔离。

- 通信模块。包含并行和串行通信接口，使继电器和变电站的控制和通信系统可以互连。

### 3.4.4 数字继电器的标准功能

多功能数字继电器本质上与单功能保护继电器是相似的。两者都必须与辅助设备相连，以构成一个完整的保护和控制系统。单功能的电磁继电器，与保护器件、开关、仪表、指示灯相连。而对于多功能的数字继电器，只需要输入逻辑整定数值，不需要另外连接保护和控制元件。输入逻辑整定数值，实际上就等效于电磁继电器中的物理连接。数字继电器就是一个将多功能保护、控制、输入/输出器件集成在一起的独特的保护控制系统。

#### (i) 保护

数字继电器一般包括以下几个保护功能：三相正向/全向过电流；接地故障正向/全向过电流；负序过电流；正向功率；过激磁；过电压和欠电压；超频和低频；距离；场损耗；差动；断路器故障；自动重合闸；断路器监控和自动重合闸。

#### (ii) 测量

数字继电器通常包含大量的测量功能：对三相电流和电压采样，并采用离散傅里叶变换（Discrete Fourier Transform, DFT）的算法进行处理；测量参数，包括电压、电流、频率、功率因数、视在功率、无功功率、有功功率；测量值可通过串口或 HMI 等通信接口输出。

#### (iii) 控制

多数数字继电器至少包含一个断路器虚拟控制开关和几个虚拟交换机，通过本地 HMI 或者远程通信的接口来控制。断路器虚拟控制开关可以分断或闭合选定的断路器，虚拟负荷开关可以分断或闭合其他的负荷开关和断路器，或者启动/停用某些功能。

#### (iv) 通信

对于数字继电器，继电器和电力系统的信息都是通过 ASCII 接口远程传输的，输入整定值、接收报告、测量信息和执行控制命令等也是如此。继保装置前面板上的通信端口为临时的本地通信接口，后面板的接口为远程通信接口。

面板上的通信接口可与计算机、终端、串口打印机、调制解调器、中间逻辑通信/控制接口（如 RS-232 串行多路复用器）等连接。多数数字继电器通信协议支持 ASCII 和二进制传输。ASCII 用于传送和接收可读数据和命令。二进制数据用于计算机通信和故障波形图原始数据的传输。多数数字继电器至少兼容以下通信协议

中的一种——Modbus、DNP、Courier、IEC 608750-5、IEC 61850。本书第 13 章将给出目前基于 IEC 61850 的继电器通信方面的各种信息。

#### (V) 记录和报警

故障报警功能可以记录和报告继电器发现的故障信息。最基本的故障报告功能是加一个标记表明故障类型。数字继电器还可以提供更为先进的故障报告功能，包括故障总结报告、事故顺序的记录报告、波形图记录等。而且，这些信息还可以下载为 COMTRADE 文件，可以用多个应用程序打开。IEEE C37.111-1999 定义了文件格式，其中包含从电力系统收集的瞬态波形和事件数据。

数字继电器的设置是采用逻辑等式的方式，故障报告功能是利用跳闸符号开始目标文件记录，并在故障时刻记录故障电流幅值。HMI 利用跳闸符号显示相应的目标，并用 LED 灯表示。断路器监控功能用跳闸符号开始计算断路器的动作时间。

启动符号用来标定故障总结记录的时间，确定从故障发生至结束的时间长度（即故障持续时间），控制波形图数据的记录。HMI 还可以利用启动符号控制脱扣指示灯（LED）的闪烁，设置成批选择功能以防止故障中单组设置被改变。

### 3.5 继电器供电

继电器为直流或交流供电，一般不可交直流通用。测量互感器可提供电压和/或电流信号，并为交流回路供电。主继电器一般直接与供电系统相连。交流信号为继电器控制回路供电，控制回路判断是否存在故障。各种警报和控制信号（如用于打开开关的信号）采用直流回路。直流回路一般由电池组供电，这样交流系统故障就不会影响开关操作机构的正常工作。

## 第 4 章 电流互感器和电压互感器

电压或电流互感器主要作用是将保护、控制和测量设备与系统高压隔离，并提供合适的电压和电流值。其二次电流一般为 1A 或 5A，电压一般为 120V。故障发生时和故障后，电流和电压互感器的特性对保护来说是至关重要的。因为互感器的信号误差可能导致继电器的误动作。此外在选择互感器时，还要考虑互感器的暂态与饱和特性。如果继电器动作只对电压或电流的幅值有要求，那么互感器绕组电流方向就无关紧要。但是，继电器要比较电流和或者电流差时，则必须牢记绕组极性。

### 4.1 电压互感器

电压互感器（Voltage Fransformer, VT）的二次绕组电压应尽可能与一次绕组电压成正比。为了达到这一目的，绕组的电压降很低，铁心的磁通密度低于饱和点，且磁化电流较小；这样在要求的电压范围内，磁阻是恒定的。电压互感器二次电压一般为线对中性点 115V 或 120V。多数保护继电器额定电压为 120V 或 69V，取决于连接方式为线线或线对中性点。

#### 4.1.1 等效电路

电压互感器可以看作为一个小型的电力变压器，所以其等效电路与电力变压器是一样的，如图 4.1a 所示。励磁支路可以忽略，所以等效电路可以简化为图 4.1b。

电压互感器的矢量示意图如图 4.2 所示。为了示意清楚，增大了图中电压降的矢量长度。图中互感器二次电压  $V_s$  滞后于  $V_p/n$ ，且幅值比  $V_p/n$  低。尽管如此，其额定工况下的最大误差并不大。电压互感器有极好的暂态特性，可以准确反映一次电压的突然变化。

#### 4.1.2 误差

使用测量仪器时，比如用于计费和控制的目的，电压互感器的准确级是很重要的，尤其是在额定系统电压附近工作时的误差。但是，由于要适应系统中各种各样的继电器和二次负载及系统参数的不确定性，保护用电压互感器在额定电压下的精度要求并不高，但是在故障情况下互感器误差要在很宽的电压范围内保持在较小的范围内。即单相对地短路时，在 5%~173% 的额定一次电压时，互感器误差必须在

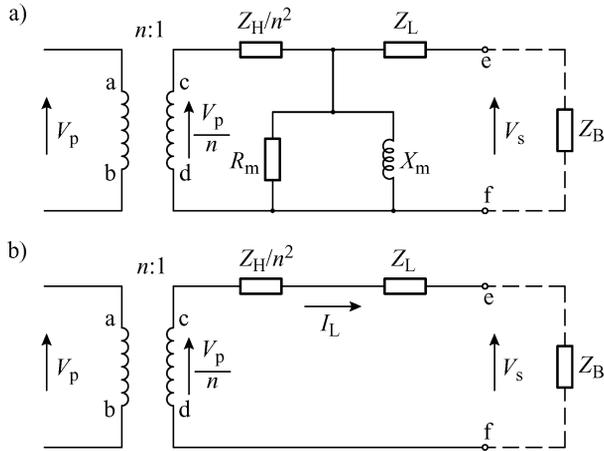


图 4.1 电压互感器的等效电路  
a) 等效电路 b) 简化电路

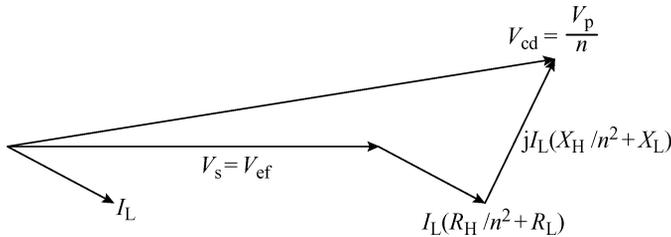


图 4.2 电压互感器的矢量示意图

较小的范围内波动。

如图 4.1a 所示，互感器误差主要是由于  $V_p/n$  与  $V_s$  间的幅值和相角差异。当二次开路（即负载阻抗  $Z_B$  为无穷大）时，误差主要是由一次绕组的励磁电流和一、二次绕组的负载电流  $I_L$  引起的电压降造成的。幅值误差可以由  $e_{VT} = [(nV_s - V_p)/V_p] \times 100\%$  计算。如果误差为正，则二次电压大于额定值。

### 4.1.3 负载

电压互感器标准负载一般用特定功率因数和容量 ( $V \cdot A$ ) 表示。

表 4.1 给出的电压互感器标准负载为标准 ANSI C57.13 规定的标准负载。标准 IEC 186A 规定了电压互感器的准确级和容量值。

表 4.2 给出的电压互感器误差限值为不同准确级的互感器允许误差， $V_n$  为额定电压。二次电压领先一次电压时，角差为正。比差为二次端口电压  $V_2$  乘以标准变比后与一次电压  $V_1$  之差相对于  $V_1$  的百分比。

表 4.1 电压互感器标准负载

标准负载			120V/60Hz 下的特性			69.3V/60Hz 下的特性		
设计	容量 (负载)/(V·A)	功率因数	电阻/ $\Omega$	电感/H	阻抗/ $\Omega$	电阻/ $\Omega$	电感/H	阻抗/ $\Omega$
W	12.50	0.10	115.2	3.04	1152	38.4	1.01	384
X	25.00	0.70	403.2	1.09	575	134.4	0.364	192
Y	75.00	0.85	163.2	0.268	192	54.4	0.089	64
Z	200.00	0.85	61.2	0.101	72	20.4	0.034	24
ZZ	400.00	0.85	31.2	0.0403	36	10.2	0.0168	12
M	35.00	0.20	82.3	1.070	411	27.4	0.356	137

表 4.2 电压互感器误差限值

准确级	一次电压	比差 ( $\pm\%$ )	角差 ( $'$ )
0.1	0.8 $V_n$ 、1.0 $V_n$ 和 1.2 $V_n$	0.1	0.5
0.2		0.2	10.0
0.5		0.5	20.0
1.0		1.0	40.0
0.1	0.05 $V_n$	1.0	40.0
0.2		1.0	40.0
0.5		1.0	40.0
1.0		2.0	80.0
0.1	$V_n$	0.2	80.0
0.2		2.0	80.0
0.5		2.0	80.0
1.0		3.0	120.0

#### 4.1.4 电压互感器的选择

电压互感器可连接于相间或相地之间。34.5kV 及以上三相星形 (Y) 联结的变电站一般都将互感器连接在相地之间, 或者有些情况需要测量每一相的电压和功率因数时也将互感器连接在相地之间。

电压互感器的一次额定电压一般根据高一个等级的额定绝缘电压 (kV) 和最接近的工作电压选择。额定二次电压一般为 115V 和 120V。要选择互感器的额定功率, 就要将二次绕组所连接的所有设备的功率全部加上, 并要考虑二次绕组的电压降, 这点在变压器和继电器距离很远的情况下是非常重要的。

#### 4.1.5 电容式电压互感器

一般来说, 感应式电压互感器的尺寸和它的额定电压成正比, 成本也随着电压

等级的提高而上升。那么，还有一个更为经济的选择，就是电容式电压互感器。电容式电压互感器实际上是个电容分压器，同电阻分压器一样，输出电压受负载的影响。实际上，连接负载时，分压器的两部分可以合在一起看作电源阻抗并产生一个电压降。

电容分压器的电源等效阻抗为容性，且可以串联一个电感来进行补偿，与感应分压器不同。如果连接一个理想电感，那么就不存在电压调整的问题——然而实际网络中总是有电阻存在的。通过分压器降低电压，可以使误差保持在可接受的范围内。为了提高准确级，通常使用一个高压电容器以便在连接点获得一个较高的电压，然后通过一个便宜的变压器将连接点电压降低到标准电压，如图 4.3 所示。

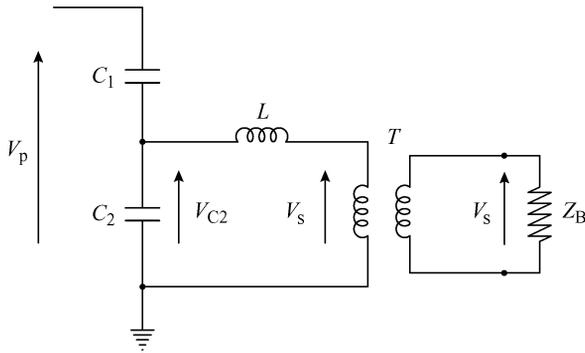


图 4.3 电容式电压互感器的基本电路

电容式电压互感器的等效电路如图 4.4 所示。图中， $V_1$  为额定一次电压， $C$  为  $(C_1 + C_2)$  的等效电容， $L$  为谐振电感， $R_1$  为变压器 T 的一次绕组电阻及  $C$ 、 $L$  的损耗， $Z_e$  为变压器 T 的励磁阻抗。以中间电压为基准，二次回路电阻和负载阻抗分别表示为  $R'_s$  和  $Z'_B$ 。 $V'_s$  和  $I'_s$  分别表示二次电压和电流。

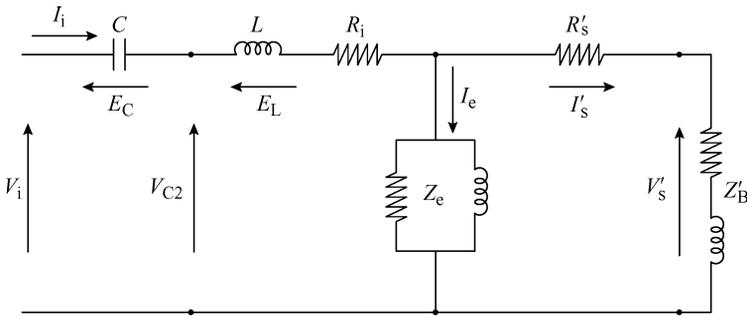


图 4.4 电容式电压互感器的等效电路

由图 4.4 所示可以看到，除了电容  $C$  以外，电容式电压互感器的等效电路同变压器是一样的。因此，当系统电压下  $C$  和  $L$  发生谐振，阻抗相互抵消时，在稳定

的系统情况下电容式电压互感器和传统互感器是类似的。实际上  $R_i$  和  $R'_s$  数值都不大。此外, 和  $I'_s$  相比  $I_e$  也较小, 所以  $V'_s$  和  $V_i$  的矢量差 (构成了互感器误差) 也是很小的。这点可以由图 4.5 所示可知。图 4.5 中, 功率因数接近 1, 比差为  $V'_s$  和  $V_i$  的幅值差异, 角差为  $\theta$ 。如图 4.5 所示, 在非谐振频率的情况下,  $E_L$  和  $E_C$  在回路中占主要部分, 比差和相位差很大。

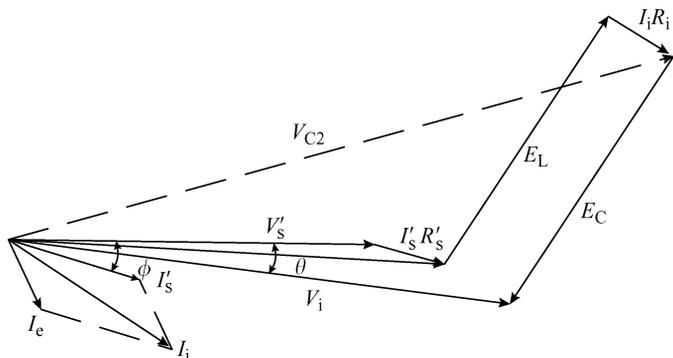


图 4.5 电容式电压互感器的矢量示意图

电容式电压互感器的暂态特性比电磁式电压互感器要好, 因为串联的感抗和容抗比负载阻抗大很多, 当一次电压跌落时, 由于变压器 T 和 LC 串并联的作用, 二次电压会保持几毫秒。

## 4.2 电流互感器

尽管保护种类不同, 对电流互感器 (Current Transformer, CT) 的要求也不同, 但是通常都要采用高质量的电流互感器。高质量的电流互感器更为可靠, 使用中问题更少, 并且通常可以提供更优质的保护性能。电流互感器的质量对差动保护来说非常重要, 因为差动保护的继电器动作直接与故障状态及额定状态时的互感器准确度有关。

近距离故障时, 短路电流很大, 可能会使电流互感器饱和; 要避免这种情况, 就要确保最严酷故障情况下电流互感器的励磁曲线仍然是线性的。在上述所有故障状态下, 电流互感器还必须提供足够的二次电流使继电器可以正常运行。

### 4.2.1 等效电路

电流互感器的等效电路如图 4.6a 所示, 图中,  $n^2 Z_H$  为一次侧阻抗  $Z_H$  折算至二次侧的值,  $Z_L$  为二次侧阻抗,  $R_m$  和  $X_m$  代表铁心的励磁阻抗。图 4.6a 所示电路可以简化为图 4.6b 所示电路, 因为  $Z_H$  不影响电流  $I_H/n$  和  $X_m$  的电压, 所以可以忽略。流过  $X_m$  的电流为励磁电流  $I_e$ 。

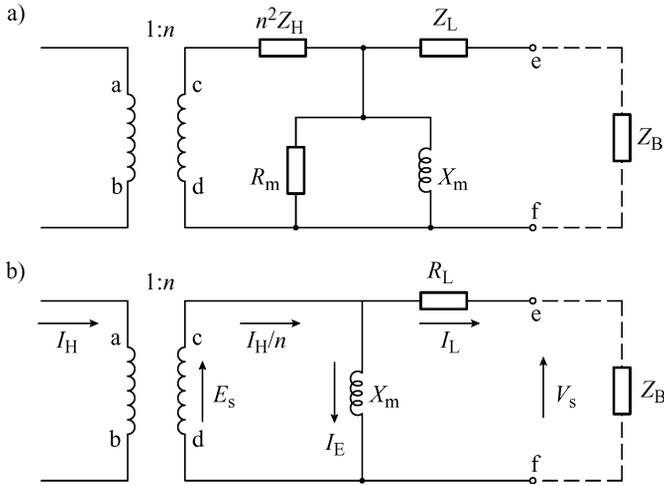


图 4.6 电流互感器的等效电路  
a) 等效电路 b) 简化后的等效电路

其等效电路的矢量示意图如图 4.7 所示，为了明显起见，图中增大了电压降的幅值。一般来说  $Z_L$  为阻性， $I_e$  滞后  $V_s$   $90^\circ$ ， $I_e$  是误差的主要起因。 $I_e$  的另一个影响是使  $I_L$  滞后并且使之小于一次侧折算至二次侧的电流  $I_H/n$ 。

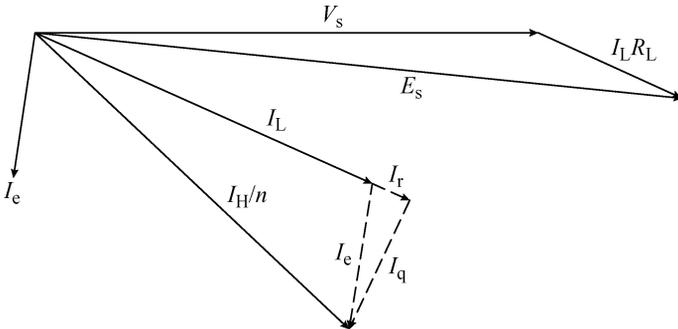


图 4.7 电流互感器等效电路的矢量示意图

### 4.2.2 误差

电流互感器误差的起因与电压互感器的截然不同。实际上，电流互感器一次阻抗对误差的影响很小——一次阻抗仅增加了串联阻抗，而这个阻抗可以忽略。电流互感器的误差主要是由于励磁支路的电流引起的。比差是  $I_L$  和  $I_H/n$  的幅值之差，数值等于  $I_r$ ， $I_r$  为  $I_e$  在  $I_L$  方向上的分量（见图 4.7）。

角差  $\theta$  与  $I_q$  有关， $I_q$  为  $I_e$  在  $I_L$  垂直方向上的分量。比差和角差实际上取决于  $I_e$  和  $I_L$  的相对偏差。值得注意的是，选取合适的感性负载，使  $I_e$  和  $I_L$  几乎同相，此时

角差很小，而励磁分量仅引起幅值误差（比差）。目前标准允许的误差为5%或10%。

### 4.2.3 交流饱和

电流互感器误差主要由励磁电流引起，因此为了检查电流互感器是否运行正常，就要首先测量和计算励磁曲线。电流互感器的励磁电流取决于励磁回路截面和长度、绕组匝数、材料的磁特性。因此，对给定的电流互感器来说，如图4.6b所示，励磁阻抗的电压 $E_s$ 与二次电流成正比。当超过饱和点的磁通密度，励磁电流很大造成较大的误差时， $E_s$ 达到饱和电压。

当评估一个电流互感器的性能时，必须测量不同电压下的励磁电流——被称为二次电流注入试验。一般来说，一次绕组开路，二次绕组施加电压较为方便。图4.8所示的电流互感器励磁特性曲线给出了用此种方法测量的二次电压和励磁电流的典型关系。根据相关欧洲标准，曲线上的 $K_p$ 点为饱和点或拐点，并定义为励磁电压每增加10%，励磁电流增加50%。

根据ANSI/IEEE标准，拐点定义为曲线的切线与横坐标呈45°角的点，如图4.9所示。欧洲标准中的拐点电压要高于ANSI/IEEE标准定义的拐点电压。

### 4.2.4 负载

电流互感器的负载是二次阻抗值，主要是来自继电器以及继电器和互感器之间的连线。依据标准ANSI C57.13，二次额定电流为5A时，电流互感器的标准负载如表4.3所示。当互感器二次为额定负载，二次电流为额定电流的20倍且误差不超过10%，此时的二次电压定义为额定二次电压。并且在1~20倍的额定电流范围内，二次为额定负载或低于额定负载时，互感器误差均不得超过10%。

表4.3 保护用电流互感器的标准负载（二次电流为5A）

名称	电阻/ $\Omega$	电感/mH	阻抗/ $\Omega$	容量(5A)/V·A	功率因数
B-1	0.5	2.3	1.0	25	0.5
B-2	1.0	4.6	2.0	50	0.5
B-4	2.0	9.2	4.0	100	0.5
B-8	4.0	18.4	8.0	200	0.5

标准IEC 60044根据电流互感器误差将其分为M和P级，分别表示测量用电流互感器和保护用电流互感器。在描述互感器时，先是用两个数字表示额定负载；然后是准确级，随后是字母M或者P；最后还有两位数字，表示额定电流的倍数，即误差在此电流倍数范围内有效。比如说一台保护用电流互感器，额定负载为25V·A，在20倍额定电流（5A）范围内误差10%，就可以表示为25V·A 10P20。

根据IEC标准，测量和保护用电流互感器的误差限值如表4.4所示。二次电流

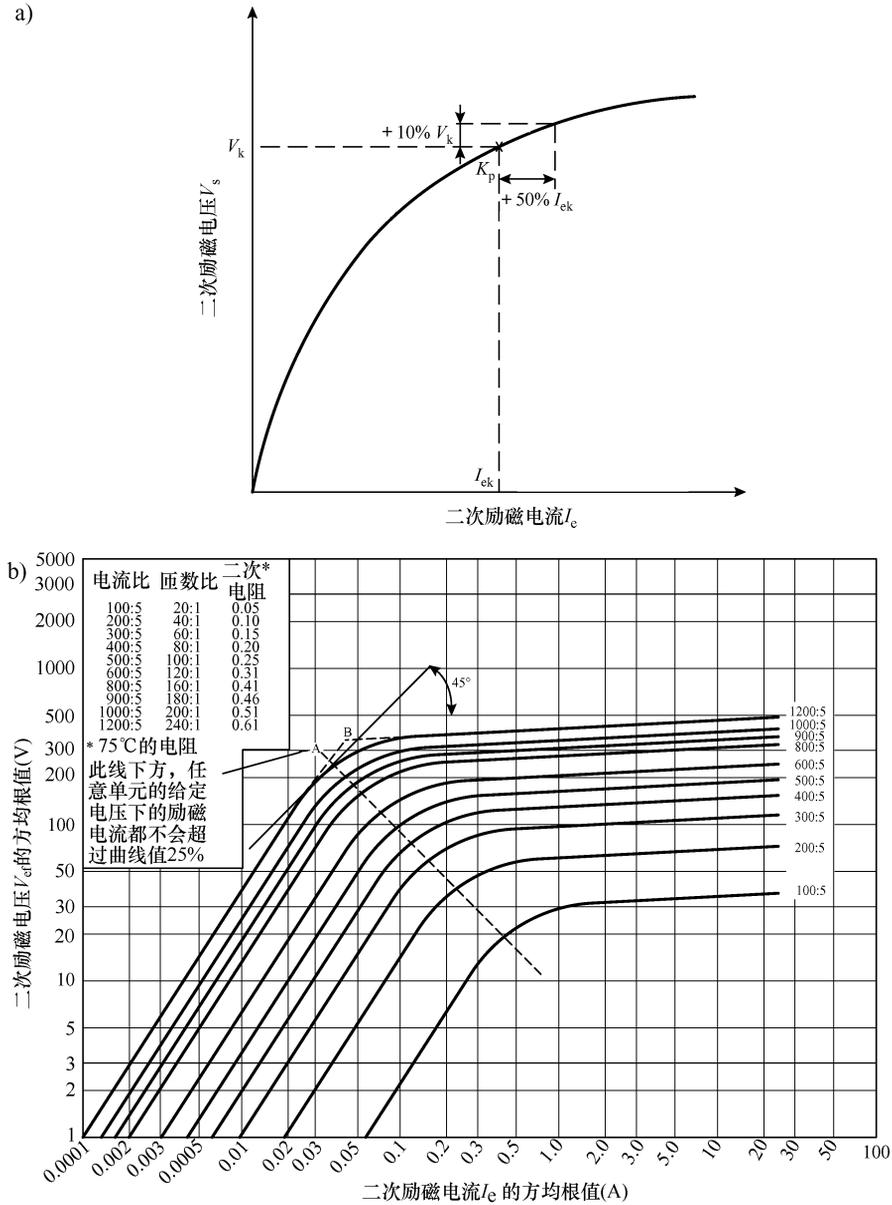


图 4.8 欧洲标准定义的电流互感器励磁特性曲线 (见 IEEE C37.110-1996)

a) 欧洲标准定义的电流互感器励磁曲线的拐点 b) 多变比 C 级电流互感器的典型励磁曲线

领先于一次电流时, 角差为正。比差为二次电流乘以标准变比后与一次电流的差, 即  $\{(CTR \times I_2) - I_1\} / I_1 \times 100\%$ 。其中,  $I_1$  为一次电流 (A);  $I_2$  为二次电流 (A); CTR 为标准变比。准确级后加“ext”表示互感器额定电流范围较宽, 其范围为 1~1.2 或 1~2 倍的铭牌额定电流。

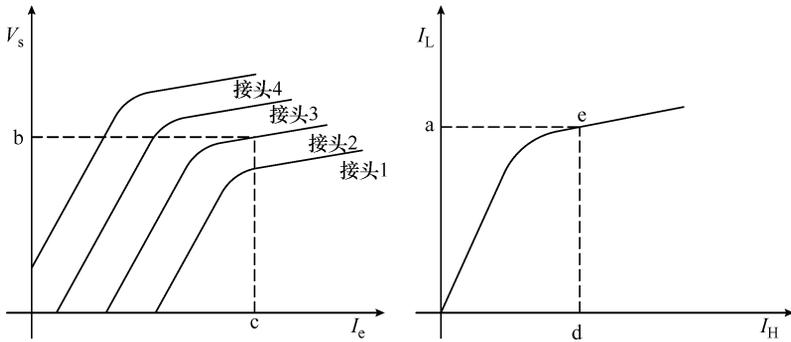


图 4.9 多变比 C 级电流互感器的典型励磁曲线

a—假设的  $I_L$  值    b— $V_s = I_L(Z_L + Z_C + Z_B)$   
 c—从曲线中找出  $I_c$     d— $I_H = n(I_L + I_c)$     e—画出曲线上的点

表 4.4 测量和保护用电流互感器的误差限值

测量用电流互感器的误差限值														
准确级	在给定额定电流百分比时的比差 (%)							在给定额定电流百分比时的角差 (')						
	2.0*	1.2	1.0	0.5	0.2	0.1	0.05	2.0*	1.2	1.0	0.5	0.2	0.1	0.05
0.1	—	0.1	0.1	—	0.20	0.25	—	—	5	5	—	8	10	—
0.2	—	0.2	0.2	—	0.35	0.50	—	—	10	10	—	15	20	—
0.5	—	0.5	0.5	—	0.75	1.00	—	—	30	30	—	45	60	—
1.0	—	1.0	1.0	—	1.50	2.00	—	—	60	60	—	90	120	—
3.0	—	3.0	—	3.0	—	—	—	—	120	—	120	—	—	—
0.1 ext	0.1	—	0.1	—	0.20	0.25	0.40	5	—	5	—	8	10	15
0.2 ext	0.2	—	0.2	—	0.35	0.50	0.75	10	—	10	—	15	20	30
0.5 ext	0.5	—	0.5	—	0.75	1.00	1.50	30	—	30	—	45	60	90
1.0 ext	1.0	—	1.0	—	1.50	2.00	—	60	—	60	—	90	120	—
3.0 ext	3.0	—	—	3.0	—	—	—	120	—	—	120	—	—	—

\* ext = 200%。

保护用电流互感器的误差限值

准确级	在给定额定电流百分比时的比差 (%)				在给定额定电流百分比时的角差 (')			
	1.0	0.5	0.2	0.1	1.0	0.5	0.2	0.1
5P 和 5P ext	1.0	—	1.5	2.0	60	—	90	120
10P 和 10P ext	3.0	3.0	—	—	120	120	—	—

注：额定负载和额定误差限值下 5P 和 5P ext 的总误差为 5%，10P 和 10P ext 的总误差为 10%。

要计算保护系统的阻抗，就要考虑保护设备的阻抗、继电器和互感器连接电缆的阻抗，以及电流互感器的阻抗。对于继电器来说，其负载是按预定电流值给出的

VA 数来表示。其负载阻抗计算如下：

$$Z_r = VA/I^2$$

比如说一个继电器 100A 时负载  $VA = 580V \cdot A$ ，其负载阻抗为

$$Z_r = 580/100^2 = 0.058\Omega$$

#### 4.2.5 电流互感器的选择

选择电流互感器时，非常重要的一点是要确保系统最大负载时的电流等于或小于互感器的额定电流，这样故障时就不会造成铁心的饱和。要确保电流互感器不会饱和，就要确保互感器的运行点低于饱和曲线上的拐点，或者是励磁电压曲线呈线性。互感器的饱和可能由交流和直流分量引起。

要计算交流分量，二次励磁电压必须由二次励磁电流乘以总负载来计算，总负载包括互感器线圈的阻抗、线路阻抗和仪器（继电器和测量仪表）阻抗。其公式如下：

$$E_s = I_L(Z_L + Z_C + Z_B) \quad (\text{式 4.1})$$

式中， $E_s$  为二次线圈感应电压有效值； $I_L$  为二次最大电流，由系统最大故障电流除以变比而得； $Z_B$  为外部连接阻抗； $Z_L$  为二次绕组阻抗； $Z_C$  为连接线路阻抗。

ANSI C37.110-1996 增加了  $(1 + X/R)$  项来检查互感器是否由于直流分量而饱和，计算公式为

$$E_s = I_L(Z_L + Z_C + Z_B)(1 + X/R)$$

式中， $X$  和  $R$  为一次系统相对于故障点的电抗和电阻。

要实现精确的计算，应该同时考虑直流和交流分量。但是一般情况下，大的电流互感器才考虑直流分量；许多情况下，尤其是低压系统中直流分量都是可以忽略的。

**例 4.1** 图 4.9 所示的互感器变比为 1200/5，负载为  $4\Omega = (2.0 + j3.464)$ ，包含了继电器和连线阻抗。图中  $Z_L = R_S = 0.61\Omega$ ，利用图 4.6b 所示的等效电路，并考虑流过负载 20 倍的额定电流的情况（即 100A），可得

$$E_s = I_L(Z_L + Z_C + Z_B)$$

$$E_s = 100(0.61 + 2.0 + j3.464) = 261 + j346.4 = 434(53^\circ)V$$

这个电压产生了 2A 的二次励磁电流，因此误差将近 2%，此互感器至少应为 C400 级，在后面的章节中会对此进一步进行解释。如前所述，理想情况下计算所得的电压应该等于拐点电压，那么互感器至少应为 800C 级。但由于成本过高和尺寸过大，通常这是不现实的。

如表 4.5 所示，负载随着互感器联结方式和故障种类不同而变化。整体负载越低，互感器运行性能越好。

表 4.5 互感器联结和故障种类对负载的影响

联结方式	故障类型	
	3 相短路或相间短路	相对地短路
Y (电流互感器)	$Z = R_L + R_C + Z_B$	$Z = R_L + 2R_C + Z_B$
Y (开关柜内)	$Z = R_L + 2R_C + Z_B$	$Z = R_L + 2R_C + Z_B$
D (开关柜内)	$Z = R_L + 2R_C + 3Z_B$	$Z = R_L + 2R_C + 2Z_B$
D (电流互感器)	$Z = R_L + 3R_C + 3Z_B$	$Z = R_L + 2R_C + 2Z_B$

注:  $Z$  为对于电流互感器来说的有效阻抗。

$R_L$  为电流互感器二次绕组电阻和连线电阻, 也包含 D 联结中的继电器阻抗 ( $\Omega$ )。

$R_C$  为回路单路连线电阻 ( $\Omega$ )。

$Z_B$  为互感器二次电流路径中的继电器阻抗 ( $\Omega$ )。

## 4.2.6 ANSI 标准定义的准确级

ANSI 标准 (ANSI C57.13) 规定的电流互感器准确级用两个符号表示——字母和额定电压, 这两个符号代表了互感器的能力。其中, C 表示的互感器变比, 可以计算出来; T 表示的变比, 可以通过试验确定。C 类互感器主要包括, 线圈均匀缠绕的互感器, 以及在一定范围内杂散磁通对变比影响可以忽略的互感器。T 类互感器主要包括那些杂散磁通对变比影响较为明显的互感器。

比如说 C100 的电流互感器, 其变比可以计算, 当二次电流在 1 ~ 20 倍额定电流范围内且最低功率因数为 0.5 时负载不超过  $1\Omega$  ( $1\Omega \times 5A \times 20 = 100V$ ), 它的误差不超过 10%。这是二次励磁电压的简化计算方法。比如说, 一个互感器负载为  $1\Omega$ , 可以选 C100 的互感器, 得到最大的二次电压为 100V。要注意的是, 此时互感器已经工作在饱和区域, 励磁电流至少为 10A。这种情况下, 如果负载大于  $1\Omega$ , 电流就会按比例减小, 以防止电压超过 100V, 反之亦然。这种方法虽然简单, 但是不能给出精确的结果, 还是需要细致的考虑。

C100 的电流互感器可以承担  $I^2R$  的额定负载, 即  $(5^2 \times 1) V \cdot A = 25V \cdot A$ 。因此 C100 与 IEC 标准中的 25 10P20 等级等效。同样, C200 与 50 10P20 等效, C800 与 200 10P20 等效。

这些准确级只适用于完整绕组的互感器。对于有抽头的互感器, 每个抽头都有一个对应电压, 承担相应的负载, 且误差不能超过 10%。允许的负载  $Z_B = N_p V_C / 100$ 。其中,  $Z_B$  为某一抽头的允许负载,  $N_p$  为使用匝数,  $V_C$  为 ANSI 标准中的完整互感器的电压。

### 例 4.2

一个回路最大故障电流为 12000A。电流互感器额定变比为 1200/5, 使用 800/5 的分接头。互感器等级为 C200, 二次电阻为  $0.2\Omega$ , 总二次负载为  $2.4\Omega$ , 功率因数为 0.6。确定故障时误差是否超过 10%。

## 答案

电流互感器二次绕组的电阻可以忽略，因为 C200 等级意味着互感器可以耐受 200V 电压加上 20 倍额定电流功率因数 0.5 时二次电阻的电压降。仅在电流不超过 100A 时二次电压降才可以忽略。此例中  $I_L = [12000 \times (5/800)] A = 75A$ 。

允许负载为

$$Z_B = \frac{N_p V_C}{100}$$

$$N_p = 800/1200 = 0.667$$

所以

$$Z_B = \frac{0.667 \times 200V}{100A} = 1.334\Omega$$

因为回路负载为  $2.4\Omega$ ，大于最大允许负载  $1.33\Omega$ ，故障电流为 12000A 时，二次侧达到最大电流 75A，此时误差可能超过 10%。因此，必须减小负载，改换分接头或者使用另外更高等级的互感器。

#### 4.2.7 直流饱和

到目前为止，仅讨论了电流互感器的稳态，没有考虑故障电流时的直流暂态分量。然而，直流分量比交流分量更容易造成饱和。

图 4.10 给出了直流饱和对二次电流的影响，是由直流饱和造成二次电流畸变和减小的例子。但是，如果  $V_k \geq 6.28IRT$ ，则故障电流的直流分量不会造成电流互感器的饱和。 $V_k$  = 励磁曲线上的拐点电压，由励磁曲线直线部分的延长线决定； $I$  为二次对称电流有效值，单位为 A； $R$  为二次系统的总电阻； $T$  为一次电流的直流时间常数，即

$$T = \frac{L_p}{R_p} f$$

式中， $L_p$  为一次回路电感； $R_p$  为一次回路电阻； $f$  为频率。

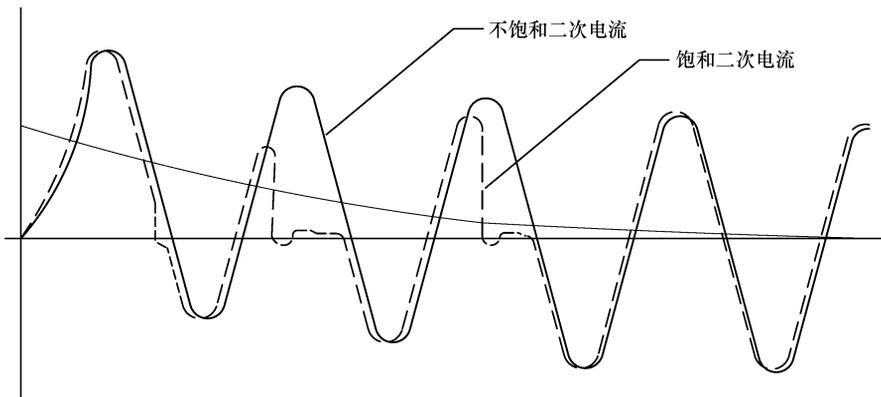


图 4.10 直流饱和和对二次电流的影响

直流饱和在复杂保护系统中尤为重要，因为外部故障时将会有极大的电流流过电流互感器。如果不同继保设计的互感器均发生饱和，有可能会产生二次不平衡电流，导致系统误动作。

### 4.2.8 使用电流互感器的注意事项

电流互感器带电工作时人员操作可能会非常危险。例如，二次回路开路会产生过电压，可能伤害操作人员或者设备，因为电流互感器设计是按回路阻抗比自身阻抗大很多的情况考虑的。当二次回路开路时，等效阻抗基本不变，但是一次电流流过励磁阻抗会产生一个高电压。因此电流互感器二次回路必须闭合或者短路，以防止这类危险情况出现。下面给出一个典型范例。

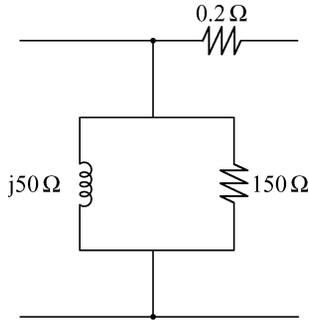


图 4.11 例 4.3 的电流互感器等效电路（折算至二次侧）

#### 例 4.3

一个 13.2kV 的电源，负载为  $10\text{MV} \cdot \text{A}$ ，功率因数为 1.0。回路有一个 500/5 的电流互感器，其负载为  $10\text{V} \cdot \text{A}$ 。电流互感器等效电路如图 4.11 所示。请计算测量系统开路时二次回路的电压。

#### 答案

电流互感器电路单线示意图如图 4.12 所示，电流互感器等效电路图如图 4.13 所示。

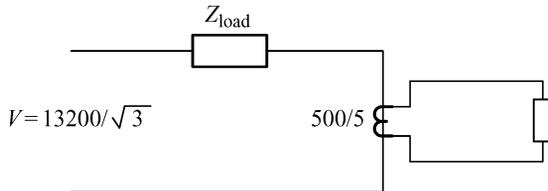


图 4.12 例 4.3 的电流互感器电路单线示意图

折算至电流互感器二次侧，有

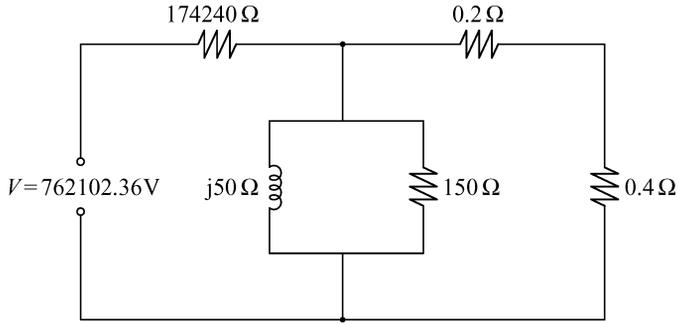


图 4.13 图 4.12 的等效电路

$$V = \left( \frac{13200}{\sqrt{3}} \times \frac{500}{5} \right) \text{V} = 762102.36 \text{V}$$

$$Z_{\text{load}} = \left[ \frac{13.2^2}{10} \times \left( \frac{500}{5} \right)^2 \right] \Omega = 174240 \Omega$$

$$Z_{\text{meter}} = \left( \frac{10}{5^2} \right) \Omega = 0.4 \Omega$$

二次回路闭合时，忽略并联支路，测量系统两端电压可以近似计算如下：

$$V_{\text{meter}} = \left( \frac{762102.36}{174240 + 0.2 + 0.4} \right) \text{A} \times 0.4 \Omega = 4.37 \text{A} \times 0.4 \Omega = 1.75 \text{V}$$

如果二次回路开路，电流只能从并联支路流过，这种情况下，电流互感器端口电压为

$$V_{\text{CT}} = \left[ \frac{762102.36}{174240 + (150 \parallel j50)} \times (150 \parallel j50) \right] \text{V} = 207.47 \angle 71.55^\circ \text{V}$$

电压升高了将近 120 倍。

# 第 5 章 过电流保护

## 5.1 简述

电力系统中的大电流通常都是由故障引起的。通过监测电流可以发现故障并启动保护设备，根据系统复杂性和准确度要求的不同，保护设备在设计上会有很大的差别。常用的保护设备有热磁开关、塑壳断路器（Moulded-Case Circuit Breaker, MCCB）、熔断器、过电流继电器等。热磁开关和塑壳断路器结构简单，主要用于低压设备的保护中。熔断器也经常用于低压保护，如线路和配电变压器保护。

过电流继电器是系统过电流保护最常用的器件，也是本章的重点。由于过电流保护主要是在故障情况下动作，因此过电流继电器不能仅作为过载保护的手段——过载通常与机器和线路的热容量有关。继电器的整定通常要综合考虑过载和过电流两种情况。

## 5.2 过电流继电器种类

基于继电器的动作特点，过电流继电器可以分为三类：固定电流值或速断，定时限，反时限。这三类过电流继电器的时间/电流特性曲线如图 5.1 所示，图中也给出了速断继电器和反时限特性组合后的特性。

### 5.2.1 固定电流值继电器

当电流达到预先设定的值时，定电流继电器就会立即动作。变电站距离电源距离最远时，继电器在较低电流时动作，随着变电站与电源距离的减小，继电器动作电流随之增大。这样，整定值低的继电器就可以首先动作，切断距离故障点最近的负载。这种保护的缺点是大电流时的选择性差，还有就是当两点阻抗近似且与电源侧阻抗相比很小时，很难判断故障点位置。

图 5.2a 给出了变电站电源阻抗对短路电流的影响（线路上点 B 故障）。如图 5.2b 所示，点 F1 和 F2 故障电流近似，继电器很难整定。当 F1 和 F2 间阻抗较大，如 F1 处线路较长，那么 F1 处的故障电流就小于 F2。同样，由于变压器阻抗，点 F2 和 F3 的故障电流差异也较大，尽管两点实际距离很近。

如果保护是按最大故障电流整定的，那么故障电流降低的情况就不适用。但如

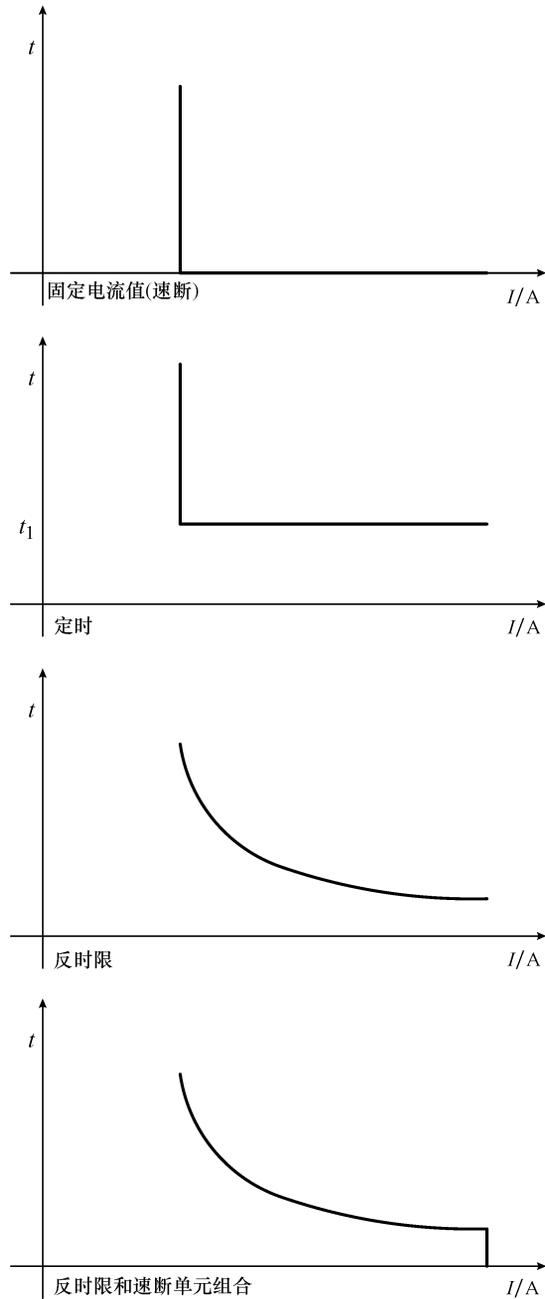


图 5.1 三类过电流继电器的时间/电流动作特性曲线

果按低故障电流整定，故障电流增大时一些与故障无关的断路器也会动作。因此，定电流继电器不能作为唯一的过电流保护，而要作为速断保护单元与其他保护配合

使用。

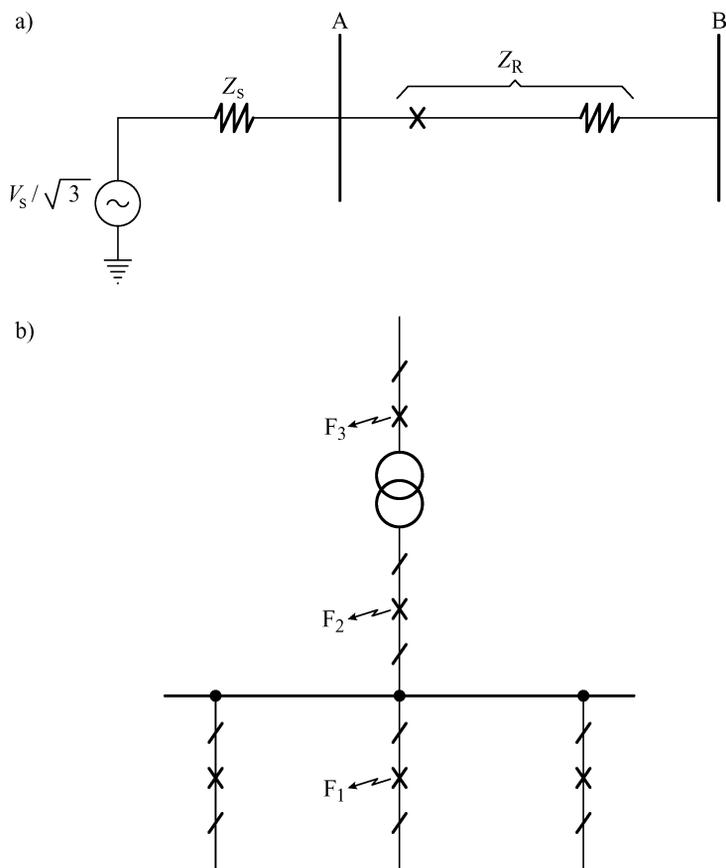


图 5.2 不同水平的故障电流

a) 变电站电源阻抗对短路电流的影响 b) 变压器线路不同故障点的影响

图 5.2 中,  $Z_R$  为被保护单元的阻抗;  $Z_s$  为电源阻抗;  $I_{SC(A)} = V_s / (\sqrt{3} Z_s)$ ;  $I_{SC(B)} = V_s / (\sqrt{3} (Z_s + Z_R))$ 。

### 5.2.2 定时限/定电流继电器或定时限继电器

这种继电器可以通过不同的动作时间对不同水平的电流进行整定。距离故障点最近的断路器以最短时间断开, 其余断路器的动作时间随着与电源距离的减少而依次增加。相同电流情况下的动作时间差称为时间级差。

由于定时限继电器的动作时间可以按固定间隔调整, 保护的选择性更强。它最大的缺点是电源附近故障时电流大, 但可能动作时间更长。这种继电器可以进行启动电流整定 (或者称为插头或分接头整定), 即可以选择继电器动作值, 再加上整

定时间值就是继电器准确的动作时间。时间整定与要求继电器动作的过电流值无关。这种继电器主要用在电源阻抗较大的情况，即继电器安装位置和被保护段末端的故障电流接近。

### 5.2.3 反时限继电器

反时限继电器的特点是动作时间与故障电流成反比，参见图 5.1 所示的特性曲线。与定时限继电器相比，它的优点是大电流情况下，可以确保保护的选择性和更短的动作时间。反时限继电器通常根据特性曲线来表示其动作时间、主要分为正常反时限、非常反时限、极限反时限。反时限继电器还被称为最小反时限（Inverse Definite Minimum Time, IDMT）过电流继电器。

## 5.3 过电流继电器整定

过电流继电器一般由速断单元和时延单元组成。以前过电流保护是各相独立的单元组成时，电磁继电器的应用非常广泛。现在，更为先进的微机继保能够集合三相过电流保护单元和接地故障单元的功能于一体。整定过电流继电器，就要选择时延和速断单元的时间/电流特性参数。这个过程要进行两次：一次是相继电器，一次是接地故障继电器。尽管过程类似，但三相短路电流用于整定相继电器，单相接地故障电流要用于整定接地故障继电器。计算故障电流时，假设电力系统处于正常运行状态。然而，如果母线上有两个或多个变压器并联并用继电器保护，而采用的继电器不能进行群组整定（群组整定功能可以通过数字继保实现，即继保能够根据实际系统情况进行调整的能力），那么就需要依次按各个变压器故障情况计算短路电流，这样继电器保护才可以有更好的故障辨别能力。复杂电路的保护设计也可采用同样的步骤。

### 5.3.1 速断单元整定

当被保护段阻抗高于电源阻抗时，速断单元更为有效。它主要有以下两个优点：

- 严酷的系统故障情况下，它缩短了继电器动作时间。
- 在包含多个不同特性的继电器的系统中，它避免了选择性的降低；如图 5.3 所示，整定速断单元时使继电器在特性曲线交叉前就动作，从而确保了保护的选择性。

根据继保安装地点和被保护段类型的不同，速断单元的整定原则也是不同的。被保护段可

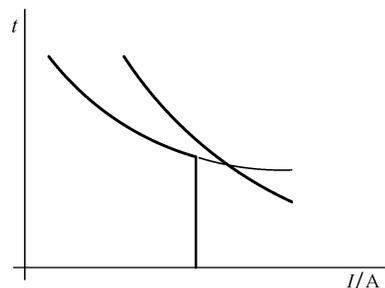


图 5.3 速断单元的选择性

以分为三类：变电站间线路，配电线，变压器。

### (i) 变电站间线路

速断单元是按下一个变电站最大故障水平时的对称电流有效值的 125%，来整定的。动作顺序是从最远变电站开始，然后向电源方向靠近。若某个故障水平两个继电器特性曲线交叉、很难配合使用时，就要将离电源最远的变电站的继电器速断单元的动作电流降低一个水平，以避免两个继电器同时动作。如果有直流分量，25% 的电流裕度可以避免速断单元重复动作。在 220kV 及更高等级的系统中，由于  $X/R$  更高，直流分量更大，电流裕度也要更多。

### (ii) 配电线

为柱上 MV/LV 变压器供电的配电线的继电器速断单元进行整定，与前文的情况不同，因为这些配电线是 MV 系统的末端，不必像变电站间连线那样考虑保护配合的问题，而是用以下两个值整定：

- 达到为继保供电的电流互感器在系统中的连接点的最大短路电流的 50%。
- 达到 6 ~ 10 倍的电路最大额定电流。

### (iii) 变压器

变压器一次侧的过电流继电器的速断单元应该按 125% ~ 150% 的低压侧母线短路电流整定，并折算至高压侧。为了避免保护失配，这个整定值要高于为变压器励磁涌流而设定的动作值。如果变压器二次绕组过电流保护的速断单元和电源继电器对应于同样的短路电流水平，那么变压器速断单元优先级就要降低，以确保保护的选择性，除非两个保护单元之间有通信，使得电源过电流保护发现故障后，禁用变压器速断单元保护。

## 5.3.2 保护变电站间连接线路的速断单元覆盖范围

线路  $X$  的速断单元保护覆盖范围如图 5.4 所示，定义以下参数：

$$K_i = \frac{I_{\text{pick-up}}}{I_{\text{end}}}$$

$$K_s = \frac{Z_{\text{source}}}{Z_{\text{element}}}$$

由图 5.4 所示可得

$$I_{\text{pick-up}} = \frac{V}{Z_s + XZ_{AB}} \quad (5.1)$$

式中， $V$  为 CT 与继电器连接点电压； $Z_s$  为电源阻抗； $Z_{AB}$  为被保护单元的阻抗； $X$  为被保护的线路百分比； $I_{\text{end}}$  为线路末端电流； $I_{\text{pick-up}}$  为继电器的最小启动电流整定值

$$I_{\text{end}} = \frac{V}{Z_s + Z_{AB}} \quad (5.2)$$

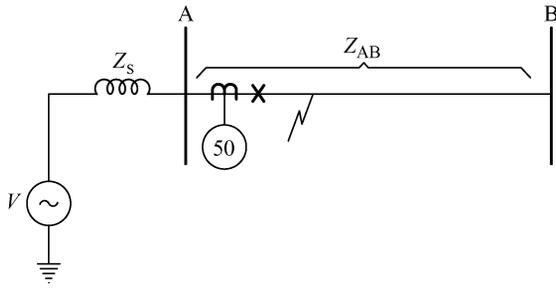


图 5.4 速断单元的保护范围

$$K_i = \frac{Z_s + Z_{AB}}{Z_s + XZ_{AB}} \Rightarrow X = \frac{Z_s + Z_{AB} - Z_s K_i}{Z_{AB} K_i} \quad (5.3)$$

可得

$$K_s = \frac{Z_s}{Z_{AB}} \Rightarrow X = \frac{K_s(1 - K_i) + 1}{K_i} \quad (5.4)$$

例如，若  $K_i = 1.25$ 、 $K_s = 1$ ，那么  $X = 0.6$ ，即保护可以覆盖线路的 60%。

**例 5.1**

减小电源阻抗  $Z_s$  对速断保护范围的影响，如图 5.5 所示，并将  $K_i = 1.25$  代入式 (5.4) 中，有

$Z_s/\Omega$	$Z_{AB}/\Omega$	$I_A/A$	$I_B/A$	覆盖范围 (%)
10	10	100	50	60
2	10	500	83	76

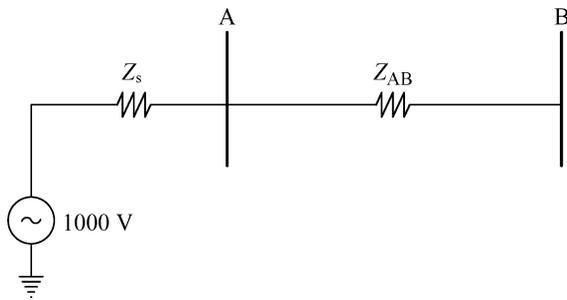


图 5.5 例 5.1 的等效电路

**5.3.3 延时过电流继电器参数整定**

过电流继电器要有足够的动作时间，以确保故障时距离故障近的其他保护先动作。图 5.6 给出了同一馈电线路上两断路器过电流反时限继电器特性曲线，显示了为满足选择性的要求，同一故障水平下继电器动作时间的差异。定时限继电器

和反时限继电器主要调整两个参数——时间或时间倍数整定值、启动电流或插头整定值（分接头整定值）。

### 5.3.3.1 启动电流整定

启动电流整定或称为插头整定，是用于定义继电器的启动电流的，其测得的故障电流表示为启动电流的倍数。这个倍数被称为插头整定倍数（Plug Setting Multiplier, PSM），

即二次故障电流相对于启动电流的倍数。对于继电器来说，超过额定电流的过电流值再留有一定裕度，就是启动电流整定值，可以用下式表示：

$$\text{启动电流整定} = \frac{\text{OLF} \times I_{\text{nom}}}{\text{CTR}} \quad (5.5)$$

式中，OLF 为取决于被保护元件的过载系数； $I_{\text{nom}}$  为回路额定电流；CTR 为 CT 的变比。

电动机过载系数建议为 1.05。线路、变压器和发电机通常为 1.25 到 1.5。配电系统中，紧急情况下电源负载可能增加，过载系数大约为 2。任何情况下  $I_{\text{nom}}$  都要小于电流互感器及导体允许的热容量；否则就必须使用最小电流值来计算启动电流的整定值。

对接地故障继电器来说，启动电流整定要考虑系统正常工况下的最大不平衡电流。典型的不平衡系数为 20%，代入式 (5.5) 为

$$\text{启动电流整定} = \frac{0.2 \times I_{\text{nom}}}{\text{CTR}} \quad (5.6)$$

高压输电线路中，不平衡系数可降至 10%，但是村镇的配电电源不平衡系数可达 30%。

### 5.3.3.2 时间整定

时间整定的作用是调节故障电流达到或超过整定值时的继电器的动作时延。电磁继电器中时延是通过调整动静触头的物理距离来实现的。时延小就意味着动作时间短。时间整定一般也称为时间倍数整定。

要对系统进行恰当的保护和保护配合，就要考虑时间整定值计算的标准和步骤。尽管定时限继电器的原理与之类似，但时间整定值计算的标准主要适用于反时限继电器。

1. 综合考虑故障水平及继电器的速断单元参数，距离电源最远的继电器时延

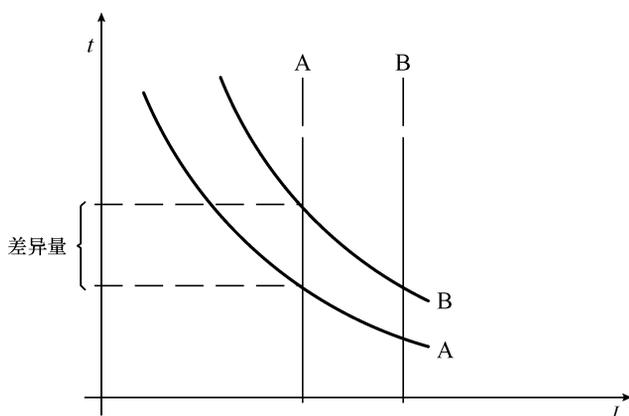


图 5.6 同一馈电线路上两台断路器的过电流反时限继电器特性曲线

最短，以此标准来确定继电器的动作时间  $t_1$ 。如果断电后回路重新带电，负载很大（冷启动负载），或者要和下游设备如熔断器/重合闸互相配合，时间整定值可能需要大一些。

2. 根据电源方向的下一个变电站的断路器情况来确定继电器动作时间，即  $t_{2a} = t_1 + t_{\text{margin}}$ ， $t_{2a}$  为断路器 2 的后备保护继电器的动作时间， $t_{\text{margin}}$  为时间级差。本例中故障水平和前面确定断路器继保动作时间  $t_1$  时所用的故障水平相同。

3. 如上述 1 和 2 中的故障电流相同，已知  $t_{2a}$  和继电器 2 的启动电流值，那么计算继电器 2 的时间整定值。要选用特性曲线高于计算值的部分，且与时间整定刻度值最为接近。

4. 确定继电器 2 的动作时间  $t_{2b}$ ，但是采用速断单元动作前的故障水平。

5. 从 2 开始重复进行。

如果继电器特性曲线以秒 (s) 为单位，就可以采用上述的计算步骤。如果动作曲线上时间调整以 1s 的百分比为单位，那么可以从最快的动作时间倍数开始，用于时间刻度 1，以此来确定时间整定刻度值。在大多现代继电器中，时间整定最小可以为 0.1s，并以 0.1s 为步进。

### 5.3.3.3 时间级差

两个连续的时间/电流特性曲线之间，通常要留 0.25 ~ 0.4s 的时间级差。这样可以避免由于以下情况的差异，而失去保护的选择性：

- 断路器断开时间。
- 故障清除后继电器超限工作时间。
- 故障水平不同，继电器特性曲线的差异（如由于制造过程中的误差），电流互感器误差。

数字继电器不存在继电器的超限工作状态，因此时间级差可以低至 0.2s。

Dy 联结变压器的 Y 联结侧发生单相故障，D 联结侧是无法发现的。因此，接地故障继电器整定时，D 联结侧可设置最短的时间整定值，这样可以大幅度缩短靠近电源的接地故障继电器的动作时间。

### 5.3.3.4 继保特性的数学表达式

继电器动作特性可以不用对数曲线，而用数学公式来表示，这些公式也同样适用于前面相和地单元的整定。IEC 和 ANSI/IEEE 的标准用以下公式定义动作时间：

$$t = \frac{k\beta}{(I/I_s)^\alpha - 1} + L \quad (5.7)$$

式中， $t$  为继电器动作时间，单位为 s； $k$  为时间刻度，或者时间倍数整定； $I$  为二次侧故障电流，单位为 A； $I_s$  为选择的启动电流； $L$  为常数。

常数  $\alpha$  和  $\beta$  决定了继电器特性的斜率。表 5.1 给出了 ANSI/IEEE 和 IEC 等标准规定的各种过电流继电器的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $L$ 。图 5.7 和图 5.8 给出了两类标准中过电流继电器的典型特性曲线。

表 5.1 ANSI/IEEE 和 IEC 等标准规定的各种过电流继电器常数

曲线	标准	$\alpha$	$\beta$	$L$
中等反时限	IEEE	0.02	0.0515	0.114
非常反时限	IEEE	2.0	19.61	0.491
极端反时限	IEEE	2.0	28.2	0.1217
反时限	CO8	2.0	5.95	0.18
短时反时限	CO2	0.02	0.0239	0.0169
标准反时限	IEC	0.02	0.14	0
非常反时限	IEC	1.0	13.5	0
极端反时限	IEC	2.0	80.0	0
长时反时限	UK	1.0	120	0

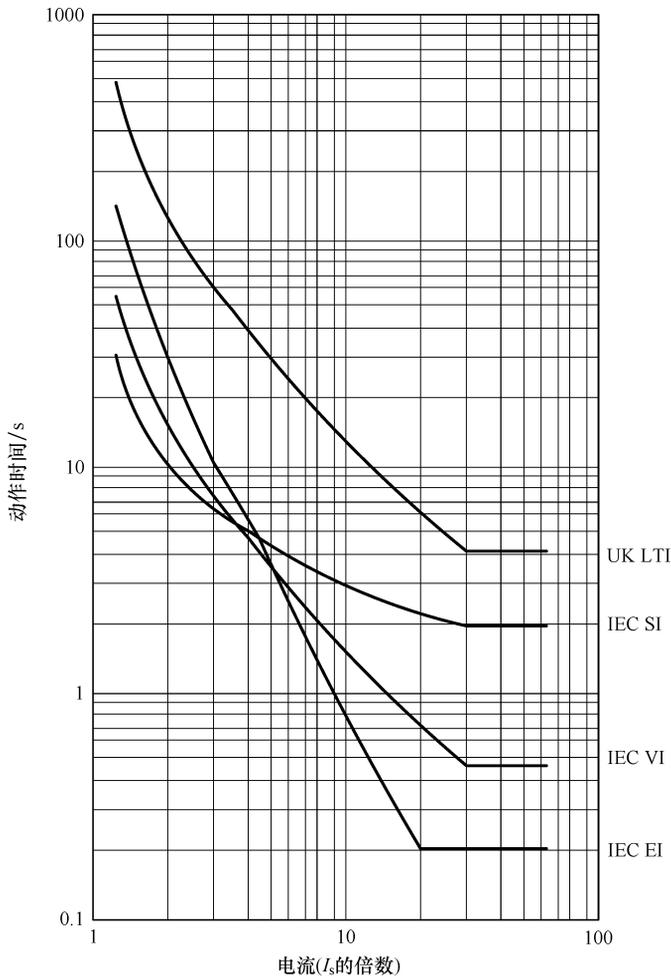


图 5.7 IEC 标准中过电流继电器的典型特性曲线

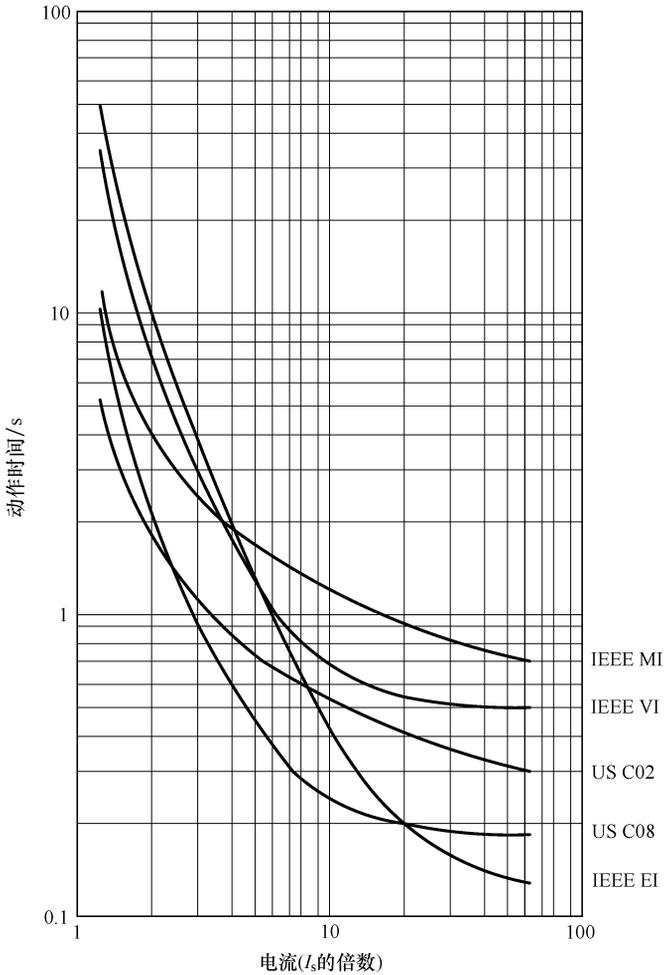


图 5.8 IEEE/ANSI 标准中过电流继电器的典型特性曲线

已知继电器特性曲线，时间刻度整定值  $k$  的响应时间、启动电流整定值及式 (5.7) 中其他值的计算就比较简单了。同样，如果已经确定了响应时间和启动电流整定值，从式 (5.7) 也可以推出时间刻度整定值  $k$ 。

## 5.4 继电器配合的限制条件

### 5.4.1 最小短路电流水平

如果时延单元是按最大故障水平整定的，那么还必须在最小故障水平下检验继电器是否按次序正常动作。这种情况可以对整定倍数进行确认——式 (5.7) 中 ( $I/I_s$ )，即在这些故障水平下整定倍数均大于 1.5。

### 5.4.2 发热限制

过电流继电器的特性曲线确定后，还要检查特性曲线是否在设备和电缆可承受的热容量以下。若是导线，那么就要检查厂商提供的热容量图，图中标明了不同尺寸的导体截面可以耐受的短路电流值。图 5.9 给出了热塑绝缘的铜导体的热容量图。若是电机，那么就要咨询厂商相关的信息。

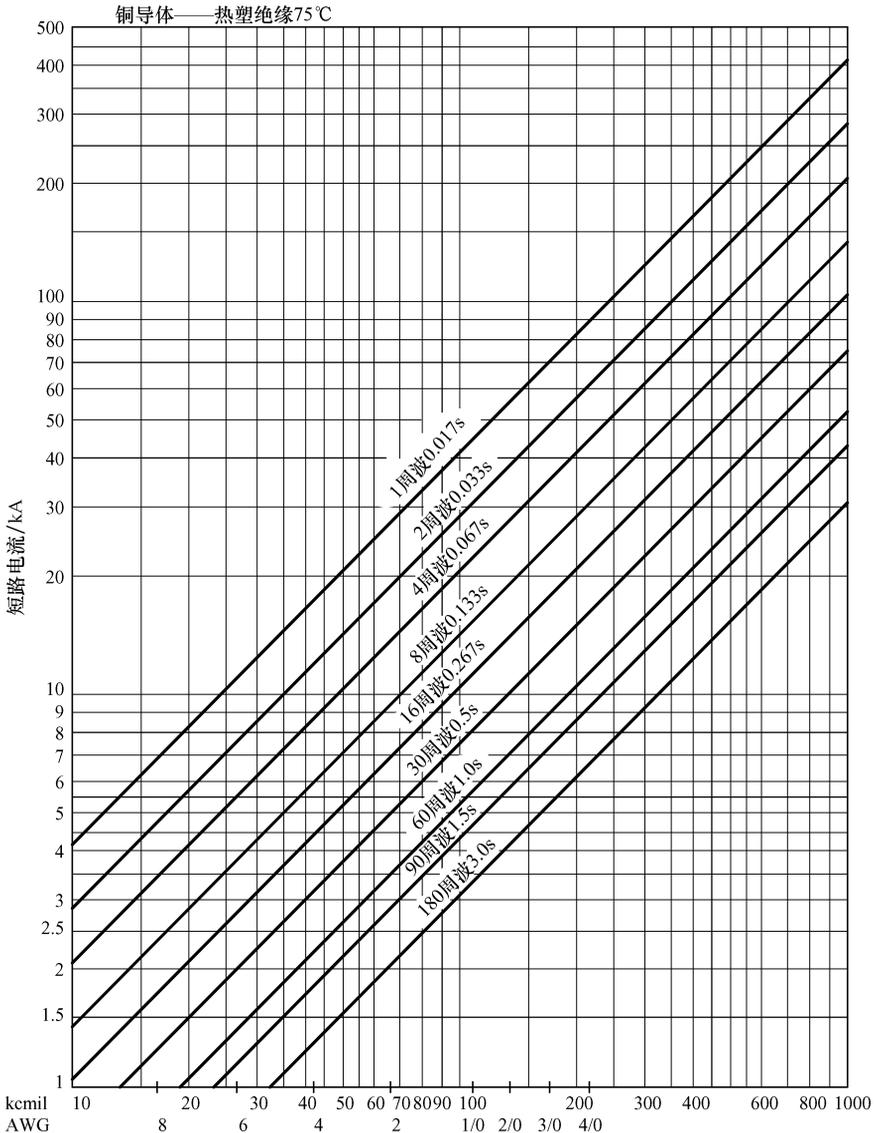


图 5.9 75°C 下热塑绝缘铜导体的发热限制

若为变压器，其在特定时间内可以耐受的故障电流幅值受变压器阻抗的限制。基于变压器额定容量（kV · A）和短路阻抗，ANSI/IEEE 242-1986 规定了4种液体绝缘的变压器短路容量曲线。

图 5.10 ~ 图 5.13 给出了4种变压器热容量曲线：

- 第Ⅰ类——单相额定容量 5 ~ 500kV · A；三相 15 ~ 500kV · A。
- 第Ⅱ类——单相额定容量 501 ~ 1667kV · A；三相 501 ~ 5000kV · A。
- 第Ⅲ类——单相额定容量 1668 ~ 10000kV · A；三相 5001 ~ 30000kV · A。
- 第Ⅳ类——单相额定容量 10000kV · A 以上；三相 30000kV · A 以上。

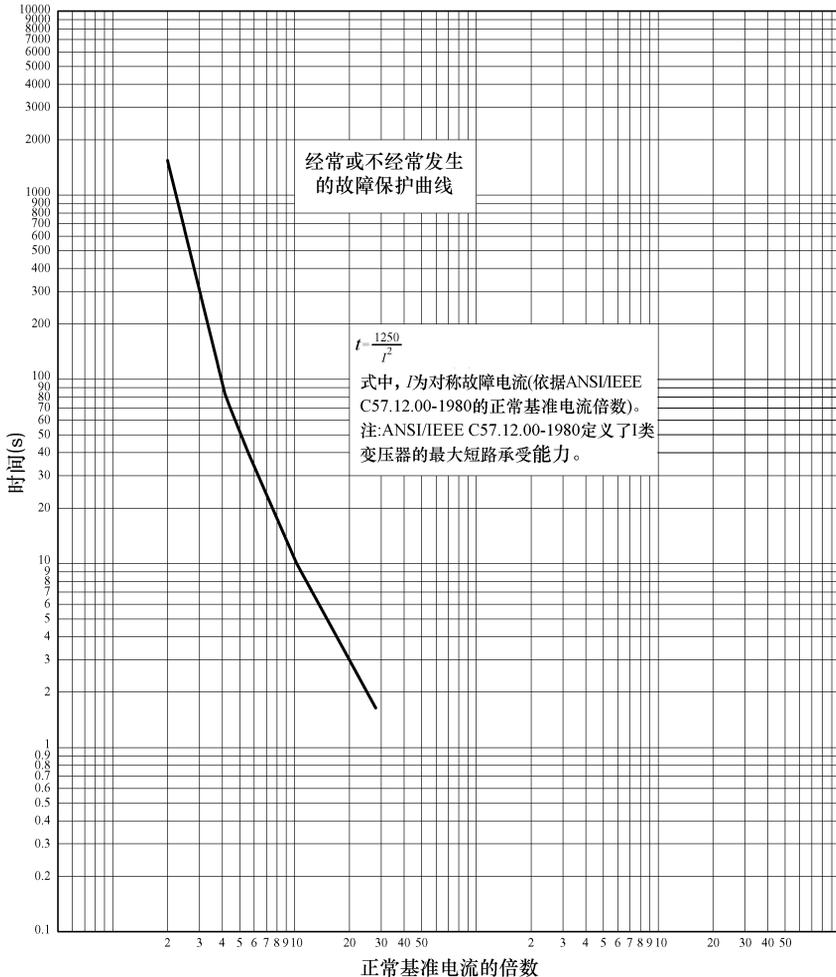


图 5.10 单相 5 ~ 500kV · A 及三相 15 ~ 500kV · A 变压器的热容量曲线 (ANSI/IEEE 242-1986)

Dy 联结的变压器热容量曲线必须要按比例向左移动  $1/\sqrt{3}$ ，使继电器更为敏

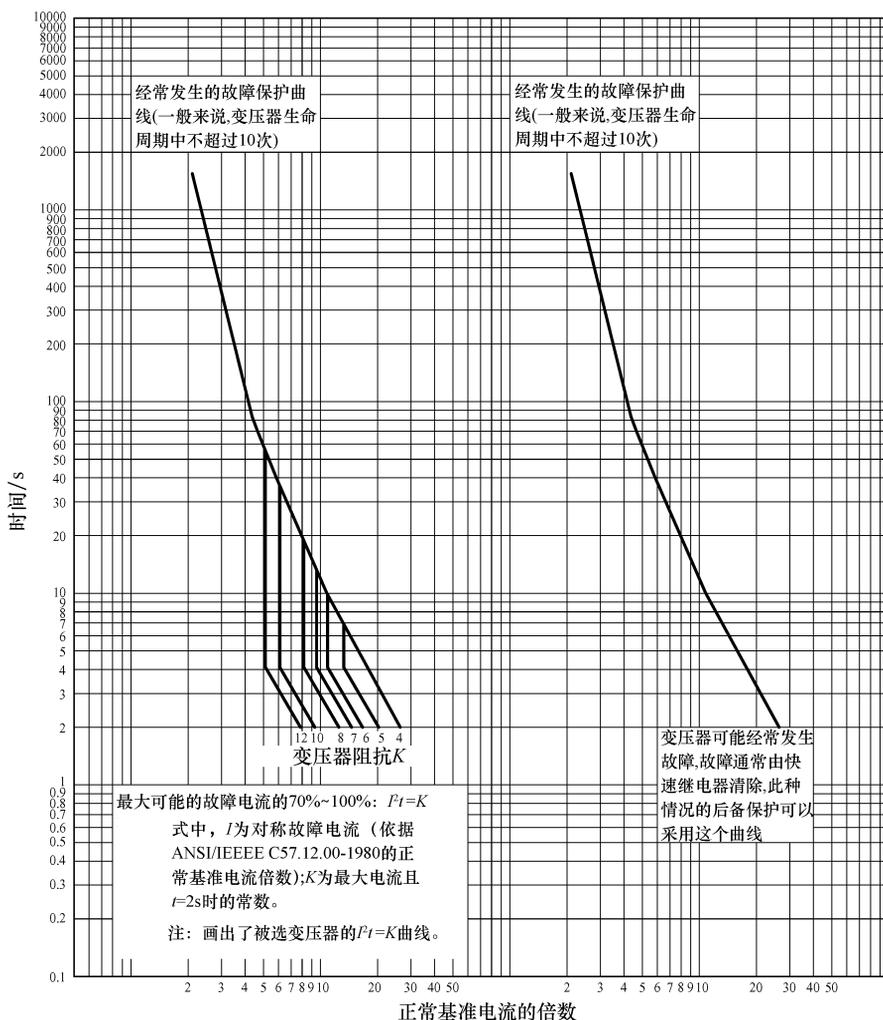


图 5.11 单相 501 ~ 1667kV · A 及三相 501 ~ 5000kV · A 变压器的热容量曲线 (ANSI/IEEE 242-1986)

感。这是因为单相接地故障时 (见本章 5.5 节), 相比于二次侧的继电器, 一次侧的继电器得到的电流较小, 曲线移动可以解决这个问题。

### 5.4.3 启动电流值

当系统其他设备启动时, 要确保继电器整定值不会引起任何问题。这点对于电机来说尤为重要。此外, 表明电机启动时额定电流倍数的代码, 也必须清楚。

对于变压器来说, 励磁涌流可以表示为  $I_{Inrush} = KI_{nom}$ 。其中,  $I_{nom}$  为变压器额定

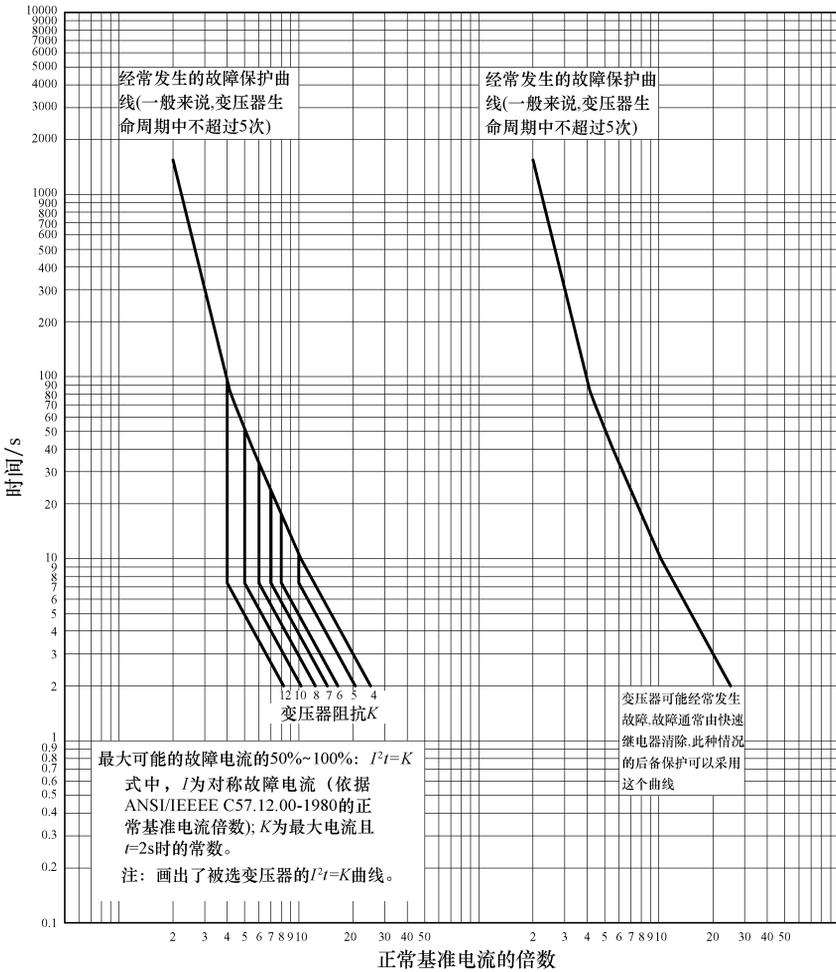


图 5.12 单相 1668 ~ 10000kV · A 及三相 5001 ~ 30000kV · A 变压器的热容量曲线 (ANSI/IEEE 242-1986)

电流; 常数  $K$  取决于变压器容量, 500 ~ 2500kV · A 时  $K = 8$ , 2500kV · A 以上时  $K = 10$ 。涌流点定义为 0.1s 时的电流。

**例 5.2**

对于图 5.14 所示的系统, 根据已知数据, 进行如下计算:

- 计算额定电流和各断路器三相短路水平。
- 选择电流互感器的变比。
- 确定所有继电器的启动电流整定值、时间整定值、速断整定值, 确保保护设计的互相配合。
- 计算断路器 2 的过电流继电器速断单元对线路 BC 的保护范围百分比。

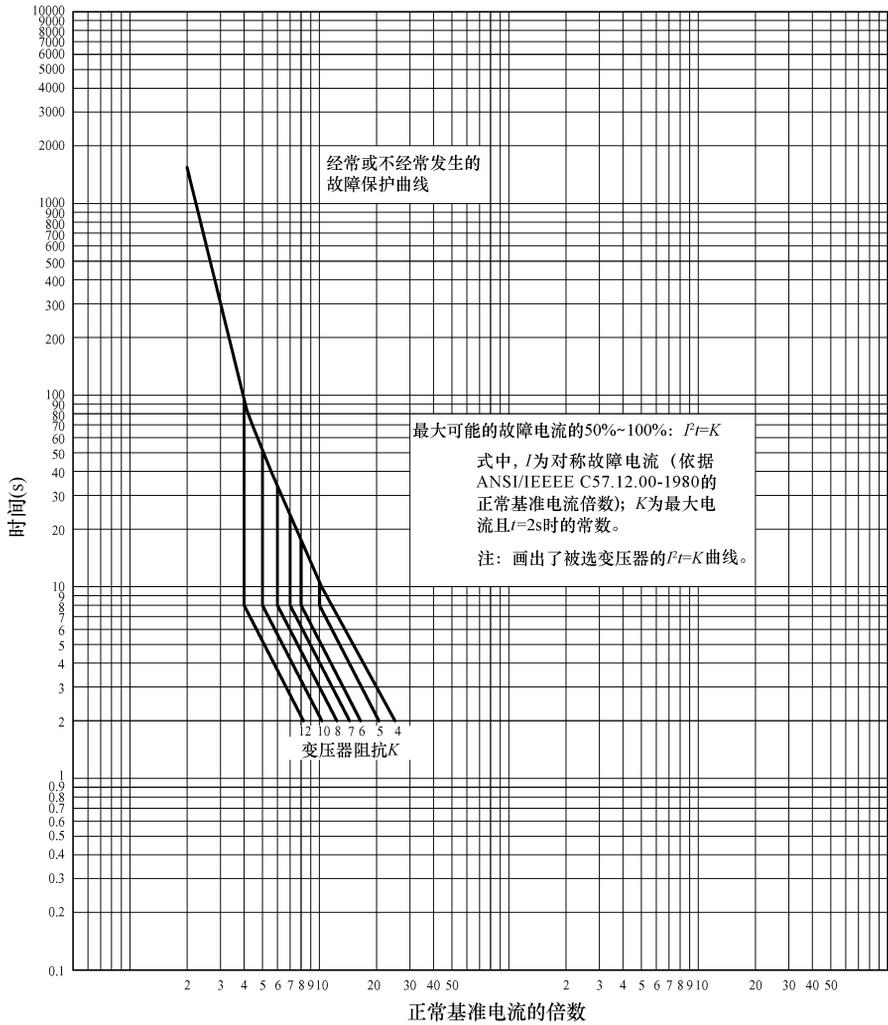


图 5.13 单相 10000kV·A 以上及三相 30000kV·A 以上变压器的热容量曲线 (ANSI/IEEE 242-1986)

- 绘制系统继电器的时间/电流特性曲线。

考虑以下因素:

- 动作时间级差为 0.4s。
- 所有继电器均为反时限特性, 如图 5.15 所示。
- 继电器数据。

启动电流整定 1~12A, 步进为 1A。

时间整定值 如图 5.15 所示。

速断 6~144A, 步进为 1A。

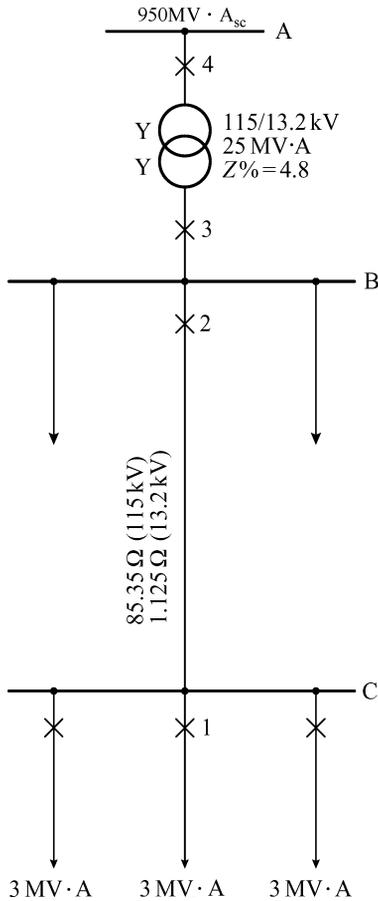


图 5.14 例 5.2 的示意图

**答案**

计算额定电流和三相短路电流

如图 5.14 所示，母线 A 的短路电流和线路 BC 的阻抗，可按以下步骤计算：

$$Z_{\text{source}} = \frac{V^2}{P_{\text{sc}}} = \left[ \frac{(115 + 10^3)^2}{950 \times 10^6} \right] \Omega = 13.92 \Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

$$Z_{\text{transf}} = Z_{\text{pu}} Z_{\text{Base}} = \left[ 0.048 \times \frac{(115 \times 10^3)^2}{25 \times 10^6} \right] \Omega = 25.39 \Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

$$Z_{\text{lineBC}} = 85.35 \Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

系统等效电路如图 5.16 所示。

额定电流为

$$I_{\text{noml}} = \frac{P}{\sqrt{3}V} = \left[ \frac{3 \times 10^6}{\sqrt{3}(13.2 \times 10^3)} \right] \text{A} = 131.2 \text{A}$$

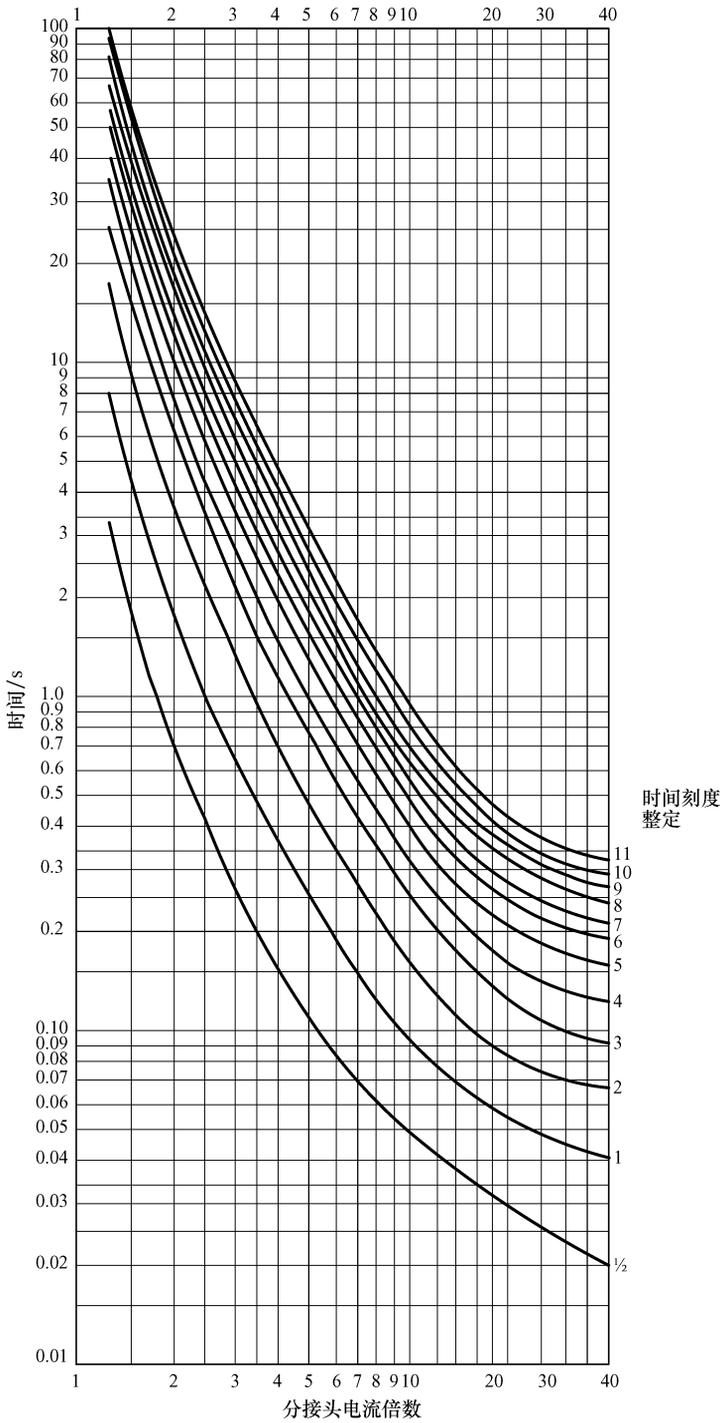


图 5.15 反时限继电器的典型动作曲线

$$I_{\text{nom}2} = 3I_{\text{nom}1} = (3 \times 131.2) \text{ A} = 393.6 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom}3} = \left[ \frac{25 \times 10^6}{\sqrt{3}(13.2 \times 10^3)} \right] \text{ A} = 1093.5 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom}4} = \left[ \frac{25 \times 10^6}{\sqrt{3}(115 \times 10^3)} \right] \text{ A} = I_{\text{nom}3} (13.2/115) = 125.5 \text{ A}$$

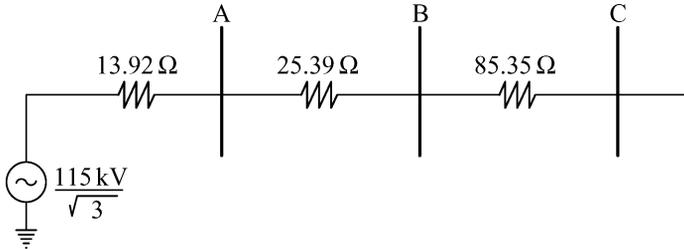


图 5.16 图 5.14 的系统等效电路

短路电流计算。

由等效回路可得：

$$I_{\text{fault}C} = \left[ \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (13.92 + 25.39 + 83.35)} \right] \text{ A} = 532.6 \text{ A} \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

$$= [532.6 (115/13.2)] \text{ A} = 4640.2 \text{ A} \quad \text{折算至 13.2kV 侧}$$

$$I_{\text{fault}B} = \left[ \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (13.92 + 25.39)} \right] \text{ A} = 1689.0 \text{ A} \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

$$= [1689 \times (115/13.2)] \text{ A} = 14714.8 \text{ A} \quad \text{折算至 13.2kV 侧}$$

$$I_{\text{fault}A} = \left( \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13.92} \right) \text{ A} = 4769.8 \text{ A} \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

电流互感器变比选择。

电流互感器变比由以下两个值中较大的一个确定：

- $I_{\text{nom}}$ 。
- 未饱和情况下的最大短路电流。要满足这种情况，就要假设使用 C100 的铁心，总负荷为  $1\Omega$ ，那么  $I_{\text{sc}}(5/X) \leq 100 \text{ A}$ ， $I_{\text{sc}}$  为短路电流。

表 5.2 给出了例 5.2 的额定电流、短路电流和变比的计算结果。

表 5.2 例 5.2 的额定电流、短路电流和 CT 变比计算结果

断路器编号	$P_{\text{nom}} / (\text{MV} \cdot \text{A})$	$I_{\text{nom}} / \text{A}$	$I_{\text{sc}} / \text{A}$	$(5/100) I_{\text{sc}} / \text{A}$	CT 变比
1	3	131.2	4640.0	232.0	300/5
2	9	393.6	14714.8	1735.7	800/5
3	25	1093.5	14714.8	735.7	1100/5
4	25	125.5	4769.8	238.5	300/5

确定启动电流整定值、时间刻度整定值和速断整定值

启动电流整定值计算如下：

继电器 1  $[1.5(131.2)5/300]A = 3.28A$ ，则启动电流为 4A

继电器 2  $[1.5(393.6)5/800]A = 3.69A$ ，则启动电流为 4A

继电器 3  $[1.5(1093.5)5/1100]A = 7.46A$ ，则启动电流为 8A

继电器 4  $[1.5(125.5)5/300]A = 3.14A$ ，则启动电流为 4A

确定时间刻度整定值和速断整定值如下：

对于继电器 1，有

$$I_{\text{pick-up}} = \left( \frac{4 \times 300}{5} \right) A = 240A$$

时间刻度整定值为 1.0。

速断单元整定值为

$$(0.5 I_{\text{sc}})(1/\text{CTR}) = \left[ (0.5 \times 4640) \times \frac{5}{300} \right] A = 38.67A$$

整定值设为 39A，则

$$I_{\text{inst. trip}} = \left( 39 \times \frac{300}{5} \right) A = 2340A \quad 13.2\text{kV 侧}$$

时间倍数整定

$$\text{PSM}_b = \left( 2340 \times \frac{5}{300} \right) \times \frac{1}{4} = 9.75$$

如图 5.15 所示，时间倍数为 9.75，时间刻度整定值为 1，则  $t_{1b} = 0.1\text{s}$ 。

对于继电器 2，有

2340A 的电流应使  $t_{2a}$  动作时间至少为  $(0.1 + 0.4)\text{s} = 0.5\text{s}$

$$\text{PSM}_a = 2340 \times \frac{5}{800} \times \frac{1}{4} = 3.66$$

PSM 为 3.66 倍， $t_{\text{op}}$  至少为 0.5s，时间刻度值为 2.0。

速断整定为

$$(1.25 I_{\text{faultC}})(1/\text{CTR}) = \left[ (1.25 \times 4640) \times (5/800) \right] A = 36.25A,$$

设定为 37A，则

$$I_{\text{inst. prim}} = \left[ (37) \frac{800}{5} \right] A = 5920A \quad \text{折算至 } 13.2\text{ kV 侧}$$

$$\text{PSM}_b = 5920 \times \frac{5}{800} \times \frac{1}{4} = 9.25$$

PSM 为 9.25 倍，时间刻度整定为 2.0，则  $t_{2b} = 0.18\text{s}$ 。

对于继电器 3，有

与继电器 2 不同， $I_{\text{inst. prim2}} = 5920A$

要求  $t_{3a}$  至少为  $(0.18 + 0.4)\text{s} = 0.58\text{s}$

$$\text{PSM}_a = 5920\text{A} \times \frac{5}{1100} \times \frac{1}{8} = 3.36$$

PSM 为 3.36 倍,  $t_{\text{op}} = 0.58\text{s}$ , 时间刻度值为 2.0。

然而, 如本章 5.3.1 节中提到的, 母线 B 故障时, 为了防止与母线侧电源保护的速断单元失配, 此时断路器 3 的继电器速动单元要有一定的延时, 优先级降低。

$$I_{\text{sc}} = 14714.8 \quad \text{折算至 } 13.2\text{kV 侧}$$

$$\text{PSM}_b = 14714.8 \times \frac{5}{1100} \times \frac{1}{8} = 8.36$$

PSM 为 8.36 倍, 时间刻度整定值为 2.0, 则  $t_{3b} = 0.21\text{s}$ 。

对于继电器 4, 有

$$\text{对于 } 14714.8\text{A}, \text{PSM} = 14714.8 \times \frac{13.2}{115} \times \frac{5}{300} \times \frac{1}{4} = 7.04$$

要求

$$t_4 = (0.21 + 0.4)\text{s} = 0.61\text{s}$$

PSM 为 7.04,  $t_{\text{op}} = 0.61\text{s}$  则时间刻度整定为 5.0。

速断单元整定为

$$\begin{aligned} (1.25I_{\text{faultB}})(1/\text{CTR}) &= \left(1.25 \times 1689 \times \frac{5}{300}\right)\text{A} \\ &= 35.19\text{A} \end{aligned}$$

则整定值为 36A。

$$I_{\text{inst. prim}} = \left(36 \times \frac{300}{5}\right)\text{A} = 2160\text{A} \quad \text{折算至 } 115\text{kV 侧}$$

$$I_{\text{inst. prim}} = \left(2160 \times \frac{115}{13.2}\right)\text{A} = 18818.2\text{A} \quad \text{折算至 } 13.2\text{kV 侧}$$

表 5.3 给出了 4 个继电器整定汇总。

表 5.3 例 5.2 继电器整定汇总

和断路器相关的继电器编号	启动电流/A	时间刻度	瞬时 $I_{\text{sec}}/\text{A}$	瞬时 $I_{\text{prim}}/\text{A}$
1	2.5	—	40	2400
2	4.0	2	37	5920
3	8.0	2	—	—
4	4.0	5	36	18818

断路器 2 相关的继电器速断单元可以保护的线路 BC 段的百分比为

$$X\% = \frac{K_s(1 - K_i) + 1}{K_i}$$

$$K_i = \frac{I_{\text{sc pick-up}}}{I_{\text{sc end}}} = \frac{5920}{4640} = 1.28$$

$$K_s = \frac{Z_{\text{source}}}{Z_{\text{element}}} = \frac{13.92 + 25.39}{85.35} = 0.46$$

$$X\% = \frac{0.46(1 - 1.28) + 1}{1.28} = 0.68$$

因此，速断单元保护了线路 BC 长度的 68%

图 5.17 所示为例 5.2 中各继电器的配合曲线，图中所有电流均折算至 13.2kV 侧。

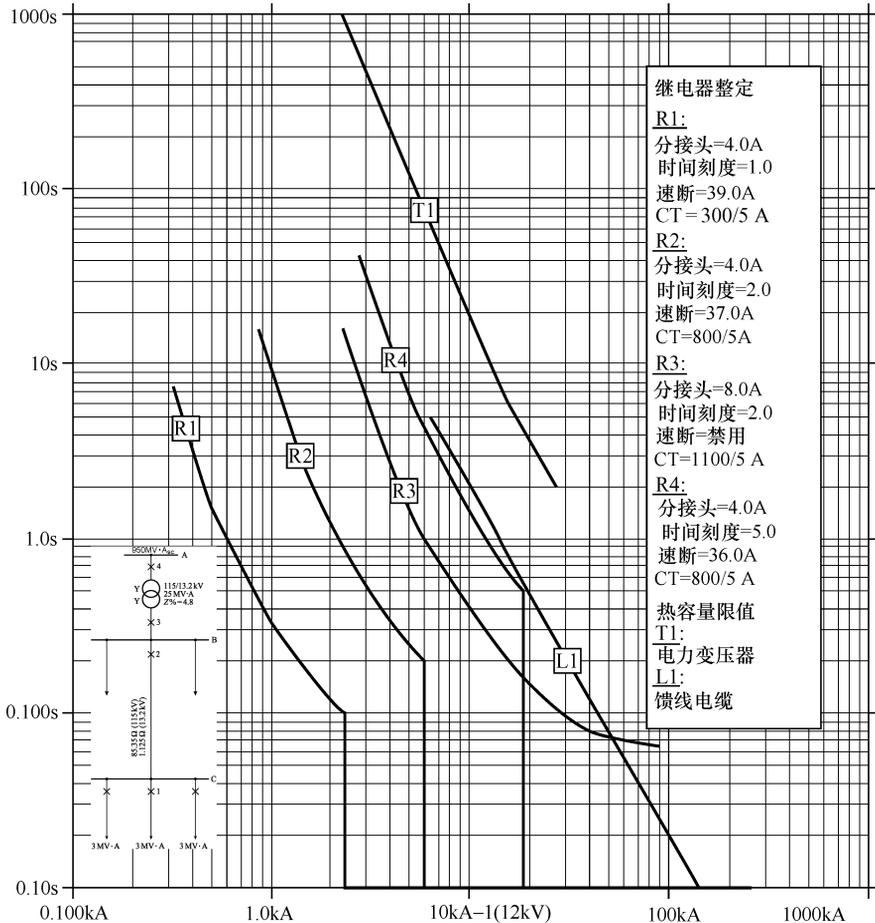


图 5.17 例 5.2 中各继电器的配合曲线

### 5.5 与 Dy 联结变压器的配合

在 Dy 联结变压器的过电流继电器的配合计算中，要考虑二次侧三相短路、相间短路、单相短路故障时变压器的电流差异，如图 5.18 所示。

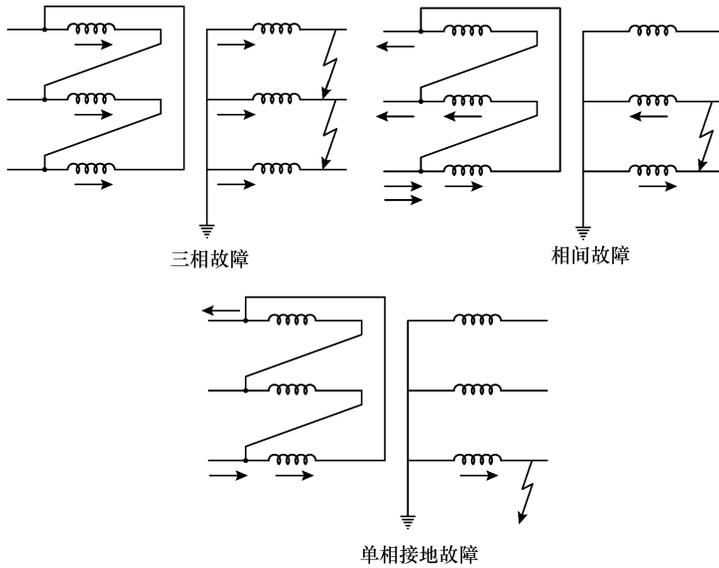


图 5.18 Dy 联结变压器故障的电流分布

为简化计算，假设变压器一次和二次侧线电压相同。这样，一次绕组匝数为二次绕组匝数的 $\sqrt{3}$ 倍，即  $N_1 = \sqrt{3}N_2$ 。

### 5.5.1 三相短路故障

$$I_f = \frac{E_{\phi-n}}{X} = I \quad (5.8)$$

$$I_{\text{delta}} = I \frac{N_2}{N_1} = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (5.9)$$

$$I_{\text{primary}} = \sqrt{3}I_{\text{delta}} = I \quad (5.10)$$

由以上计算可知，由于一次和二次电压相等，且故障涉及三相，所以二次绕组的各继电器电流和一次绕组的各继电器电流相等。

### 5.5.2 相间短路故障

$$I_f = \frac{E_{\phi-\phi}}{2X} = \frac{\sqrt{3}E_{\phi-n}}{2X} = \frac{\sqrt{3}}{2}I \quad (5.11)$$

$$I_{\text{delta}} = \frac{\sqrt{3}}{2}I \frac{N_2}{N_1} = \frac{I}{2} \quad (5.12)$$

$$I_{\text{primary}} = 2I_{\text{delta}} = I \quad (5.13)$$

二次绕组的继电器电流为一次绕组的继电器最大电流的 $\sqrt{3}/2$ 倍。由图 5.18 所

示可知，此种故障情况，一次电流分布为 1—1—2，二次电流分布为 0—1—1。

### 5.5.3 单相接地故障

$$I_f = \frac{E_{\phi-n}}{X} = I \quad (5.14)$$

$$I_{\text{delta}} = I \frac{N_2}{N_1} = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (5.15)$$

$$I_{\text{primary}} = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (5.16)$$

因此，对于单相接地故障，二次绕组故障相的继电器电流为同相的一次侧继电器电流的 $\sqrt{3}$ 倍。

以上三种故障情况的计算结果如表 5.4 所示。由结果可知，对于过电流继电器的配合来说最严酷的情况是相间短路故障。此时二次侧的继电器电流比一次侧的继电器的等效电流要小，不能确保保护的选择性。因此，一次侧和二次侧的继电器要有时间级差。时间级差设定，基于二次侧的继电器电流为 $\sqrt{3}I_f/2$  时的动作时间，以及一次侧继电器为全故障电流  $I_f$  时的动作时间，如图 5.19 所示。

表 5.4 三种故障情况的计算结果

故障	$I_{\text{primary}}$	$I_{\text{secondary}}$
三相短路	$I$	$I$
相间短路	$I$	$\sqrt{3}I/2$
单相接地	$I$	$\sqrt{3}I$

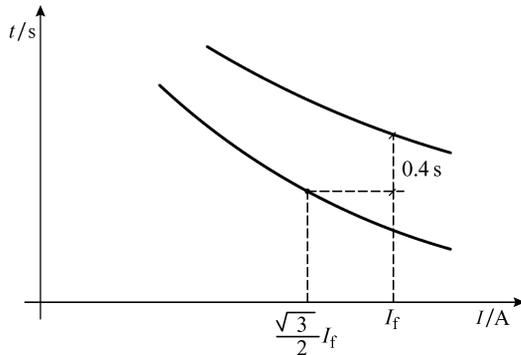


图 5.19 Dy 变压器的过电流继电器配合

#### 例 5.3

如图 5.20 所示，计算以下问题：

- 母线 1、2 的三相短路电流。
- 断路器 1~8 相关的电流互感器变比，已知断路器 9 的电流互感器变比为 250/5，其他电流互感器变比为 100 的倍数。假设每个互感器的负载为  $1\Omega$ ，使用 C100。
- 保护配合的时间级差为 0.4s 时，确保保护配合的速断单元整定，PU 和时间刻度整定。
- 断路器 6 的过电流保护继电器，其速断单元可以保护的 34.5kV 线路的百分比。

其他已知条件如下：

- PU 阻抗基于的数据为

$$V = 34.5\text{kV}$$

$$P = 100\text{MV} \cdot \text{A}$$

- 继电器 7 的整定值为

$$\text{PU} = 4\text{A}$$

$$\text{时间刻度} = 0.3$$

$$\text{速断} = \text{一次侧 } 1100\text{A}$$

- 所有继电器都为 IEC 非常反时限特性，如表 5.1 所示。
- 继电器数据为

PU 整定为 1 到 12A，步进为 1A

时间刻度整定为 0.05 到 10，步进为 0.05

速断 6 到 14A，步进为 1A

- 电源的继电器速断单元整定基于其最大额定电流的 10 倍。
- 变电站 A 的 34.5kV 母线故障时的短路功率和电流，如图 5.20 所示。

**答案**

计算等效阻抗

变电站 A 的 34.5kV 母线故障的短路水平，可由图 5.20 所示得到 ( $183.11\text{MV} \cdot \text{A}$ )。母线后的系统等效阻抗计算如下：

$$Z_{\text{base}} = \frac{V^2}{P_{\text{sc}}} = \left( \frac{34500^2}{183.11 \times 10^6} \right) \Omega = 6.5\Omega \quad \text{折算至 } 34.5\text{kV 侧}$$

$$Z_{\text{transf1}} = \left( 0.1 \times \frac{34500^2}{15 \times 10^6} \right) \Omega = 7.93\Omega \quad \text{折算至 } 34.5\text{kV 侧}$$

$$= 88.17\Omega \quad \text{折算至 } 115\text{kV 侧}$$

$$Z_{\text{transf2}} = \left( 0.073 \times \frac{34500^2}{3 \times 10^6} \right) \Omega = 28.96\Omega \quad \text{折算至 } 34.5\text{kV 侧}$$

$$Z_{\text{line}} = \left( 1.086 \times \frac{34500^2}{100 \times 10^6} \right) \Omega = 12.93\Omega \quad \text{折算至 } 34.5\text{kV 侧}$$

折算至 34.5kV 侧的等效正序阻抗网络，如图 5.21 所示。

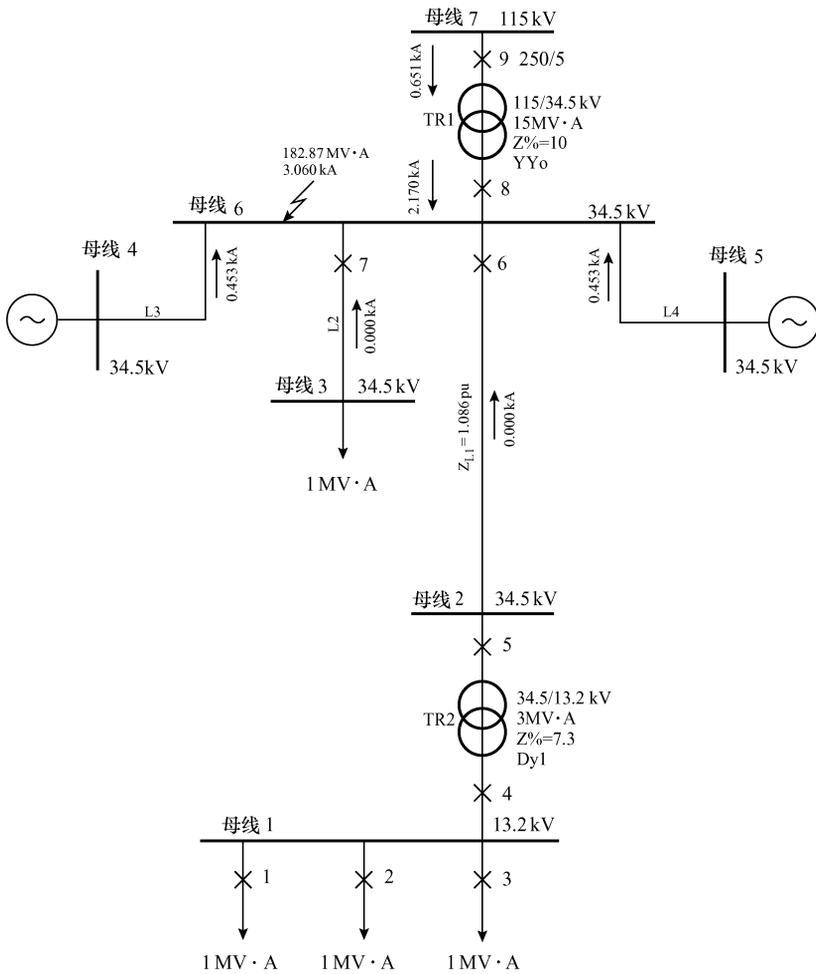


图 5.20 例 5.3 标注故障电流的单线示意图

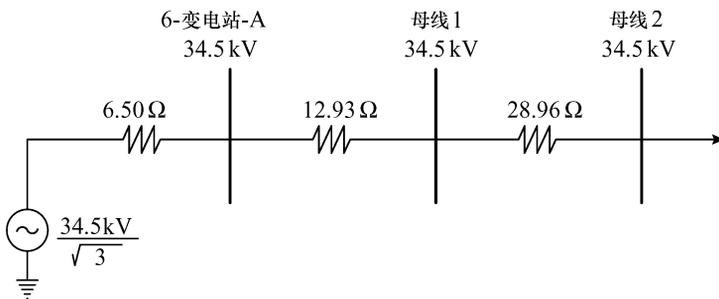


图 5.21 例 5.3 的正序网络

## 额定电流

$$I_{\text{nom}1,2,3} = \left( \frac{1 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13.2 \times 10^3} \right) \text{A} = 43.74 \text{A} \quad 13.2 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{nom}4} = \left( \frac{3 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13.2 \times 10^3} \right) \text{A} = 131.22 \text{A} \quad 13.2 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{nom}5} = \left( \frac{3 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 34.5 \times 10^3} \right) \text{A} = 50.20 \text{A} \quad 34.5 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{nom}6} = 50.20 \text{A} \quad 34.5 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{nom}7} = \left( \frac{1 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 34.5 \times 10^3} \right) \text{A} = 16.73 \text{A} \quad 34.5 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{nom}8} = 251.02 \text{A} \quad 34.5 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{nom}9} = \left( \frac{15 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 115 \times 10^3} \right) \text{A} = 75.31 \text{A} \quad 115 \text{kV 侧}$$

## 短路水平

34.5kV 侧的变压器短路容量  $P_{\text{sc}} = (\sqrt{3} \times 2170.34 \times 34.5 \times 10^3) \text{MV} \cdot \text{A} = 129.69 \text{MV} \cdot \text{A}$

$$Z_{\text{transf1}} + Z_{\text{base}} = \left( \frac{34.5^2}{129.69} \right) \Omega = 9.18 \Omega \quad 34.5 \text{kV 侧}$$

$$= 101.97 \Omega \quad 115 \text{kV 侧}$$

$$Z_{\text{system}} = 101.97 \Omega - 88.17 \Omega = 13.80 \Omega \quad 115 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{fault}1,2,3,4} = \left( \frac{34.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (6.5 + 12.93 + 28.96)} \right) \text{A} = 411.63 \text{A} \quad 34.5 \text{kV 侧}$$

$$= 1075.84 \text{A} \quad 13.2 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{fault}5} = \left( \frac{34.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (6.5 + 12.93)} \right) \text{A} = 1025.15 \text{A} \quad 34.5 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{fault}6,7} = \left( \frac{34.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6.5} \right) \text{A} = 3064.40 \text{A} \quad 34.5 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{fault}8} = \left( \frac{129.69 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 34.5 \times 10^3} \right) \text{A} = 2170.34 \text{A} \quad 34.5 \text{kV 侧}$$

$$I_{\text{fault}9} = \left( \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13.80} \right) \text{A} = 4811.25 \text{A} \quad 115 \text{kV 侧}$$

## 电流互感器的选择

表 5.5 给出了决定电流互感器变比的主要参数值, 决定变比时取下面两个值中的最大者:

- 额定电流;
- 未饱和时的最大短路电流。

因此,  $(I_{sc}5/X) \leq 100$ , 则  $X \geq (I_{sc} \times 5/100)$

表 5.5 例 5.3 中决定电流互感器变比的主要参数

断路器编号	$P_{nom}$ (MV·A)	$I_{nom}$ (A)	$I_{sc}$ (A)	$(5/100) I_{sc}$ (A)	CT 变比
9	15	75.31	4797.35	239.87	250/5
8	15	251.02	2170.40	108.51	300/5
7	1	16.73	3060.34	153.01	200/5
6	3	50.20	3060.34	153.01	200/5
5	3	50.20	1025.67	51.28	100/5
4	3	131.22	1076.06	53.80	200/5
1~3	1	43.74	1076.06	53.80	100/5

### 确定 PU 值

$I_{load1,2,3} = 43.74\text{A}$ ;  $PU_{1,2,3} = [1.5 \times 43.74 \times (5/100)]\text{A} = 3.28\text{A}$ ; 取  $PU_{1,2,3} = 4\text{A}$

$I_{load4} = 131.22\text{A}$ ;  $PU_4 = [1.5 \times 131.22 \times (5/200)]\text{A} = 4.92\text{A}$ ; 取  $PU_4 = 5\text{A}$

$I_{load5} = 50.20\text{A}$ ;  $PU_5 = [1.5 \times 50.20 \times (5/100)]\text{A} = 3.76\text{A}$ ; 取  $PU_5 = 4\text{A}$

$I_{load6} = 50.20\text{A}$ ;  $PU_6 = [1.5 \times 50.20 \times (5/200)]\text{A} = 1.88\text{A}$ ; 取  $PU_6 = 2\text{A}$

$PU_7 = 4\text{A}$

$I_{load8} = 251.02\text{A}$ ;  $PU_8 = [1.5 \times 251.02 \times (5/300)]\text{A} = 6.28\text{A}$ ; 取  $PU_8 = 7\text{A}$

$I_{load9} = 75.31\text{A}$ ;  $PU_9 = [1.5 \times 75.31 \times (5/250)]\text{A} = 2.26\text{A}$ ; 取  $PU_9 = 3\text{A}$

### 确定速断和时间刻度整定

继电器 1~3:

当计算回路末端继电器整定值时, 选择最小时间刻度整定值为 0.05。由已知条件中可知, 速断单元整定值基于 10 倍最大负载电流, 因此

$$I_{inst. trip} = 10I_{nom} (1/CTR) = [10 \times 43.74 \times (5/100)]\text{A} = 21.87\text{A}$$

则整定值为 22A, 有

$$I_{prim. trip} = [22 \times (100/5)]\text{A} = 440\text{A}$$

对于非常反时限过电流继电器来说, IEC 给出了  $\alpha = 1.0$ 、 $\beta = 13.5$ 、 $L = 0$ ; 那么继电器动作时间  $t = [\text{时间刻度值} \times 13.5] / (\text{PSM} - 1)$ 。其中, PSM 为二次侧故障电流与继电器启动 (PU) 电流的比值。PSM = 22/4 = 5.5, 时间刻度整定值为 0.05, 继电器操作时间为  $[(0.05 \times 13.5) / (5.5 - 1)]\text{s} = 0.15\text{s}$ 。

继电器 4:

在 440A 时, 要与继电器 3 相区别, 要求动作时间为  $t_{4a} = (0.15 + 0.4)\text{s} = 0.55\text{s}$ 。

$\text{PSM}_{4a} = (440 \times 5/200) \times (1/5) = 2.2$ 。PSM 为 2.2 倍时,  $t_{4a} = 0.55\text{s}$ , 时间刻度整定值为  $0.55 \times (2.2 - 1) / 13.5 = 0.0490$ , 则取 0.05。

如本章 5.3.1 节中提到的, 继电器 4 没有速断单元。

相间故障的动作时间由 86% 的三相故障电流决定。

$$\text{PSM}_{4b} = 0.86 \times (1075.84 \times 5/200) \times (1/5) = 4.63$$

类似可得继电器 1~3 的动作时间,  $t_{4b} = 0.19\text{s}$ 。

继电器 5:

继电器 4 的后备保护, 考虑了相间故障的动作时间为  $t_{5a} = (0.19 + 0.4)\text{s} = 0.59\text{s}$ 。

$$\text{PSM}_{5a} = 1075.84 \times (13.2/34.5) \times (5/100) \times (1/4) = 5.15$$

$\text{PSM}_{5a}$  为 5.15 倍、 $t_{5a} = 0.59\text{s}$ , 时间刻度整定值为 0.20。

速断单元整定为  $[1.25 \times 1075.84 \times (13.2/34.5) \times (5/100)]\text{A} = 25.73\text{A}$ , 取 26A, 因此  $I_{\text{prim. trip}} = [26 \times (100/5)]\text{A} = 520\text{A}$

时间继电器的动作时间利用  $\text{PSM}_{5b} = (1/4) \times 26 = 6.5$  计算。6.5 倍时, 时间刻度整定为 0.2, 由继电器特性和式 (5.7) 可得  $t_{5b} = 0.5\text{s}$ 。

继电器 6:

520A 时, 继电器动作时间必须为  $t_{6a} = (0.5 + 0.4)\text{s} = 0.9\text{s}$

$$\text{PSM}_{6a} = 520 \times (5/200) \times (1/2) = 6.5$$

$\text{PSM}_{6a}$  为 6.5 倍、 $t_{6a} = 0.9\text{s}$ , 时间刻度整定为 0.37, 取 0.40。

速断整定为  $[1.25 \times 1025.15 \times (5/200)]\text{A} = 32.04\text{A}$ , 取 32A, 则

$$I_{\text{prim. trip}} = (32 \times 200/5)\text{A} = 1280\text{A}$$

继电器 8:

继电器 8 为继电器 6 和 7 的后备保护, 必须比两者的动作时间长。继电器 7 的一次速断电流整定值为 1100A, 折算至二次侧为 27.5A, 小于继电器 6 的整定值, 继电器 6 和 7 的动作时间都决定于这个电流值。

对于继电器 7,  $\text{PSM} = 1100 \times 5/200 \times 1/4 = 6.87$ 。此时时间刻度整定值为 0.3,  $t_{\text{op}} = 0.69\text{s}$ 。

对于继电器 6,  $\text{PSM} = 1100 \times 5/200 \times 1/2 = 13.75$ 。此时时间刻度整定值为 0.4,  $t_{\text{op}} = 0.42\text{s}$ 。

因此, 动作时间与继电器 7 相区别,  $t_{8a} = (0.69 + 0.4)\text{s} = 1.09\text{s}$

对于继电器 8, 没有考虑变电站 G 和 M 对继电器 6 的作用。而只考虑了变压器输入, 因此  $\text{PSM}_{8a} = 1100 \times (2170.34/3060.40) \times (5/300) \times (1/7) = 1.86$ , 此时  $t_{8a} = (0.69 + 0.4)\text{s} = 1.09\text{s}$ , 时间刻度整定值为 0.07, 取 0.1。

如本章 5.2.1 节中提到的原因, 继电器 8 也没有速断单元整定。继电器所取的最大短路电流为 34.5kV 母线故障时, 从 115kV 母线流至 34.5kV 母线的电流,  $\text{PSM}_{8b} = 2170.34 \times (5/300) \times (1/7) = 5.17$ , 此时时间刻度整定值为 0.1,  $t_{8b} = 0.32\text{s}$ 。

继电器 9:

此继电器为继电器 8 的后备保护,  $t_{9a} = (0.4 + 0.32)\text{s} = 0.72\text{s}$

$$\text{PSM}_{9a} = 2170.34 \times (34.5/115) \times (5/250) \times (1/3) = 4.34$$

PSM<sub>9a</sub> 为 4.34 倍、 $t_{9a}=0.72s$ ，时间刻度整定为 0.18，取 0.20。

速断单元整定为  $[1.25 \times 2170.39 \times (34.5/115) \times (5/250)]A = 16.28A$ ，取 17A。

$I_{\text{prim. trip}} = (17 \times 250/5)A = 850A$ ，折算至 115kV 侧。

此系统的继电器配合曲线和整定值汇总如图 5.22 和表 5.6 所示。

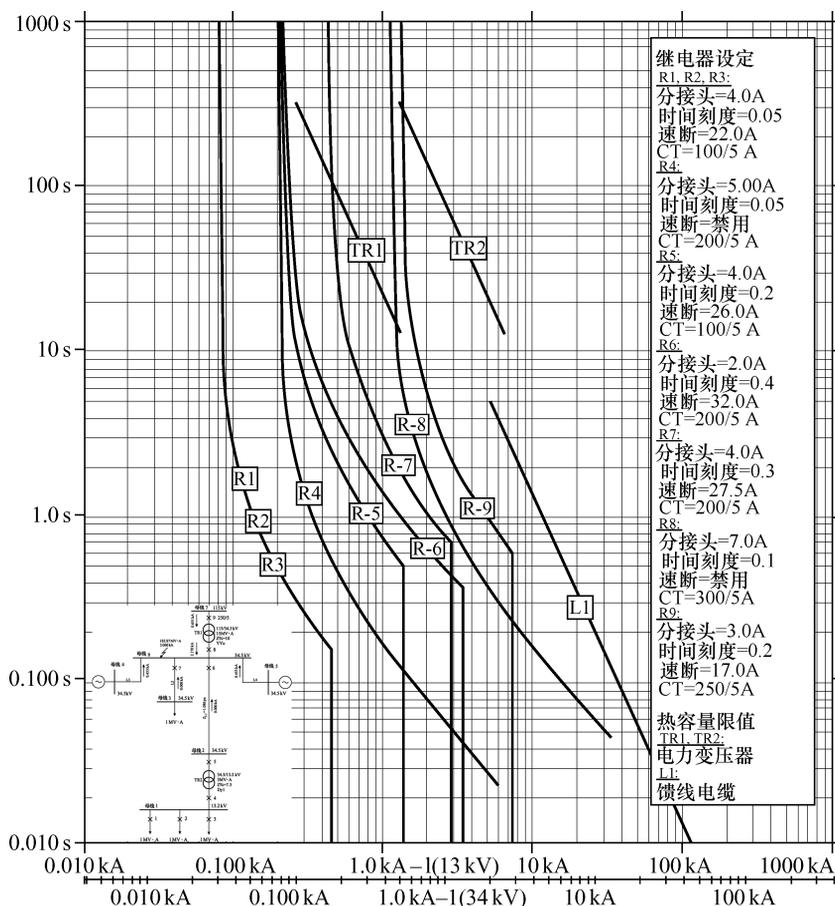


图 5.22 例 5.3 的各继电器配合曲线

表 5.6 例 5.3 的各继电器整定汇总

继电器编号	CT 变比	启动电流/A	时间 刻度	速动电流 $I_{\text{sec}}/A$
1 ~ 3	100/5	4	1/2	20.0
4	200/5	5	1/2	—
5	100/5	4	3	26.0
6	200/5	2	6	32.0
7	200/5	4	5	27.5
8	300/5	7	1	—
9	250/5	3	2	17.0

断路器 6 的过电流继电器速断单元保护的 34.5kV 线路长度的百分比：  
已知

$$X\% = \frac{K_s(1 - K_i) - 1}{K_i}$$

其中

$$K_i = \frac{I_{sc, pick-up}}{I_{sc, end}} = \frac{1280}{1025.15} = 1.25$$

$$K_s = \frac{Z_{source}}{Z_{element}}$$

计算可得

$$Z_r = \frac{V^2}{P} = \frac{34.5^2}{183.11} = 6.50$$

$$K_s = 6.50/12.93 = 0.50$$

$$X\% = \frac{0.50(1 - 1.25) + 1}{1.25} = 0.70$$

速断单元覆盖了 70% 的线路。

## 5.6 与熔断器的配合

要同过电流继电器配合，就有必要考虑用于 MV/LV 变电站变压器保护的熔断器的时间/电流特性。熔断器动作时，直至更换熔断器之前，电路都是开路的。因此，为了避免熔断器动作后需要更换的问题、减少更换熔断器的次数，有必要考虑相应的措施。例如，不考虑熔断器的特性曲线，放弃保护的选择性，使熔断器仅作为后备保护。

## 5.7 与负序单元的配合

由于平衡负载没有负序电流  $I_2$  分量，采用负序继电器（型号 50/51Q）可以提高对相间故障的灵敏度。同样，由于平衡负载没有零序电流  $I_0$  分量，采用型号为 50/51 的继电器可以提高相对地故障的灵敏度。

负序过电流速断和负序过电流时延单元，都是新型多功能继电器的常见功能组成。尤为重要的是，必须确保这些单元的整定要与仅检测单相故障的设备配合，如下游的熔断器和重合闸，和/或接地故障继电器。

要确定负序单元的 PU 整定值，必须记得相间故障电流幅值为同一地点三相短路故障电流的  $\sqrt{3}/2$ （即约 87%），如本章 5.11 节所述。另一方面，三相短路故障的负序分量可由本书 2.2 节中的公式得到：

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c)$$

对相间故障,  $I_a = 0$ ,  $I_b = I_c$ 。因此, 负序分量的幅值为三相故障电流幅值的  $1/\sqrt{3}$  (即约 58%)。两个倍数相乘 ( $\sqrt{3}/2$  和  $1/\sqrt{3}$ ), 消掉  $\sqrt{3}$ , 为  $1/2$ 。

因此, 建议负序单元的整定值为相 PU (启动电流) 整定值的  $1/2$ , 以确保相间故障和三相短路故障同样的灵敏度。

对于相间和接地故障设备, 要在同一张图上绘制负序时间/电流特性曲线, 就需要采用乘法器调整负序单元的启动电流值, 使乘法器系数为故障电流对负序电流的倍数。对于相间短路故障来说, 乘法器系数为 1.732。对于相间接地故障来说, 负序启动电流值必须乘以一个大于 1.732 的倍数, 而单相接地故障就要乘以 3。三相故障没有负序电流流过, 负序电流继电器不会动作, 所以也不需要乘以一个系数。

假设一个负载方向的相过电流时延单元启动电流值为 100A, 电源方向的负序时延继电器的启动电流为 150A。为了检查两个单元在相间故障时的配合度, 将相过电流单元的特性曲线向右按 1.732 倍的比例移动, 启动电流值为  $(1.732 \times 150) \text{ A} = 259.8 \text{ A}$ 。一般来说, 对于负载方向的相过电流单元的配合而言, 最严酷的情况即为相间故障, 此时相当于时间/电流特性曲线向右移动最多。

## 5.8 带电压控制的过电流继电器

接近发电机的故障, 可能导致电压降落和故障电流减小, 尤其在发电机是隔离的并且故障很严重的情况下。因此, 为了确保保护的正确动作和配合性, 发电机保护中过电流时延单元中的电压控制功能就很重要。电压控制功能可以改善继电器的可靠性, 确保继电器在发电机电流降得很低之前动作。有两种过电流继电器有此功能——电压控制和电压限制型, 继电器型号为 51V。

电压控制功能 (51/27C) 可以使继电器整定值低于额定电流, 在电压不低于额定电压之前, 继电器都不会动作。实际上, 在电压降至一个预定的值之前, 继电器都被锁定不能动作。整定值一般应低于 80% 的额定电压, 启动电流约为 50% 的发电机额定电流。

电压限制功能 (51/27R) 可使启动电流随着电压降低而降低, 如图 5.23 所示。例如, 继电器可整定为额定电压下, 175% 的发电机额定电流时动作。那么在 25% 的额定电压下, 继电器在 25% 的电流整定值下启动 (即  $1.75 \times 0.25 = 0.44$  倍额定电流)。变化的启动电流值使这种继电器很难和其他固定启动电流的过电流继电器配合。

电压控制型继电器启动电流值固定, 比起电压限制型继电器, 更容易和外部继电器进行配合。另一方面, 和电压控制型继电器相比, 电压限制型继电器不会在电

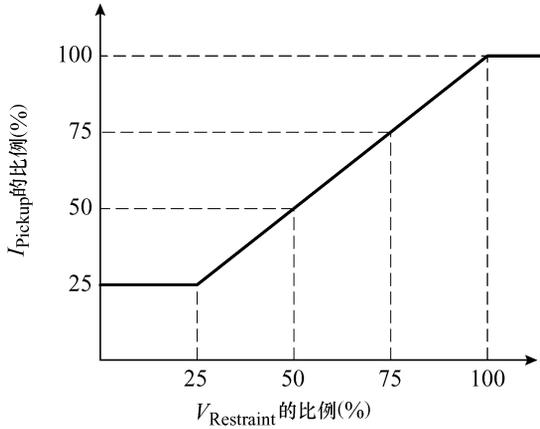


图 5.23 继电器 51/27R 的启动电流整定

动机起动或系统振荡时动作，而这种情况下电压会降低至电压控制型继电器的动作范围。

## 5.9 用软件技术设置过电流继电器

如前所述，确定过电流继电器的整定值过程，对于辐射状或中等规模的系统来说是相对比较简单。但是，对于大规模的系统来说，如果人工整定的话就非常麻烦，因此就需要使用软件技术，尤其是需要分析不同的电网结构时。本节介绍一种使用不同算法的简单步骤，来进行过电流继电器的整定。要求输入的数据包括，所有母线故障的短路电流、系统裕度和限制、需配合的继电器整定值。此外，还要考虑那些最靠近负荷或者连接其他网络的继电器的整定值。

整定分以下三步：

- 确定故障点，获得继电器整定所需的电流值。
- 识别要整定的成对继电器，首先确定哪个距离电源最远，哪个是作为后备保护。程序还要根据本章 5.3 节中的标准确定整定值。
- 确认是否满足本章 5.4 节中的要求；不满足的话，程序会采用更低的时间级差重新计算，或者尝试使用新的继电器。

图 5.20 所示的单线示意图可以用来说明计算机程序是如何解决继保配合问题的。

算法将要求的动作时间级差、最靠近负载的继电器整定值（本例中为继电器 1~3）及对应系统边界的继电器 9 的整定值等内容归类整理。然后建立成对的继电器组，识别每一对中的后备保护继电器。对于图 5.20 所示的系统，算法将确定继电器 1~3 中动作最慢的一个，并使之和上游的继电器 4 配合。继电器 4 又要同

继电器 5 配合，同时继电器 5 要和继电器 6 配合，这样就要确保所有情况下的动作时间级差。对于母线 6 连接的其他线路保护继电器来说，可以采用上述相同的步骤。然后，算法要确定这些继电器中最慢的一个，与继电器 8 配合，然后继电器 8 与继电器 9 配合。所有过程结束后，算法已经对所有输入数据和限制条件进行了必要的检查。如果有的条件不能满足，那么程序会重新开始，采用更低的动作时间级差或者不同特性的继电器，直到获得适当的配合为止。

在程序执行过程中，必须明确关键路径，即对应于数量最多的继电器组的路径。系统内部连接越复杂，关键路径就越复杂，计算机程序也越来越多地用于大型系统的计算中。然而，对于小型系统和特定故障分析，仍然采用手工方法，但可以借助软件编辑器的帮助，软件中包含来自很多厂商的继电器曲线。这样可以减少绘制曲线的工作量，节省大量时间。

## 5.10 数字继电器中数字逻辑的使用

### 5.10.1 简述

当采用数字继电器时，必须恰当地利用继电器的逻辑功能，包括控制输入模块、虚拟输出模块、硬件输出模块等。定义多功能继电器的功能所采用的逻辑公式组称为逻辑关系图。

通过定义单个保护的整定值（临界 PU 和延时），数字继电器可以适用于某一特定的系统参数。动作整定和逻辑整定是相互关联的，但分别进行设定。改变逻辑整定类似控制板重新接线，用来管理输入、输出、保护和控制功能，监视和报告多功能保护继电器的状态等。每个继电器系统都有多种功能模块，包括各个元件的输入、输出模块等。基于继电器逻辑公式定义的变量，每个独立的功能模块和输入控制、虚拟输出、硬件输出等进行互动。为了对继电器进行整定、控制启动电流临界值和时延，输入并存储在非易失存储器中的继电器逻辑公式，会将所选或被激活的保护进行整合。

### 5.10.2 数字逻辑基础

数字系统由三个基本的逻辑门组成。这三个逻辑门为 AND（与），OR（或），NOT（非）。除此之外，还有 NAND（与非）和 EOR（异或）门。图 5.24 给出了基本的逻辑门符号和操作。

仅当所有输入均为高电平时，与门输出才为高。可以用  $\cdot$  来表示与的操作，但是点通常可以忽略。如果任一输入为高电平，或门输出为高电平。可以用  $+$  来表示或的操作。NOT 非门的输出与输入信号相反，也称为逆变器。如果变量为 A，反向输出为 NOT A，可表示为  $\bar{A}$ 。与非为 NOT-AND 回路，等同于与门后接一个或门。任一输入为低电平时，所有与非回路的输出为高电平。NOR（或非）门为 NOT-OR

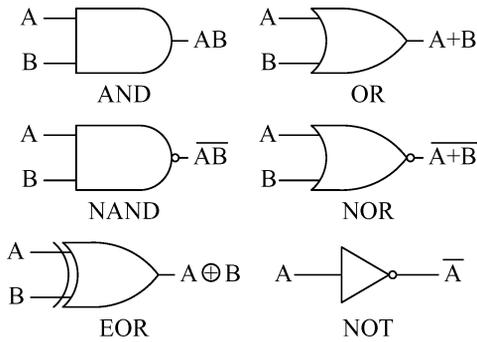


图 5.24 基本的逻辑门符号和操作

回路，等同于或门后接非门回路。任一输入为高电平时，或非门的输出为低电平。对于异或门，如果任一输入为高电平，但两个输入不同时为高电平，此时异或门输出为高电平。加号外加圆圈—— $\oplus$ ，可以用来表示异或运算。

表 5.7 列出了以上各个逻辑门的输入/输出组合。注意若有  $n$  个输入变量，输入组合则有  $2^n$  种。

表 5.7 各种逻辑门的输入/输出组合

输 入		输 出				
A	B	AND (与)	OR (或)	NAND (与非)	NOR (或非)	EOR (异或)
0	0	0	0	1	1	0
0	1	0	1	1	0	1
1	0	0	1	1	0	1
1	1	1	1	0	0	0

NOT (非门) 的输入/输出组合	
输 入	输 出
0	1
1	0

### 5.10.3 逻辑关系图

通常数字继电器有多个预编程的逻辑方案，保存在继电器存储器中。每个逻辑方案都是为一个典型的保护应用设计的，基本上不需要从头编程。保护逻辑方案的设计者可能会从预编程的方案中挑选出最常用且能满足控制要求的逻辑方案，也可以利用继电器的逻辑功能创建用户定制的逻辑方案。

图 5.25 给出了一个数字继电器的典型预编程逻辑方案，其中每个功能都分解为各个功能组。这个逻辑方案可以提供基本的时间和速断过电流保护，保护元件包

括相、中线、负序过电流保护单元。但此方案不能实现断路器故障、虚拟断路器控制、自动重合闸、保护电压等功能。但如果正确设计继电器逻辑关系，也有可能实现上述功能。

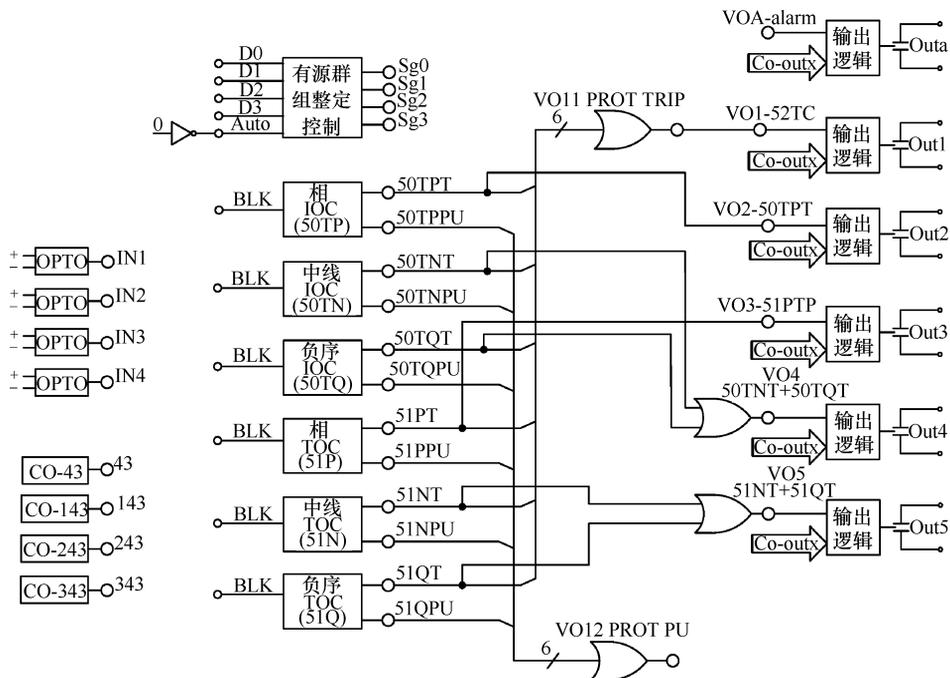


图 5.25 数字继电器的典型预编程逻辑方案

注：为清楚起见，进入同一或门的多个变量用单线表示。

图中的数字继电器有 4 个可编程输入，IN1 ~ IN4；5 个可编程输出，OUT1 ~ OUT5；一个可编程警报输出，OUTA；10 个虚拟输出，VO6 ~ VO15；4 个虚拟选择开关，43、143、243、343；4 个带有外部或自动选择模式的保护整定组。

如图 5.25 所示，时间（51）和速断（50）过电流保护是通过激活相、中线和负序单元而实现的。在所有 4 个整定组中，若启动电流整定值设为 0，功能模块即被禁止。虚拟输出 VO11 是所有保护的跳闸启动信号。VO11 为 TRUE（真）时，OUT1 将动作并使断路器开断。触头输出 OUT2 ~ OUT5 各自属于不同的功能模块。OUT2 在单相速断过电流时动作，OUT3 在单相定时过电流情况下动作，OUT4 在中线和负序过电流速断时动作，OUT5 在定时的中线和负序过电流情况下动作。输入 IN1 通常用来监视断路器状态（52b）。用户可以自动选择整定组或者通过通信端口或 HMI 面板选择。自动整定组通常都是通过改变电流和持续时间实现的。此方案不能通过触头传感器的输入信号来改变整定组，但是可以通过对逻辑输入编程来实现。

## 5.11 群组整定变化的适应性保护

这一部分将举例说明一些难以和数字继电器配合的逻辑关系和功能。例如，拓扑结构改变，会影响短路电流，如果继电器不重新整定的话可能导致保护不匹配。而采用大多数字继电器中的多样整定组功能就可以解决这一问题（即适应性保护）。

图 5.26 所示的只是电力系统的一个部分，该部分可能出现如下四个情况：

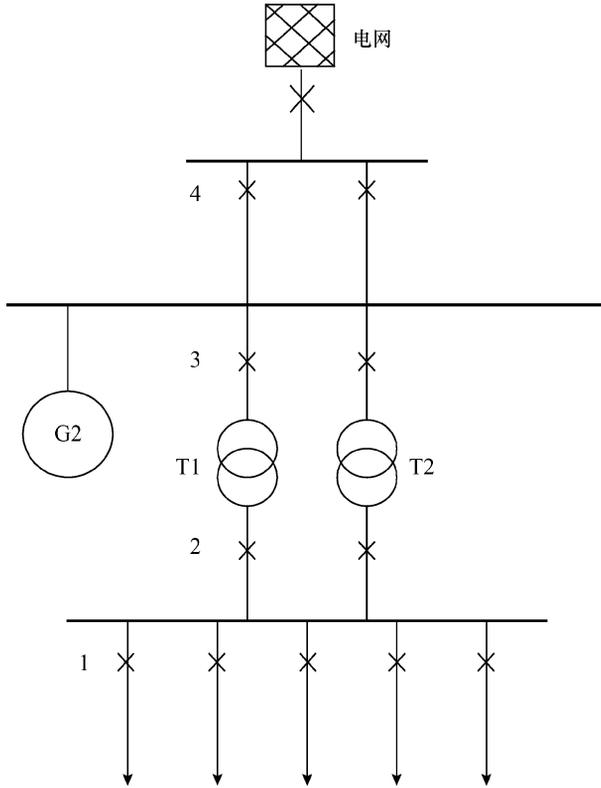


图 5.26 用于说明群组整定变化的电力系统的一部分

- 系统正常。
- 一个变压器停用维护。
- 没有电网输入。
- 户内发电机停用。

馈线故障，故障电流为  $I_f$ ，由图 5.27 所示的配合曲线  $R_1$  可得馈线继电器动作为  $t_1$ 。两台变压器都运行时，流过每台变压器的故障电流为  $0.5I_f$ 。变压器低压侧的继电器  $R_2$  在  $t_2$  时间内动作，动作时间级差为  $(t_2 - t_1)$ 。

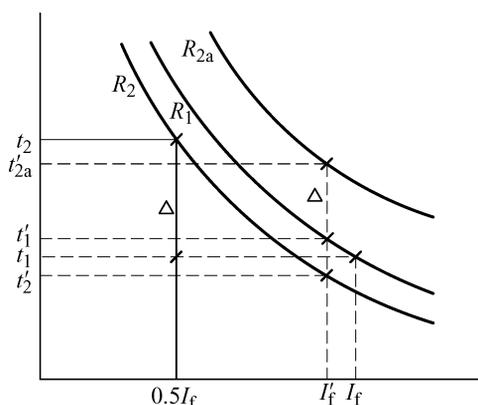


图 5.27 考虑到适应性继电器的过电流保护配合曲线

然而，若一个变压器停用，流过剩下的一个变压器的电流增加到  $I'_f$ 。由曲线  $R_2$  可知，变压器继电器动作时间将由  $t_2$  减小到  $t'_2$ ，比馈线继电器的动作时间  $t'_1$  短，从而导致保护误动。要避免此种情况，可将变压器低压侧继电器曲线移至曲线  $R_{2a}$ ，继电器在  $I'_f$  时的动作时间将为  $t'_{2a}$ ，这样就可以保持与馈线继电器动作时间的差异。还可以对变压器继电器进行预编程，以确保一个变压器停用时继电器曲线可以自动移动。

## 5.12 习题

**5.1** 某系统的单线图与例 5.2 的一样，但变压器为 115/34.5kV、58.5MV·A。变电站 C 的馈线容量为 10MV·A。如果变电站 A 的短路水平为 1400MV·A，继电器 1~4 的整定值是多少？假设继电器型号相同。

**5.2** 对于图 5.28 所示的变电站，计算 115/13.2kV 变压器 T1 和 T3 的高压侧和低压侧的相继电器启动电流整定值、时间刻度整定值、速断整定值。短路水平、CT 变比和其他数据如图 5.28 所示。同样采用例 5.2 和 5.3 的假设条件。

**5.3** 对于图 5.29 所示的系统，进行下列计算：

1. 母线 D 的对称短路电流为 12906.89A（对称有效值）、2570.87MV·A，计算母线 A、B 和 C 的三相故障最大短路电流值。

2.

a) 计算断路器 1、5、8 对应的最大电流峰值。

b) 计算断路器 1、5、8 保证可以承受的 5 个周波的不对称电流有效值。

3. 计算断路器 1 和 8 对应的电流互感器变比。断路器 6 的 CT 变比为 100/5。二次额定电流为 5A，一次的为 50~400 的倍数，选为 100。

4. 为确保保护的配合性，计算相继电器的速断单元、启动电流、时间刻度整

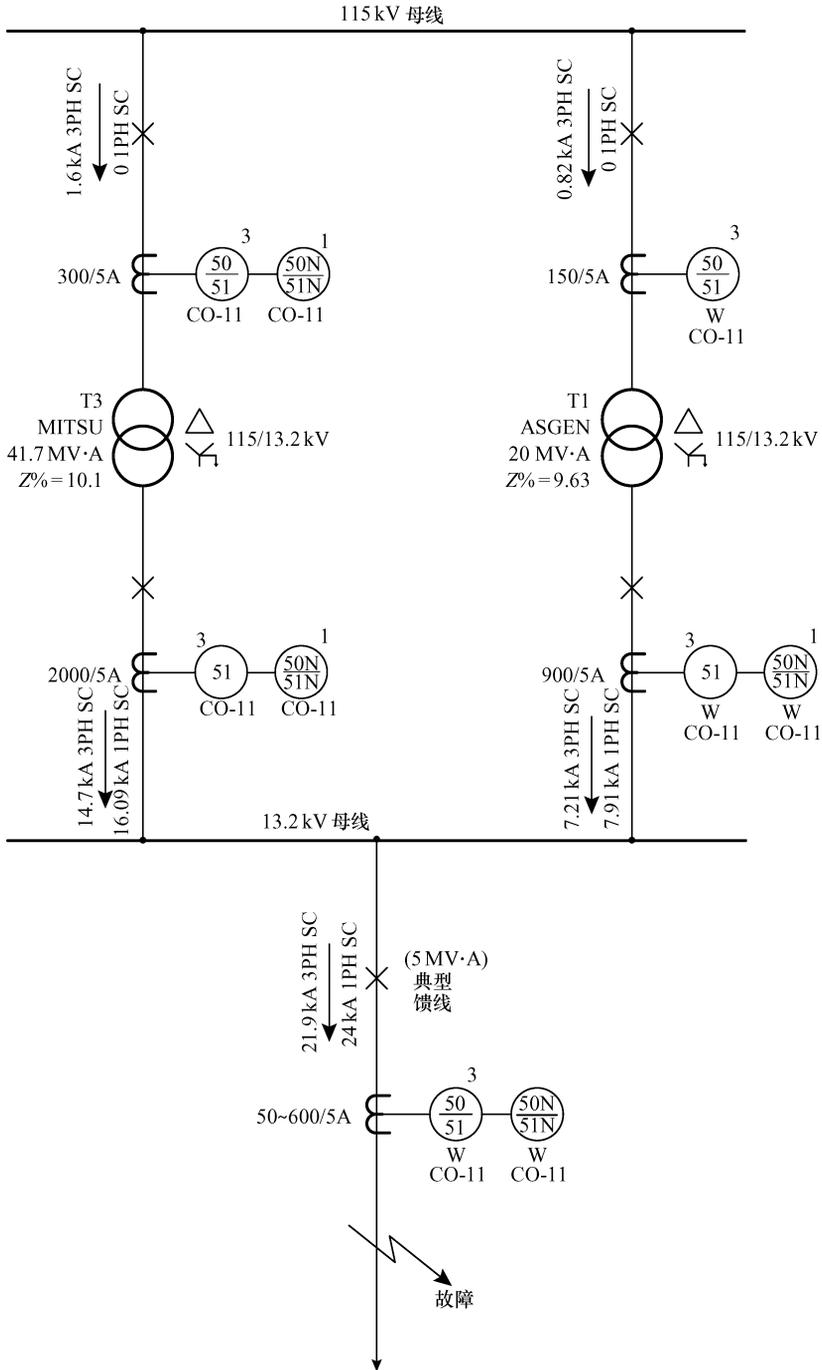


图 5.28 习题 5.2 的单线示意图

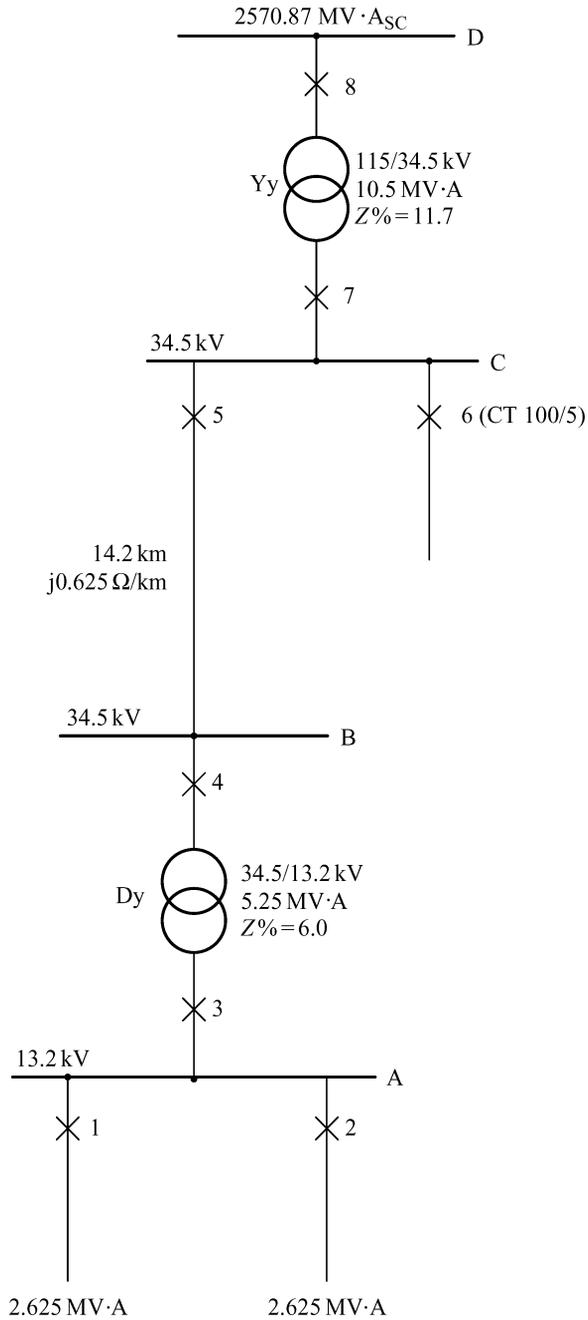


图 5.29 习题 5.3 的单线示意图

定值。时间级差为 0.4s。

5. 计算断路器 5 的过电流继电器速断单元保护覆盖 34.5kV 线路的百分比。

### 附加信息

- 继电器 6 的整定值：启动电流为 7A、时间刻度为 5、速断单元为 1000A (一次电流)。

- 所有继电器均为反时限类型，具有如下特征：

启动电流 1 到 12A，步进为 2A。

时间刻度 如图 5.15 所示。

速断单元 6 到 144，步进为 1A。

假设母线 A 短路电流为  $0.5I_{sc}$ ，计算馈线的继电器速断单元的整定值。

## 第 6 章 熔断器、重合闸和分段器

配电网有大量的保护设备。保护设备的类型取决于被保护的元件和系统电压水平，尽管整个配电网系统的保护没有专门的标准，但保护系统如何工作是一定的通用准则的。

### 6.1 设备

配电系统保护常用的设备有以下几种：

- 过电流继电器
- 重合闸
- 分段器
- 熔断器

过电流继电器的配合在本书第 5 章已经详细介绍了，本章主要介绍后面三种设备。

#### 6.1.1 重合闸

重合闸可以用于发现各相和单相接地过电流的情况，如果在预定时间后过电流仍然存在，重合闸可以切断回路，然后再自动合闸接通回路。如果这一故障仍然存在，在预定的操作次数之后，重合闸就保持开路，将系统和故障段隔离。在架空线配电系统中，80%~95% 的故障都是暂时性的，多数仅持续几个周波或几秒钟。那么，由于重合闸的合分特性，配电回路不会因为暂时故障而断开。典型情况下，重合闸进行 3 次的合分操作后，以最后一个分断操作结束。之后可以进行人工合闸。计数器会记录动作次数，若有合适的通信方式，也可以由外部控制器实现。

重合闸动作的时间/电流特性曲线和三条曲线配合，一条是快速动作曲线，另两条是延迟动作曲线，三条曲线分别用 A、B 和 C 字母表示。图 6.1 所示为一个典型的重合闸时间/电流曲线。新型的微处理器控制的重合闸可能还有一个键盘，用以选择时间/电流曲线，这样工程师就可以根据单相故障和接地故障的配合要求来设定曲线。那么无需更换元件，工程师就可以根据客户的特定需求来进行重合闸特性的设置。

发生故障时，应该确保切断线路的范围最小，尽量减少断电客户的时间和数量，因此重合闸和其他保护装置的配合非常重要。通常，确定重合闸的时间特性和操作顺序时，要考虑与朝向电源侧的设备配合。确定了重合闸的时间和操作顺序后，再调整背向电源侧的设备保护与之配合。图 6.2 所示为永久故障情况下重合闸操作的典型顺序。第一次冲击为速断模式，在故障对线路造成损害前就切断暂时性

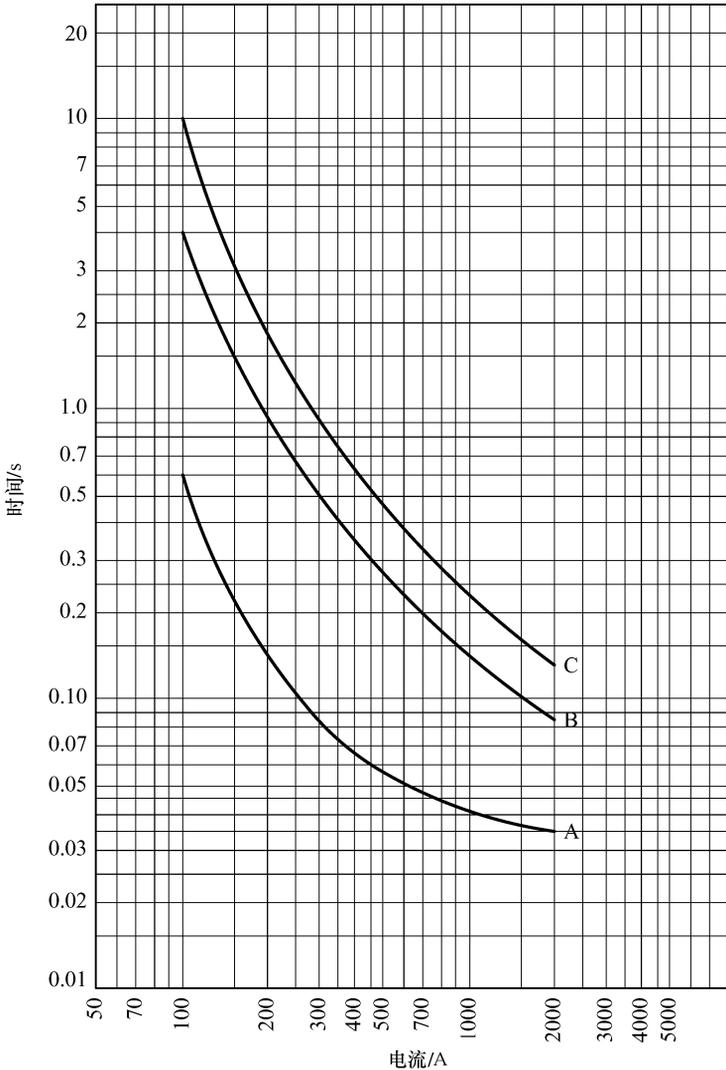


图 6.1 典型的重合闸时间/电流曲线

的故障。后三次冲击是根据预定的时间整定值后延时动作的波形。如果故障是永久性的，延时操作可以使靠近故障点的其他保护设备动作，缩小被切断的网络范围。

接地故障没有相间故障严重，因此重合闸需要足够的灵敏度来分辨两者。一种方法是采用电流互感器特殊的连接方式，使得正常情况下剩余电流接近为 0。接地故障剩余电流超过整定值时，重合闸就会动作。

重合闸可以分为以下几类：

- 单相和三相
- 液压机构或电子控制机构

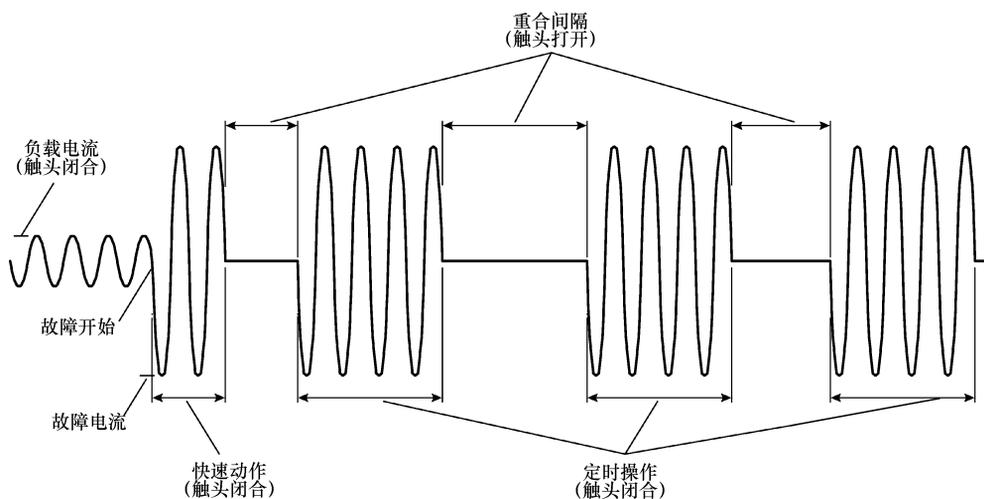


图 6.2 永久故障情况下重合闸操作的典型顺序

### • 油、真空或六氟化硫

如主要为单相负载，就使用单相重合闸。这样，发生单相故障时，重合闸必须永久性的切除故障相，而电源还能继续向其他相供电。当必须切断所有三相电路以避免系统不平衡负载的现象时，就要使用三相重合闸。

液压操动机构的重合闸带有一个和电路串联的隔离线圈。电流超过整定值时，隔离线圈会吸引活塞，打开重合闸主触头，断开回路。重合闸的时间特性和操作顺序取决于绝缘油在各个小室的流动。电子控制操动机构一般在重合闸的外部，由带有 CT 的套管取得电流信号。电流超过预定值时，会有一个延迟的冲击，将跳闸信号传送给控制机构。控制回路根据整定值决定机构的分合操作。电子操动机构的重合闸用线圈或电动机来合上触头。油浸式重合闸用油来灭弧，油同时也作为基本的绝缘介质。这种绝缘油也可以用在控制机构中。真空和六氟化硫重合闸的优点是所需维护量少。

重合闸在配电网中主要用在以下位置：

- 变电站，提供回路主保护。
- 主要馈线回路，允许长线路的分段，避免线路末端故障时断开整个回路。
- 分支线路，避免分支线路故障时断开主回路。

当安装重合闸时，需考虑以下几点：

- 系统电压
- 短路水平
- 最大负载电流
- 重合闸保护区的最小短路电流
- 与朝向电源方向和背向电源方向的其他机构的配合
- 接地故障操作的灵敏度

重合闸的额定电压和短路容量应大于或等于其安装点的对应值。同样，其电流容量也应大于等于回路最大负载电流。同时，还应确保被保护线路末端发生故障时，重合闸也能可靠动作。

### 6.1.2 分段器

分段器一般装在重合闸的下游，当上游的断路器或重合闸切断故障后，分段器自动将故障段隔离。由于分段器不能分断故障电流，使用时必须有后备保护，而后备保护必须具有开断短路电流的能力。故障时分段器计算重合闸动作次数。重合闸分断一定次数且重合闸分开时，分段器打开，将线路故障段隔离。这样重合闸就可以在无故障的区域合闸，继续给线路供电。如果故障是暂时性的，分段器的操动机构会重新复位。

分段器可以为单相或三相、液压或电子驱动机构。分段器没有电流/时间动作特性，当两个保护设备的动作曲线非常接近，又不可能进行配合时就可以采用分段器。

液压机构的分段器有一个和线路串联的动作线圈。线圈过电流时，活塞运动并激活计数机构，回路断开，电流为0，分段器小室中流过绝缘油。电路断开预定次数后，分段器触头由储能弹簧打开。这种分段器可以人工闭合。带有电子操动机构的分段器操作更为灵活，整定更为简单。负载电流由CT测量，二次电流进入控制回路，控制回路计算重合闸或其他断路器操作次数，并向操动机构发送跳闸信号。这种分段器可以人工或自动合闸。

在选择分段器时，必须考虑以下因素：

- 系统电压
- 最大负载电流
- 最大短路水平
- 与安装在其上下游的保护设备的配合

分段器的额定电压和电流应等于或大于安装点的最大电压或负载电流值。分段器的短路容量（瞬时额定值）应等于或大于安装点的故障水平。相关断路器断开故障的最长时间不得超过分段器可承受的额定短路电流的时间。此外，还需要考虑保护配合的因素，包括相关断路器开断前的操作次数和起始电流整定值。

### 6.1.3 熔断器

熔断器是一个过电流保护装置。熔断器内的熔体直接由电流加热，当电流超过预定值时，熔体熔断。选择合适参数的熔断器，通过熔体熔断断开电路，熔体熔断过程中熄弧，主回路断开，断口两端为额定电压（电弧不经过熔体）。

配电系统中的大部分熔断器都为喷射式，即都有一个限制电弧扩散的通道（熔管），熔管内有熔体及去电离纤维。如存在故障，当熔体熔化并产生去电离气体聚集在熔管中时，内部纤维受热，电弧受到压缩，由熔管中喷射而出；此外，熔管末端喷出的气体可以使电弧持续喷射。这样，电流过零时电弧就可以熄灭。由于去电离气体和熔管内的气体流动，确保了电流过零后故障电流不再恢复。熔断器的

保护区域受两个因素的限制：熔体熔断所需的最短时间限制（最短熔化时间），熔断器切断故障总共所需的最长时间。

很多标准中按照额定电压、额定电流、时间/电流特性、制造特点等来将熔断器分类。例如，标准 ANSI/UL 198-1982 中的几个章节都是介绍 600V 及以下的低压熔断器的。标准 ANSI/IEEE C37.40 ~ 42, 46 ~ 48 都是关于 2.3 ~ 138kV 范围的中高压熔断器的。其他组织和国家也都有自己的标准。此外，熔断器制造商也有自己的分类和名称。

配电系统中，K 和 T 型熔丝极为普遍，K 和 T 分别代表快速和慢速，用速率比（Speed Ratio, SR）来区分。速率比为熔断器在 0.1s 动作的最小熔断电流和 300s 动作的最小熔断电流之比。K 型熔丝的速率比为 6 ~ 8，T 型熔丝速率比为 10 ~ 13。图 6.3 所示为 200K 和 200T 型熔丝的典型时间/电流特性曲线。200K 型熔丝，在 0.1s

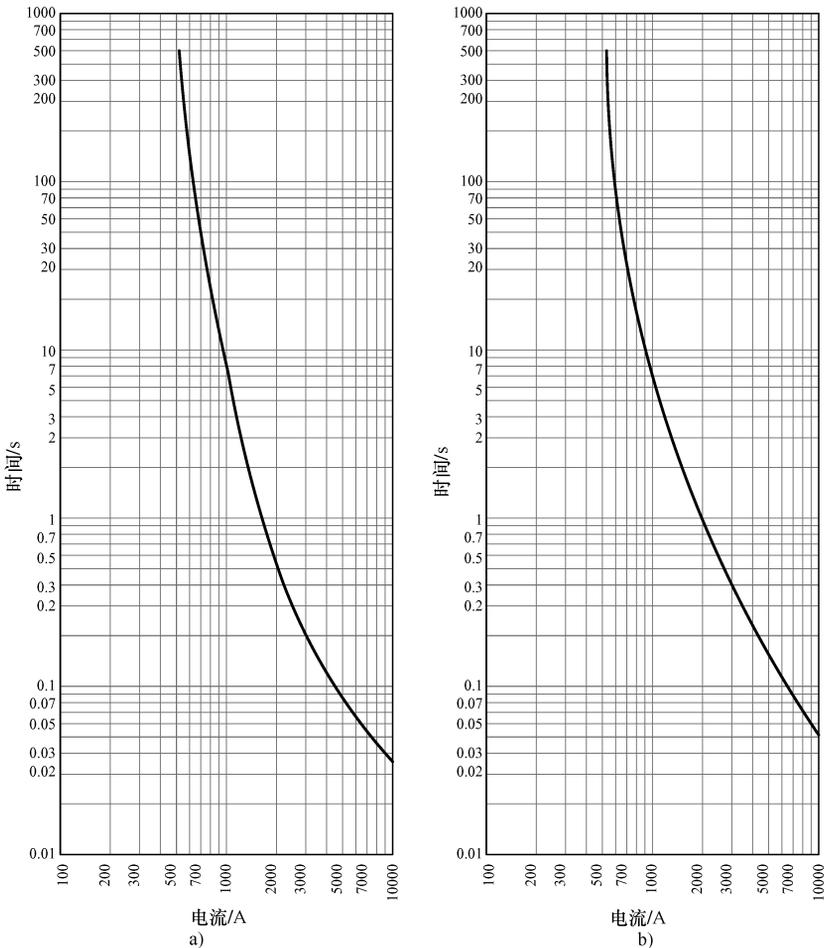


图 6.3 200K 和 200T 型熔丝的典型时间/电流特性曲线

a) 200K 型熔丝 b) 200T 型熔丝

内熔断的电流为 4400A, 300s 内熔断的电流为 560A, 得到速率比为 7.86。200T 型熔丝, 在 0.1s 内熔断的电流为 6500A, 300s 内熔断的电流为 520A, 速率比为 12.5。

配电系统中选择合适的熔断器要用到以下信息:

- 电压和绝缘水平
- 系统类型
- 最大短路水平
- 负载电流

以上四个因素决定了熔断器的额定电流、电压和短路容量特性。

#### 6.1.3.1 选择额定电流

熔断器额定电流应大于可能使之动作的最大持续负载电流。过载倍数应根据保护设备的情况来选择。例如变压器保护所用的熔断器, 其时间/电流特性曲线应在变压器涌流曲线之上、热容量限值之下。一些制造商专门制作了表格, 用以帮助客户在不同电压和连线情况下正确选择熔断器。

#### 6.1.3.2 额定电压的选择

熔断器额定电压由以下系统特性决定:

- 最大相-相或相对地电压
- 接地类型
- 相数 (三相或单相)

系统特性决定了故障电流开断时熔断器的电压。这个电压应低于或等于熔断器额定电压。因此, 熔断器电压选择应遵循以下原则:

- 在不接地系统, 熔断器额定电压应等于或大于最大线电压。
- 在三相接地系统, 单相负载时熔断器额定电压应等于或大于最大的相对地电压, 三相负载时额定电压应根据线电压来选择。

#### 6.1.3.3 短路容量的选择

熔断器对称短路容量应该等于或大于熔断器安装点的对称故障电流。

#### 6.1.3.4 熔断器命名

当一个系统使用两个或多个熔断器, 距离负载最近的保护设备称为主保护, 朝向电源方向的称为后备保护。其配合原则将在下面再进行讨论。

## 6.2 配电系统的时间/电流设备的配合原则

配电系统中时间/电流设备的配合应使用以下原则:

- 主保护应该在后备保护动作前将短时或永久故障切除, 或者在电路断开前继续动作。但是, 如果主保护是熔断器, 后备保护是重合闸, 一般情况下如果故障没有清除的话允许重合闸先动作、熔断器后动作 (见本章 6.2.2 节)。
- 永久故障造成的断电应该限制在系统最小的范围内, 断电时间应尽可能短。

下面给出了配电系统中不同设备配合的原则和建议。

### 6.2.1 熔断器-熔断器的配合

如图 6.4 所示, 选用熔断器的基本准则是, 在同一故障电流下, 主保护熔断器的最大断开时间不能超过后备熔断器最小熔化时间的 75%。这样, 在后备保护受影响前, 主保护就可以断开回路清除故障。75% 的因数, 主要是考虑负载电流和周围温度的影响; 或者故障电流流过熔丝但并不足以使熔丝熔断, 而熔丝因热效应而老化。

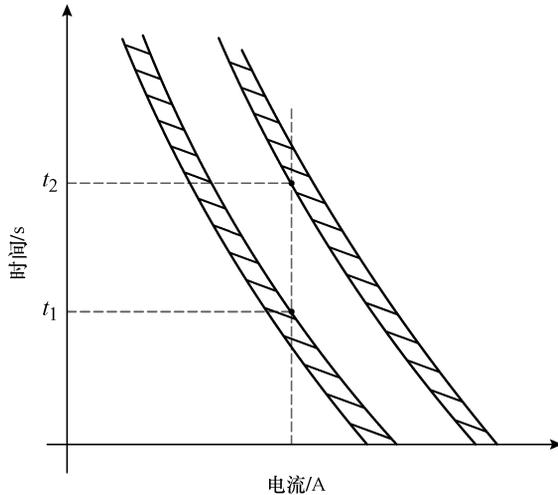


图 6.4 熔断器-熔断器的配合准则 ( $t_1 < 0.75t_2$ )

两个或多个相连的熔断器要进行配合, 就要先画出它们的时间/电流特性曲线, 过电流继电器通常采用对数坐标。过去, 也用保护配合表的方法, 表格中为熔断器的参数, 这种方法也较为简单和准确。但是, 图形法仍然比较常用, 因为图形可以提供更多的信息, 并且计算机辅助设计工具可以轻松画出各种特性曲线。

### 6.2.2 重合闸-熔断器的配合

重合闸-熔断器的配合原则, 取决于设备的相对位置。如果熔断器在电源侧, 那么熔断器就作为负载侧重合闸的后备保护, 反之亦然。下面进行详述。

#### 6.2.2.1 熔断器在电源侧

熔断器在电源侧, 所有重合闸动作时间必须小于熔断器的最小熔化时间。连续的重合闸操作带来的累积热效应会使熔丝老化, 但通过调整重合闸时间/电流曲线的倍数因子, 可以补偿熔丝老化的影响。经过倍数因子修正后的重合闸分闸曲线速度变慢, 但必须快于熔断器分断曲线, 如图 6.5 所示。

上面提到的倍数因子取决于重合闸时间的周波数, 以及尝试重合的次数。

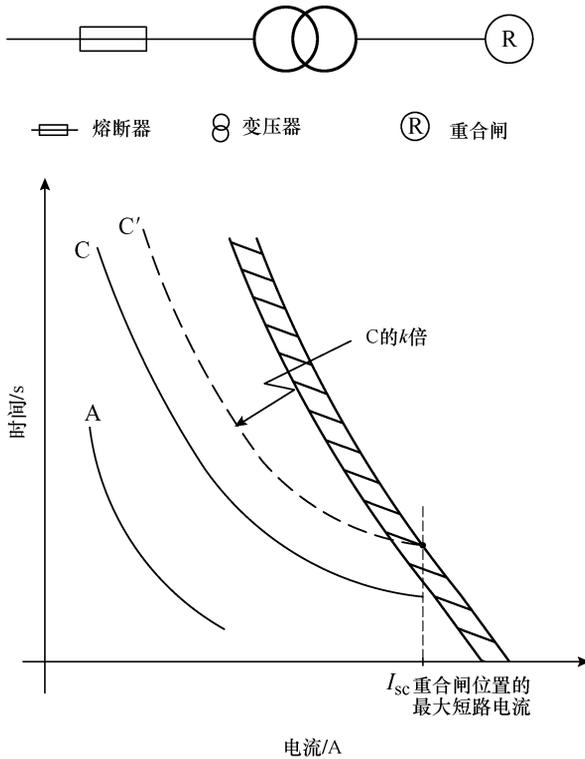


图 6.5 电源侧熔断器和重合闸的配合准则 ( $t_1 < 0.75t_2$ )

表 6.1 给出的电源侧熔断器的倍数因子  $k$ ，是 Cooper Power System 提出的倍数因子值。

如果熔断器在变压器高压侧，重合闸在低压侧，考虑到变压器电压比，熔断器或重合闸曲线必须沿电流坐标轴平移。通常，变压器抽头改变可以得到高压侧的最大电流，所以熔断器曲线更容易移动。此外，如果变压器联结方式为三角形-星形，就必须考虑本书 5.5 节中所说的因素。

表 6.1 电源侧熔断器的倍数因子  $k$

重合闸时间 /周波数	倍数因子		
	2 次快速, 2 次延迟	1 次快速, 3 次延迟	4 次延迟
25	2.70	3.20	3.70
30	2.60	3.10	3.50
50	2.10	2.50	2.70
90	1.85	2.10	2.20
120	1.70	1.80	1.90
240	1.40	1.40	1.45
600	1.35	1.35	1.35

注： $k$  用来与重合闸延迟曲线的时间值相乘。

6.2.2.2 熔断器在负载侧

当熔断器在负载侧，重合闸和熔断器的配合准则如下：

- 熔断器的最小熔化时间必须大于重合闸乘以倍数因子后的快速曲线，负载侧熔断器的倍数因子  $k$  如表 6.2 所示。表 6.2 与表 6.1 给出数据的参考基准相同。

表 6.2 负载侧熔断器的倍数因子  $k$

重合闸时间 (周波数)	倍数因子	
	1 次快速操作	2 次快速操作
25 ~ 30	1.25	1.80
60	1.25	1.35
90	1.25	1.35
120	1.25	1.35

注： $k$  用来与重合闸快速曲线的时间值相乘。

- 熔断器最大开断时间必须小于重合闸未乘以倍数因子前的延迟曲线；重合闸应至少进行两次或更多次的延迟操作，以防止熔断器动作时重合闸分断，电路断电。

图 6.6 所示为重合闸和负载侧熔断器的配合准则。

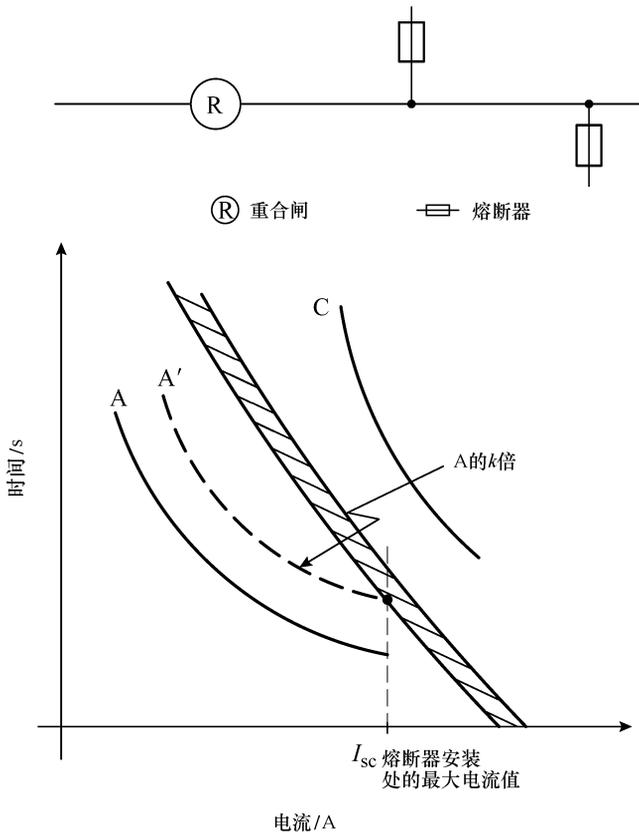


图 6.6 重合闸和负载侧熔断器的配合准则

如果重合闸进行2次快速动作,2次延时动作,这样就可以与熔断器更好地配合。一般来说,重合闸的第1次分断将清除80%以上的瞬时故障;第2次分断可以再清除10%。负载侧熔断器在重合闸第三次分断时动作,清除永久故障。如果重合闸进行1次快速动作,3次延时动作,与熔断器的配合有效性就稍逊一筹。

### 6.2.3 重合闸-重合闸的配合

重合闸的配合需要合理选择液压机构重合闸脱扣线圈的电流整定值,或者电子机构的重合闸的启动电流。

#### 6.2.3.1 液压机构重合闸

液压机构重合闸的配合取决于设备类型。对于小型重合闸,其电流线圈和活塞作用使触头断开。选择重合闸时必须考虑以下因素:

- 曲线间的距离低于2个周波经常会导致重合闸同时动作。
- 曲线间距离在2~12个周波可能会导致重合闸同时动作。
- 曲线间距离大于12个周波重合闸不会同时动作。

对于大容量重合闸来说,活塞和电流线圈仅是启动分断机构。相互配合时应考虑以下因素:

- 曲线间距离低于2个周波经常会导致重合闸同时动作。
- 曲线间距离高于8个周波重合闸不会同时动作。

两个串联的大型单元的配合原则主要是基于其动作特性曲线相距时间的差别,小型单元也是一样。

#### 6.2.3.2 电子机构重合闸

相邻的电子机构重合闸可以很好地配合,因为电子机构没有电磁机构固有的误差(由于超速、惯性等引起)。下游(远离电源侧)重合闸必须快于上游(靠近电源侧)重合闸,下游重合闸的分断时间加上允许误差必须小于上游重合闸的分断时间减去允许误差。通常,变电站重合闸的整定必须可以至少实现一次快速重合,以便清除变电站和负载间线路的瞬时故障。负载侧重合闸整定值应与变电站重合闸相同,或者快速动作次数更多。需要注意的是,对于电子机构重合闸与液压机构重合闸,其时间/电流特性曲线距离的选择基准,是不同的。

### 6.2.4 重合闸-继电器的配合

重合闸和继电器的配合应考虑两个因素:继电器动作后断路器在几个周波内将回路开断;继电器必须和重合闸的清除故障时间配合。一般来说继电器复位时间较长,如果在继电器完全复位前还有故障电流,继电器触头将从未完全复位点向动作点移动。

假设一个重合闸动作顺序为2次快速2次延时,间隔为2s,与一个反时限过电流继电器配合,那么故障时该继电器0.6s内合上触头、16s完全复位。此例中忽略继电器的脉冲时间裕度。重合闸的快速动作时间为0.03s,延迟的动作时间为0.3s。继电

器动作发生在任一重合闸快速分闸操作过程的百分比为  $(0.03\text{s}/0.6\text{s}) \times 100\% = 5\%$ 。继电器复位发生在重合闸动作间隔的百分比为  $(2\text{s}/16\text{s}) \times 100\% = 12.5\%$ 。因此，继电器是在重合闸2次快速分断操作后完全复位。

继电器动作时间发生在重合闸第1次延时分断时的百分比为  $(0.3\text{s}/0.6\text{s}) \times 100\% = 50\%$ 。继电器在重合闸第3次分断时复位的百分比为  $12.5\%$ ，因此重合闸第3次分断后继电器动作的净百分比为  $50\% - 12.5\% = 37.5\%$ 。在重合闸第2次延时分断时继电器动作的百分比为  $(0.3\text{s}/0.6\text{s}) \times 100\% = 50\%$ ，在重合闸第4次分断后继电器动作的总百分比为  $37.5\% + 50\% = 87.5\%$ 。

由以上分析可知，在重合闸最后一次分断开始前，继电器没有完成100%的动作，因此可以保证继电器和重合闸的配合。

### 6.2.5 重合闸-分段器的配合

由于分段器没有时间/电流动作特性，它们的配合不需要分析曲线。

配合准则主要基于后备重合闸的操作次数。这些操作可以是任何快速或延迟的动作，如2次快速2次延迟。分段器操作仅1次。如果分段器保护范围外发生永久故障，分段器将在重合闸第3次分断后打开并隔离故障。重合闸将再次动作恢复该段线路的供电。如果还有其他串联的分段器，距离最远的重合闸的动作次数应减少。最后一个分段器范围外的故障，会使重合闸动作，所有分段器的计数器开始计数。

### 6.2.6 重合闸-分段器-熔断器的配合

所有的设备都应该进行调整以便与重合闸配合。同时，重合闸的操作顺序也应调整，以便在故障时熔断器不能动作的情况下（前文已经介绍），与之配合。

#### 例 6.1

图 6.7 所示为某 13.2kV 配电线路的一部分，该配电线路由变电站的一系列过电流继电器保护。在负载流向侧安装了一个重合闸和一个分段器，以改善客户供电的稳定性。重合闸为2次快速操作，2次延迟操作，90个周波的间隔。

图 6.8 所示为变压器、支路熔断器、重合闸和继电器的时间/电流曲线。若配电变压器发生故障，它的熔断器应首先动作，重合闸快速动作作为后备保护。如果故障仍未清除，支路熔断器应动作，然后为重合闸的延迟开断，馈线继电器应在最后动作。在计数器清零后，分段器将故障段隔离，电源方向的馈线仍然带电。

112.5kV·A 的配电变压器在 13.2kV 侧的额定电流为 4.9A，可选 6T 型熔断器，允许过载 20%。基于前述的配合基准，要确保重合闸快速曲线位于两个熔断器曲线之间，重合闸的快速曲线可以按下式选择：

$$t_{\text{recloser}} \times k \leq t_{\text{MMT}} \times 0.75 \quad (6.1)$$

式中， $t_{\text{MMT}}$  为支路熔断器的最小熔化时间（Minimum Melting Time, MMT）。采用

0.75 的因数，以确保支路熔断器和变压器熔断器相配合，如本章 6.2.1 节所述。

支路熔断器处短路电流为 2224A，动作时间为 0.02s。如表 6.2 所示，重合闸 2 次快速操作及重合闸时间为 90 周波的倍数因子  $k = 1.35$ 。由式 (6.1) 可以推出重合闸操作的最大时间为  $(0.02 \times 0.75 / 1.35) s = 0.011s$ 。这一最大时间及重合闸的启动电流决定了重合闸的快速动作曲线。

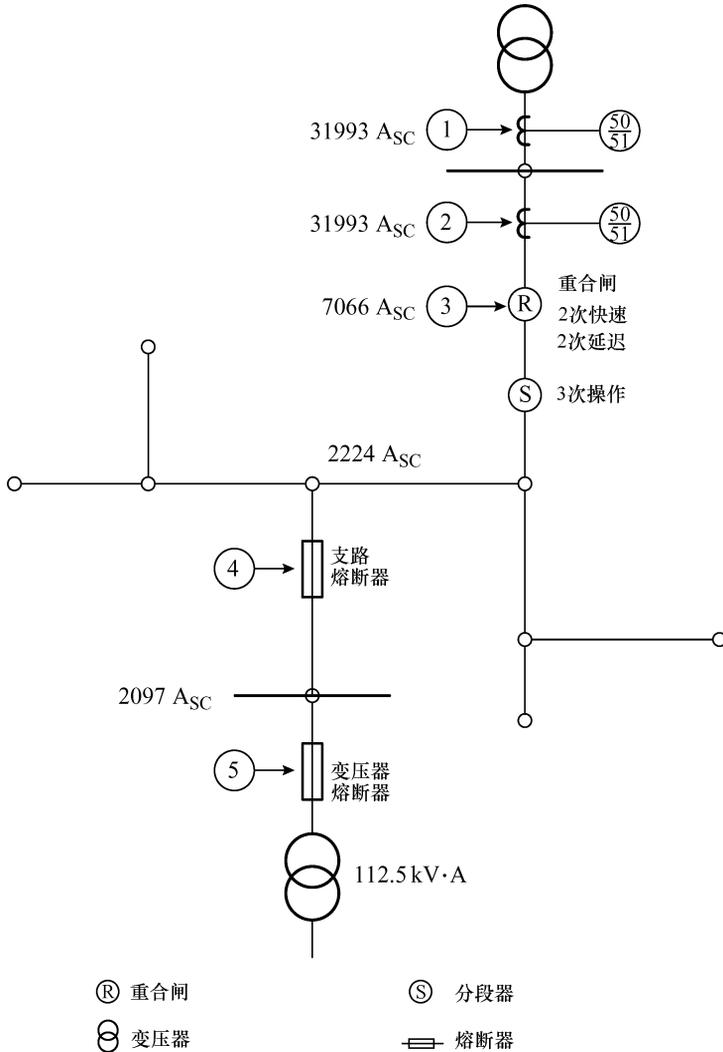


图 6.7 例 6.1 的某 13.2kV 配电线路的一部分

馈线继电器曲线应在重合闸延迟曲线之上，这样就要考虑继电器的复位时间。由于本书第 5 章已经介绍过计算步骤，本例中不再给出详细计算，但是图 6.8 所示的曲线可以表明保护间恰当的配合。

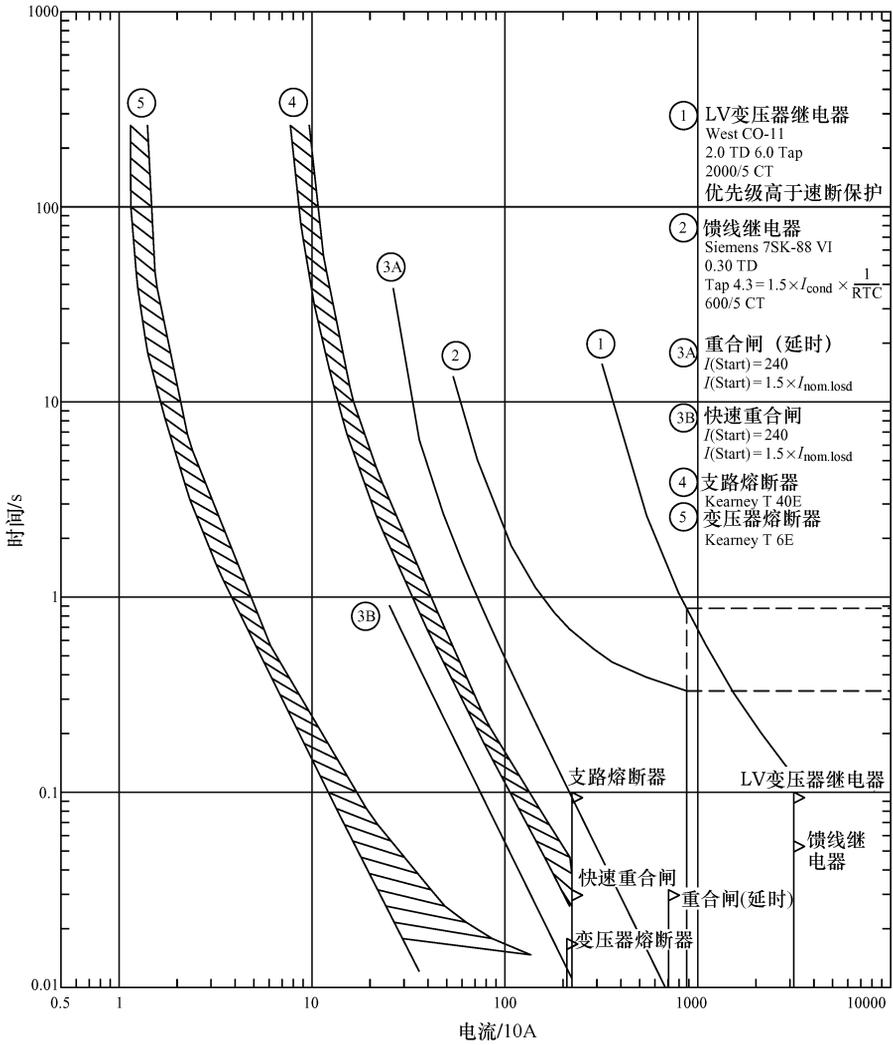


图 6.8 例 6.1 的变压器、支路熔断器、重合闸和继电器的时间/电流曲线

## 第 7 章 方向过电流继电器

在故障电流可以正、反两个方向流过系统设备时，双向的过电流保护会造成电路不必要的断开，这时就要采用方向过电流继电器。在环形或者复杂的交错系统中及有多个电源点时，可能会有上述情况。图 7.1 所示为方向过电流继电器的两种应用。

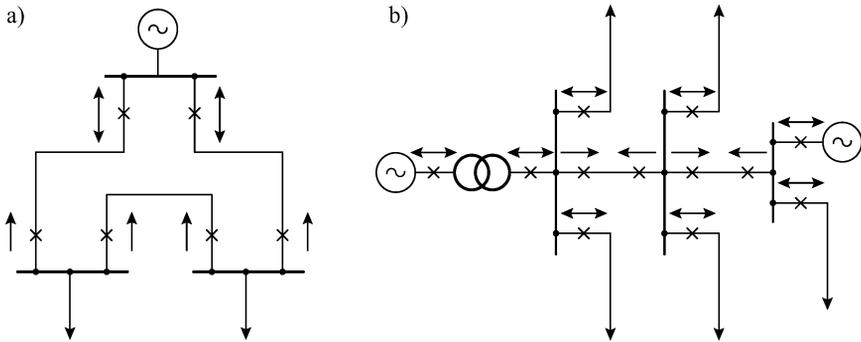


图 7.1 方向过电流继电器的两种应用

a) 环形系统 b) 多个电源系统

### 7.1 结构

方向继电器由一个普通的过电流单元和一个确定功率方向的单元组成。此外，确定功率方向的单元除电流信号外，还需要一个参考信号测量故障相角，以此来确定继电器是否动作。一般来说，参考信号为电压信号，但也可以是电流信号。

基本上，有两种方法可以获得功率方向，即监视和控制。如图 7.2 所示，其中 D 表示方向单元，OC 表示过电流单元。因为过电流单元仅在方向正确时才能启动，因此最好采用控制系统确定功率方向。如果采用监视的方法，过电流继电器可能在功率流向错误的时候启动。此外，在环形系统中断路器断开，电流方向将改变，也可能导致保护失配。

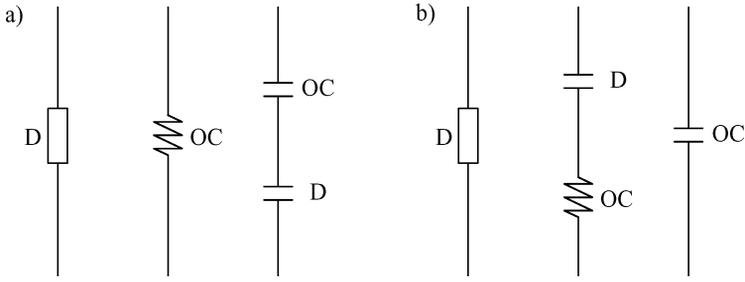


图 7.2 获得功率流向的方法  
a) 监视 b) 控制

## 7.2 动作原则

操作力矩可以定义为  $T = K\Phi_1\Phi_2\sin\theta$ 。式中， $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$  为偏离值， $\Phi_1$  正比于电流， $\Phi_2$  正比于电压； $\theta$  为  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  的夹角。若  $0 < \theta < 180^\circ$ ，力矩为正；若  $180^\circ < \theta < 360^\circ$ ，力矩为负。应注意到  $\theta$  和  $I$  同相，但是比电压滞后，因为  $V = -(d\Phi)/dt$ 。

如果  $I$  和  $V$  同相，那么磁通量与之异相，相差  $90^\circ$ 。因此，继电器电压和电流同相时力矩最大。采用同相的电压和电流即可实现。但是，实际上这种方法并不可行，因为某相发生故障时，该相的电压可能跌落为 0。因此，一般的做法是采集另一相的电流。

## 7.3 继电器的连接

方向继电器的连接是根据单元功率因数下的电流领先于极化电压的角度来确定的。一般来说，最大力矩的角度（Angle of Maximum Torque, AMT）（即在此角度下力矩最大）会和极化电压一同给出。

### 7.3.1 30°连接（0° AMT）

继电器输入

$$\begin{matrix} \Phi_A : I_a, & \Phi_B : I_b, & \Phi_C : I_c \\ V_{ac} & V_{ba} & V_{cb} \end{matrix}$$

最大力矩

相电流滞后于相电压  $30^\circ$ （见图 7.3）。

动作角度

电流角度在领先  $60^\circ$  到滞后  $120^\circ$  的范围内。

使用

此种类型的连接常用于馈线中，继电器输入共有 3 个分量，每相一个。如果输入是两个相分量和一个接地分量，则会导致继电器动作不合人意。但是变压器回路不应采用三相单元的结构，因为某些故障可能导致一相或多相产生反向电流，从而使继电器误动。

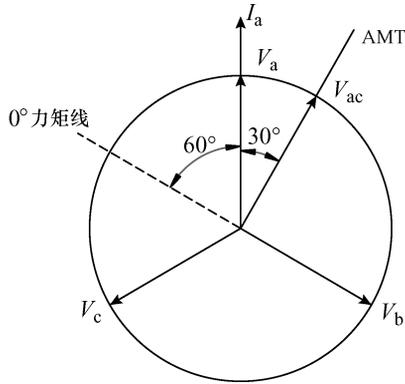


图 7.3 30°连接的矢量图 (0° AMT)

### 7.3.2 60°连接 (0° AMT)

继电器输入

$$\begin{matrix} \Phi_A: I_{ab}, & \Phi_B: I_{bc}, & \Phi_C: I_{ca} \\ V_{ac} & V_{ba} & V_{cb} \end{matrix}$$

最大力矩

相电流滞后于相电压 60°。I<sub>ab</sub> 滞后 I<sub>ac</sub> 为 60°，整功率因数下 I<sub>a</sub> 滞后于 V<sub>a</sub> 为 60° (见图 7.4)。

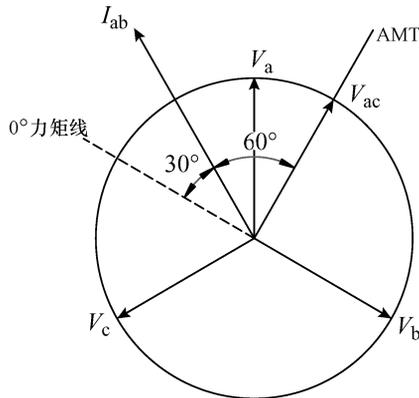


图 7.4 60°连接的矢量图 (0° AMT)

动作角度

电流  $I_{ab}$  在领先  $30^\circ$  到滞后  $150^\circ$  的范围内，或者整功率因数下  $I_a$  领先  $30^\circ$  或滞后  $150^\circ$ 。

使用

建议此种类型的连接仅用于馈线中，同时要求 CT 连接必须为角形。因此，和本章 7.3.1 节的连接方式相比，此种方式没有什么优势，所以很少采用。

7.3.3 90°连接 (30° AMT)

继电器输入

$$\begin{array}{ccc} \Phi_A : I_a, & \Phi_B : I_b, & \Phi_C : I_c \\ V_{bc} + 30^\circ & V_{ca} + 30^\circ & V_{ab} + 30^\circ \end{array}$$

最大力矩 电流滞后于相电压  $60^\circ$  (见图 7.5)。

动作角度 电流角度在领先  $30^\circ$  到滞后  $150^\circ$  的范围内。

使用 馈线中零序分量的来源在继电器连接点之后。

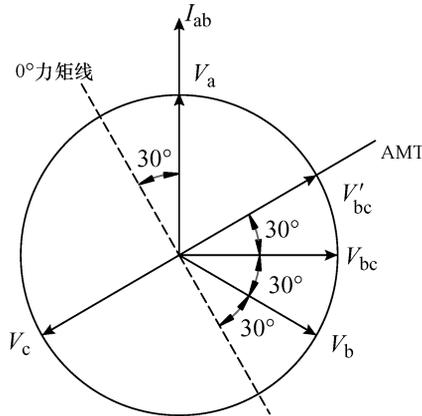


图 7.5 90°连接的矢量图 (30° AMT)

7.3.4 90°连接 (45° AMT)

继电器输入

$$\begin{array}{ccc} \Phi_A : I_a, & \Phi_B : I_b, & \Phi_C : I_c \\ V_{bc} + 45^\circ & V_{ca} + 45^\circ & V_{ab} + 45^\circ \end{array}$$

最大力矩 电流滞后于电压  $45^\circ$  (见图 7.6)。

动作角度 电流角度在领先  $45^\circ$  到滞后  $135^\circ$  的范围内。

使用 建议此种方式用于保护变压器或馈线中，且零序分量源在继电器之前。并联变压器或者变压器馈线中采用此种方式，可以确保 Yd 变压器以外的故障时继

电器可以正常动作。当采用单相方向继电器、电流分配为 2-1-1 时，通常采用此种连接方式。

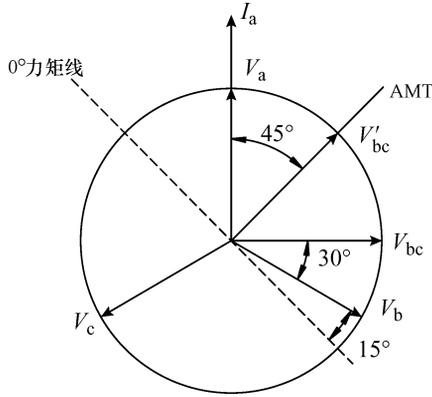


图 7.6 90°连接的矢量图 (45° AMT)

## 7.4 接地故障方向继电器

接地故障方向继电器的动作原理，主要是基于剩余电压为电源阻抗上的零序分量电压降的 3 倍；而且在电源阻抗角度特性方面，剩余电流可以代替剩余电压。当没有合适的 VT 测量极化电压时，可以利用现有的接地变压器的接地电流作为极化电流。这主要是因为中性线电流通常从大地流向系统，而故障时剩余电流可能流向任意方向。必须强调的是，由于极化电压方向继电器故障率很低，所以应尽可能采用。

### 例 7.1

如图 7.7 所示，系统中带箭头的点 F 表示 B 相和 C 相直接接地故障。请确定图中每个方向继电器（30°连接）的电流和电压信号（单位为 A 和 V）。

$$\begin{array}{ccc} \Phi_A : I_A, & \Phi_B : I_B, & \Phi_C : I_C \\ V_{AC} & V_{BA} & V_{CB} \end{array}$$

此外，明确故障时哪个继电器将会动作。答案中，忽略负载电流，假设故障前电压为 1 (p. u.)。发电机电压为 13.2kV，容量为 100MV · A。

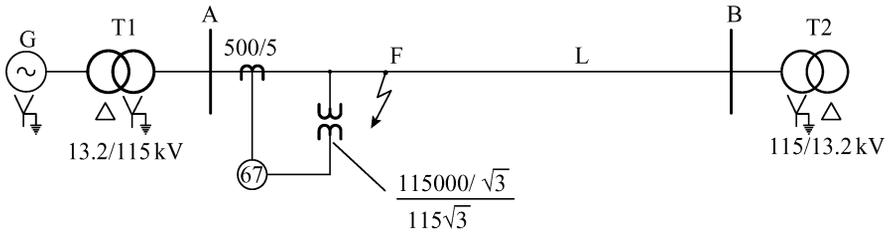
尽管系统是辐射状的，但是方向过电流继电器的安装原则，是假设回路未来是环形系统的一部分。

### 答案

双相接地故障 B-C-N 时，有

$$I_A = 0, V_B = 0, V_C = 0$$

图 7.8 所示为三序网络。等效电路如图 7.9 所示。



G	T1	L	T2
$X_1=0.15$	$X_1=0.11$	$X_1=0.4$	$X_1=0.3$
$X_2=0.15$	$X_2=0.11$	$X_2=0.4$	$X_2=0.3$
$X_0=0.09$	$X_0=0.11$	$X_0=1.2$	$X_0=0.3$

图 7.7 例 7.1 的系统单线示意图

由图 7.8 可知

$$Z_0 = 0.11 \parallel 1.5 \text{ 得 } Z_0 = 0.102$$

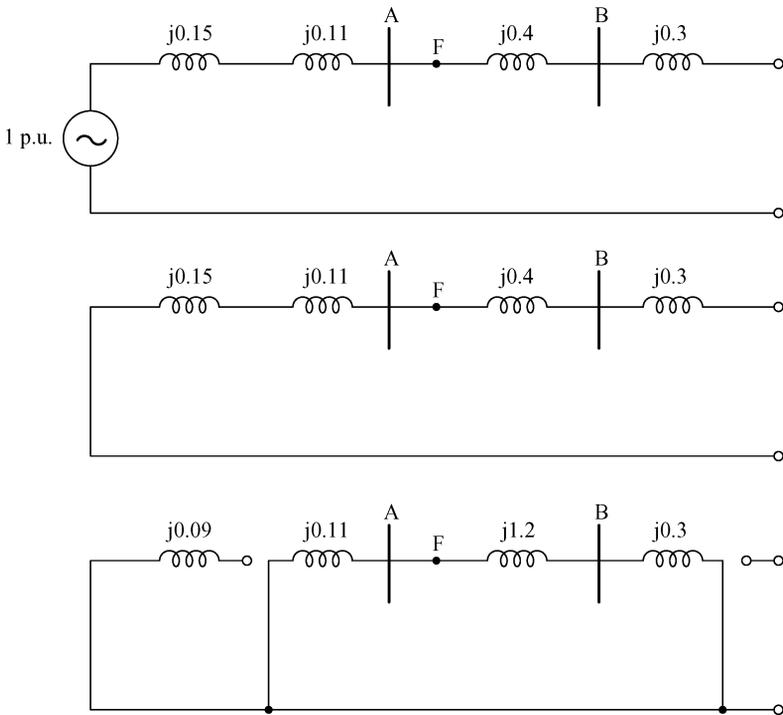


图 7.8 例 7.1 的三序网络

网络中的各序电流为

$$I_{A1} = \frac{1}{j0.26 + [(j0.26 \times j0.102) / (j0.362)]} = -j3.0 \text{ p. u.}$$

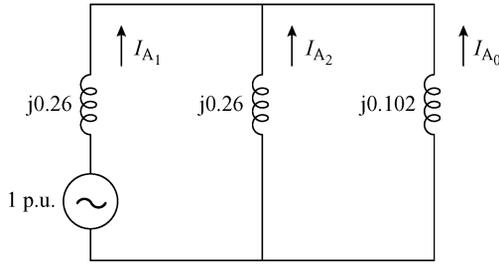


图 7.9 图 7.8 的等效电路

$$I_{A_2} = -(-j3.0) \frac{j0.102}{j0.26 + j0.102} = j0.845$$

$$I_{A_0} = (-j3.0) \frac{j0.26}{j0.26 + j0.102} = j2.155$$

在故障点有

$$I_A = I_{A_1} + I_{A_2} + I_{A_0} = -j3.0 + j0.845 + j2.155$$

得出 B-C-N 故障时,  $I_A = 0$ , 有

$$\begin{aligned} I_B &= a^2 I_{A_1} + a I_{A_2} + I_{A_0} = 1 \angle 240^\circ (-j3.0) + 1 \angle 120^\circ (j0.845) + j2.155 \\ &= -3.33 + j3.2315 = 4.64 \angle 135.86^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= a I_{A_1} + a^2 I_{A_2} + I_{A_0} = 1 \angle 120^\circ (-j3.0) + 1 \angle 240^\circ (j0.845) + j2.155 \\ &= 3.33 + j3.2315 = 4.64 \angle 44.14^\circ \end{aligned}$$

在网络的故障点 (不在继电器处) 有

$$V_{A_1} = V_{A_2} = V_{A_0} = -I_{A_2} (j0.26) = 0.220$$

$$V_A = V_{A_1} + V_{A_2} + V_{A_0} = 3V_{A_1} = 3 \times 0.22 = 0.66$$

$$V_B = V_C = 0$$

$$V_{AC} = V_A - V_C = V_A - 0 = 0.66$$

$$V_{BA} = V_B - V_A = -V_A = -0.66$$

$$V_{CB} = V_C - V_B = 0$$

故障点的基本参数为

$$V = 115 \text{ kV}; P = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$I_{\text{Base}} = \frac{P}{\sqrt{3}V} = \left( \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 115 \times 10^3} \right) \text{ A} = 502.04 \text{ A}$$

因此, 故障点计算值为

$$I_A = 0$$

$$V_{AC} = \left( 0.66 \times \frac{115000}{\sqrt{3}} \times \frac{115}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{3}}{115000} \right) \text{ V} = 43.82 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$I_B = [4.64 \angle 135.86^\circ \times 502.04 \times (5/500)] \text{ A} = 23.29 \angle 135.86^\circ \text{ A}$$

$$V_{BA} = \left( -0.66 \times \frac{115000}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1000} \right) \text{V} = 43.82 \angle 180^\circ \text{V}$$

$$I_C = [4.64 \angle 44.14^\circ \times 502.04 \times (5/500)] \text{A} = 23.29 \angle 44.14^\circ \text{A}$$

$$V_{CB} = 0$$

推论

$$I_{3\phi} = \frac{1}{j0.26} = -j3.48 \quad I_{1\phi} = I_{A_1} + I_{A_2} + I_{A_0} = 3I_{A_1}$$

$$I_{A_1} = \frac{1}{j0.26 + j0.26 + j0.102} = -j1.6077$$

所以

$$I_{1\phi} = 3 \times (-j1.6077) = -j4.823$$

故障点与继电器安装处的正序和负序电流相等；但是由于分流，继电器本身的零序电流与故障点不同。

继电器处， $I_{AB} = j2.154(1.5/1.61) = j2 \text{ p. u.}$ ，所以继电器处

$$I_A = I_{A_1} + I_{A_2} + I_{A_0} = -j3.0 + j0.845 + j2 = -j0.155$$

此种情况下，可知  $I_A \neq 0$ ，有

$$I_B = a^2 I_{A_1} + a I_{A_2} + I_{A_0} = 1 \angle 240^\circ (-j3.0) + 1 \angle 120^\circ (j0.845) + j2$$

$$= 3.0 \angle 150^\circ + 0.845 \angle 210^\circ + 2.0 \angle 90^\circ$$

$$= -3.33 + j3.077 = 4.534 \angle 137.26^\circ$$

$$I_C = a I_{A_1} + a^2 I_{A_2} + I_{A_0} = 1 \angle 120^\circ (-j3.0) + 1 \angle 240^\circ (j0.845) + j2$$

$$= 3.0 \angle 30^\circ + 0.845 \angle -30^\circ + 2.0 \angle 90^\circ$$

$$= 3.33 + j3.077 = 4.534 \angle 42.73^\circ$$

$$V_{A_1} = V_{A_2} = V_{A_2}(j0.26) = 0.845 \times 0.26 = 0.22$$

$$V_{A_0} = -I_{A_0}(j0.11) = -j2.0(j0.11) = 0.22$$

$$V_A = V_{A_1} + V_{A_2} + V_{A_0} = 3V_{A_1} = 3 \times 0.22 = 0.66$$

$$V_B = V_C = 0$$

CT 电流来自同一故障点，因此有

$$V_{AC} = V_A - V_C = V_A - 0 = 0.66$$

$$V_{BA} = V_B - V_A = -V_A = -0.66$$

$$V_{CB} = V_C - V_B = 0$$

继电器的输入信号为

$\Phi_A$

$$I_A = [0.155 \angle -90^\circ \times 502.04 \times (5/500)] \text{A} = 0.728 \angle -90^\circ \text{A}$$

$$V_{AC} = \left( 0.66 \times \frac{115000}{\sqrt{3}} \times \frac{115\sqrt{3}}{115000/\sqrt{3}} \right) \text{V} = 43.82 \angle 0^\circ \text{V}$$

$\Phi_B$

$$I_B = [4.534 \angle 137.26^\circ \times 502.04 \times (5/500)] A = 22.76 \angle 137.26^\circ A$$

$$V_{BA} = \left( -0.66 \times \frac{115000}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1000} \right) V = 43.82 \angle 180^\circ V$$

$\Phi_C$

$$I_C = [4.534 \angle 42.73^\circ \times 502.04 \times (5/500)] A = 22.76 \angle 42.73^\circ A$$

$$V_{BC} = 0$$

下面进行方向继电器的动作分析。

极化

$\Phi_A$	$\Phi_B$	$\Phi_C$
$I_A$	$I_B$	$I_C$
$V_{AC}$	$V_{BA}$	$V_{CB}$

A 相继电器

$$I_A = 0.728 \angle -90^\circ A$$

$$V_{AC} = 43.82 \angle -0^\circ V$$

动作时， $-90^\circ < I_A$  角度  $< 90^\circ$ 。A 相继电器在动作的边缘处（见图 7.10），那么可能会怀疑方向单元是否能正确动作。

B 相继电器

$$I_B = 22.76 \angle 137.26^\circ A$$

$$V_{BA} = 43.82 \angle 180^\circ V$$

动作时， $90^\circ < I_B$  角度  $< 270^\circ$ 。由于  $I_B$  角度为  $137.26^\circ$ ，所以 B 相继电器动作（见图 7.11）。

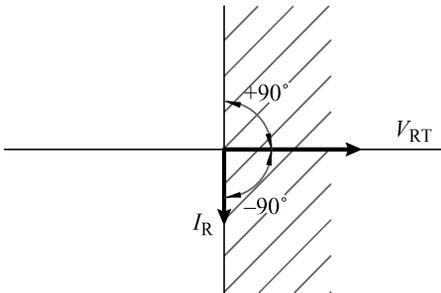


图 7.10 A 相继电器的动作分析

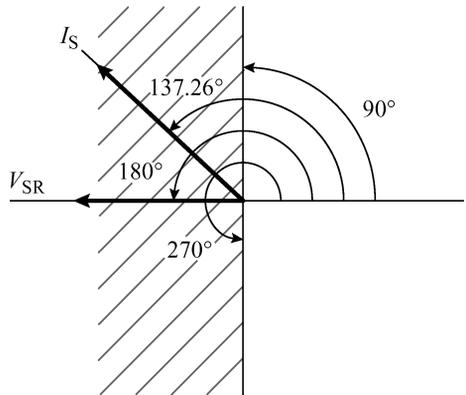


图 7.11 B 相继电器的动作分析

C 相继电器

由于  $V_{CB} = 0$ ，C 相继电器不会动作。

## 7.5 速断单元的配合

环形系统的速断单元的整定计算，是将环形系统断开时下一个继电器（远离电源方向）的短路电流，乘以一个安全系数（考虑到电流的直流暂态分量和保护的配合）。整定原则和变电站间线路保护用的双向过电流继电器是一样的。环形系统仅有一个电源时，靠近电源的变电站继电器，不应采集从变电站流向电源的电流。因此，这类继电器的速断单元整定值为 1.5 倍的最大负载电流。整定值不可更低，否则方向单元可能在严重的负载转移情况下启动，从而导致继电器误动。基于以上原则，速断单元启动电流与时延单元相同，保护配合性得到保证。

### 例 7.2

如图 7.12 所示，确定系统最大负载电流、CT 的变比及确保保护配合性的速断单元的电流整定值。速断单元整定值应为一次电流值。

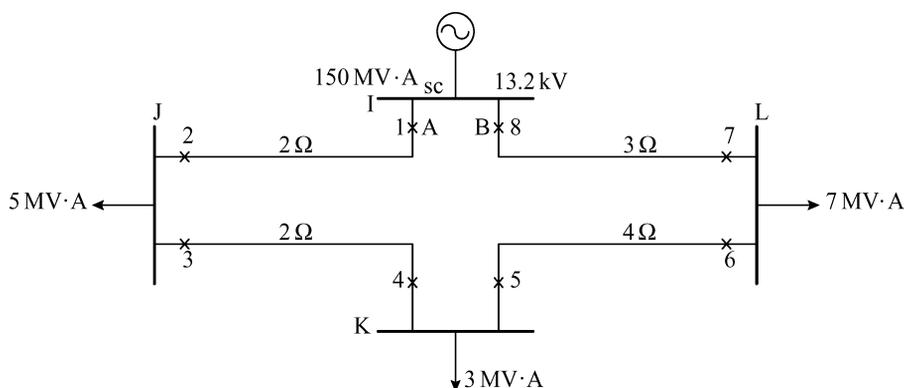


图 7.12 例 7.2 的单电源环形系统的单线图

### 最大负载电流计算

环形系统在 A 点断开：

$$\begin{aligned} \text{流经 B 的总负载电流为} & (7 + 3 + 5) \text{ MV} \cdot \text{A} / (\sqrt{3} \times 13200 \text{ V}) && \text{继电器} \\ & = (15 \text{ MV} \cdot \text{A}) / (\sqrt{3} \times 13200 \text{ V}) = 656.08 \text{ A} && (7)(8) \end{aligned}$$

$$\text{从 L 到 K 的总负载电流为} (8 \text{ MV} \cdot \text{A}) / (\sqrt{3} \times 13200 \text{ V}) = 349.9 \text{ A} \quad (5)(6)$$

$$\text{从 K 到 J 的总负载电流为} (5 \text{ MV} \cdot \text{A}) / (\sqrt{3} \times 13200 \text{ V}) = 218.69 \text{ A} \quad (3)(4)$$

$$\text{从 J 流出的总负载电流为} 0 \text{ A} \quad (1)(2)$$

环形系统在 B 点断开：

$$\text{流经 A 的总负载电流为} (15 \text{ MV} \cdot \text{A}) / (\sqrt{3} \times 13200 \text{ V}) = 656.08 \text{ A} \quad (1)(2)$$

$$\text{从 J 到 K 的总负载电流为} (10 \text{ MV} \cdot \text{A}) / (\sqrt{3} \times 13200 \text{ V}) = 437.38 \text{ A} \quad (3)(4)$$

从 K 到 L 的总负载电流为  $(7\text{MV} \cdot \text{A}) / (\sqrt{3} \times 13200\text{V}) = 306.17\text{A}$  (5) (6)

从 L 流出的总负载电流为  $0\text{A}$  (7) (8)

CT 的选择

假设可选用的 CT 一次绕组匝数为 100 ~ 600，那么可以选 200。首先计算最大负载情况下的 CT 变比。CT 变比选择如下：

$I_{\max 1} = 656.08\text{A}$	CT 变比为 800/5
$I_{\max 2} = 656.08\text{A}$	CT 变比为 800/5
$I_{\max 3} = 437.38\text{A}$	CT 变比为 500/5
$I_{\max 4} = 437.38\text{A}$	CT 变比为 500/5
$I_{\max 5} = 349.90\text{A}$	CT 变比为 400/5
$I_{\max 6} = 349.90\text{A}$	CT 变比为 400/5
$I_{\max 7} = 656.08\text{A}$	CT 变比为 800/5
$I_{\max 8} = 656.08\text{A}$	CT 变比为 800/5

为了确认 CT 变比选择是否正确，就要在每个断路器最大故障电流时，用上面的变比来验证互感器是否会饱和。由于每种情况下的  $0.05I_{sc}$  均小于一次绕组值，所以即使在最严重的故障情况下（详细计算随后给出），CT 也没有饱和。

故障电流计算

母线 I:

$$I_{sc} = (150\text{MV} \cdot \text{A}) / (\sqrt{3} \times 13200\text{V}) = 6560.8\text{A}$$

$$Z_{\text{source}} = (13200\text{V})^2 / (150\text{MV} \cdot \text{A}) = 1.16\Omega$$

母线 J:

J 点故障的等效电路图如图 7.13 所示，则有

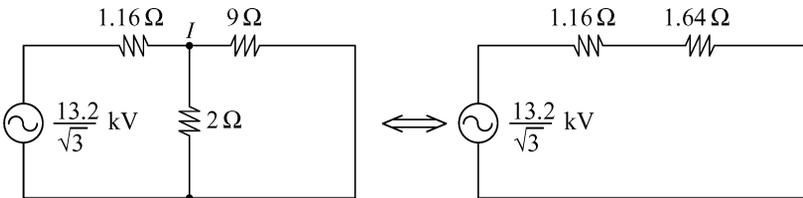


图 7.13 J 点故障的等效电路 (例 7.2)

$$I_{scJ} = \left[ \frac{13200}{\sqrt{3} \times (1.16 + 1.64)} \right] \text{A} = 2721.79\text{A} \quad \text{环状系统闭合}$$

电流反比于电路阻抗，则有

$$I_{scJ}(\text{右手侧}) = \left( 2721.79 \times \frac{2}{11} \right) \text{A} = 494.87\text{A}$$

$$I_{scJ}(\text{左手侧}) = \left( 2721.79 \times \frac{9}{11} \right) \text{A} = 2226.92\text{A}$$

断路器 A 断开, 有

$$I_{scJ} = \left[ \frac{13200}{\sqrt{3} \times (1.16 + 9)} \right] A = 750.1 A$$

断路器 B 断开, 则有

$$I_{scJ} = \left[ \frac{13200}{\sqrt{3} \times (1.16 + 2)} \right] A = 2411.71 A$$

母线 K:

图 7.14 所示为 K 点故障等效电路, 则有

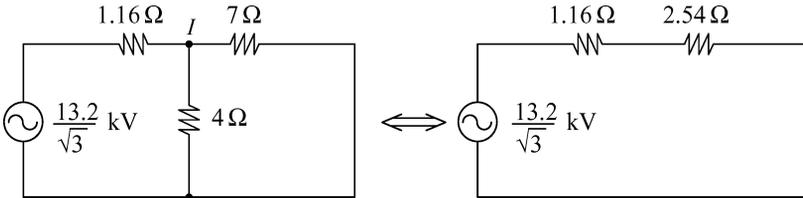


图 7.14 K 点故障的等效电路 (例 7.2)

$$I_{scK} = \left[ \frac{13200}{\sqrt{3} \times (1.16 + 2.54)} \right] A = 2059.74 A \quad \text{环状系统闭合}$$

$$I_{scK} (\text{右边}) = [2059.74 \times (4 \div 11)] = 748.99 A$$

$$I_{scK} (\text{左边}) = [2059.74 \times (7 \div 11)] = 1310.74 A$$

断路器 A 断开, 则有

$$I_{scK} = \left[ \frac{13200}{\sqrt{3} \times (1.16 + 7)} \right] A = 933.94 A$$

断路器 B 断开, 则有

$$I_{scK} = \left[ \frac{13200}{\sqrt{3} \times (1.16 + 4)} \right] A = 1476.94 A$$

母线 L:

图 7.15 所示为 L 点故障的等效电路, 则有

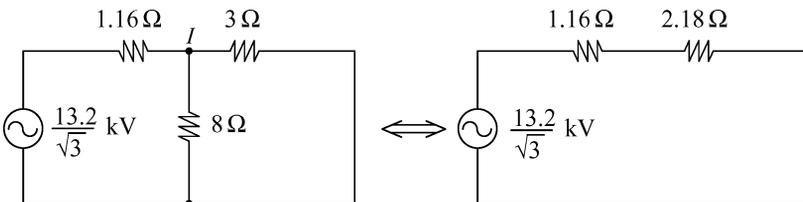


图 7.15 L 点故障的等效电路 (例 7.2)

$$I_{scL} = \left[ \frac{13200}{\sqrt{3} \times (1.16 + 2.18)} \right] A = 2281.74 A \quad \text{环状系统闭合}$$

$$I_{\text{scL}}(\text{右边}) = 2281.74 \times (8 \div 11) = 1659.45 \text{ A}$$

$$I_{\text{scL}}(\text{左边}) = 2281.74 \times (3 \div 11) = 622.29 \text{ A}$$

断路器 A 断开, 则有

$$I_{\text{scL}} = \left[ \frac{13200}{\sqrt{3} \times (1.16 + 3)} \right] \text{ A} = 1831.97 \text{ A}$$

断路器 B 断开

$$I_{\text{scL}} = \left[ \frac{13200}{\sqrt{3} \times (1.16 + 8)} \right] \text{ A} = 831.99 \text{ A}$$

速断单元整定

顺时针方向有

$$\text{继电器 7:} \quad 1.50 \times 656.08 \text{ A} = 984.12 \text{ A}$$

$$\text{继电器 5:} \quad 1.25 \times 831.99 \text{ A} = 1039.99 \text{ A}$$

$$\text{继电器 3:} \quad 1.25 \times 1476.94 \text{ A} = 1846.17 \text{ A}$$

$$\text{继电器 1:} \quad 1.25 \times 2411.71 \text{ A} = 3014.64 \text{ A}$$

逆时针方向有

$$\text{继电器 2:} \quad 1.50 \times 656.08 \text{ A} = 984.12 \text{ A}$$

$$\text{继电器 4:} \quad 1.25 \times 750.10 \text{ A} = 937.62 \text{ A}$$

$$\text{继电器 6:} \quad 1.25 \times 933.94 \text{ A} = 1167.42 \text{ A}$$

$$\text{继电器 8:} \quad 1.25 \times 1831.97 \text{ A} = 2289.96 \text{ A}$$

## 7.6 方向过电流延时继电器的整定

同双向过电流继电器一样, 对环形系统方向过电流继电器的延时单元的整定, 就是选择合适的启动电流和时间倍数。下面介绍启动电流和时间倍数整定步骤。

### 7.6.1 启动电流整定

方向过电流继电器的启动电流整定值, 要考虑继电器各个方向上的最大转移负载, 并乘以本书 5.3.3 节中提到的过载系数。考虑继电器各个方向的转移负载, 主要是为了避免继电器误动作, 尤其是在严重负载转移情况下, 方向单元可能被错误的极性激活而动作。

### 7.6.2 时间刻度整定

时间刻度整定可以用两种方法来确定: 第一种方法是基于瞬时整定值; 第二种方法是考虑触头行程。因为要进行多种环状系统的故障计算, 第二种方法比第一种更为严密。采用第一种方法, 时间刻度值可能会稍微高一点, 多用于

简单系统或者配合曲线不是非常重要的地方，但是两种方法都可以保证良好的配合性。

### 7.6.2.1 直接法确定时间刻度整定值

采用直接法整定时间刻度单元，主要是基于速断单元所用的故障电流值。与双向继电器一样，时间倍数整定采用继电器下游的瞬时电流整定值，动作时间则大于下游继电器的动作时间（考虑了时间级差）。环形系统的所有继电器都应采用这种方法，包括从主母线开始的顺时针和逆时针方向的继电器。例7.2说明了此种方法在速断整定中的应用。

### 7.6.2.2 考虑触头行程的时间刻度整定

考虑到定时单元的触头行程，方向继电器的时间刻度整定需要进行以下步骤：

- 确定环形系统继电器的起始时间刻度值，这样由跳闸方向的母线供电的线路和机器的继电器，可以互相配合。

- 当环形系统闭合时，计算第一个继电器要求的动作时间。一般都将主电源母线连接的设备保护继电器作为第一个继电器，但是实际上任何一个继电器都可以作为第一个继电器。任选一个继电器时，就需要进行系统检查，以确保该继电器和相邻变电站后备保护继电器的动作时间级差。如果动作时间级差不够，就需要修改相邻变电站的时间刻度值。此外，还要计算线路另一端的断路器继保动作时间，以及后备保护继电器的动作时间。

- 接下来，考虑环形系统打开时，线路另一端故障的情况。此时，需要计算最接近故障点的继电器的动作时间，并且检查该继电器和相邻变电站后备保护继电器的动作时间级差是否足够。如前一个例子所述，如果两个继电器不能配合，就需要增加时间刻度整定值。这种情况下就要考虑故障时，环形系统被第一个继电器断开前的触头行程。这样，就要使用以下公式：

$$t_{\text{靠近故障的继电器}} = t_{\text{环形系统闭合时附近的继电器}} + t_{\text{环形系统断开时临近故障的继电器}} \left( 1 - \frac{t_{\text{环形系统闭合时附近的继电器}}}{t_{\text{环形系统闭合时临近故障的继电器}}} \right)$$

以及

$$t_{\text{后备保护继电器}} = t_{\text{环形系统闭合时附近的继电器}} + t_{\text{环形系统断开时后备保护继电器}} \left( 1 - \frac{t_{\text{环形系统闭合时远端继电器}}}{t_{\text{环形系统闭合时后备保护继电器}}} \right)$$

$$t_{\text{后备保护继电器}} \geq t_{\text{靠近故障的继电器}} + t_{\text{动作时间差}}$$

- 对于每个继电器都进行如上相同的步骤，即先考虑环形系统闭合时继电器所连断路器附近的故障情况，然后考虑环形系统闭合时线路另一端的故障情况。如果没有另外的时间刻度整定要求值，那么完成以上步骤就可以了。

应该说，由于整定计算都是考虑最严重的故障情况（如环形系统闭合和断开时各个母线故障的情况），在环形系统中基于触头行程进行时间刻度整定计

算，可以确保保护的配合性。要说明其原因，可以参考图 7.16 所示的 34.5kV 环形系统。

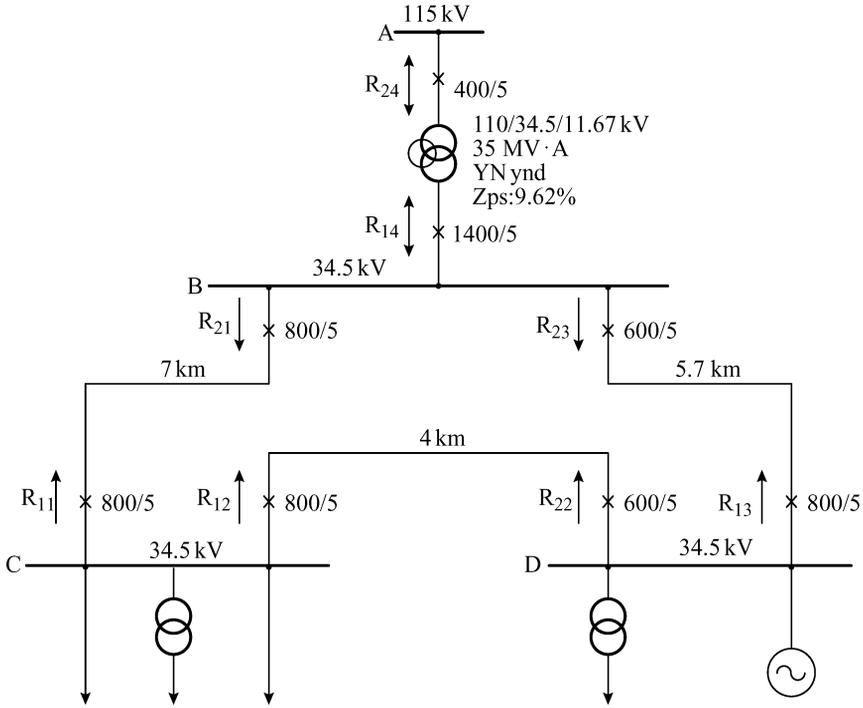


图 7.16 说明过电流方向继电器整定步骤的 34.5kV 环形系统

在确定启动电流和瞬时电流整定值后，基于触头行程的时间刻度整定值步骤如下：

- 进行继电器时间刻度的整定，要确保环形系统三段母线供电的线路和设备的继保之间的配合性。

- 环形系统闭合时，首先考虑继电器 R<sub>21</sub> 相连的断路器出口处的故障。由图 7.17a 所示可知，三相短路电流为 5157A。

- 检查继电器 R<sub>13</sub> 和 R<sub>14</sub> 的动作时间，确保与继电器 R<sub>21</sub> 的配合。如果不能配合，就要增加 R<sub>13</sub> 和 R<sub>14</sub> 的时间刻度值。

- 计算 R<sub>11</sub> 和其后备保护 R<sub>22</sub> 的动作时间，确保环形系统闭合时特定故障可以被清除。

- 计算环形系统断开时，R<sub>11</sub> 相连的断路器出口处故障时的短路电流。由图 7.17b 所示可知，短路电流为 2471A。

- 按以下公式计算此种情况下 R<sub>11</sub> 和其后备保护 R<sub>22</sub> 的动作时间：

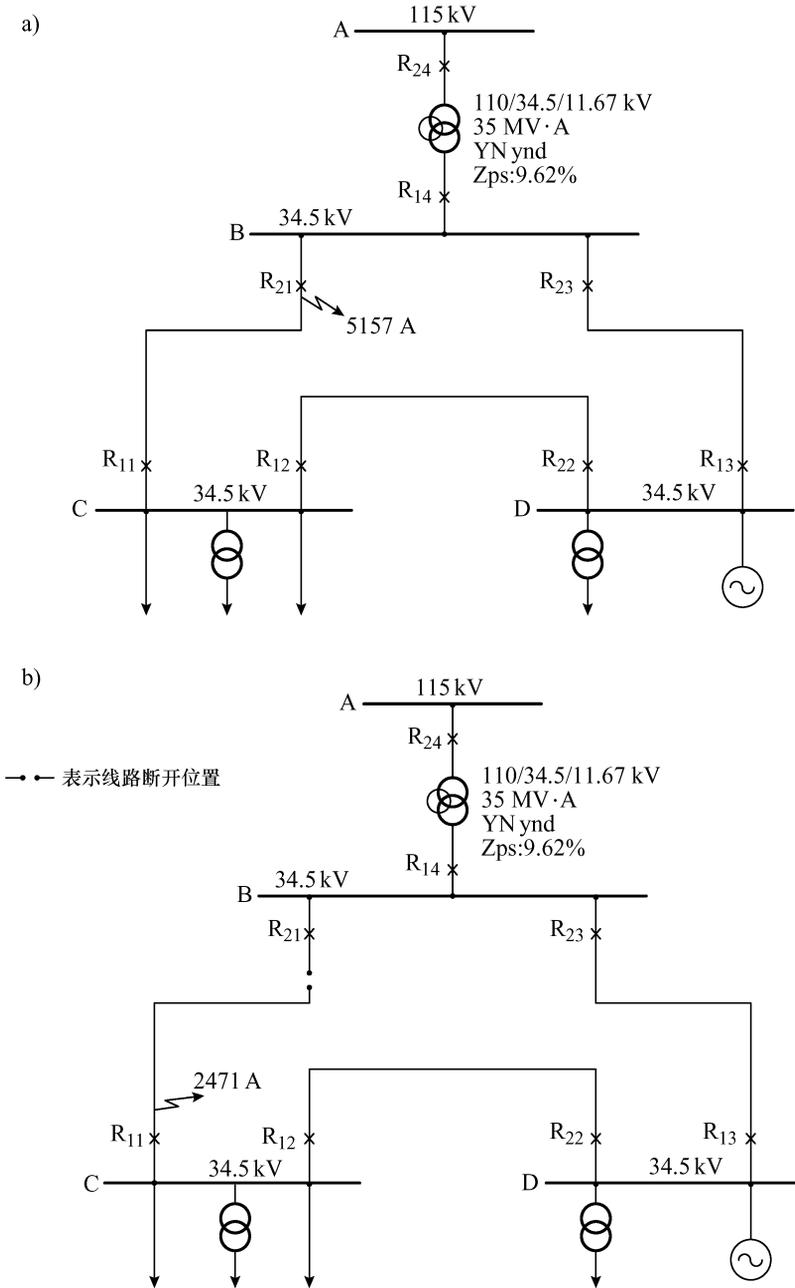


图 7.17 断路器处故障时的短路电流

a) 环形系统闭合时  $R_{21}$  相关的故障

b) 环形系统在  $R_{21}$  处断开时  $R_{11}$  相关的故障

$$t''_{R_{11} \text{ 靠近故障的继电器}} = t_{R_{21} \text{ 环形系统闭合时附近的继电器}} + t'_{R_{11} \text{ 环形系统断开时临近故障的继电器}} \left( 1 - \frac{t_{R_{21} \text{ 环形系统闭合时附近的继电器}}}{t_{R_{11} \text{ 环形系统闭合时临近故障的继电器}}} \right)$$

以及

$$t''_{R_{22} \text{ 后备保护继电器}} = t_{R_{21} \text{ 环形系统闭合时远端继电器}} + t'_{R_{22} \text{ 环形系统断开时后备保护继电器}} \left( 1 - \frac{t_{R_{21} \text{ 环形系统闭合时远端继电器}}}{t_{R_{11} \text{ 环形系统闭合时后备保护继电器}}} \right)$$

式中,  $t$  为环形系统闭合时起始故障的继电器动作时间;  $t'$  为第一个继电器动作后, 新拓扑结构下继电器的动作时间;  $t''$  为考虑新的拓扑结构和触头行程后的继电器动作时间。

- 最后, 检查  $R_{22}$  的时间刻度值, 确保其满足以下条件:

$$t''_{R_{22}} \geq t''_{R_{11}} + t_{\text{动作时间差}}$$

环形系统中其他继电器的整定可以重复以上步骤。表 7.1 列出了图 7.16 所示的环形系统时间刻度整定步骤汇总。

表 7.1 图 7.16 所示的环形系统时间刻度整定步骤汇总

故障点	环形网络的结构	计算	配合检查
$B_{21}$	闭合	$t_{R_{21}}, t_{R_{11}}, t_{R_{22}}$	$t_{R_{13}}, t_{R_{14}}$
$B_{11}$	断开	$t'_{R_{11}}, t'_{R_{22}}, t''_{R_{11}}$	$t''_{R_{22}}$
$B_{12}$	闭合	$t_{R_{12}}, t_{R_{22}}, t_{R_{23}}$	$t_{R_{21}}$
$B_{22}$	断开	$t'_{R_{22}}, t'_{R_{23}}, t''_{R_{22}}$	$t''_{R_{23}}$
$B_{13}$	闭合	$t_{R_{13}}, t_{R_{23}}, t_{R_{14}}, t_{R_{11}}$	$t_{R_{12}}$
$B_{23}$	断开	$t'_{R_{23}}, t'_{R_{14}}, t'_{R_{11}}, t''_{R_{23}}$	$t''_{R_{14}}, t''_{R_{11}}$
$B_{11}$	闭合	$t_{R_{11}}, t_{R_{21}}, t_{R_{14}}, t_{R_{13}}$	$t_{R_{22}}$
$B_{21}$	断开	$t'_{R_{21}}, t'_{R_{14}}, t'_{R_{13}}, t''_{R_{21}}$	$t''_{R_{13}}, t''_{R_{14}}$
$B_{22}$	闭合	$t_{R_{22}}, t_{R_{12}}, t_{R_{21}}$	$t_{R_{23}}$
$B_{12}$	断开	$t'_{R_{12}}, t'_{R_{21}}, t'_{R_{12}}$	$t'_{R_{21}}$
$B_{23}$	闭合	$t_{R_{23}}, t_{R_{13}}, t_{R_{12}}$	$t_{R_{14}}, t_{R_{11}}$
$B_{13}$	断开	$t'_{R_{13}}, t'_{R_{12}}, t''_{R_{13}}$	$t''_{R_{12}}$

## 7.7 习题

习题 7.1 如图 7.18 所示，环形系统的短路数据如下：

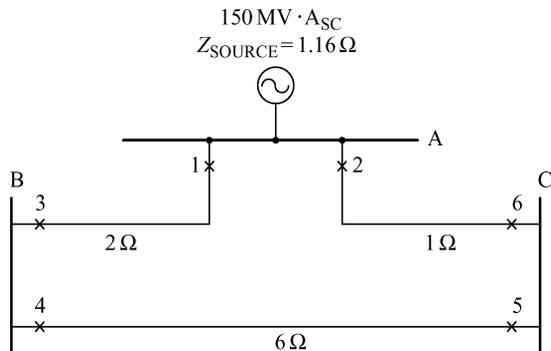


图 7.18 习题 7.1 的网络

环形系统闭合时，有

A 点故障，电流为 6560A

B 点故障，电流为 2731A，即 2235A（由 1 点来）+ 496A（由 2 点来）

C 点故障，电流为 2280A，即 622A（由 1 点来）+ 1658A（由 2 点来）

环形系统断开时，有

B 点故障，电流为 750A，（1 点断开）

为 2411A（2 点断开）

C 点故障，电流为 1832A，（1 点断开）

为 832A（2 点断开）

如果变电站 C 的速断单元 6 整定值为 424A，环形系统闭合时保护范围至线路 AC 的中间，计算变电站 A 中继电器 4 的速断单元整定值。

## 习题 7.2

如图 7.19 所示，34.5kV 环形系统三相故障时的短路电流。F1、F3、F5 为每种故障情况下该点断开时的故障电流，假定各条线路在故障发生时已经断开。

确定断路器 A、B、C 相连的过电流继电器的时间刻度和瞬时电流整定值。事先计算了每个继电器的抽头，各继电器抽头都选为 5。

采用本书图 5.15 所示的反时限继电器的特性曲线。继电器有如下特征：

启动电流 1 到 12A，步进为 1A。

时间刻度 如图 5.15 所示。

速断单元 6 到 80A，步进为 1A。

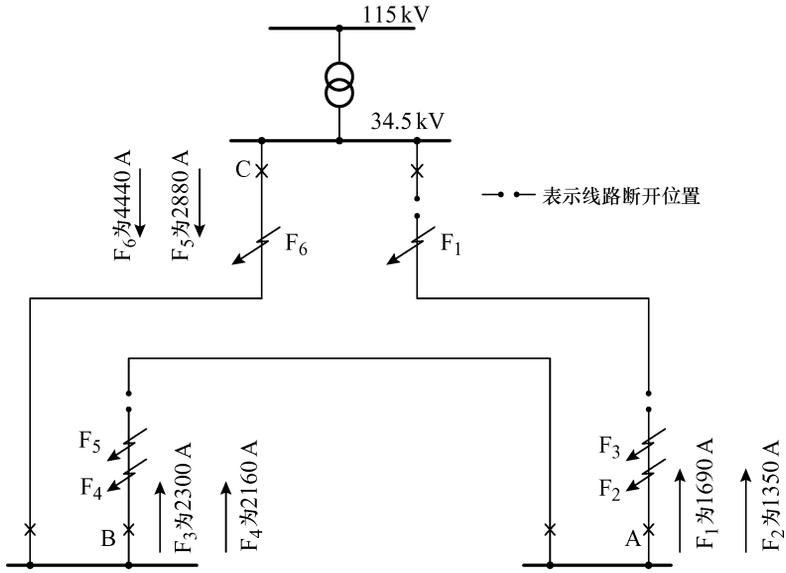


图 7.19 习题 7.2 的网络

( $F_1$ 、 $F_3$ 、 $F_5$  为环形系统断开时末端短路的情况，图中以标识 —●— 表示； $F_2$ 、 $F_4$ 、 $F_6$  为环形系统闭合时短路的情况)

## 第 8 章 差动保护

### 8.1 概述

当两个或多个相似的电气参数幅值之差超过一个预定值，差动保护就会动作。几乎所有的继电器都可以作为差动保护工作。在差动保护中，继电器结构并不重要，而回路中的连接方法则非常关键。大部分的差动继电器都是电流差动型，但是也有电压差动型，电压差动型和电流差动型继电器工作原理相同；主要的差别就是电压差动型的动作信号来源于并联电阻的电压。

一个简单的差动保护布置如图 8.1 所示。电流互感器二次侧互连，过电流继电器线圈再与之相连。假设两个电流互感器变比合适、连接正确，在额定负载或元件保护范围外故障的情况下，尽管电流  $I_1$  和  $I_2$  可能不同，二次电流还是会在两个电流互感器间流动，而不通过过电流继电器。但是，如果故障发生在两个电流互感器的中间区域，故障电流向两个方向流动，互感器二次电流的和将流过差动继电器。在任何情况下，差动继电器的电流都同被保护元件的流入和流出电流差的相量成正比；如果流过差动继电器的电流超过整定值，继电器就会动作。

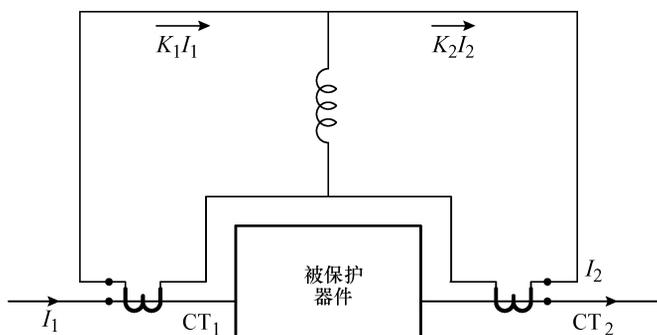


图 8.1 一个简单的差动保护布置（电流平衡）

有一种广泛应用的差动保护继电器具有可变比率的特性，也称为偏置式比率，即除了图 8.2 所示的动作线圈外，还配有一个附加单元——制动线圈。这种类型的继电器常用于差动保护中，因此本章所有的差动继电器都是此种类型。继电器动作线圈的电流与  $(I_1 - I_2)$  呈正比。如果  $N$  为制动线圈的匝数，动作线圈连接至制动线圈中点，那么总的安匝数为  $I_1(N/2) + I_2(N/2)$ ，与  $(I_1 + I_2)/2$  流经所有制动线圈

圈时相同。这种类型的继电器动作特性如图 8.3 所示。

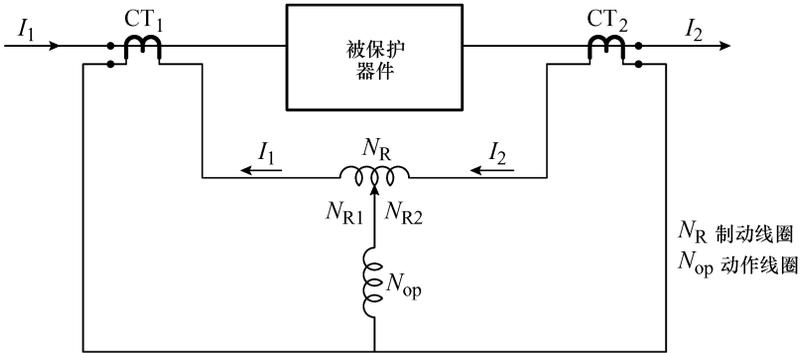


图 8.2 可变比率特性的差动保护继电器

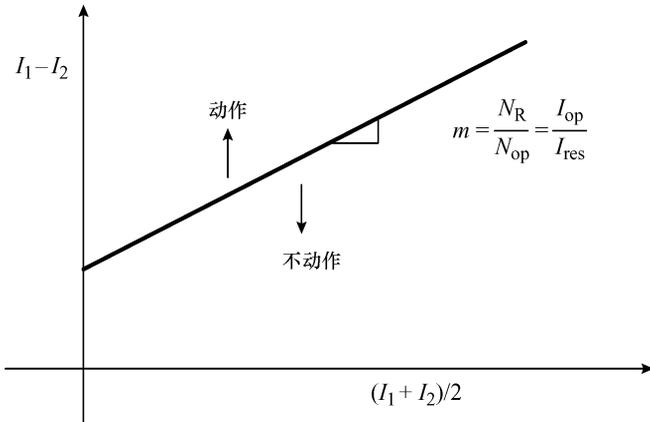


图 8.3 差动保护继电器动作特性（可变比率）

尽管电流互感器参数相同，但是一次电流相同时，二次电流也并不完全相等，因为励磁特性总会有细微的差别。继电器的制动力随着  $(I_1 + I_2)$  幅值的增加而增大，由此可以避免由于 CT 不平衡误差引起的误动。此外，故障电流流过时，制动力矩增大，由此产生一个更为稳定的动作特性并防止继电器误动。在制动线圈回路有多个抽头的继电器中，抽头可以用来调整由于 CT 差异带来的电流误差。如果继电器没有抽头，那么流出 CT 的电流应互相匹配，以防止误动。

如图 8.4 所示，有两个或多个端口的电力系统元件的保护可以采用差动继电器。三个制动线圈匝数相同，每个线圈的制动力互相独立；各量相加。每个继电器的动作特性斜率取决于电流在三个线圈中的分配。其他类型的差动继电器，也采用方向单元或过电压单元，而不仅限于过电流单元。因此，所有类型的继电器实际上都是基于上述基本原理的。

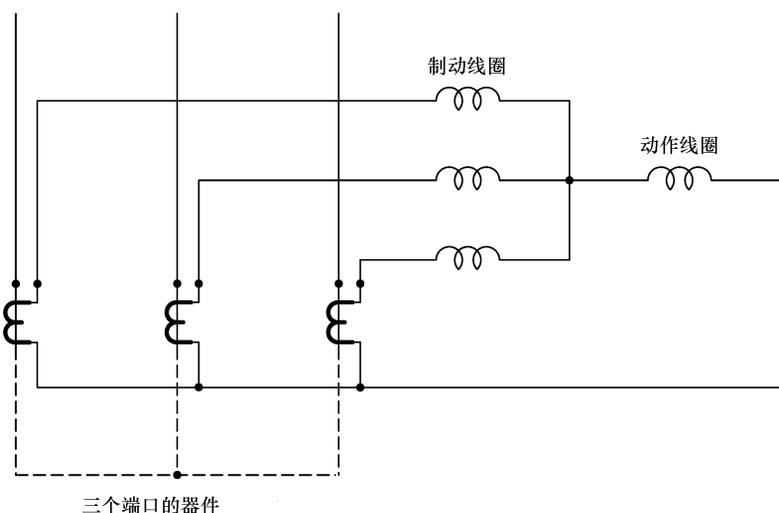


图 8.4 三端口器件的差动保护

## 8.2 差动保护的分类

差动保护可根据被保护元件的种类分类，如下：

- 变压器
- 发电机和旋转电机
- 线路和母线

## 8.3 变压器差动保护

由于继电器固有的稳定性且动作速度快、变压器的一、二次绕组产生的等效安匝，所以差动保护系统可以非常有效的保护变压器。如图 8.5 所示，变压器一、二次侧的 CT 连接形成了一个电流回路。变压器出口或绕组故障在变压器的保护范围内，故障时需要立即清除以防止内部应力和起火危险。大部分的绕组内部故障都是接地或匝间短路，故障严重程度取决于变压器设计和接地类型。

差动保护还可以发现和清除变压器绕组的绝缘故障。此类故障主要是套管起弧和分接开关故障引起的。此外，差动保护还可以发现相间故障和相对地故障，以及一些匝间故障。但是，三相变压器绕组发生相间短路故障的概率是很低的。内部故障是故障的初始阶段，并不会立即引起危险，但如果及时发现，可能会发展成严重的故障。变压器主要的故障是铁心故障，是由铁心的叠片间绝缘老化引起。

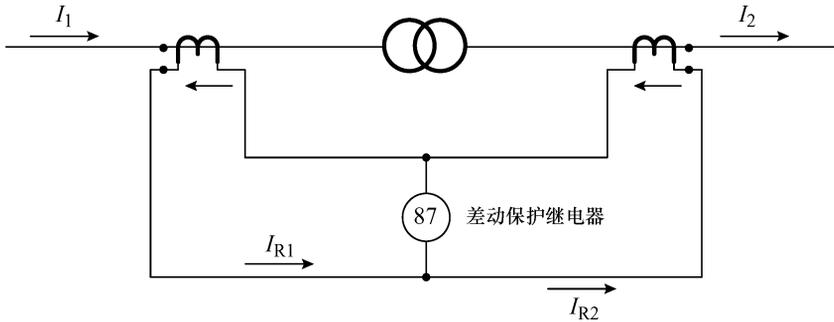


图 8.5 变压器差动保护

### 8.3.1 基本因素

采用三相变压器的差动保护，需要考虑以下因素：

#### 8.3.1.1 变压器电压比

变压器一、二次额定电流与对应的电压成反比关系。因此需要在变压器一、二次侧采用不同变比的 CT。

#### 8.3.1.2 变压器连接

变压器星-三角形联结时，相对于一次电流，二次电流有一个  $30^\circ$  倍数的相移，相位移取决于相量组。相移可以通过 CT 的联结方法来消除。变压器星形联结一侧有零序电流流过，却不会在另一侧三角形联结的绕组中产生感应电流。因此在变压器星形联结侧 CT 为三角形联结，就可以消除零序电流。同样，变压器三角形联结侧的 CT 应为星形联结。当 CT 为三角形联结，二次额定值要乘以  $\sqrt{3}$ ，这样可以平衡掉三角形联结中流过绕组的电流。

#### 8.3.1.3 分接开关

如果变压器有分接开关可以调整电压比，那么所有的差动保护系统都应该适应这种变化。因为实际情况下，不太可能调整 CT 的变比，那么为了调整动作的灵敏性，差动保护就要有一个合适的允许误差范围。因此，在大电流输入端子需要加以标识，保护系统也可以进行一定范围的调整。

#### 8.3.1.4 励磁涌流

当变压器开始带电时或者外部故障清除后一次电压回到额定值时，都会产生励磁涌流的现象。励磁涌流仅在一次绕组内流动，产生的效果就类似变压器发生了内部故障。而差动继电器会将励磁涌流识别为内部故障。因此为了避免差动保护继电器误动，就需要一些方法来区分励磁电流和故障电流。这些方法包括以下几项：

- 采用合适灵敏度的差动继电器，并采用延时单元，避开最初的涌流峰值。
- 采用谐波抑制单元或者监视单元，配合差动单元的使用。
- 在变压器启动时禁止差动继电器动作。

### 8.3.2 CT 的选择和连接

在差动保护系统中，应考虑以下因素：

- 一般来说，星-三角联结的变压器星形联结侧的 CT 应为三角形联结，在变压器三角形联结侧的 CT 应为星形联结。这种接法可以补偿变压器的相位移，并且在外部接地故障时没有零序电流。

- 继电器接法应满足，负载电流从变压器一侧流入，从另一侧流出。如果有两个以上的绕组，就要考虑所有可能的组合，每次考虑两个绕组。

- CT 变比的选择，应考虑在最大负载情况下，变压器两侧 CT 二次电流的平衡。如果有两个以上的绕组，应考虑所有可能的组合，每次考虑两个绕组，并考虑一次绕组的额定容量。如果 CT 变比不能满足要求，可以增加补偿变压器来补偿变压器的相位移。

以下的例题示范了 CT 的联结方法和变比计算，以及变压器保护中差动保护的连接。

#### 例 8.1

如图 8.6 所示，变压器为  $30\text{MV}\cdot\text{A}$ 、 $11.5/69\text{kV}$ 、Yd1 联结。确定变压器的电压比和 CT 的联结方式，以设置差动继电器的整定值。CT 变比步进为  $50/5 \sim 250/5$ ，因此可采用  $100/5$ 。采用可变比率特性的继电器。电流抽头有， $5.0\text{-}5.0\text{A}$ ， $5.0\text{-}5.5\text{A}$ ， $5.0\text{-}6.0\text{A}$ ， $5.0\text{-}6.6\text{A}$ ， $5.0\text{-}7.3\text{A}$ ， $5.0\text{-}8.0\text{A}$ ， $5.0\text{-}9.0\text{A}$ ， $5.0\text{-}10.0\text{A}$ 。

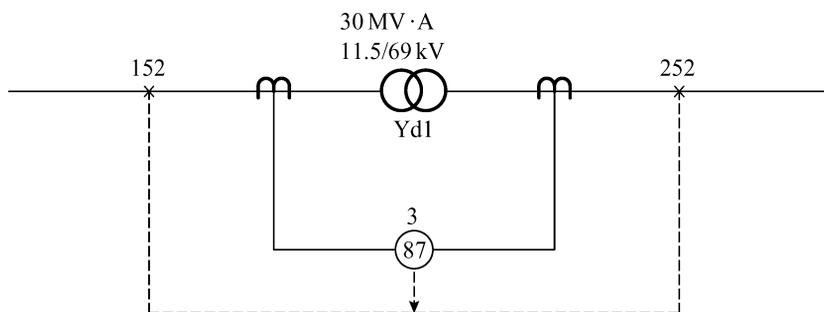


图 8.6 例 8.1 的单线图

#### 答案

图 8.7 所示为完整的三相联结示意图。图中画出了绕组和线路电流，继电器星形和三角形联结侧的制动电流是同相的。

对于  $30\text{MV}\cdot\text{A}$  的输出容量来说，负载电流为

$$I_{\text{load}(69\text{kV})} = \frac{30\text{MV}\cdot\text{A}}{\sqrt{3} \times 69\text{kV}} = 251.0\text{A}$$

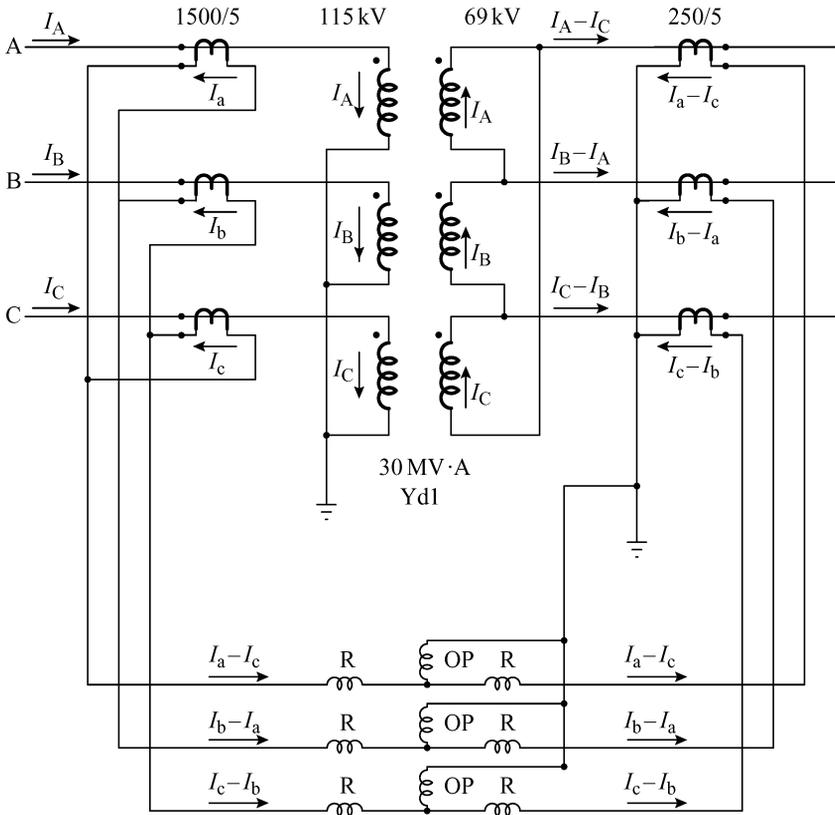


图 8.7 例 8.1 完整的三相联结示意图

$$I_{\text{load}(11.5\text{kV})} = \frac{30\text{MV} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 11.5\text{kV}} = 1506.13\text{A}$$

为了增加保护的灵敏度，11.5kV 侧的 CT 变比选择应尽可能满足最大负载电流的情况，因此，11.5kV 侧的 CT 变比选择 1500/5。当计算其他 CT 变比时，必须保持电流的平衡，即

$$1506.13 \times (5/1500) \times \sqrt{3} = 251 \times (5/X)\text{A}, \text{得 } X = 144$$

那么就要建议 CT 变比为 150/5。然而，考虑到差动继电器有多个抽头，在其端口并不一定要得到完全相同的电流值，因此也可以选用其他的 CT 变比。此例中，希望得到接近额定电流的变比，因此选择 250/5。最后，还要检查这个变比是否和继电器的抽头匹配。

按上述方法选择的两个变比，在额定情况下继电器绕组的电流为

$$I_{\text{relay}(69\text{kV})} = [251 \times (5/250)]\text{A} = 5.02\text{A}$$

$$I_{\text{relay}(11.5\text{kV})} = [1506.13 \times (5/1500) \times \sqrt{3}]\text{A} = 8.69\text{A}$$

因此应选择分接抽头范围为 5.0 ~ 9.0A。

**例 8.2**

对于图 8.8 所示的变压器，确定变压器电压比及补偿变压器的联结方式。采用例 8.1 中同一类型的差动继电器。画出完整的三相联结图，标明每个器件的电流。

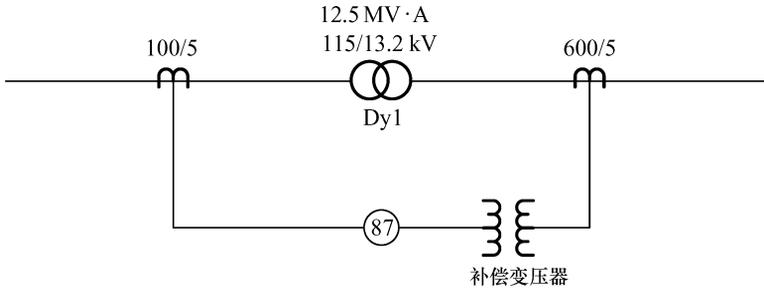


图 8.8 例 8.2 的单线图

**答案**

已知变压器的相量组，就可能确定绕组的联结方式。一旦获得联结方式，就可以画出完整的三相联结示意图，并标明流通的电流，以检查差动继电器是否正确工作。完整的三相联结示意图如图 8.9 所示。

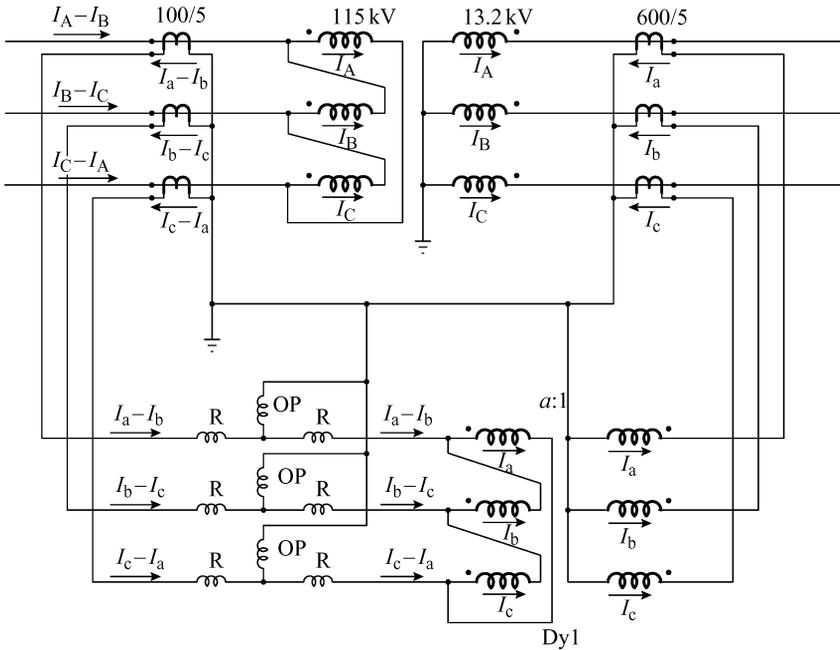


图 8.9 例 8.2 完整的三相联结示意图

负载电流为

$$I_{\text{load}(13.2\text{kV})} = (12.5\text{MV} \cdot \text{A}) / (\sqrt{3} \times 13.2\text{kV}) = 546.7\text{A}$$

$$I_{\text{load}(115\text{kV})} = (12.5\text{MV} \cdot \text{A}) / (\sqrt{3} \times 115\text{kV}) = 62.75\text{A}$$

为了选择补偿变压器的电压比，需要获得电流的平衡，并考虑一侧为三角形联结，有

$$62.75\text{A} \times (5/100) = 546.7\text{A} \times (5/600) \times (1/a) \times \sqrt{3}$$

得到  $a = 2.51$ 。

但是，假设市场上的继电器不能满足这个  $a$  值，继电器的  $a$  值一般为  $\sqrt{3}$ 。那么流入继电器的电流为

$$I_{\text{relay}(115\text{kV})} = [62.75 \times (5/100)]\text{A} = 3.13\text{A}$$

$$I_{\text{relay}(13.2\text{kV})} = [546.7 \times (5/600) \times (1/\sqrt{3}) \times \sqrt{3}]\text{A} = 4.55\text{A}$$

选择继电器抽头，有

$$\frac{4.55}{3.13} = \frac{X}{5}$$

得到  $X = 7.26\text{A}$ ，因此应选择抽头范围为  $5.0 \sim 7.3\text{A}$ 。

### 例 8.3

如图 8.10 所示，已知电力变压器额定容量和电压比，以及 CT 变比，确定补偿变压器的电压比和联结方式，以便整定无抽头的差动继电器。画出完整的三相联结图，标明每个元件的电流。

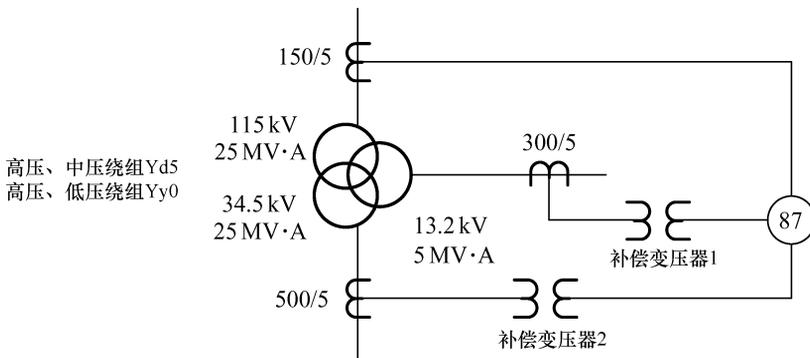


图 8.10 例 8.3 的单线图

### 答案

图 8.11 所示为完整的三相联结示意图；变压器绕组联结方式可由相量组得出。如果差动继电器在 Y 联结侧，那么补偿继电器 2 就应为 Yd5 联结，以补偿高压和中压绕组电流的相位差。没有必要在高压和低压绕组间进行相位补偿，因此补偿变压器 1 接为 Yy0 最为适合。应该注意到，动作线圈公共点、补偿变压器和 CT 的中



为  $1/0.578 = 1.73$ 。

假设低压绕组容量等于高压绕组，从而得到电流幅值的平衡，然后计算 13.2kV 侧的继电器电流。这种连接等效于仅考虑高压和低压绕组，把它们看为一台双绕组的变压器，那么有

$$I_{\text{relay}(13.2\text{kV})} = 4.18\text{A} = \frac{25\text{MV} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 13.2\text{kV}} \times \frac{5}{300} \times \frac{1}{a_1}$$

得到  $a_1 = 4.36$ 。据此整定后，对于任意的负载电流分布，高压绕组制动电流都等于中压和低压绕组的制动电流之和。

### 8.3.3 接地故障时差动继电器保护的绕组的百分比

尽管对于变压器保护来说，差动保护非常可靠，但是绕组并不是完全被保护的，尤其是在单相故障的情况下。对于图 8.12a 所示的三角/星形联结变压器，星形绕组通过电阻接地。假设在距离中性点  $X$  处的  $F$  点发生内部接地故障，涉及  $X\%$  的匝数，电阻值设定为出线端故障时额定电流  $I_{\text{nom}}$  可以流过（相地间为全相电压）。一次和二次绕组匝数分别为  $N_p$  和  $N_s$ 。

$F$  点故障时二次电流由  $X\%$  的相电压产生。因此，电流为  $XI_{\text{nom}}$ 。此外，涉及的绕组匝数为  $XN_s$ 。星形联结侧接地故障时，在三角形联结侧的电流分布使得线电流  $I'_L =$  相电流。因此，有

$$I'_L = XI_{\text{nom}} \frac{XN_s}{N_p} = X^2 I_{\text{nom}} \frac{N_s}{N_p} \quad (8.1)$$

在正常情况下，三角形联结侧的线电流  $I_L$  为

$$I_L = \sqrt{3} I_{\text{nom}} \frac{N_s}{N_p} \quad (8.2)$$

如果差动继电器整定在 20% 的额定线电流时动作，为了使继电器动作，应满足以下条件：

$$I'_L \geq 0.2 I_L$$

即

$$\begin{aligned} X^2 I_{\text{nom}} \frac{N_s}{N_p} &\geq 0.2 \times \sqrt{3} I_{\text{nom}} \frac{N_s}{N_p} \\ X^2 &\geq 0.2 \sqrt{3} \end{aligned}$$

即

$$X \geq 59\%$$

因此，二次绕组的 59% 将不被保护。要保护 80% 的绕组 ( $X \geq 0.2$ )，则要求继电器整定值为 2.3% 的额定一次电流。对于很多类型的差动继电器来说，很难满足这个要求。

图 8.12b 所示为三角/星形联结变压器的典型一、二次故障电流（二次星形联

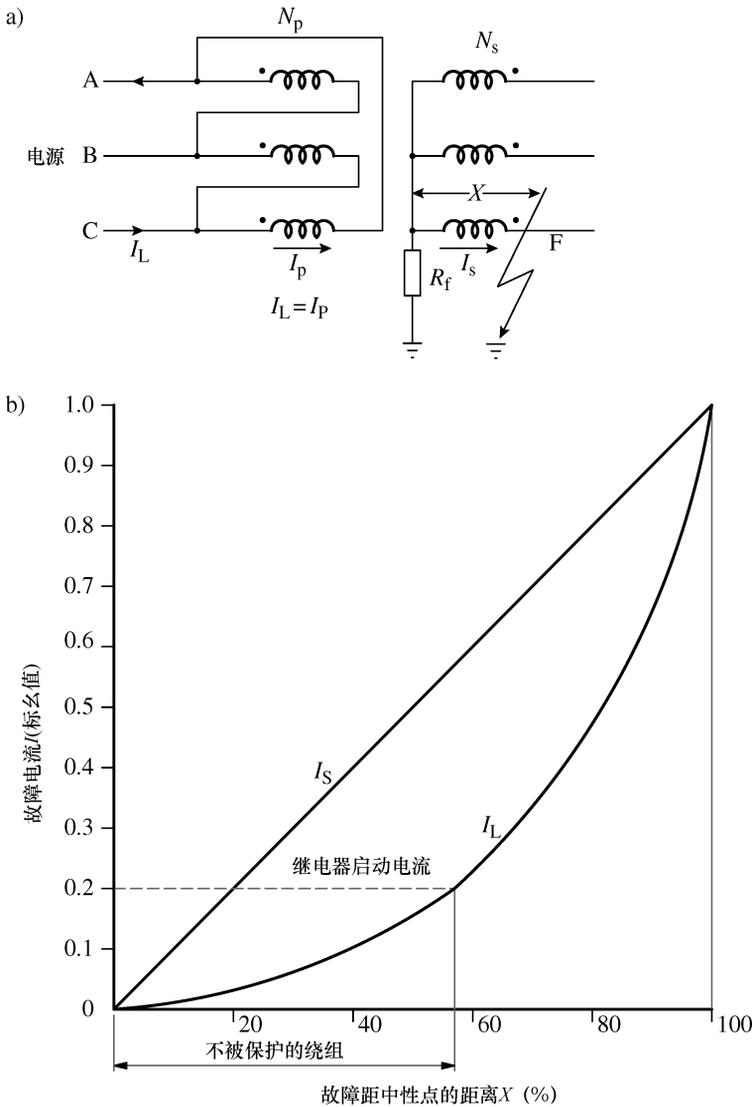


图 8.12 三角/星形联结变压器（星形联结侧绕组通过电阻接地，星形联结侧故障）  
a) 连接示意图 b) 典型一次和二次故障电流

结绕组通过电阻接地)，以及星形联结绕组故障点对差动继电器启动电流的影响。

### 8.3.4 确定斜率

在正常负载情况下，分接头和 CT 变比的变化会造成制动绕组中电流的差异，此时差动继电器的斜率整定要确保保护不会因此而误动。为了确定斜率，要根据以下步骤，在相应线圈中的电流和匝数基础上，计算制动和动作力矩：

$$T_{\text{res}} = I_1 N_{R1} + I_2 N_{R2}$$

$$T_{\text{op}} = |I_1 - I_2| N_{\text{op}}$$

式中,  $I_1$  和  $I_2$  为 CT 二次电流;  $N_{R1}$  和  $N_{R2}$  为制动线圈的匝数 (见图 8.2)。

若继电器动作, 要求  $T_{\text{op}} > T_{\text{res}}$ , 即  $|I_1 - I_2| N_{\text{op}} > I_1 N_{R1} + I_2 N_{R2}$ , 如果

$$N_{R1} = N_{R2} = N_R/2$$

那么

$$T_{\text{res}} = (I_1 + I_2) N_R/2$$

斜率为

$$\frac{|I_1 - I_2|}{0.5 |I_1 + I_2|} \geq \frac{N_{\text{res}}}{N_{\text{op}}} = m$$

其典型的动作曲线如图 8.3 所示。

### 8.3.5 电力变压器中的故障电流分布

当考虑到差动保护动作特性时, 为了确保保护的灵敏性, 还要考虑所有绕组中的故障电流分布。这对于经阻抗接地的变压器单相故障情况尤其重要。以下为保护整定的计算过程。

#### 例 8.4

如图 8.13 所示, 额定电压为 115/13.2kV 的 Dy1 联结变压器, 额定容量为 25MV·A, 配有差动保护。

变压器连接于一个辐射状网络中, 电源在 115kV 侧。继电器最小动作电流为 1A。变压器 13.2kV 绕组通过电阻接地, 二次端子单相故障时电流即等于额定负载电流。

画出完整的三相联结示意图, 标明以下情况下所有器件中的电流值:

- 满负载时;
- 假定变压器空载, 13.2kV 侧 C 相绕组中间故障时。

在以上情况下, 要注明继电器是否动作。

**答案**

满负载时

变压器最大负载满载情况下, 有

$$I_{\text{nom}(13.2\text{kV})} = \frac{25 \times 10^6 \text{V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 13.2 \times 10^3 \text{V}} = 1093.47 \text{A}$$

$$I_{\text{nom}(115\text{kV})} = \frac{25 \times 10^6 \text{VA}}{\sqrt{3} \times 115 \times 10^3 \text{V}} = 125.51 \text{A}$$

基于给定的一次电流, A-B-C 相位方向是顺时针的。因此, 对应的二次电流比一次电流相位超前  $30^\circ$ , 以符合变压器 Dy1 的相位移要求。图 8.13 还给出了 HV 和 LV 侧的电流值, 非常明确的是, 平衡电流进入差动继电器, 差动继电器不能启动。

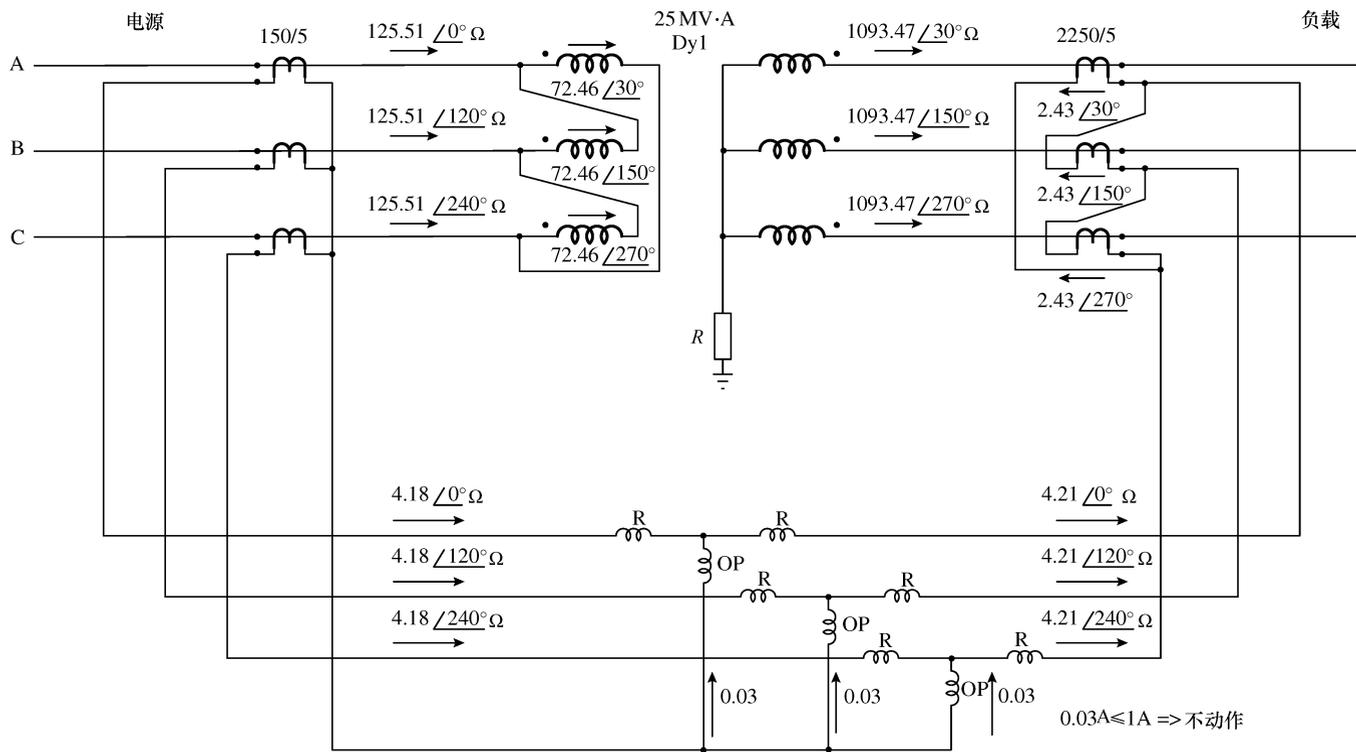


图 8.13 例 8.4 完整的三相联结示意图

### 13. 2kV 侧 C 相绕组中间故障

由于变压器通过电阻接地，变压器 13.2kV 侧套管到绕组间故障时可以限制故障电流，由于故障发生在绕组中间，故障电流等于额定值的 1/2，即

$$I_{\text{fault}} = \frac{I_{\text{nom}(13.2\text{kV})}}{2} = \left( \frac{1093.47}{2} \right) \text{A} = 546.74 \text{A}$$

由于

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{\sqrt{3} \times V_1}$$

三角形联结绕组的一次电流为

$$I_{\text{prim}} = I_{\text{fault}} \frac{(N_2/2)}{N_1}$$

$$I_{\text{prim}} = I_{\text{fault}} \frac{V_2}{2\sqrt{3}V_1} = \left( 546.47 \times \frac{13.2}{2\sqrt{3} \times 115} \right) \text{A} = 18.12 \text{A}$$

图 8.14 也给出了 HV 和 LV 的电流值，如图所示，由于流过动作线圈的电流仅为 0.6A，小于继电器动作电流 1A，因此差动继电器不动作。

## 8.4 发电机和旋转电机的差动保护

发电机和其他旋转电机的差动保护和变压器保护有很多相似之处。发电机绕组内部故障有相间短路、匝间短路、开路和接地故障，这些情况下都应该立即断开回路。为了差动保护的有效性，发电机中性点应接地良好，可通过电阻或电抗接地，也可直接接地。差动保护应满足以下要求：

- 灵敏度高，可以发现发电机定子绕组的缺陷，但在发电机外部故障时不会动作。
- 动作迅速，在没有造成任何严重损害前断开发电机。
- 中性点断路器、场断路器和主断路器都应分断。

图 8.15 所示为星形联结带有 4 个端子的发电机差动保护，给出了星形联结发电机的配套 CT 和差动继电器排布；图 8.16 为三角形联结的发电机差动保护。如果中性点连接点在发电机内部，并将中性点引出，那么差动保护仅覆盖接地故障，如图 8.17 所示。

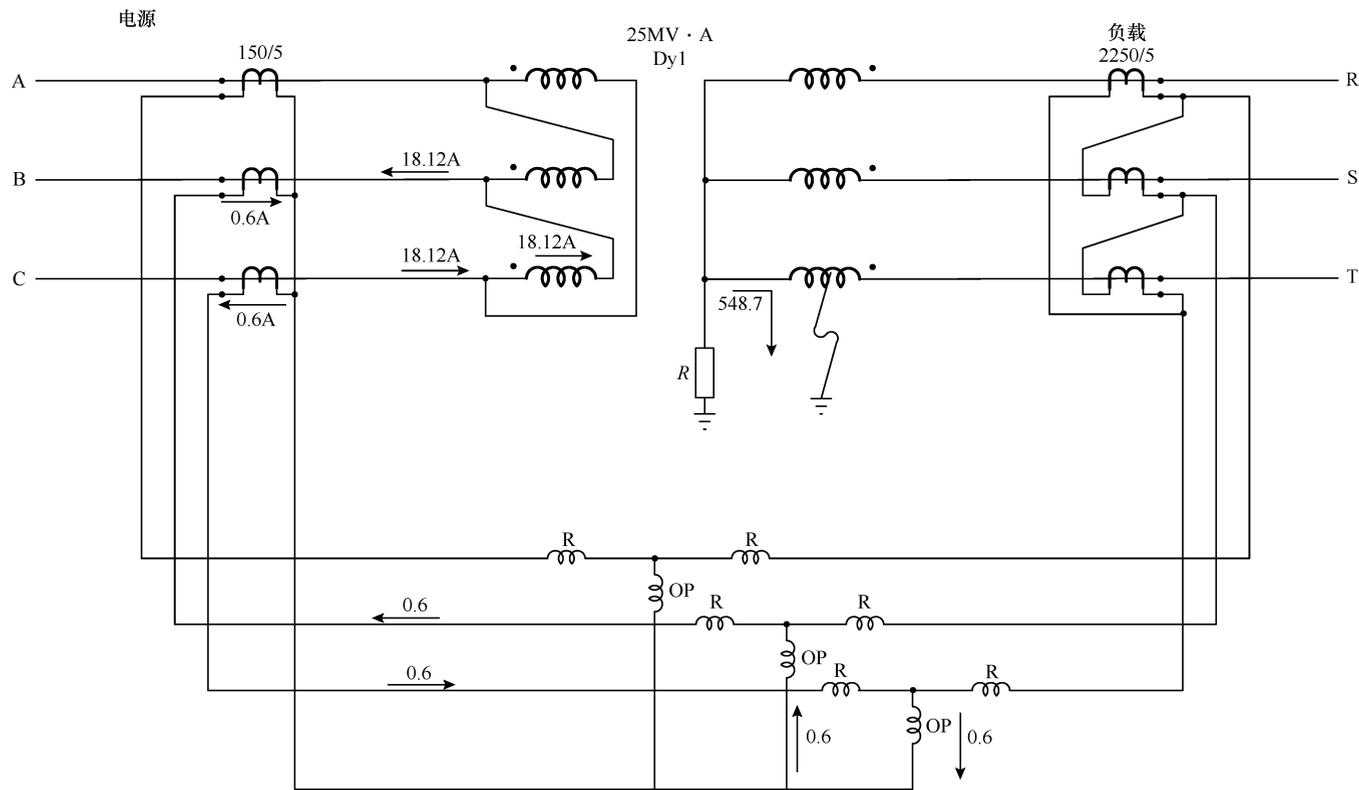


图 8.14 例 8.4 的 13.2kV 侧 T 相绕组中间故障情况

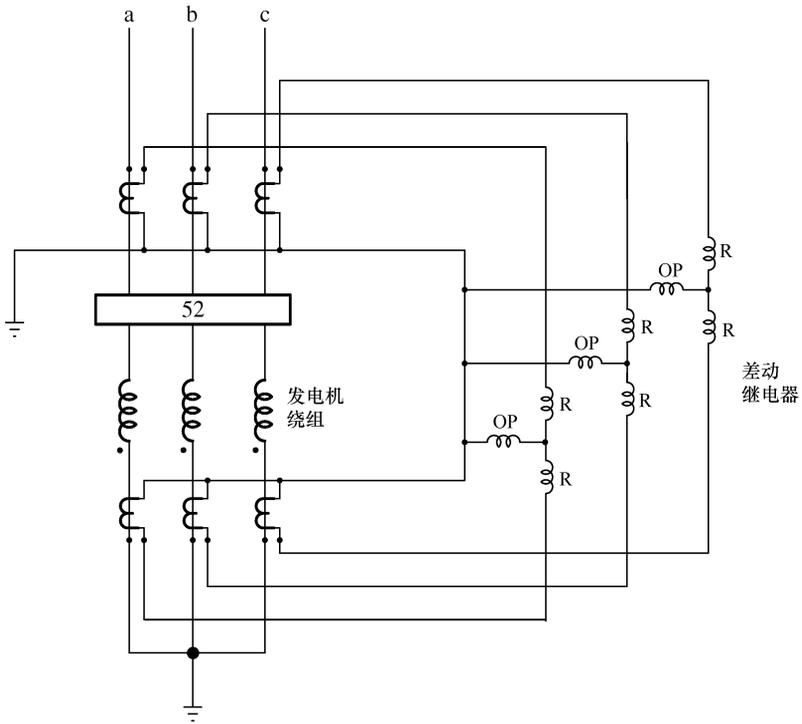


图 8.15 星形联结带有四个端子的发电机差动保护

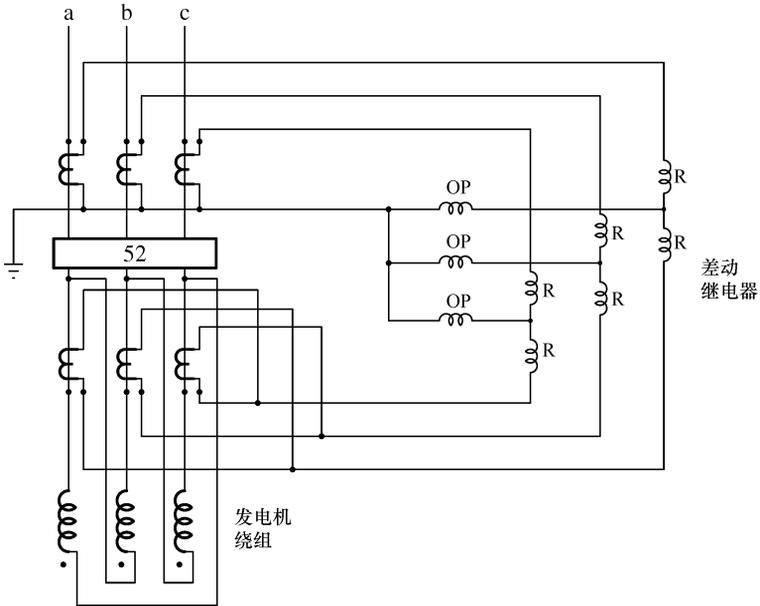


图 8.16 三角形联结的发电机差动保护

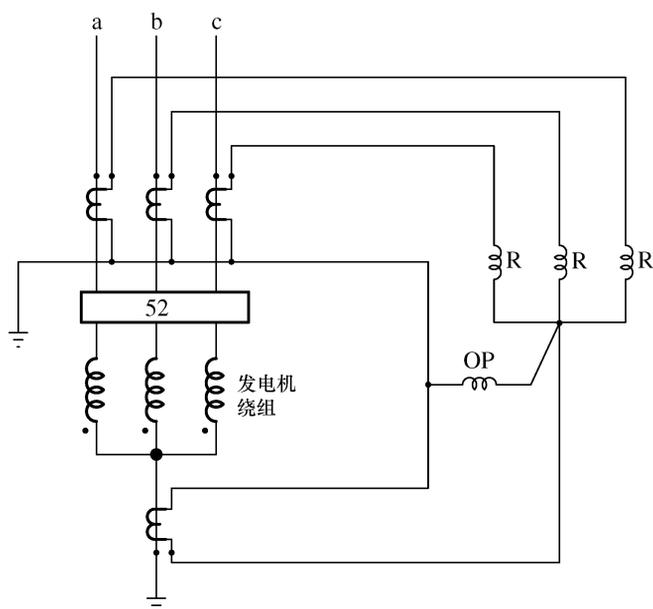


图 8.17 星形联结的发电机差动保护

## 8.5 线路差动保护

图 8.2 所示的只采用一组继电器的差动保护，并不适用于长距离的架空线，因为线路两端距离过远，很难将 CT 二次侧连接起来。因此有必要在回路两端各安装一套继电器，并用通信手段将两者相连。纵联保护就是指架空线中采用差动保护，纵联即表示线路两端有信息传递的通道。有三种信息传递的通道：辅助导线，载流线路，厘米波系统。辅助导线一般包括两种电话线路，架空或电缆。载流线路是指，高频小电流通过电力线传输至线路另一端的接收器，接地线或保护线作为返回导体。厘米波通过高频无线系统传播，频率通常高于 900MHz。

纵联差动保护原理与发电机和变压器的差动保护原理类似。但是由于线路末端的继电器更为分散，单个继电器不能启动两个跳闸回路，因此继电器整定是不同的。纵联差动保护从理论上讲是非常理想的保护方式，因为无论线路哪个部分发生故障，线路两端都应该可以立即断开。此外，在本段线路范围外发生故障，保护不应动作，以确保选择性。传统继保中感应电流带来很多实际操作中的困难，但是光纤的使用逐步克服了这些困难，大大改善了这种保护的稳定性。

## 8.6 母线差动保护

母线差动保护与变压器和发电机差动保护原理相同。在正常系统条件下，母线输入功率与输出功率相等；差分回路内部故障时，系统失去平衡，电流流入继电器动作线圈，和母线相关的所有断路器断开。

和母线相连的可能有多个回路，很多 CT 的二次侧可能并联在一起。母线差动保护设备中包括套管型 CT，该类 CT 可以使 6~8 个二次侧并联在一起。尽管一些母线差动保护仍然采用多个制动线圈，但是由于高阻抗继电器性能更为优越，多数母线差动保护均采用高阻抗继电器。母线多数的故障为单相接地，很多情况下是由雷电或开关设备的绝缘缺陷引起的。但是，还有很大一部分母线故障是由人为因素而不是开关故障引起的。

### 8.6.1 多个制动线圈的差动保护系统

具有可变比率的差动继电器应使用于多个制动线圈的系统，如图 8.18 所示。母线出线侧的各馈线 CT 的二次侧并联，通过差动继电器，母线进线侧 CT 二次侧也并联相接。

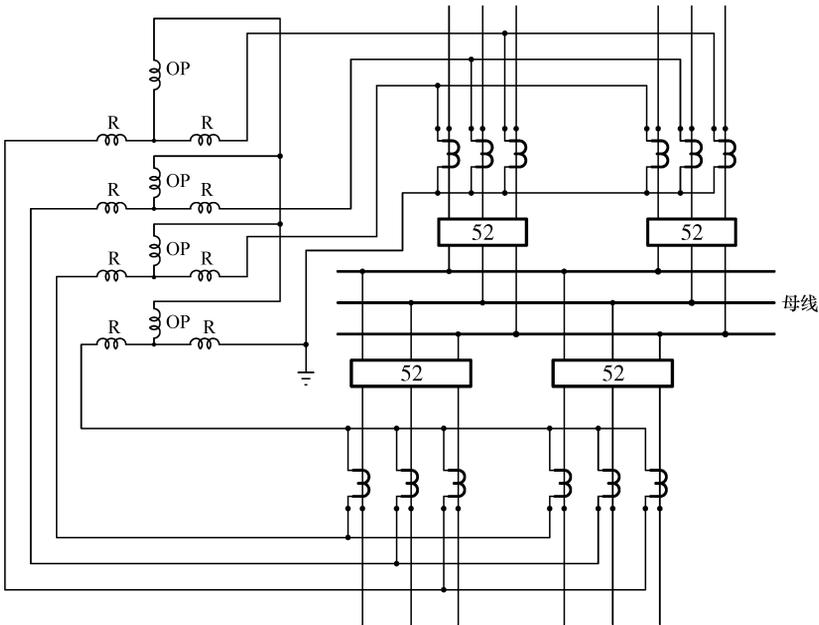


图 8.18 多个制动线圈的母线差动保护

### 8.6.2 高阻抗差动系统

高阻抗系统迫使所有非正常的差动电流流过 CT，而不是流过继电器动作线圈，

因此避免外部故障时继保误动，以及由于励磁特性的差异使所有 CT 二次电流不同导致过载而引起保护误动。

### 8.6.2.1 CT 并联连接

这种方式需要一个高阻抗继电器，连接在 CT 二次侧两端，每个回路的所有 CT 二次侧并联，如图 8.19 所示。然而，这种连接方式下，仅在接地故障下可以保护母线。为了使此种保护方式更为有效，CT 二次侧连线的电阻必须尽可能的小。

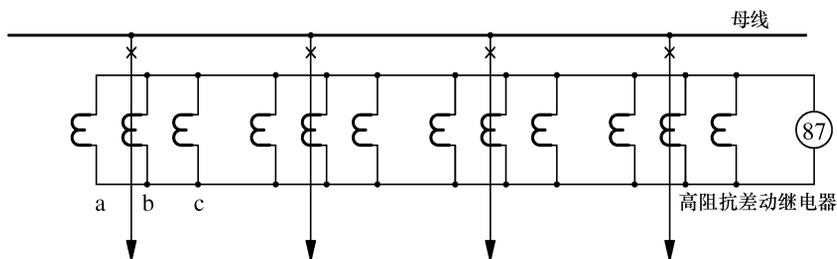


图 8.19 CT 并联的高阻抗差动保护

高阻抗继电器包括一个速断过电压单元，整定值为外部故障时继电器端子的最大电压，并考虑了最大一次故障电流、连线和二次绕组的电阻、CT 的变比及安全裕度。因此，在外部故障时，继电器两端电压相对较低，并不会使继电器动作。在内部故障时继电器两端电压较高，引起速断过电压单元动作，并给相关断路器发出断开信号。

### 8.6.2.2 每相采用公共母线

如图 8.20 所示，这种方式下每相的 CT 电流均平衡，并采用同一公共母线为一个高阻抗继电器的三个单元供电，因此在相间和接地故障时母线都可以得到保护。

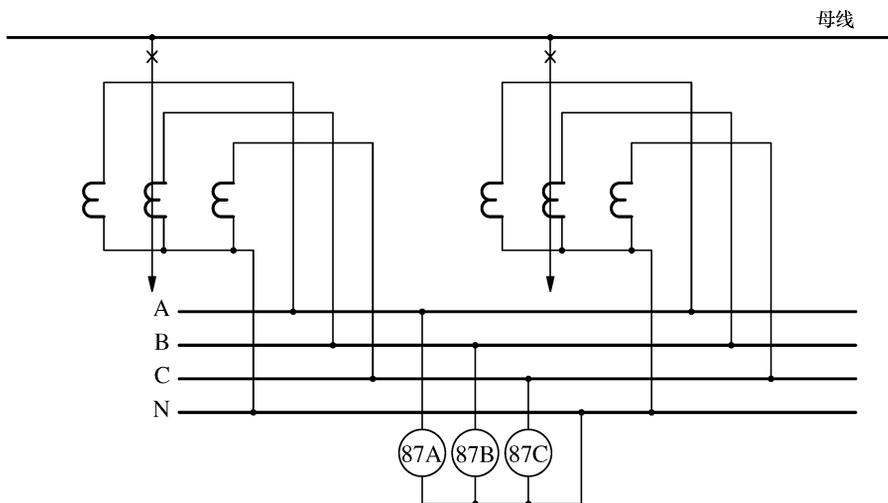


图 8.20 每相采用公共母线的高阻抗差动保护

## 8.7 习题

### 习题 8.1

如图 8.21 所示, 变压器配有差动保护继电器, 每个制动回路的抽头如下:

$$2.9-3.2-3.5-3.8-4.2-4.6-5.0-8.7$$

如图 8.21 所示, CT 变比为 1000/5 和 200/5, 且不会饱和, 确定每个制动线圈的抽头。

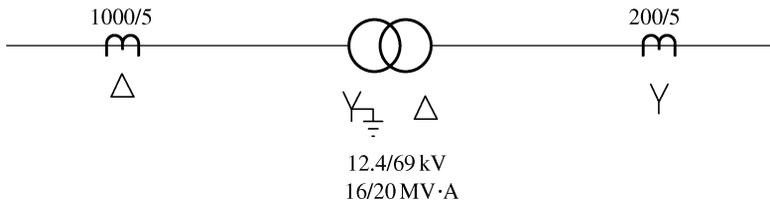


图 8.21 习题 8.1 的示意图

### 习题 8.2

如图 8.22 所示, 有一台多绕组变压器, 对于每个制动线圈, 差动继电器都采用同一抽头, 进行与习题 8.1 同样的计算。

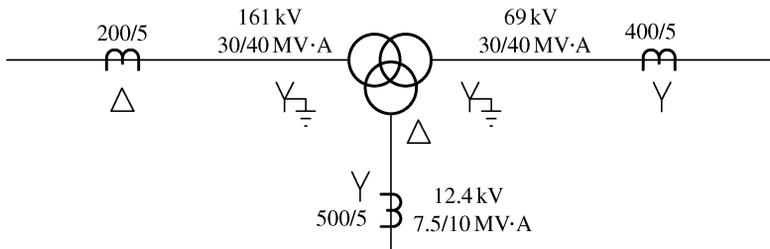


图 8.22 习题 8.2 的示意图

### 习题 8.3

如图 8.23 所示, 变压器为  $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 、 $34.5/13.2 \text{ kV}$ 、 $\text{Dy1}$  联结。 $34.5 \text{ kV}$  侧 CT 变比为 200/5,  $13.2 \text{ kV}$  侧 CT 变比为 900/5。

计算 CT 一次侧和二次侧的电流幅值和方向。如果变压器二次绕组 b 和 c 相短路故障, 故障电流为  $4.5 \text{ kA}$ , 差动继电器是否动作?

检查差动继电器动作是否正确? 如果不正确, 说明怎样改正。

注: 差动继电器在 20% 额定电流时动作, 额定电流为  $5 \text{ A}$ 。因此继电器动作电流大于  $1 \text{ A}$ 。

### 习题 8.4

如图 8.24 所示, 变压器为  $16/20 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 、 $69/12.4 \text{ kV}$ 、 $\text{Yd7}$  联结。确定补偿变

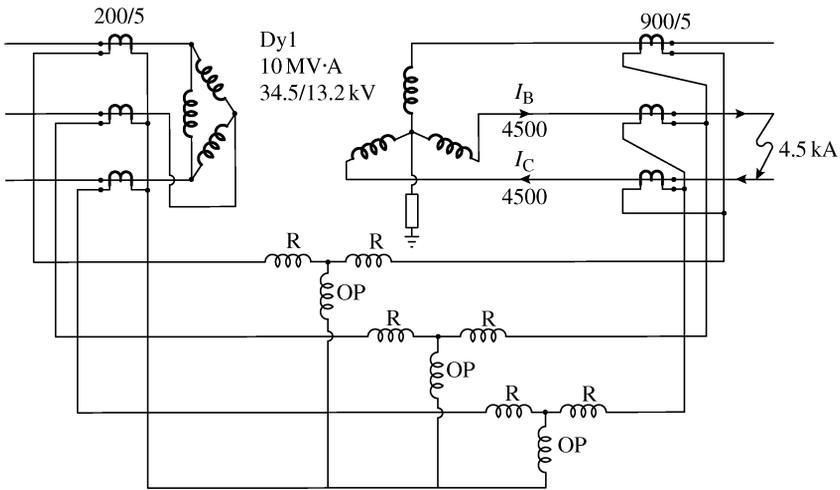


图 8.23 习题 8.3 的示意图

压器的变比和联结方式，以确定差动继电器的联结方式，差动继电器没有抽头。补偿变压器的一次和二次绕组仅为星形或三角形联结。

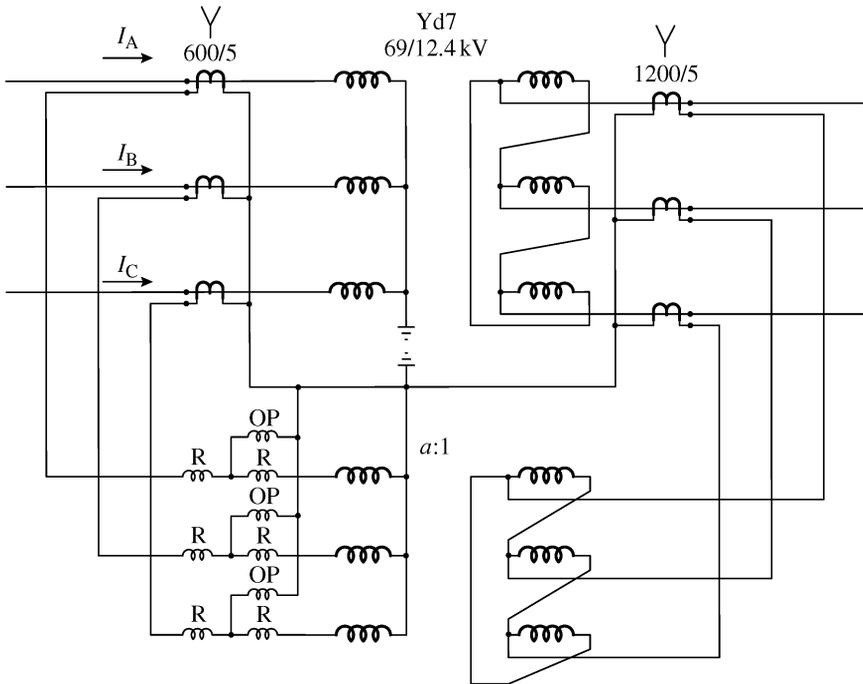


图 8.24 习题 8.4 的示意图

画出系统中每个器件的三相联结示意图，标明电流，并考虑  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  电流流入变压器一次侧。

# 第9章 距离保护

## 9.1 概述

电力系统中发生故障后要尽快切除；否则会导致客户断电、系统不稳定、设备损坏。距离保护可以满足可靠性和快速性的保护要求，因此在电力系统中广泛应用。

距离保护是非单元式保护，能够根据阻抗值识别在系统不同位置发生的故障。距离保护的原理主要是通过故障电流和继电器安装位置的电压得到距离故障点的阻抗。如图 9.1 所示，A 点继电器根据线电流和线电压估算阻抗  $Z = V/I$ 。F<sub>1</sub> 点故障时阻抗为  $Z_{AF1}$ ，F<sub>2</sub> 点故障时阻抗为  $(Z_{AB} + Z_{BF2})$ 。

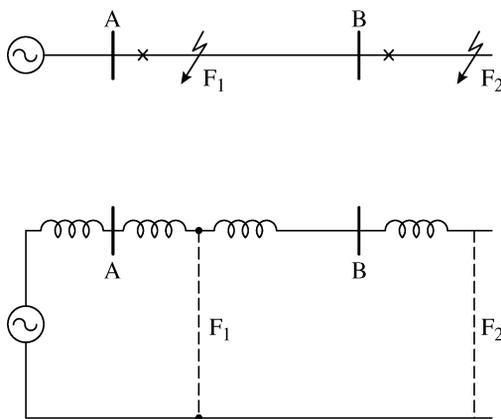


图 9.1 电力系统不同位置故障

采用距离保护继电器的主要优点是被保护线路的阻抗是常数，和电压电流幅值基本无关。因此距离保护范围是固定的，不像过电流保护那样保护范围根据系统情况变化而变化。

## 9.2 距离继电器的种类

根据  $R-X$  坐标平面的特性、输入信号数量、对比输入信号的方法等不同，距离继电器可以分为多种类型。最常用的一种距离继电器是对比两个输入信号的幅值或相位，以获得动作特性。其动作特性在  $R-X$  平面上为直线或圆。尽管对比的信

号数量可能不同，由某种比较器得到的特性也可以由另外一种比较器获得。

如果距离继电器的阻抗整定值为  $Z_R$ ， $Z_R \geq V/I$  或  $I Z_R \geq V$  时，继电器动作。如图 9.2 所示，当电流回路的安匝数超过电压回路安匝数时，幅值比较器使继电器动作。但是，当  $V$  和  $I$  相位差接近  $90^\circ$  且存在暂态现象，使用于评估  $I Z_R \geq V$  的  $V$  和  $I$  的有效值不正确，这样很难通过幅值比较器使继电器正确动作。因此，幅值比较器的使用是有局限性的；对比两个信号的相位比幅值更方便。

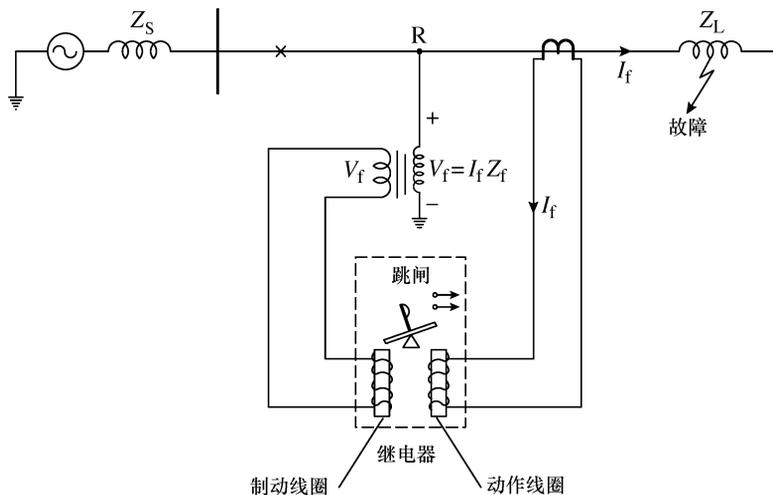


图 9.2 基于幅值比较器的继电器

假设两个信号  $S_0$ 、 $S_r$ ，要进行幅值比较，另外两个信号  $S_1$ 、 $S_2$  进行相位比较。这些信号间的关系如下：

$$\begin{aligned} S_0 &= S_1 + S_2 \\ S_r &= S_1 - S_2 \end{aligned} \quad (9.1)$$

则

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{(S_0 + S_r)}{2} \\ S_2 &= \frac{(S_0 - S_r)}{2} \end{aligned} \quad (9.2)$$

幅值比较

$$\begin{aligned} |S_0| &\geq |S_r| \\ |S_1 + S_2| &\geq |S_1 - S_2| \end{aligned} \quad (9.3)$$

定义  $S_1/S_2 = C$ ，上面的关系式可以表示为

$$|C + 1| \geq |C - 1| \quad (9.4)$$

在  $R-X$  平面中画出  $C$ ，如图 9.3 所示。图中可以看到在右半平面满足式 (9.4) 的条件。此右半平面可以定义为  $C \angle \theta$ ， $-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ$ 。

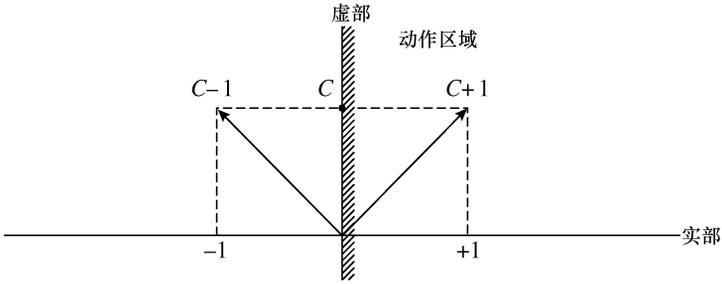


图 9.3 在复数平面对比相位 ( $C = S_1/S_2$ )

假设  $C \angle \theta = (S_1 \angle \alpha)/(S_2 \angle \beta)$ ，那么在以下情况下可以满足式 (9.4) 的条件：

$$-90^\circ \leq \alpha - \beta \leq +90^\circ \quad (9.5)$$

以上关系式表明用于幅值比较器的两个信号，可以转化为相位比较器使用的信号。在下面的段落中将对信号进行分析，以获得最主要的距离继电器的动作特性。

### 9.2.1 阻抗继电器

阻抗继电器并不考虑电压和电流的相位，因此  $R-X$  平面上的动作特性是个圆，圆心为坐标轴原点，半径为整定值（单位为  $\Omega$ ）。继电器在阻抗小于整定值时动作，即阻抗值在圆内时继电器动作。因此若  $Z_R$  为阻抗整定值，继电器就要在  $Z_R \geq V/I$  或  $I Z_R \geq V$  时动作。为使阻抗继电器作为相位比较器工作，信号  $S_0$  和  $S_r$  应等于

$$\begin{aligned} S_0 &= I Z_R \\ S_r &= KV \end{aligned} \quad (9.6)$$

$K$  为常数，与 CT 和 VT 的变比有关。相位比较器的相应信号为

$$\begin{aligned} S_1 &= KV + I Z_R \\ S_2 &= -KV + I Z_R \end{aligned} \quad (9.7)$$

式 (9.7) 除以  $KI$ ，得到

$$\begin{aligned} S_1 &= Z + Z_R/K \\ S_2 &= -Z + Z_R/K \end{aligned} \quad (9.8)$$

式中

$$Z = V/I$$

当除以  $KI$  时，信号  $S_1$  和  $S_2$  的幅值改变了。但是由于相位差不变，因此幅值改变并不重要，不会影响两个信号的相位关系。

在  $R-X$  平面上画出  $Z_R/K$  和式 (9.8)，继电器动作特性由  $Z$  决定， $S_1$  和  $S_2$  相位差为  $\theta$ ， $-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ$ 。如图 9.4 所示，式 (9.8) 为一个四边形 OABC，对角线为  $S_1$  和  $S_2$ 。如果  $|Z| = |Z_R/K|$ ，那么根据四边形的性质， $S_1$  和  $S_2$  的夹角为  $90^\circ$ 。因此 C 点就是动作区域的界限，对应于不同的  $Z$  值，C 点的轨迹为一个半径是  $Z_R/K$  的圆。

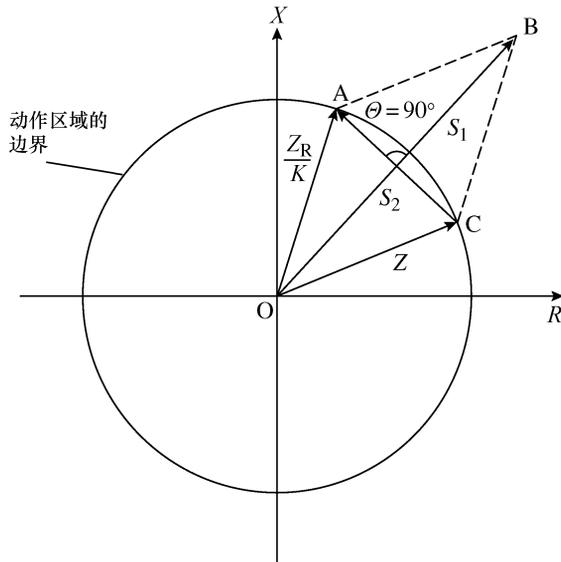


图 9.4 采用相位比较器的阻抗继电器的动作特性

如果,  $Z < Z_R/K$ , 如图 9.5 所示,  $\theta < 90^\circ$ ,  $Z$  在继电器动作区域内。如果,  $Z > Z_R/K$ , 如图 9.6 所示,  $\theta > 90^\circ$ , 那么  $Z$  在继电器动作区域外, 继电器不动作。由于没有方向性, 阻抗继电器在矢量 AB (见图 9.7) 和 AC 范围内发生故障时都会动作。矢量 AB 表示继电器安装点 A 到电源侧线路 AB 另一端的阻抗, 矢量 AC 表示继电器安装点之后远离电源侧的阻抗。

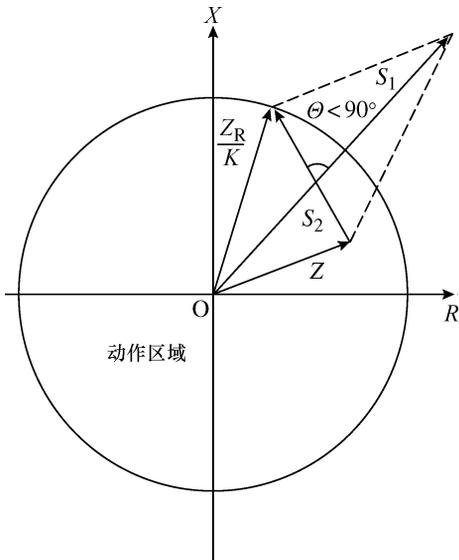


图 9.5 阻抗继电器动作区域内的阻抗 Z

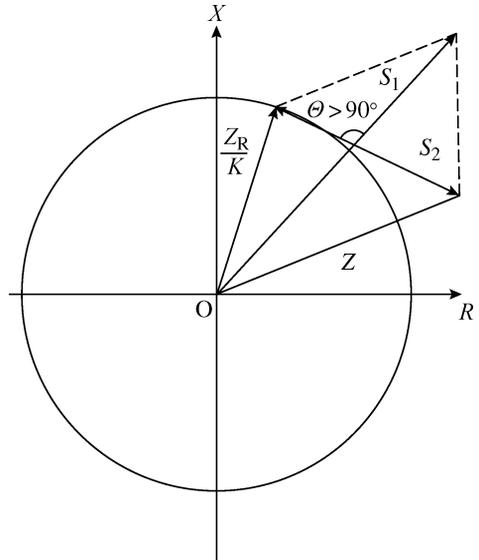


图 9.6 阻抗继电器动作区域外的阻抗 Z

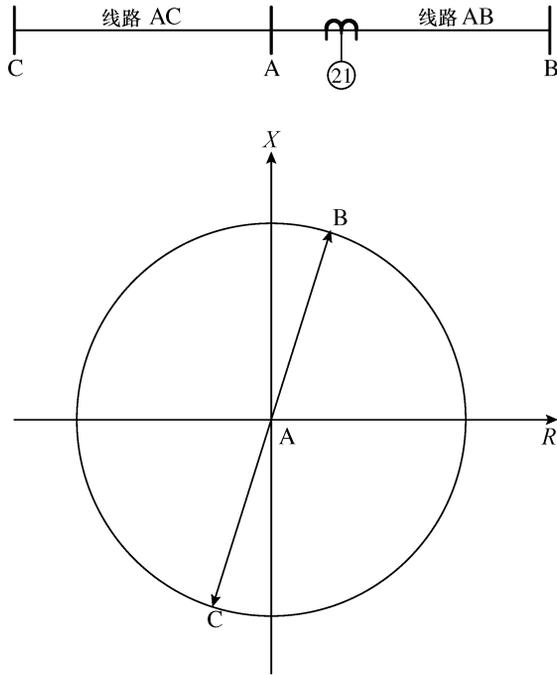


图 9.7 复平面上阻抗继电器特性

阻抗继电器有以下三个缺点：

- 没有方向性。继电器在安装点前后有故障都会动作，因此需要一个方向单元。可以增加一个独立的方向继电器，在发生故障、电流流出被保护区时，限制或阻止距离继电器脱扣。
- 受弧阻影响。
- 由于圆形的动作特性覆盖区域很广，对电力系统波动非常敏感。

### 9.2.2 方向继电器

方向继电器可以在测量阻抗位于  $R-X$  平面上  $1/2$  的区域内时，使断路器脱扣。方向继电器常和阻抗继电器一同使用，以便将动作区域限制在半圆内。

其动作特性通过下述信号的相位比较获得：

$$\begin{aligned} S_1 &= KV \\ S_2 &= Z_R I \end{aligned} \quad (9.9)$$

两边除以  $KI$ ，且  $Z = V/I$ ，得到

$$\begin{aligned} S_1 &= Z \\ S_2 &= Z_R / K \end{aligned} \quad (9.10)$$

方向继电器的动作区域由  $Z$  和  $Z_R$  确定， $S_1$  和  $S_2$  间相角差小于  $90^\circ$ 。图 9.8 给

出了其动作区域，图中标出了  $S_1$  和  $S_2$ 。

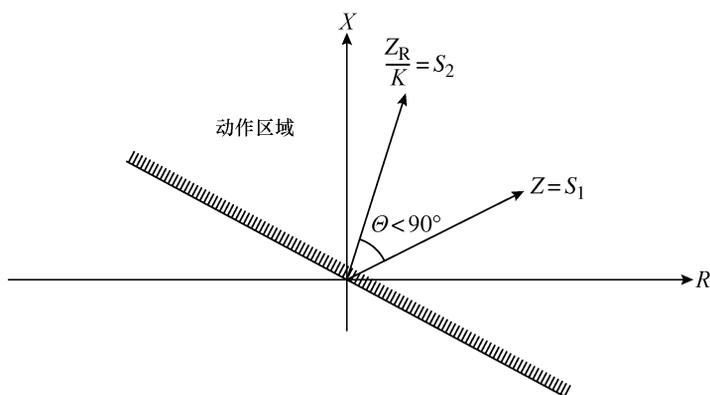


图 9.8 方向继电器的动作区域

### 9.2.3 感抗继电器

感抗继电器用于测量线路阻抗中的电感分量，其整定值由感抗  $X_R$  决定。 $S_1$  和  $S_2$  的计算公式如下：

$$\begin{aligned} S_1 &= -KV + X_R I \\ S_2 &= X_R I \end{aligned} \quad (9.11)$$

两边除以  $KI$ ，得到

$$\begin{aligned} S_1 &= -Z + X_R/K \\ S_2 &= X_R/K \end{aligned} \quad (9.12)$$

在复数平面画出式 (9.12)，可以得到继电器的动作特性，确定  $\theta < 90^\circ$  范围内的  $Z$  值。如图 9.9 所示，动作区域的边界是一条和电阻轴平行的直线，其感抗整定值为  $X_R/K$ 。

故障时的阻抗几乎都是阻性的，所以有些情况可以假设故障电阻对感抗继电器没有影响。在一个辐射状的系统中，多数情况都可以这样假设。但如果故障电流来自两个或多个点时这一假设就不再适用，因为此时故障电阻的电压降低、线路压降增大，从而影响了继电器的电压。除非继电器电流和故障电流完全同步，故障电阻上的电压降将使一个分量偏离继电器电流相位  $90^\circ$ ，产生的效果和线路感抗相似。感抗可能为正、可能为负，继电器测量阻抗可以加上或减去该感抗，从而可以影响继电器的动作。如果故障电阻比线路感抗大，对继电器影响很大，那么就不能采用此种继电器。

图 9.10 所示为存在弧阻和两个输入点时测得的继电器电压。由图中可见，继电器的测量值，小于继电器安装点和故障点间的实际感抗值。

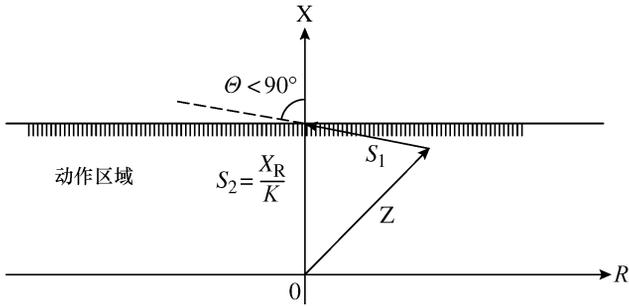


图 9.9 感抗继电器的动作区域

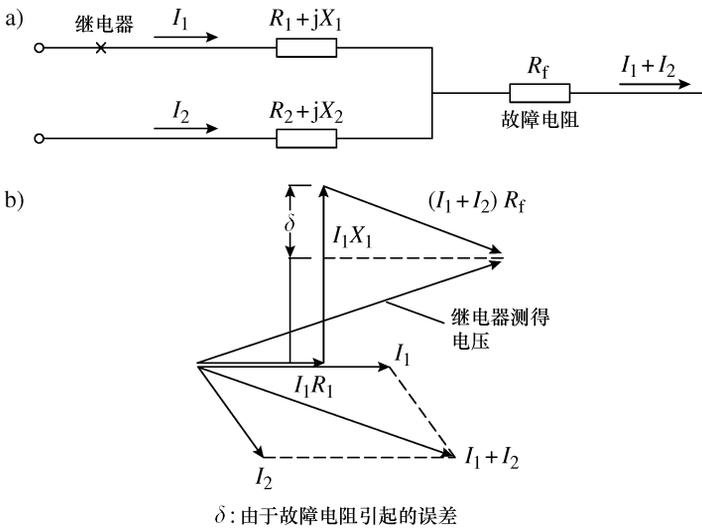


图 9.10 存在弧阻和两个输入点时测得的继电器电压

a) 电路示意图 b) 矢量图

### 9.2.4 姆欧继电器

姆欧继电器组合了阻抗继电器和方向继电器的特点。它具有方向性，继电器仅在继电器安装位置前（电源方向）故障时动作；此外，它还具有一个优点，就是继电器的保护范围随着故障角的不同而变化。在  $R-X$  平面上，这种特性是个圆，圆周通过坐标轴原点，其输入信号为

$$\begin{aligned} S_1 &= -KV + Z_R I \\ S_2 &= KV \end{aligned} \tag{9.13}$$

则

$$\begin{aligned} S_1 &= -Z + Z_R/K \\ S_2 &= Z \end{aligned} \tag{9.14}$$

在  $R-X$  平面画出式 (9.14) 和  $Z_R/K$ , 继电器特性由  $Z$  值决定,  $\theta < 90^\circ$ 。如图 9.11 所示, 其动作区域边界 ( $\theta = 90^\circ$ ) 为一个通过原点的圆, 直径为  $Z_R/K$ 。如图 9.12 所示,  $Z$  值在圆内时,  $\theta < 90^\circ$ , 继电器动作。

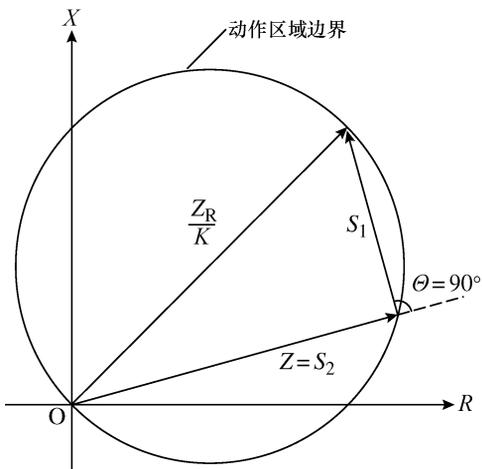


图 9.11 姆欧继电器的动作特性

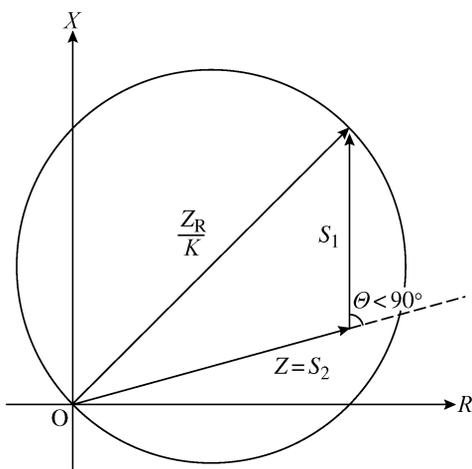


图 9.12 姆欧继电器动作区域内的阻抗  $Z$

### 9.2.5 完全极化的姆欧继电器

自动极化的姆欧继电器的一个缺点是, 当用在长线路中时, 保护范围不能沿着电阻轴有效覆盖所有的区域, 那么在故障电阻或弧阻较高时, 继电器就不能发现故障。而由于整定值偏低, 与弧阻相比, 姆欧继电器保护范围内的  $R$  值很小, 在短线路中上述的缺点就更为明显。

解决这一问题的较为实用的方法是, 采用一个完全极化的姆欧继电器, 对于所有不平衡故障, 其圆形的动作特性沿着  $R$  轴延长, 如图 9.13 所示。这可以通过一个相位比较器来实现, 其输入信号为

$$\begin{aligned} S_1 &= V_{\text{pol}} \\ S_2 &= V - IZ_R \end{aligned} \quad (9.15)$$

式中,  $V$  为继电器安装处故障相或相间电压;  $V_{\text{pol}}$  为由单相或相间取得的极化电压, 不涉及故障情况;  $I$  为故障电流;  $Z_R$  为距离继电器

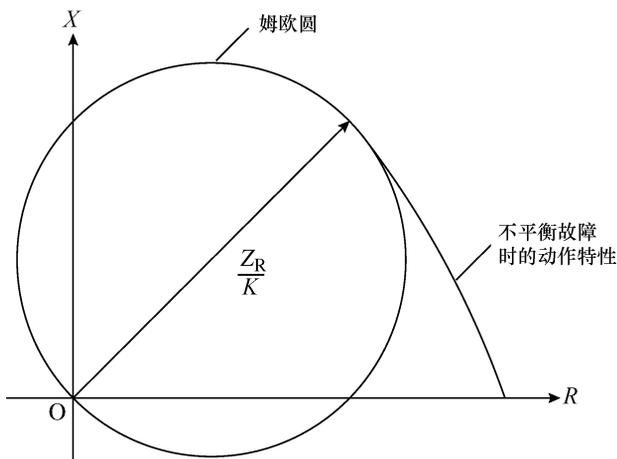


图 9.13 完全极化的姆欧继电器动作特性

器的整定值。

### 9.2.6 透镜特性的继电器

对于大功率传输的高阻抗线路保护来说，具有透镜特性的继电器非常实用。此时线路阻抗为  $V^2/S$ ，和继电器阻抗特性较为接近，尤其是在区域3的范围内。这种偏置透镜特性在一些继电器中很常见，它可以用来补偿图9.14所示的姆欧继电器的圆形动作特性。

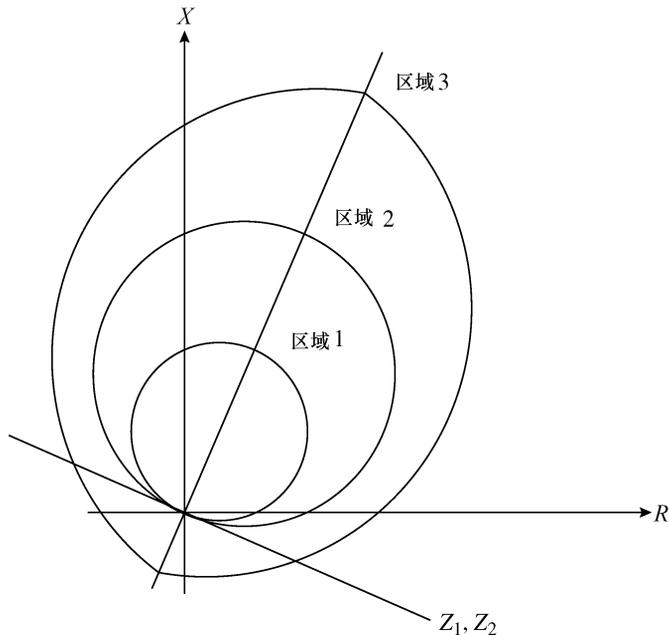


图 9.14 区域3带偏置透镜特性

### 9.2.7 多边形特性的继电器

多边形特性的继电器可以提供更宽的保护范围，以适应故障电阻的变化，尤其是在短线路的情况下，可以将阻性线路的位置整定在跳闸特性中（图9.15所示的线路2，一个典型的多边形动作特性。）。

多边形跳闸特性可以通过三个独立的测量单元实现——感抗、电阻和方向单元。各个单元要组合恰当。继电器仅在所有三个单元全部动作时才启动；这样才能获得要求的多边形特性。

### 9.2.8 混合特性继电器

如图9.16所示，在阻抗平面上，典型的混合动作特性有两条分别平行于电阻和电感轴的直线，两直线交点为  $Z_k$ 。为了获得方向性，还要采用通过  $Z_k$  的姆欧圆。具

有这种混合特性的继电器，电阻和电感整定范围相同，并且可以分别单独调整。

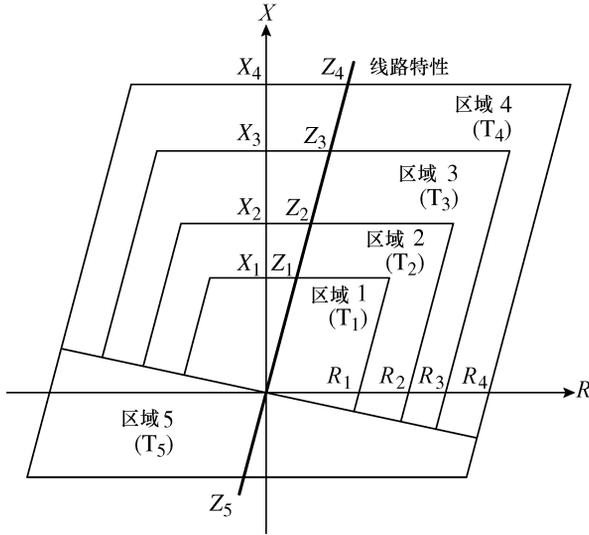


图 9.15 多边形继电器动作特性

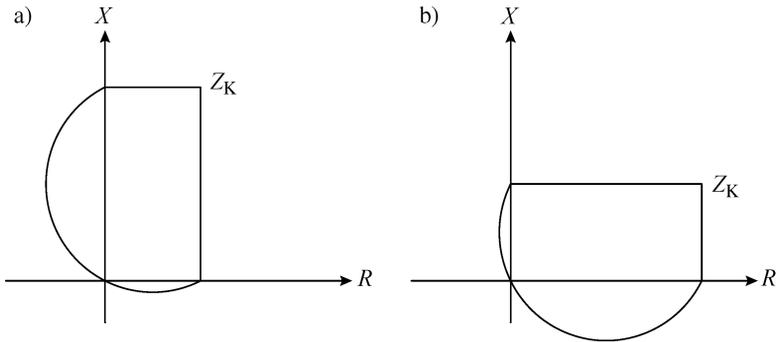


图 9.16 典型的混合特性继电器动作特性

a)  $R/X=0.5$  b)  $R/X=2$

### 9.3 整定距离继电器的保护范围和动作时间

距离继电器的整定是基于继电器安装点和保护线路端点间的线路正序阻抗的。线路阻抗和长度呈正比，由此可以确定故障点相对于继电器安装点的位置。但是，阻抗值是由互感器测得的电压电流信号推出的。为了将一次阻抗转换为二次阻抗值，以便可以进行距离继电器的整定，要采用以下公式：

$$\frac{V_{\text{prim}}}{I_{\text{prim}}} = Z_{\text{prim}} = \frac{V_{\text{sec}} \text{VTR}}{I_{\text{sec}} \text{CTR}} \quad (9.16)$$

$$Z_{\text{sec}} = Z_{\text{prim}} (\text{CTR}/\text{VTR}) \quad (9.17)$$

式中，CTR 和 VTR 分别为电流互感器和电压互感器的变比。

通常，故障方向共设三段保护，这样可以覆盖一段线路并可以为远方线路提供后备保护（见图 9.17）。一些继电器在故障方向有 1 或 2 个附加的保护段，反方向还有一个保护段作为母线保护的后备保护。大多数情况下，三个主保护段的范围整定依据以下原则：

- 1 段，覆盖 80%~85% 的保护线路长度。
- 2 段，覆盖所有被保护线路加下一条最短线路的 50% 长度。
- 3 段，覆盖所有被保护线路加第二长线路的 100% 长度，加下一条最短线路的 25% 长度。

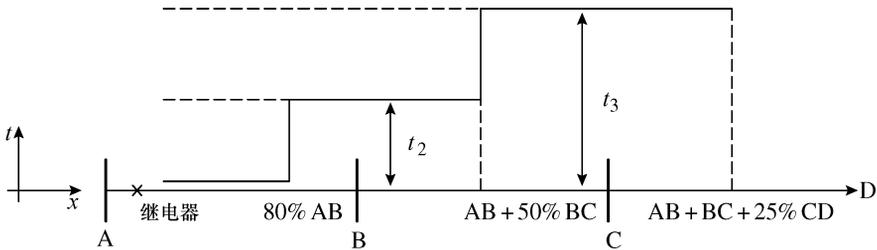


图 9.17 辐射状系统的距离继电器保护范围

除了保护范围整定，每个保护段还有个时间单元。1 段的动作时间为  $t_1$ ，一般由制造厂规定，用于快速跳闸，这是因为 1 段范围内的被保护线路故障应立即消除，不必等待任何其他设备动作。2 段的动作时间通常为 0.25s~0.4s；3 段保护的动作为 0.6s~1.0s。当在附近的变电站中有电力变压器时，2 段的定时单元要有 0.2s 的裕度，这样相关的变压器过电流保护可以先动作。对于 3 段的保护区域，不同地点的继电器保护范围相互重叠，那么 3 段范围内最远继电器的动作时间应至少增加 0.2s，以确保各个保护间的正确配合。然而，3 段单元的动作时间也必须确保系统的稳定性，因此，有时也要考虑缩短 3 段保护的動作时间。

由于 1 段保护为速断保护，那么它的保护范围不能像母线保护那样远，可以直到线路末端（见图 9.17），所以其保护范围一般为被保护线路的 80%~85%。剩余的 20%~15% 为安全系数，以避免互感器测量误差和线路阻抗计算中的误差引起的误动。线路的剩余 20%~15% 范围由 2 段保护覆盖，动作时间为  $t_2$ （单位为 s）。3 段保护提供后备保护，动作时间为  $t_3$ （单位为 s）。由于距离继电器的动作时间是固定的，各段保护间的配合比过电流继电器容易。

为了解释上述继保的工作方式，下面以图 9.18 所示系统为例，考虑其线路 AB 和 BC 的保护。A 点需要 3 个继电器来整定 3 个区域的保护。1 段区域故障时，所有 3 个继电器单元都必须动作。线路 BC 故障，但是为 A 点的 2 段继电器保护范围，2 段和 3 段的继电器都应动作。因为变电站 B 也有距离保护，A 点继电器应允许 B 点断

路器断开以清除故障；所以，2段和3段的继电器单元都有合适的时延，以区别线路AB和BC上的故障。图9.19所示为A点各距离继电器的动作时间示意图。

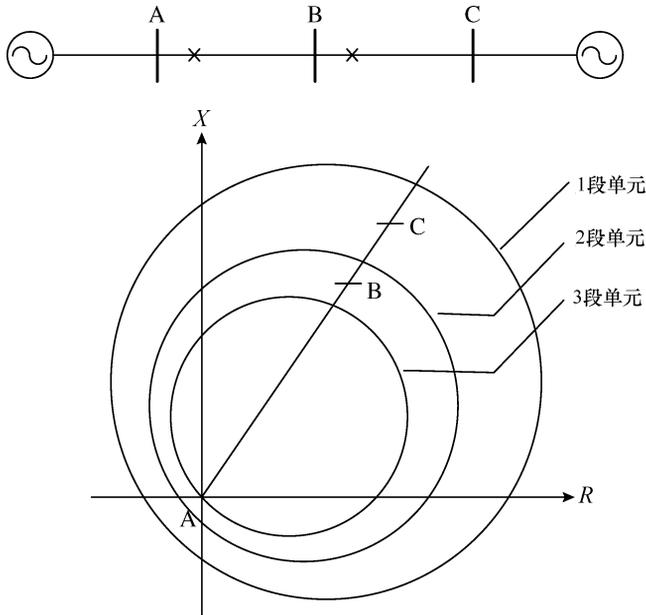


图 9.18 A点的各距离继电器的动作特性

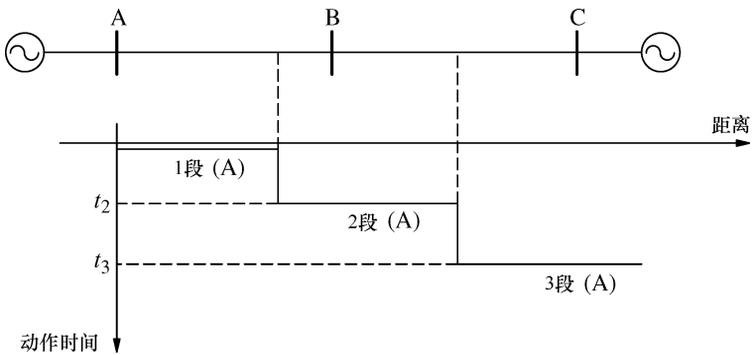


图 9.19 A点各距离继电器的动作时间示意图

有些距离继电器采用与上述不同的整定原则，其差异主要是2段和3段的保护范围。其中一种特殊的整定原则是，建议2段的保护范围为保护线路阻抗的120%，3段的保护范围为被保护线路和其相邻最长线路阻抗和的120%。这种情况下，2段和3段保护的时间不是固定值，但是要基于断路器的开断时间及继电器的保护范围，以保证在同一区域内不会和其他相邻继电器的保护范围重叠。但是，不论哪种整定原则，其基本原理是一致的，所以也不必建议一定要用哪种方法，而应根据系统的特点来进行选择。

现代的距离继电器，尤其是数字的，还提供4段和5段的保护来加强后备功能，如图9.15所示。3段和4段保护仅为正向（远离电源方向），5段为反方向。头三段的整定和前面所讲的一样，但各个电力公司的4段和5段的整定各不相同。有些建议4段保护范围整定为3段的120%，5段范围为1段的20%。4段和5段的时限通常和3段相同，但是增加一个400ms的裕量。此外，还要注意整定值更高的区域，如3段和4段，不要因为升压/降压变压器或者负载阻抗的变化，而使保护区域重叠。

## 9.4 距离继电器馈入电流的影响

在距离继电器的保护范围内有一个或多个电源可以提供故障电流，但距离继电器却不能发现的情况下，就要考虑馈入电流的影响。

对于图9.20所示的情况，母线B以外故障时，A点距离继电器检测到的阻抗大于实际情况。事实上，如果F点为直接接地故障，A点继电器电压为

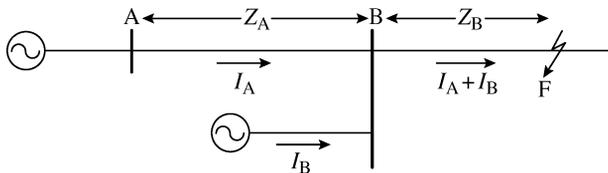


图 9.20 距离保护馈入电流的影响

$$V_A = I_A Z_A + (I_A + I_B) Z_B \quad (9.18)$$

得到

$$\frac{V_A}{I_A} = Z_A + \left(1 + \frac{I_B}{I_A}\right) Z_B \quad (9.19)$$

除了线路阻抗  $Z_A$  以外，继电器还测得  $KZ_B$ ，输入常数  $K$  等于  $I_B/I_A$ ，那么由上式可以看出继电器测得的阻抗大于实际值，意味着其保护范围缩小了。

A点继电器的2段和3段整定要按照以下步骤：

$$Z_{\text{relay}} = Z_A + (1 + K) Z_B \quad (9.20)$$

式中， $K$  为总馈入电流除以继电器电流，即

$$K = I_{\text{total infeed}} / I_{\text{relay}} \quad (9.21)$$

如果引入电流的电源被切断了，距离继电器保护范围会随之扩大，那么这种情况就需要检查是否与邻近的2段保护范围重叠。一个线性系统，其2段和3段保护的区域不是环状系统的一部分，那么其  $K$  值就是一个常数，与故障点位置无关，如图9.21a所示。图9.21b给出了变电站C处的距离继电器测到的阻抗。点B和D之间故障，B或D变电站故障，或者连接BD变电站线路上任何一点故障，它们的  $K$  值都是相同的。如果故障点从B移向D，电流值减小，但是继电器得到的电流中

馈入电流的比率是相同的。

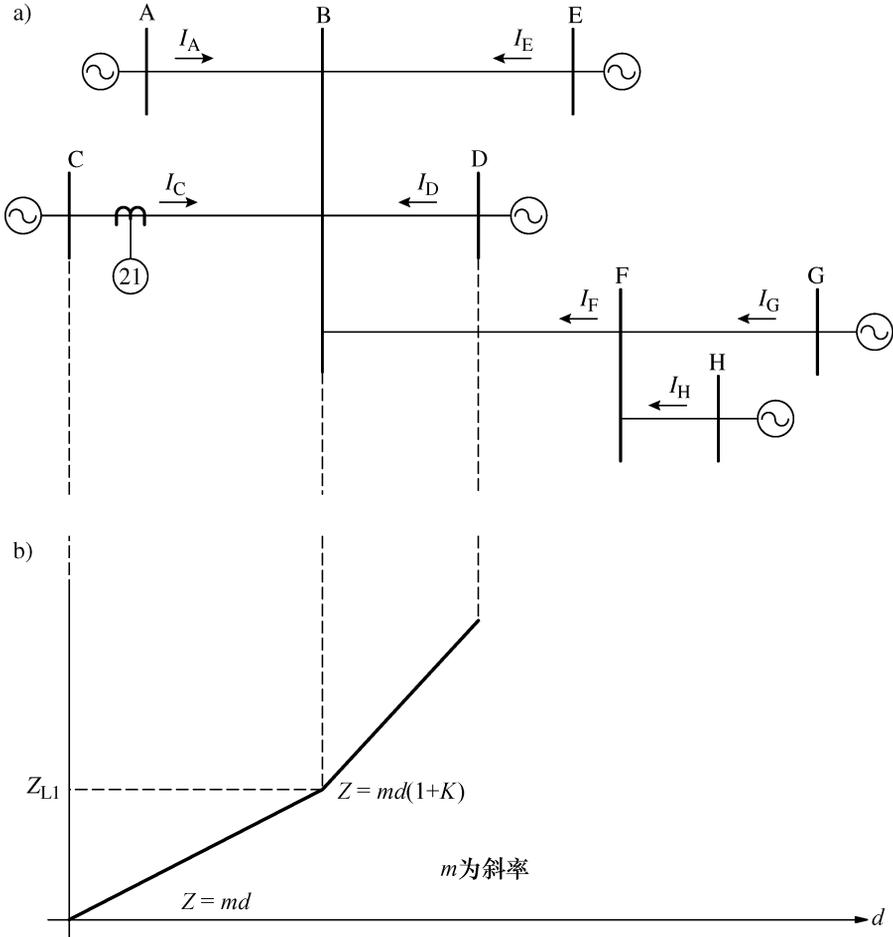


图 9.21  $K$  值为定值的距离保护

a) 分析馈入电流影响的典型系统 ( $K$  为常数) b) 变电站 C 处的距离继电器测到的阻抗

馈入电流常数值取决于保护的区域，那么就需要计算各个保护区段的馈入电流常数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 。 $K_1$  用于计算 2 段的馈入电流， $K_2$  和  $K_3$  用来计算 3 段， $K_2$  考虑临近线路的馈入电流， $K_3$  考虑远方线路的馈入电流。基于本章 9.3 节所述的原则，母线 C 处的继电器 3 个区域的保护范围计算如下：

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= 0.8 - 0.85Z_{AB} \\
 Z_2 &= Z_{CB} + 0.5(1 + K_1)Z_{BD} \\
 Z_3 &= Z_{CB} + (1 + K_2)Z_{BF} + 0.25(1 + K_3)Z_{FH}
 \end{aligned}$$

式中

$$K_1 = \frac{I_A + I_E + I_F}{I_C}$$

$$K_2 = \frac{I_A + I_D + I_E}{I_C}$$

$$K_3 = \frac{I_A + I_D + I_E + I_G}{I_C}$$

由于覆盖远方线路并不非常重要，一般来说可以假设  $K_3 = K_2$ ，这样就缩小了3段保护的覆盖范围。由于缩小的范围通常可以忽略，所以假设  $K_3 = K_2$  带来的差异是可以接受的。

如图 9.21b 所示，在绘制阻抗和距离的关系图时，线路 CB 的斜率是不变的。但是，由于  $K$  的引入，尽管 BD 段斜率与 CB 段不同，但是 BD 段斜率仍然不变。那么在 BD 段故障时，C 点继电器得到的阻抗就与故障点位置呈正比，BC 段故障时也是如此。当 2 段和 3 段保护覆盖了一个双回路或环形系统的线路时， $K$  值就取决于故障点或相应的母线，如图 9.22 所示。在上述情况下，线路 BC 故障时继电

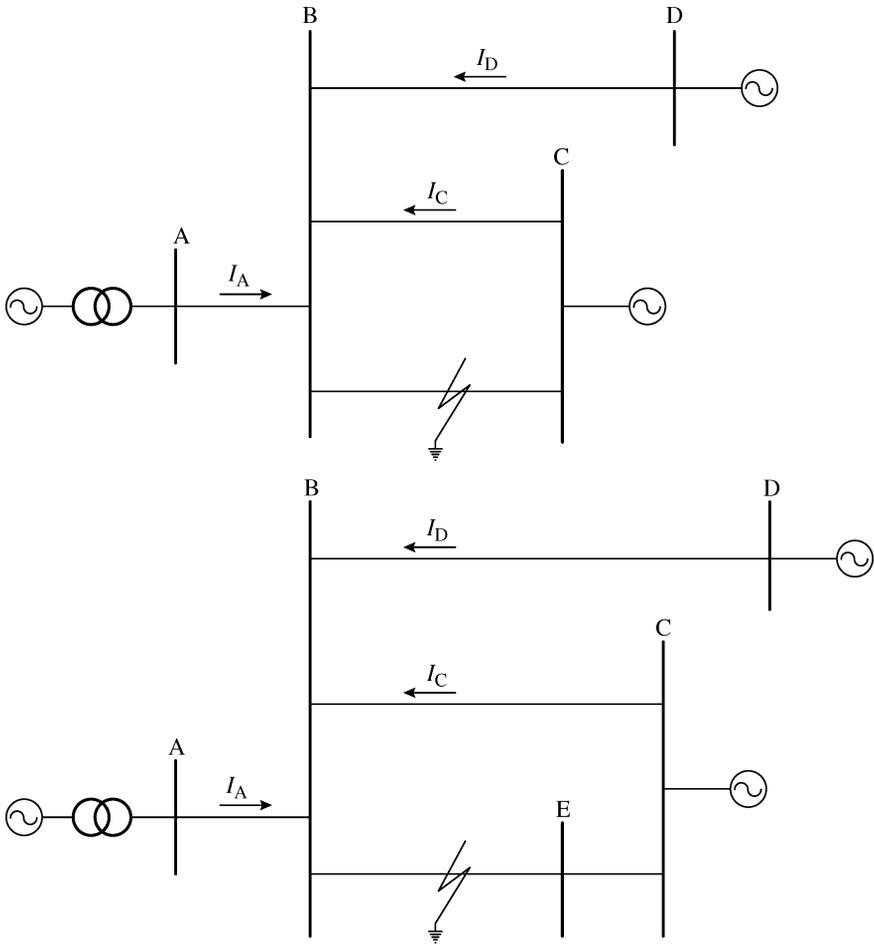


图 9.22  $K$  为变量的距离保护

器得到的阻抗是一个斜率变化的曲线。

如果将馈入电流曲线拆分，图 9.22 所示的 BC 段故障时继电器得到的阻抗可以写为

$$Z_{\text{relay}} = Z_{\text{line}} + \left(1 + \frac{I_D + I_C}{I_A}\right) Z_{\text{B到故障点}} \quad (9.22)$$

这种情况下，线路 BC 故障时  $I_D/I_A$  的值是固定的，不会随着故障点的不同而改变。但是， $I_C/I_A$  是变化的，当电流  $I_C$  改变方向、变电站 C 附近故障时， $I_C/I_A$  还有可能为负值。那么从母线 B 开始，当故障点向 C 点移动时， $Z$  值会随之增大到最大值，之后  $Z$  值减小。由固定  $K$  值计算  $Z$  值，利用馈入电流公式，由母线 B 起始的特定一段线路可以得到保护，由于阻抗减小母线 C 前的一段线路为另一段保护区域。

如果采用母线 C 故障时的电流值来整定，那么 2 段保护范围可能达不到 50%。如果考虑母线 B 故障时的电流，那么保护范围将超过 50%，甚至达到 80%，那么就会与 B 点继电器的 2 段保护范围重叠，如图 9.23 所示。因此，上述情况下，就建议采用临近母线故障时的短路电流值（本例中用母线 B），但是去除并联回路馈入的电流  $I_C$ 。

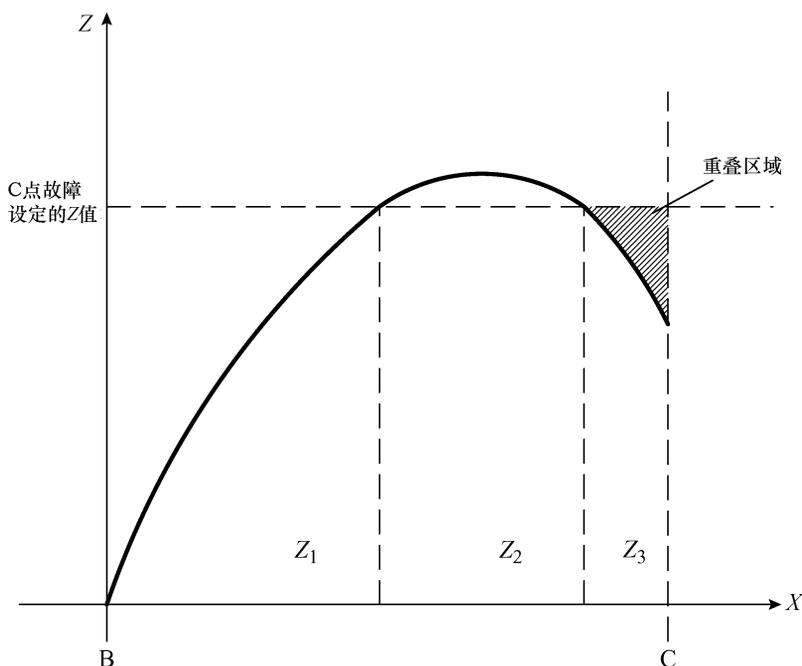


图 9.23 环状系统的重叠 ( $Z_1$  为 2 段的保护区域，应大于 BC 的 50%； $Z_2$  为不被保护的区域； $Z_3$  为点 A 和 B 的继电器的 2 段保护重叠的区域)



阻覆盖范围可以沿水平轴扩大。

## 9.6 剩余补偿

接地故障单元的输入为相电压及相电流和剩余电流的组合值, 这些输入量取决于线路正序和零序阻抗。如果发生单相接地故障, 如 A—E, 各序网络串联, 继电器电压为

$$V_A = V_{A_1} + V_{A_2} + V_{A_0} = I_{A_1} (Z_{L_1} + Z_{L_2} + Z_{L_0}) \quad (9.24)$$

可假设线路正序和负序阻抗相等, 式 (9.24) 可以写为

$$V_A = V_{A_1} + V_{A_2} + V_{A_0} = I_{A_1} (2Z_{L_1} + Z_{L_0}) \quad (9.25)$$

由于单相接地故障,  $I_{A_1} = I_{A_2} = I_{A_0}$ , 所以  $I_A = 3I_{A_1}$ 。  $V_A/I_A$  的值为  $(2Z_{L_1} + Z_{L_0})/3$ , 而不等于正序阻抗  $Z_{L_1}$ 。

因此, 要正确测量到故障点的阻抗, 就要采用剩余补偿因子  $K_0$ 。这个因子可以确定注入电流的值, 并使根据线路正序阻抗整定的继电器可以正确动作。

因此, 继电器引入线电流和剩余电流, 可得

$$I_A + 3KI_{A_0} = I_A (1 + K_0) \quad (9.26)$$

$$\frac{V_A}{I_A (1 + K_0)} = Z_{L_1} \quad (9.27)$$

代入  $V_A/I_A$  的值, 有

$$\frac{2Z_{L_1} + Z_{L_0}}{3} = Z_{L_1} (1 + K_0) \quad (9.28)$$

$$K_0 = \frac{Z_{L_0} - Z_{L_1}}{3Z_{L_1}} \quad (9.29)$$

## 9.7 距离继电器测得的阻抗

距离继电器主要是保护系统中的 4 种故障: 三相故障, 相间故障, 相间接地故障, 单相故障。为了发现以上故障, 距离继电器的每个保护段都有 6 个单元: 3 个是发现相间故障 (A—B, B—C, C—A), 3 个是发现相对地故障 (A—E, B—E, C—E)。一个完整的保护设计要求在每个区域都有这 6 个单元, 但有时一个或多个区域会共用一组 6 个单元。距离继电器的整定通常根据正序阻抗来计算。实际上在所有故障情况下, 都能准确选择正确的电压和电流是不可能的, 所以每个单元的输入都是互相独立的, 以便获得满足要求的继电器动作特性。

### 9.7.1 相单元

相单元为三角形联结, 接收的是线-线电压和线电流之差。测得的阻抗是电压

和电流的比值，即

$$\begin{aligned} Z_{AB} &= \frac{V_{AB}}{I_A - I_B} \\ Z_{BC} &= \frac{V_{BC}}{I_B - I_C} \\ Z_{CA} &= \frac{V_{CA}}{I_C - I_A} \end{aligned} \quad (9.30)$$

### 9.7.2 接地故障单元

如本章 9.5 节所述，接地故障单元接收相电压、相电流和剩余电流的组合值。由之前的计算可知，距离继电器的接地故障单元测得的三相阻抗为

$$\begin{aligned} Z_A &= \frac{V_A}{I_A \left( 1 + \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \right)} = \frac{V_A}{I_A + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0} \\ Z_B &= \frac{V_B}{I_B \left( 1 + \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \right)} = \frac{V_B}{I_B + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0} \\ Z_C &= \frac{V_C}{I_C \left( 1 + \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \right)} = \frac{V_C}{I_C + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0} \end{aligned} \quad (9.31)$$

## 9.8 电力系统振荡

系统消除短路后，或者开断大负载时，系统都可能发生振荡。此时，继电器输入的电压和电流随时间变化，因此继电器测得的阻抗也随着时间变化而变化，并可能引起保护误动。

要描述振荡时距离继电器的情况，可参考图 9.26 所示的等效电路图。假设转移功率从电源

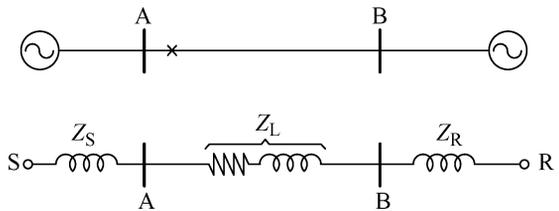


图 9.26 用于分析电力系统振荡的等效电路

点 S 处至最远端的负载点 R。电流  $I_S$  从电源 S 流向 R，在系统中引起电压降，如图 9.27 所示的矢量图所示。 $E_S$  和  $E_R$  间的相位差  $\theta_s$ ，随着负载转移而增加。

A 点的距离继电器测得的阻抗为  $Z = V_A / I_S$ ；该阻抗的公式可以通过  $V_A$  计算：

$$\begin{aligned} V_A &= I_S Z_L + I_S Z_R + E_R \\ \frac{V_A}{I_S} &= Z_L + Z_R + E_R / I_S \end{aligned} \quad (9.32)$$

最后一个公式可以由图 9.27 所示的矢量除以振荡电流  $I_s$  推导出来。这样可以得到系统阻抗的示意图，如图 9.28 所示，除了  $I_s$  和  $\theta_s$  外，所有的参数都可以假定为常数。这样  $V_A/I_s$  就可以减小，如果负载增量足够大的话，继电器测得的阻抗 ( $V_A/I_s$ ) 就可以移至继电器的动作区域内，如图 9.29 所示。

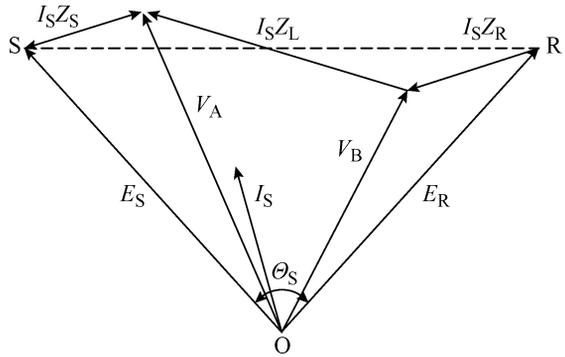


图 9.27 电力系统振荡情况的矢量图

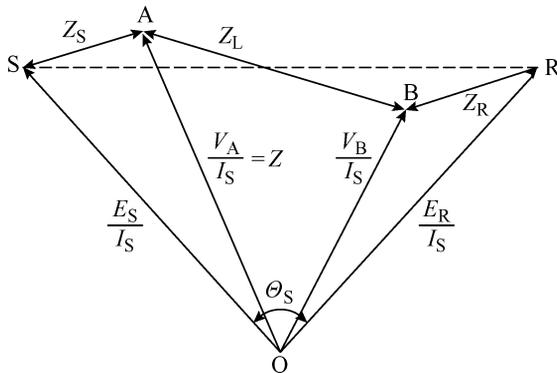


图 9.28 图 9.26 所示的系统阻抗图

在继电器 A 的轨迹上建立  $R-X$  平面，画出继电器动作特性和系统阻抗示意图，如图 9.29 所示。A 点的继电器将测量 B 点直接接地故障时的阻抗  $Z_L$ ，并持续测量 AO 间阻抗。如果发生严重振荡，负载相位  $\theta_s$  增大，继电器测得的阻抗将减小至 AQ' 的阻抗，但仍在继电器动作特性范围内。 $E_s = E_R$  时，振荡过程中继电器测得的阻抗轨迹是一条直线，如图 9.29 所示。如果  $E_s > E_R$ ，阻抗轨迹是一组圆心在 SR 轴的圆。图 9.30 所示为电力振荡时，在  $R-X$  平面绘出的阻抗典型轨迹。穿过继电器动作特性内部的轨迹，意味着系统振荡时相关的继电器可能跳闸。

为了防止振荡时继电器误动，采用了闭锁特性（见图 9.30）。阻抗轨迹穿过测量单元和闭锁单元的特性范围。如果在闭锁单元动作后，测量单元在给定时间内动作，断路器可以断开。另一方面，在预定的延迟时间内，如果测量单元没有动作，那么断路器就不会断开。在故障情况下，闭锁单元和测量单元几乎同时动作时，断路器就会断开。但是，在电力系统振荡情况下，如果测量单元在闭锁单元动作后的一段时间内动作，则断路器不能断开。

为防止继电器在振荡时误动，还增加了振荡闭锁单元。姆欧继电器的保护范围

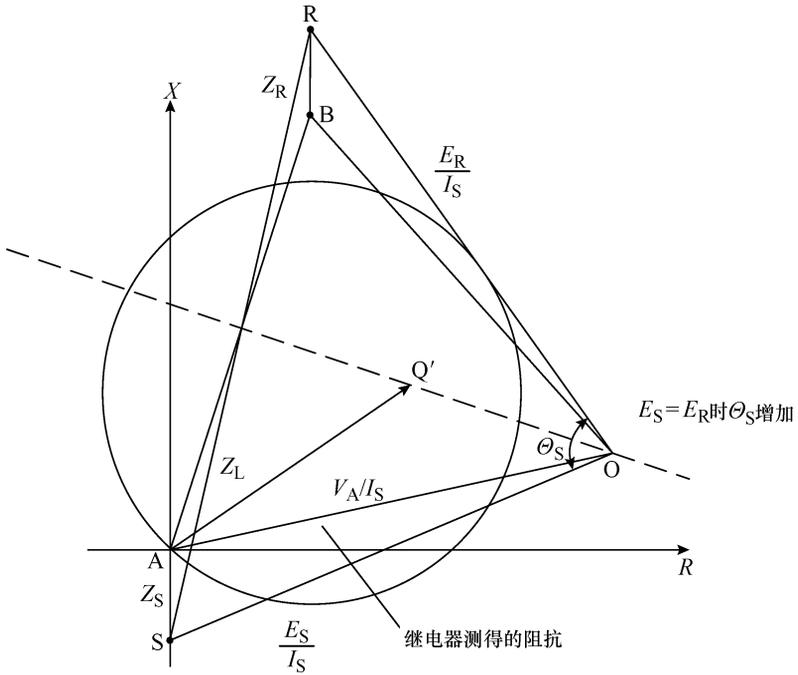


图 9.29 电力系统振荡时继电器测得的阻抗

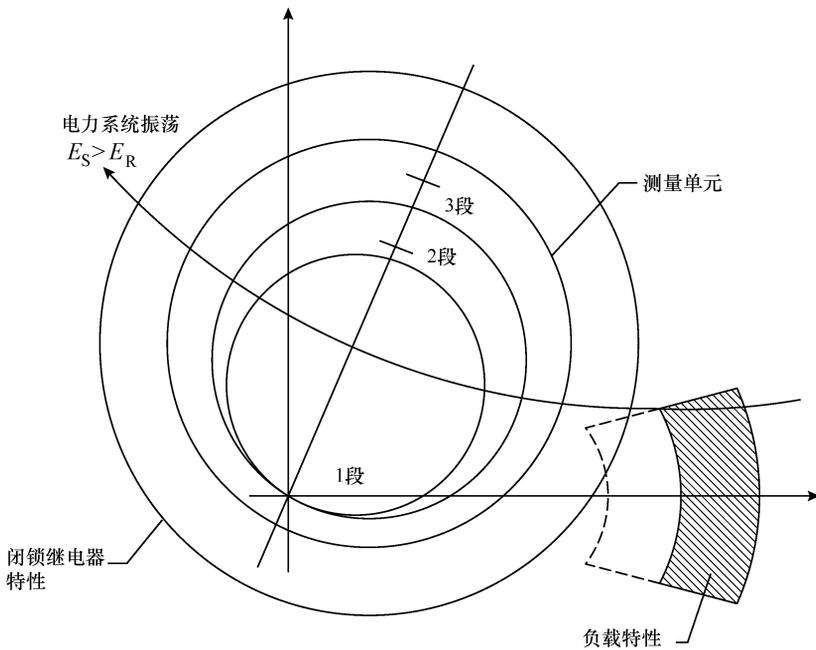


图 9.30 电力系统振荡时阻止继电器动作的闭锁特性

直径一般为继电器最外层保护区（3段区域）直径的1.3倍或更高。在故障情况下，距离继电器测得的阻抗位移比振荡时速度快。这一特点可以用来整定振荡闭锁单元，如果0.1s或更短时间内该单元不动作，阻抗轨迹就可以从振荡闭锁特性区移动至3段保护区或最外层的保护范围。制造商们通常会提供整定振荡闭锁单元的建议，此时就要根据实际使用的继电器类型进行整定，制造商建议的整定值仅作为通用指导准则。

## 9.9 距离继电器的有效保护范围

在有电源输入的互联系统中，距离继电器的有效保护范围不一定按阻抗值整定。而是有可能利用之前定义的馈入常数，计算两者的比值。2段和3段的距离继电器整定值由以下公式确定：

$$Z_2 = Z_{L_1} + (1 + K_1)X_2Z_{L_2} \quad (9.33)$$

$$Z_3 = Z_{L_1} + (1 + K_2)X_2Z_{L_2} + (1 + K_3)X_3Z_{L_3} \quad (9.34)$$

式中， $X_2$ 和 $X_3$ 为本章9.3节中定义的有效范围，分别为50%和25%。但是，有些情况下，由于继电器保护范围的局限性，不可能按 $Z_2$ 和 $Z_3$ 的计算值来整定，而是要根据临近线路的继电器有效保护范围来进行考虑。

通过前面的公式，2段保护在临近线路上的保护范围计算公式如下（见图9.31）：

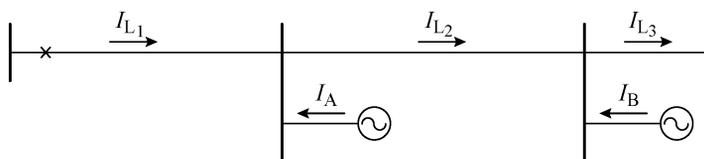


图9.31 多个电源输入的电力系统

$$X_2 = \frac{Z_2 - Z_{L_1}}{Z_{L_2}(1 + K_1)} \quad (9.35)$$

式中， $Z_2$ 为2段的整定阻抗值（ $\Omega$ ）； $X_2Z_{L_2}$ 为在临近线路上的有效保护范围（ $\Omega$ ）； $Z_{L_1}$ 为和继电器相关的线路阻抗； $K_1$ 为临近线路的馈入常数。

由以上公式可知，继电器对远端线路的有效覆盖范围计算如下：

$$X_3 = \frac{Z_3 - Z_{L_1} - (1 + K_2)Z_{L_2}}{Z_{L_3}(1 + K_3)} \quad (9.36)$$

式中， $Z_3$ 为3段的整定阻抗值（ $\Omega$ ）； $X_3Z_{L_3}$ 为在远端线路上的有效保护范围（ $\Omega$ ）； $Z_{L_1}$ 为和继电器相关的线路阻抗； $K_2$ 为最长的临近线路的馈入常数； $Z_{L_2}$ 为最长临近线路的阻抗； $K_3$ 为远端线路的馈入常数。

采用这些公式和适合的馈入常数，就有可能计算出继电器在被保护线路临近的

线路上的有效保护范围。

## 9.10 最大负载检查

最大负载检查是为了确保最大负载阻抗不在各段的动作范围内。为了满足这个条件，在单回路系统中，3段保护的動作特性与最大负载点之间的距离至少应为原点到最大负载点距离的25%；在双回路系统中至少为50%。

### 9.10.1 姆欧继电器

3段保护的姆欧继电器動作特性与整定值有10%的偏差，如图9.32所示。最大负载点定义为

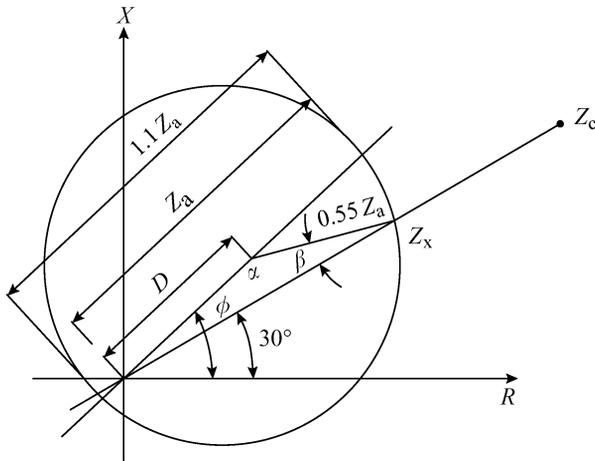


图 9.32 姆欧继电器最大负载检查

$$Z_c = \frac{V^2}{S_{\max}} \angle 30^\circ \quad (9.37)$$

图中， $Z_a$  和  $\phi$  分别为整定值和继电器的特性角。由图 9.32 所示可得

$$D = Z_a - \frac{1.1Z_a}{2} = 0.45Z_a \quad (9.38)$$

用正弦定理，有

$$\frac{\sin\beta}{\sin(\phi - 30^\circ)} = \frac{0.45Z_a}{0.55Z_a} \quad (9.39)$$

$$\sin\beta = 0.818\sin(\phi - 30^\circ) \quad (9.40)$$

由前面的公式，可以得到  $\alpha$  值。由图 9.32 所示还可得

$$\alpha = 180^\circ - \beta - (\phi - 30^\circ) \quad (9.41)$$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin(\phi - 30^\circ)} = \frac{Z_x}{0.55Z_a}$$

因此

$$Z_x = \frac{0.55Z_a \sin\alpha}{\sin(\phi - 30^\circ)}$$

所有情况下，都可以利用上面最后一个公式，计算负载方向的继电器保护范围。负载检查包括验证以下情况：

$$\frac{Z_c - Z_x}{Z_c} \times 100\% \geq P \tag{9.42}$$

式中，双回路线路中  $P=0.5$ ，单回路线路  $P=0.25$ 。

### 9.10.2 多边形特性的继电器

3 段保护范围由电阻  $R_3$  和电感  $X_3$  整定值决定。对于图 9.33 所示的情况为

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1}\left(\frac{X_3}{R_3}\right), r = \sqrt{R_3^2 + X_3^2} \\ (\phi - 30^\circ) + 120^\circ + \beta &= 180^\circ \\ \beta &= 90^\circ - \phi \end{aligned} \tag{9.43}$$

采用正弦定理，有

$$\begin{aligned} \frac{\sin\beta}{\sin 120^\circ} &= \frac{Z_x}{r} \\ Z_x &= r \frac{\sin\beta}{\sin 120^\circ} \end{aligned} \tag{9.44}$$

以上公式可以确定多边形特性的继电器，在负载方向的保护范围。距离  $Z_x$  应满足前面不等式的条件。

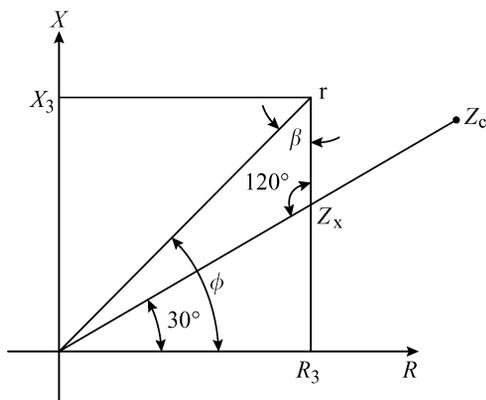


图 9.33 多边形特性的继电器最大负载检查

### 9.11 画出继电器整定值

距离继电器的整定可以用时间和阻抗关系的图形来表示。阻抗（范围）取决于整定值，整定值按前面几章中的方法来定义。还应注意的是，用公式计算的整定值有两个限制条件：

- 特殊继电器的限制，计算值非常高，并且不可能对继电器进行整定。
  - 对于负载的限制，3 段保护范围的值过于接近最大负载点。
- 当遇到第一种限制条件的情况时，保护范围调整至继电器的最大范围。

#### 例 9.1

下面这个例子说明了距离继电器的整定步骤。如果正确运用了整定原则，确定整定值是很明确的过程，但是根据继电器厂商和继电器种类的不同，实际情况总有

差异。

本例中,考虑安装在变电站 Pance 的距离继电器,变电站 Pance 在通往变电站 Juanchito 的回路中。图 9.34 给出了该继电器测到的阻抗。每根母线对应的数字用于短路计算中,如图 9.35 所示。CT 和 VT 的变比分别为 600/5 和 1000/1。

根据 1 段整定原则,有

$Z_1 = 0.85Z_{10-11} = [0.85 \times (7.21 \angle 80.5^\circ)] \Omega = 6.13 \angle 80.5^\circ \Omega$  一次电阻  
对于 2 段,有

$$Z_2 = Z_{10-11} + 0.5(1 + K_1)Z_{11-9}$$

对于母线 11 处的故障,馈入常数为

$$K_1 = \frac{I_{14-11} + I_{17-11} + I_{5-11} + I_{18-11}}{I_{10-11}}$$

根据图 9.35 所示的短路值,可得

$$K_1 = \frac{1333.8 \angle -85.54^\circ + 0 + 5364.6 \angle -85.88^\circ + 449.9 \angle -86.34^\circ}{2112.6 \angle -85.55^\circ}$$

需要注意的是,电流为接收母线侧的值。

$$K_1 = \frac{7148.27 \angle -85.87^\circ}{2112.6 \angle -85.5^\circ} = 3.38 \angle -0.37^\circ$$

那么

$$1 + K_1 = 4.38$$

因此,2 段整定值为

$Z_2 = [7.21 \angle 80.50^\circ + (4.38 \times 0.356 \angle 82.90^\circ)] \Omega = 8.77 \angle 80.93^\circ \Omega$  一次电阻  
3 段整定值为

$$Z_3 = Z_{10-11} + (1 + K_2)Z_{11-17} + 0.25(1 + K_3)Z_{\text{transformer}}$$

本例中,由于保护范围缩小不明显,馈入常数  $K_3$  和  $K_2$  取相等值。当确定 3 段整定值时常采用此种方法。

对于母线 11 处的故障,馈入常数定义为

$$K_2 = \frac{I_{9-11} + I_{14-11} + I_{5-11} + I_{18-11}}{I_{10-11}}$$

$$K_2 = \frac{2232.8 \angle -90.08^\circ + 1333.8 \angle -85.54^\circ + 5364.6 \angle -85.88^\circ + 449.9 \angle -86.34^\circ}{2112.6 \angle -85.55^\circ}$$

$$K_2 = \frac{9376.72 \angle -86.86^\circ}{2112.6 \angle -85.5^\circ} = 4.44 \angle -1.36^\circ$$

$$1 + K_2 = 5.44 \angle -1.10^\circ$$

因此,3 段整定值为

$$Z_3 = [7.21 \angle 80.50^\circ + (5.44 \angle -1.10^\circ \times 8.07 \angle 68.71^\circ) + (1 + 4.44 \angle -1.36^\circ)11.95 \angle 90^\circ] \Omega = 114.35 \angle 80.20^\circ \Omega$$
 一次电阻

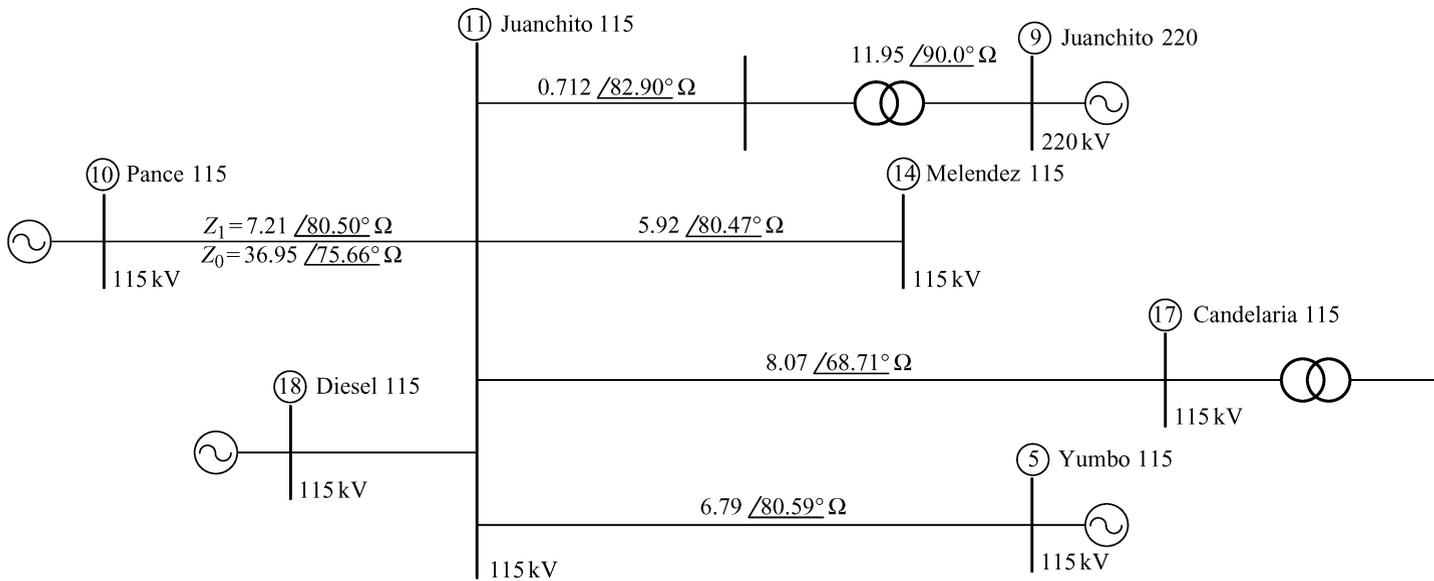


图 9.34 例 9.1 的阻抗图，变电站 Pance 中安装在 Juanchito 回路的继电器测到的阻抗

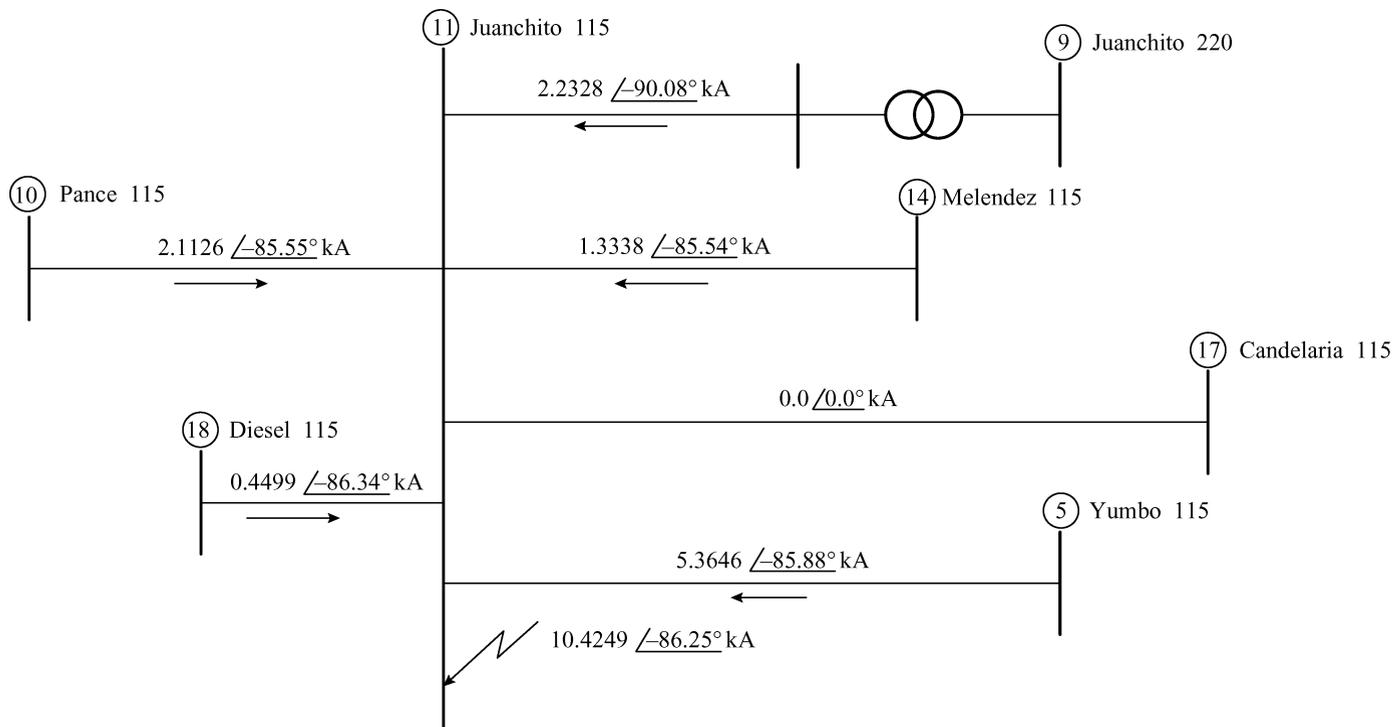


图 9.35 例 9.1 的故障电流

继电器整定值换算为一次的阻抗，可以汇总如下：

$$Z_1 = 6.13 \angle 80.5^\circ$$

$$Z_2 = 8.77 \angle 80.93^\circ$$

$$Z_3 = 114.35 \angle 80.20^\circ$$

二次阻抗可用以下公式计算：

$$Z_{\text{sec}} = Z_{\text{prim}} \frac{\text{CTR}}{\text{VTR}}$$

本例中， $\text{CTR} = \text{VTR} = 120/1000 = 0.12$ ，因此  $Z_1 = 0.736\Omega$ 、 $Z_2 = 1.052\Omega$ 、 $Z_3 = 13.72\Omega$ 。

启动单元整定

启动单元整定为最大负载阻抗的 50%。假设从变电站 Pance 到 Juanchito 的功率为  $S = (30.4 + j13.2) \text{MV} \cdot \text{A} = 33.14 \text{MV} \cdot \text{A}$ ，那么有

$$Z_c = \frac{V^2}{P} = \left( \frac{115^2}{33.14} \right) \Omega = 399.03\Omega \text{ 一次电阻}$$

二次电阻为 47.88Ω

剩余补偿常数整定

$$K_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$$

式中， $K_0$  为剩余补偿常数； $Z_1$  为线路正序阻抗； $Z_0$  为线路零序阻抗。

$$K_0 = \frac{36.95 \angle 75.66^\circ - 7.21 \angle 80.50^\circ}{3(7.21 \angle 80.50^\circ)} = 1.377 \angle -6^\circ$$

所以  $K_0 = 1.4$ 。

时间整定

2 段保护的时延为 0.4s

3 段保护的时延为 1.0s

负载检查

决定继电器最远保护距离的整定值，必须确保不与负载范围重叠。

继电器在负载方向的保护范围如下：

$$\sin\beta = 0.818 \sin(\phi - 30^\circ)$$

其中继电器整定  $\phi = 75^\circ$ 。

$$\sin\beta = 0.818 \sin 45^\circ$$

有

$$\beta = 35.34^\circ$$

$$\alpha = 180^\circ - \beta - (\phi - 30^\circ)$$

假设， $\alpha = 99.66^\circ$  那么保护范围将为

$$Z_x = \frac{0.55 Z_3 \sin 99.66^\circ}{\sin 45^\circ} = \left( \frac{0.55 \times 114.35 \times \sin 99.66^\circ}{\sin 45^\circ} \right) \Omega$$

$$Z_x = 87.68\Omega \text{ 一次}$$

到负载点的距离，可用百分比表示为

$$\frac{399.03 - 87.68}{399.03} \times 100\% = 78.03\%$$

因此，整定值是合适的，不需要根据负载调节保护范围。

#### 确定有效保护范围

根据计算的整定值，在 2 段区域继电器可以覆盖线路 11-9 的 50% 范围。但是，还要确定这一整定在 Juanchito 到 Yumbo 115kV (11-5) 线路上的覆盖范围。因此，要采用以下公式：

$$X_2 = \frac{Z_2 - Z_{L_1}}{Z_{L_2}(1 + K_1)}$$

母线 11 处故障时，变电站 Juanchito (11) 馈入常数  $K_1$  为

$$K_1 = \frac{I_{9-11} + I_{14-11} + I_{17-11} + I_{18-11}}{I_{10-11}}$$

已知馈入常数角度接近于 0，那么其幅值为

$$K_1 = \frac{2232.8 + 1333.8 + 0 + 449.9}{2112.6} = 1.90$$

因此，沿着 Juanchito 到 Yumbo 线的有效保护范围为

$$X_2 = \frac{8.77 - 7.21}{6.79(1 + 1.90)} = 0.079 = 7.9\%$$

如同预期的一样，由于最短线路为 Juanchito115 到 Juanchito220 的回路，2 段的保护范围小于 Juanchito 到 Yumbo 线路的 50%。距离继电器保护范围如图 9.36 所示。

#### 例 9.2

对于图 9.37 所示的电力系统，计算 San Antonio 的继电器 2 段整定，馈入常数基于变电站 Chipichape 故障时的计算结果，整定原则如前面所述。

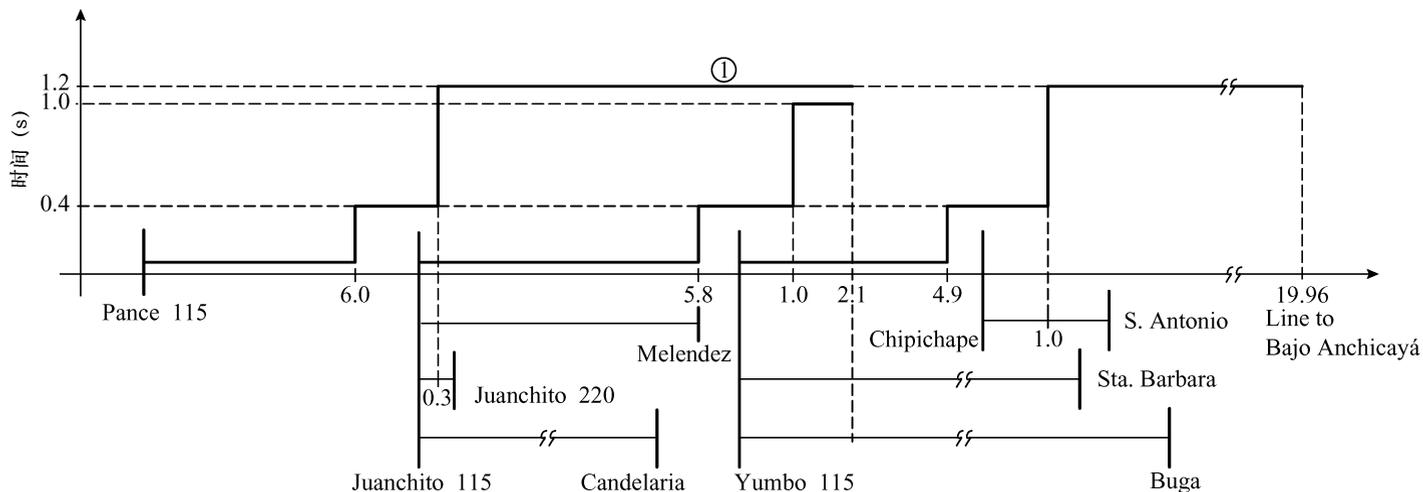
在线路 Chipichape—Yumbo 和母线 Yumbo 处发生故障时，确定继电器实际测得的阻抗，确定继电器 2 段保护是否会动作。

在计算 2 段保护范围时，如果忽略了线路 Yumbo—Chipichape 的作用，就要检查被保护线路的覆盖范围。采用一次侧的阻抗进行计算。

#### 答案

继电器 2 段保护范围延伸至线路 Chipichape—Yumbo，Chipichape—Yumbo 为安装于 San Antonio 的继电器可测得的最短临近线路。

在计算过程中，最初的故障点取在 Chipichape 处，然后沿着 Chipichape—Yumbo 回路按 10% 的步进移动。在计算机的辅助下，可以确定每一点的  $K$  值，母线名为“TEST 故障点”。这样，每种情况的  $K$  值可用下列公式计算：



$Z_L$ (Pance—Juanchito)	$= 7.21 \angle 80.50^\circ \Omega$	$Z_L$ (Chipichape—S. Antonio)	$= 2.08 \angle 67.18^\circ \Omega$
$Z_L$ (Juanchito—Yumbo)	$= 6.79 \angle 80.59^\circ \Omega$	$Z_L$ (Juanchito 115—Candelaria)	$= 8.07 \angle 68.70^\circ \Omega$
$Z_L$ (Yumbo—Chipichape)	$= 5.79 \angle 69.25^\circ \Omega$	$Z_L$ (Yumbo—Santa Barbara)	$= 10.25 \angle 80.28^\circ \Omega$
$Z_L$ (Chipichape—B. Anchicaya)	$= 27.59 \angle 67.16^\circ \Omega$	$Z_L$ (Yumbo—Buga)	$= 23.38 \angle 69.52^\circ \Omega$
$Z_L$ (Juanchito 115—Juanchito 220)	$= 0.712 \angle 82.90^\circ \Omega$		

图 9.36 例 9.1 距离继电器的保护范围

$$K = \left[ \frac{(I_{SA-Ch}/2) + I_{BA-Ch} + I_{D-Ch} + I_{Y-Ch}}{I_{SA-Ch}/2} \right]$$

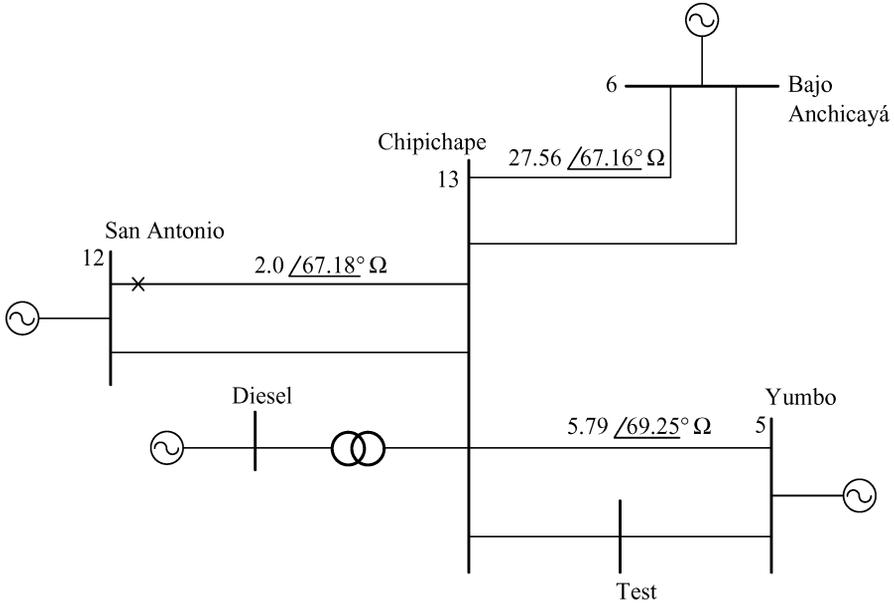


图 9.37 例 9.2 的电力系统

本例中，有  $I_{inf} + I_{relay} = I_{Ch-TEST}$

有 
$$\frac{I_{inf} + I_{relay}}{I_{relay}} = K + 1$$

因此， $(1 + K)$  的值可由下面公式计算

$$\frac{I_{Ch-TEST}}{(I_{SA-Ch})/2}$$

Chipichape—Yumbo 不同位置发生故障时故障电流和阻抗值的计算结果如表 9.1 所示。已知每个故障点的  $K$  值，就可以计算继电器实际测得的  $Z$  值。

图 9.38 给出了以下曲线：

- 以到 Chipichape 的距离为变量的线路阻抗函数。
- San Antonio 的继电器测得的到 Chipichape 的实际阻抗。
- $(1 + K)$  的值。

无论有没有 Yumbo 的影响，都可以推算出 Chipichape 故障时的整定值。应该注意，在考虑 Chipichape—Yumbo 的并联线路时，2 段保护的覆盖范围将近 68%，然后从 94% 处起至线路末端。这意味着 Chipichape 的继电器 2 段保护范围末端可能重叠。

表 9.1 Chipichape—Yumbo 不同位置发生故障时故障电流和阻抗值的计算结果

故障位置 (%)	$I_{\text{relay}} = (I_{\text{SA-Ch}})/2$ /A	$I_{\text{Ch-fault}}$ /A	并联线路的 $I_{\text{Y-Ch}}/A$	馈入电流 /A	$1 + K$	到 Chipichape 的 $Z_{\text{real}} = (1 + K)Z_L$ /Ω
0(Ch)	1534.8 ∠ -87°	7748.6 ∠ -83°	3243.5 ∠ -82°	6227.1 ∠ -83°	5.048	0
10	1295.7 ∠ -87°	6117.8 ∠ -85°	2175.9 ∠ -83°	4822.1 ∠ -85°	4.721	2.733
20	1213.0 ∠ -86°	5591.5 ∠ -85°	1858.8 ∠ -83°	4378.5 ∠ -85°	4.609	5.337
30	1135.0 ∠ -86°	5084.6 ∠ -85°	1546.6 ∠ -84°	3949.9 ∠ -85°	4.479	7.780
40	1061.2 ∠ -85°	4594.5 ∠ -85°	1237.8 ∠ -84°	3533.5 ∠ -84°	4.329	10.025
50	990.7 ∠ -85°	4114.6 ∠ -85°	928.1 ∠ -85°	3123.9 ∠ -85°	4.153	12.022
60	922.7 ∠ -84°	3638.2 ∠ -85°	612.7 ∠ -87°	2715.2 ∠ -85°	3.943	13.697
70	8556.2 ∠ -84°	3158.9 ∠ -85°	288.2 ∠ -92°	2302.3 ∠ -85°	3.689	14.951
80	790.6 ∠ -83°	2669.0 ∠ -84°	70.8 ∠ +132°	1878.4 ∠ -84°	3.375	15.633
90	725.5 ∠ -82°	2164.6 ∠ -84°	422.0 ∠ +101°	1439.0 ∠ -84°	2.983	15.544
100(Y)	576.8 ∠ -80°	1115.8 ∠ -81°	1115.8 ∠ +99°	539.8 ∠ -83°	1.934	11.197

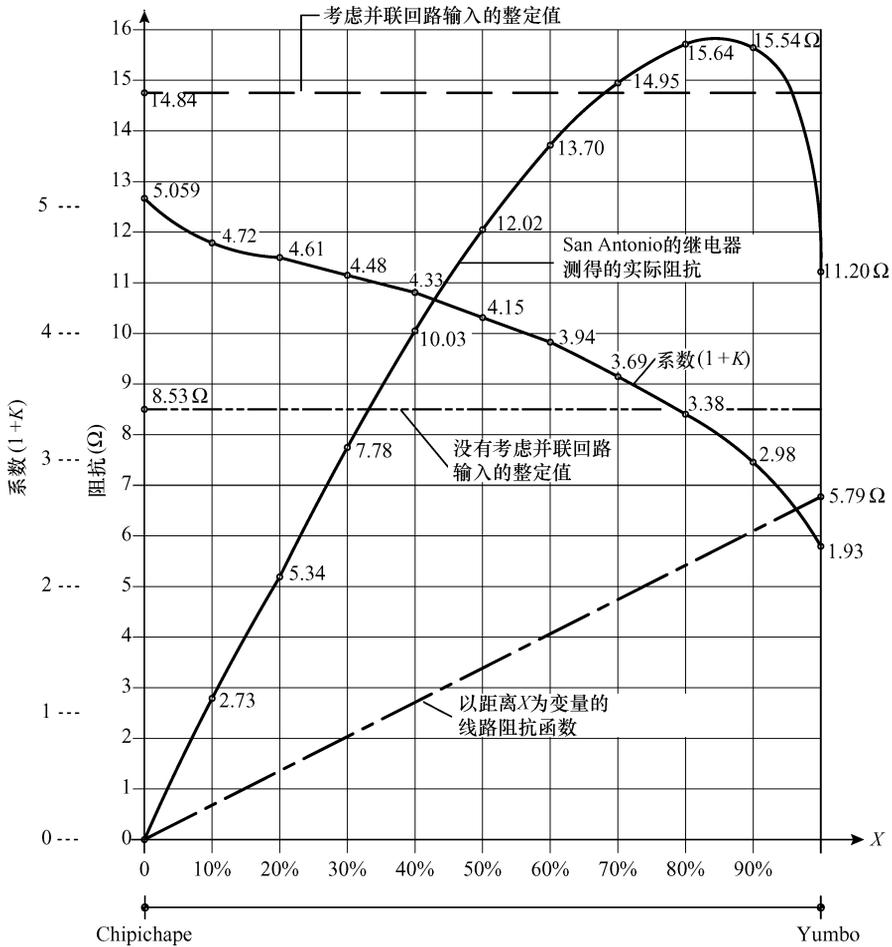


图 9.38 例 9.2 的阻抗曲线

## 9.12 联锁跳闸

距离保护在高压线路里应用多年，尽管它的1段保护不能覆盖整个回路，但仍是非常稳定的一种保护方式。随着更为高速、可靠而经济的通信手段的发展，在每个线路末端的继电器可以增加通信连接，并为距离保护增加联锁跳闸功能，距离保护1段的覆盖范围就可以扩大。此外，距离保护还有一个优点，就是可以作为沿线变电站的后备保护。尽管联锁跳闸种类多样，这里仅考虑最为常用的类型。保护方式的选择取决于电力部门采用的原则、通信方式、被保护线路的重要性。最终，保护系统应能清除1段区域外、线路最末端的故障，此时就需要采用连锁跳闸功能。

### 9.12.1 欠范围直接跳闸

此种情况下，距离继电器的整定采用本章9.3节的原则。当继电器1段保护单元动作时，产生一个信号，通过通信网络传送至线路末端，使开关立即脱扣。这种保护方式非常简单，突出的优点是动作速度极快。但是，其缺点是，一旦通信设备故障，可能引起断路器误动。图9.39所示的欠范围直接跳闸，为位于线路末端的距离继电器的动作原则。

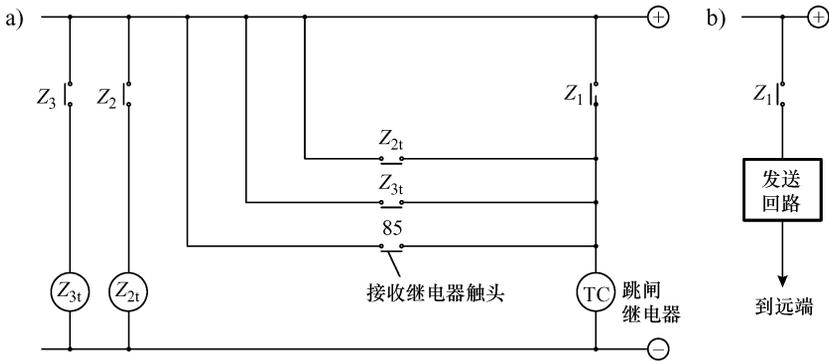


图 9.39 欠范围直接跳闸

a) 跳闸回路的触头逻辑 b) 信号发送通道的触头逻辑

### 9.12.2 允许的欠范围联锁跳闸

这种保护方式和前面所述是类似的，但是接收端的2段单元必须在跳闸信号发出前发现故障。这种保护方式的优点是可以屏蔽大量假的跳闸信号。因此，就要认真考虑接收线路末端继电器信号的2段单元的情况。有些情况下，尤其是线路末端单电源供电的双回路线路，常常要增加一个时间继电器，来接收远端的跳闸信号。图9.40所示的允许的欠范围联锁跳闸，为位于线路末端的距离继电器动作原则。

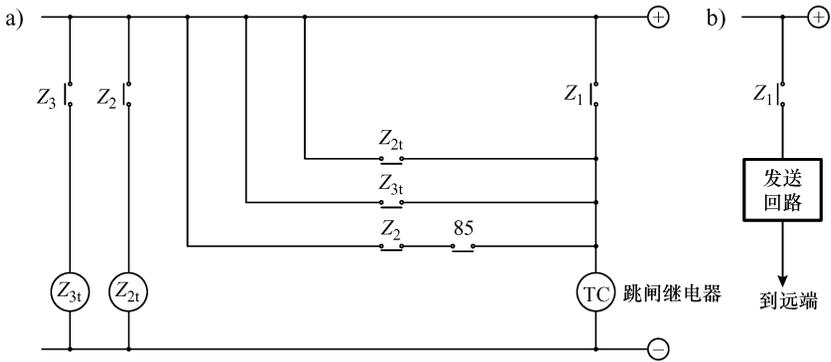


图 9.40 允许的欠范围联锁跳闸

a) 跳闸回路的触头逻辑 b) 信号发送通道的触头逻辑

### 9.12.3 允许的超范围联锁跳闸

这种方式和上一节所述类似，除了跳闸信号是由 2 段单元发出的而不是由 1 段单元发出。接收信号的继电器是否跳闸取决于 2 段单元是否发现了故障，如图 9.41 所示。

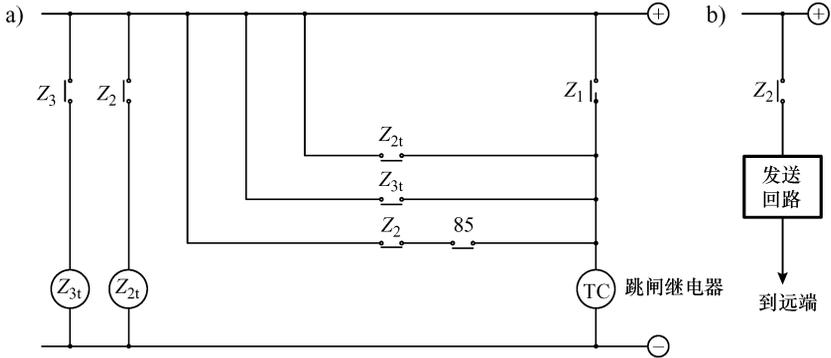


图 9.41 允许的超范围联锁跳闸

a) 跳闸回路的触头逻辑 b) 信号发送通道的触头逻辑

### 9.13 在串联补偿线路中的距离继电器

在线路中采用串联电容补偿，是一种提高功率传输效率的有效方法。采用线路补偿的主要原因如下：

- 改善无功功率平衡
- 减小系统损耗

- 改善电压波动
- 改善系统暂态稳定性
- 增加功率传输能力

对于最后一点，从系统 1 到系统 2 的有功功率传输公式为

$$P = \{ V_1 V_2 \sin(\phi_1 - \phi_2) \} / X$$

串联电容减小了线路感抗，因此传输的有功功率增加。电容补偿量一般表示为线路感抗的百分比。补偿值通常为 20% ~ 70%。

加入串联补偿对保护系统有严重的影响，尤其是对距离保护，因为其与电压和 / 或电流的关系和阻抗有关。在线路中间点加入 50% 的串联补偿，A 点继电器测得的视在阻抗如图 9.42 所示。串联电容之外的故障，由继电器测得的阻抗值来看，显得距离更近，因此 1 段整定值应调整至较小的阻抗值，以避免超范围保护。图 9.43 所示为线路起始端加入 70% 串联补偿的视在阻抗。这种情况下，继电器可以发现相反方向的故障，那么整定就要依靠记忆及无故障相的电压偏差来确定，以保证保护的正确动作。

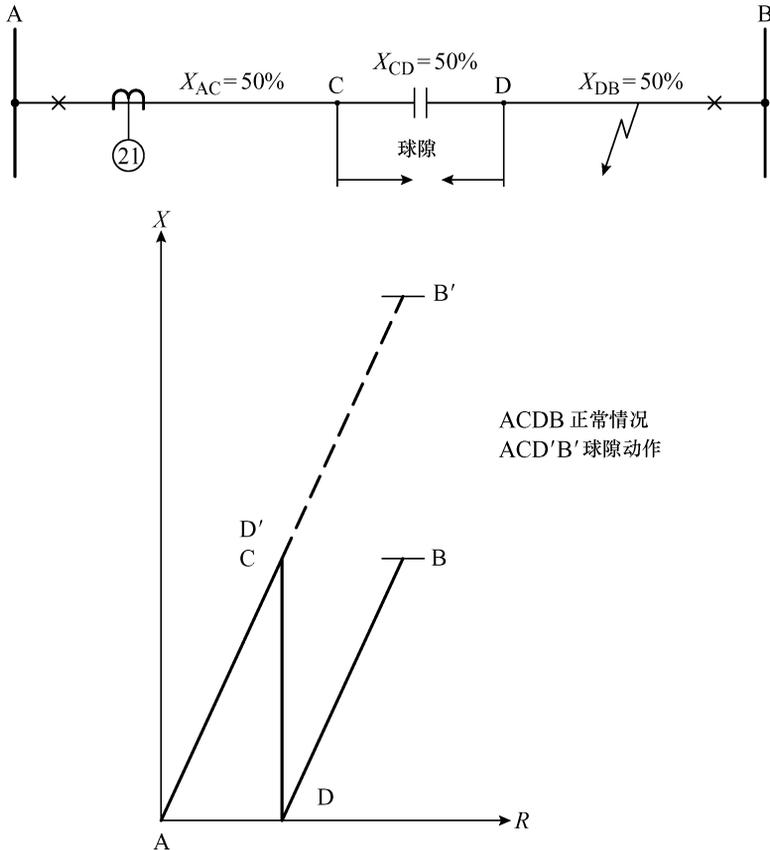


图 9.42 线路中间加入 50% 串联补偿的视在阻抗

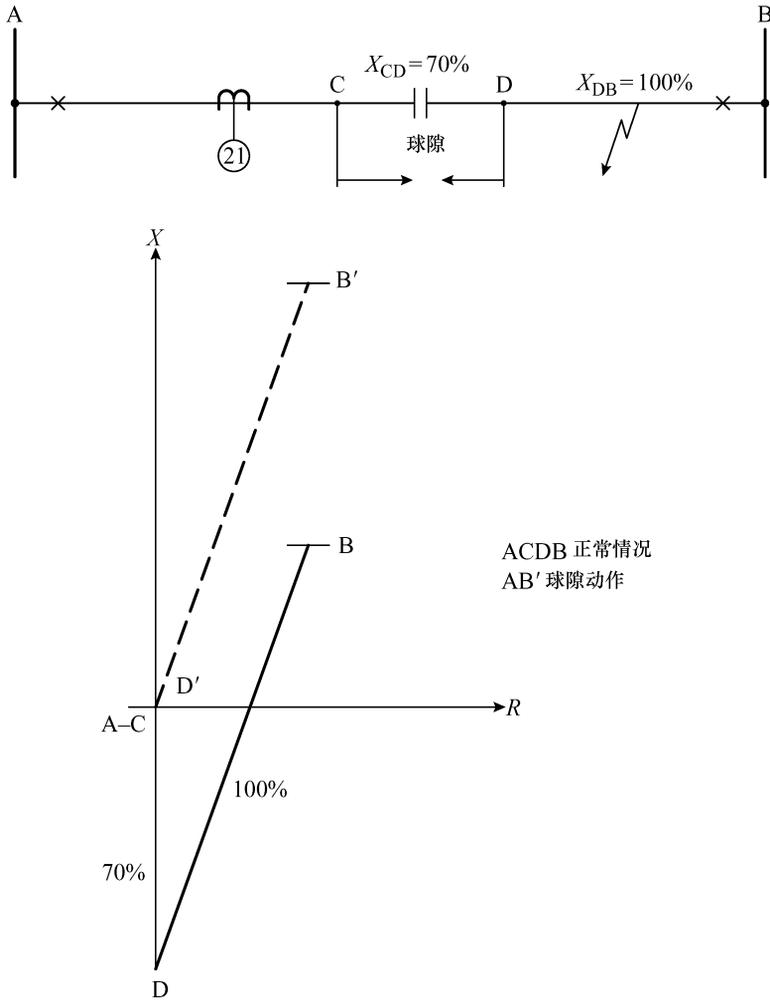


图 9.43 线路起始端加入 70% 串联补偿的视在阻抗

## 9.14 在 T 形回路中距离保护的考虑因素

在 T 形回路中的距离继电器，应特别注意组成 T 形回路的端口带来的馈入电流的影响。可能有 2 个或 3 个端口都有馈入电流，在这些情况下都要特别注意。

### 9.14.1 两个端口有馈入电流的 T 形回路

对于图 9.44 所示的情况，假设母线 C 没有发电机。由于馈入电流  $I_B$  的影响，母线 A 处的距离继电器测得的视在阻抗比实际阻抗大。F 点故障时，A 点继电器电压为

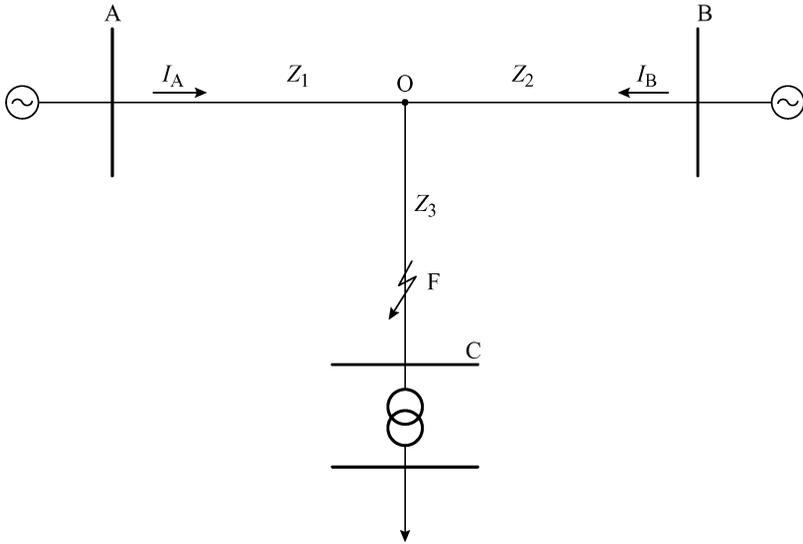


图 9.44 馈入点在 A、B 的 T 形回路

$$V_A = I_A Z_1 + (I_A + I_B) Z_3 \quad (9.45)$$

因此，A 处继电器的视在阻抗为

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = Z_1 + \left(1 + \frac{I_B}{I_A}\right) Z_3$$

$$Z_A = Z_1 + (1 + K_A) Z_3 \quad (9.46)$$

式中， $K_A$  为系统馈入常数。

在正常情况下  $K_A > 1$ ，A 点继电器测得的阻抗  $Z_A$  大于实际的故障阻抗，因此如果不考虑馈入电流的话，继电器沿线路 OC 的覆盖范围实际上是减小了。类似的，B 点继电器测得的阻抗为

$$Z_B = Z_2 + \left(1 + \frac{I_A}{I_B}\right) Z_3$$

$$Z_B = Z_2 + (1 + K_B) Z_3 \quad (9.47)$$

另一方面，A 和 B 点继电器的整定，应保证 A 点继电器 1 段保护范围不超过母线 B 和 C，B 点继电器 1 段保护不超过母线 A 和 C。否则，变电站 C 的变压器故障时，可能引起线路 AB 断开。A 点继电器的 1 段保护范围应调整至下面两式中较小的一个：

$$Z_1 = 0.85 Z_{AB} \quad (9.48)$$

$$Z_1 = 0.85 (Z_{AO} + Z_{OC})$$

这样就可以确保 OB 和 OC 段保护范围最大，而且在馈入电流  $I_B$  消失时，变电站 A 的继电器也不会超范围。但是，当  $I_B$  存在时，正常情况下可能会引起继电器保护范围缩小。有种方法可以解决这一问题，即修改式 (9.48)

$$Z_1 = 0.85 \left[ Z_{AB} + \left(1 + \frac{I_B}{I_A}\right) Z_{OC} \right] \quad (9.49)$$

尽管这样确保了线路 OC 的有效保护范围，但是式 (9.49) 有一个缺点，就是在 B 点开路时，保护会超范围。如果阻抗  $Z_{OC}$  远远小于  $Z_{OB}$ ，那么 A 点继电器在 OB 段的保护范围会大大减小。这种情况下，就需要增加联锁跳闸功能，以加快保护动作时间，保护此段线路。

### 9.14.2 所有三个端口都有馈入电流的 T 形回路

如图 9.45 所示，在 T 形网络的三个端口都有电源，线路 AB 故障时，电源会导致 A 和 B 点继电器保护范围减小。F 点故障时，A 点继电器测得的视在阻抗如图 9.45 所示。

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = Z_1 + \left(1 + \frac{I_C}{I_A}\right) Z_C \quad (9.50)$$

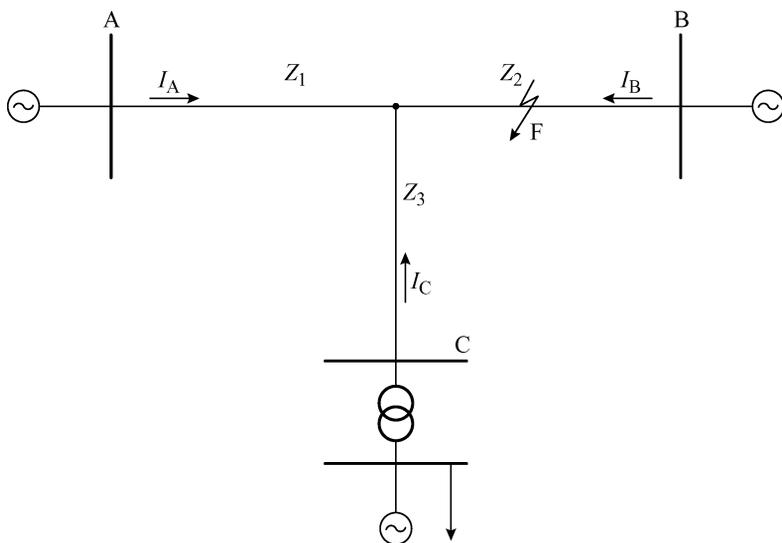


图 9.45 馈入点在 A、B 和 C 点的 T 形回路

$Z_A$  值大于实际故障阻抗 ( $Z_1 + Z_2$ )，导致 A 点继电器保护范围缩小。那么 A 点整定值计算就应基于实际的系统阻抗，而不用考虑电源影响，以避免 1 个或多个端口开路时保护超范围。

基于这一原则，可以得到最优的保护配合方案，但是由于电源的影响，继电器保护范围减小了。

## 9.15 采用距离继电器发现发电机励磁故障

发电机励磁故障会引起系统失步、绕组过热、输出功率减少。当发电机失步时，在定子端口测得的阻抗值变化最为显著。失磁情况下，端口电压降低电流增大，导致阻抗减小、功率因数变化。发电机和其相关问题的等效系统如图 9.46 所示。其电压

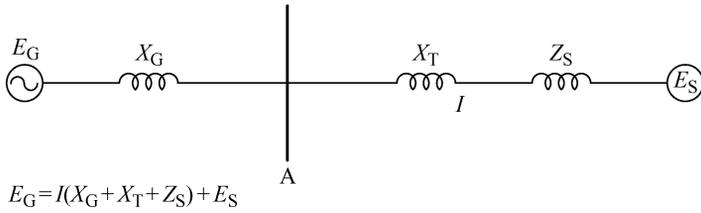


图 9.46 分析发电机场损耗的等效系统

矢量图如图 9.47 所示。A 点检查失步的继电器测到的阻抗矢量图如图 9.48 所示。当  $E_G$ 、 $E_S$ 、 $I$  和  $\delta$  幅值变化时，继电器测得的阻抗圆的圆心沿着直线 CD 移动。

同步发电机失磁时， $E_G/E_S$  的比值减小，角度  $\delta$  增大。此种情况下的阻抗图为负载点（或者说继电器测得的阻抗）的移动，移动方向如图 9.49 所示。具有姆欧特性的继电器有两个整定值—偏置和直径，可以用于发现这种失磁情况，如图 9.50 所示。在没有失磁并防止异步

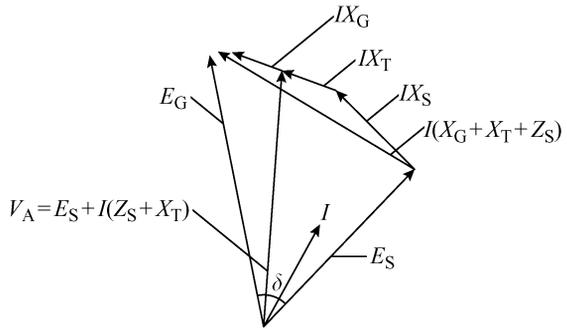


图 9.47 系统电压矢量图

运行时，偏置值用于避免系统振荡时保护误动。直径整定值必须保证负载的功率因数超前。直径整定值为  $X_d$  的 50%~100% 时，一般就可以防止系统异步运行。

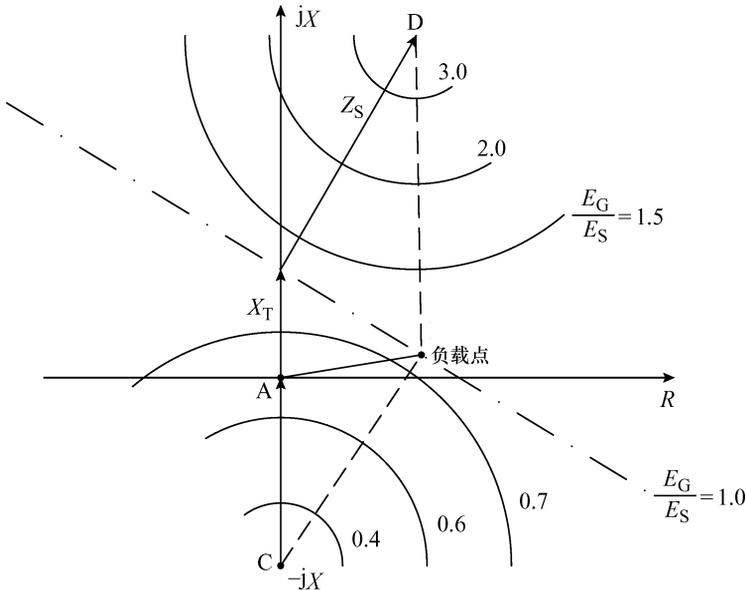


图 9.48 A 点检查失步的继电器测到阻抗矢量图

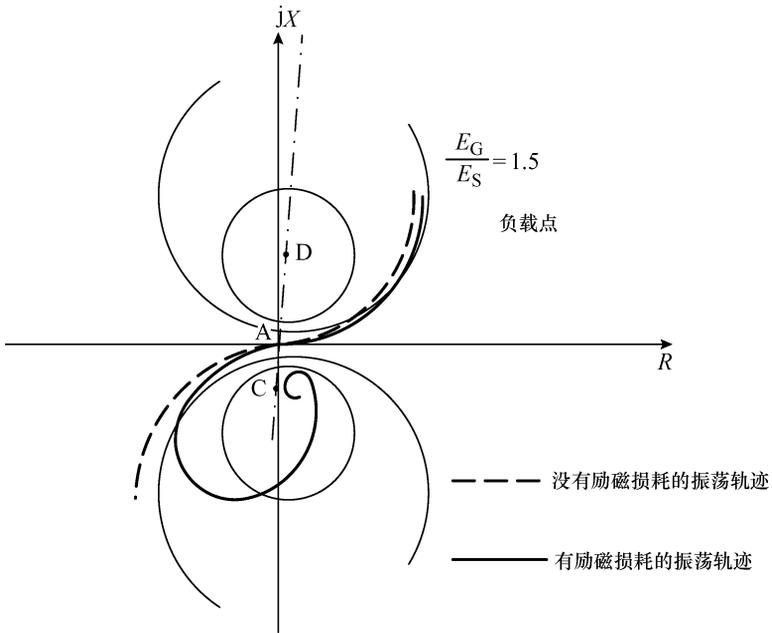


图 9.49 负载点移动

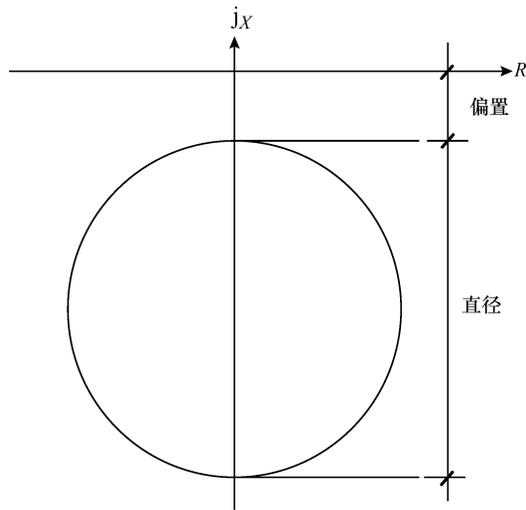


图 9.50 姆欧继电器偏置和直径整定值

## 9.16 习题

### 习题 9.1

说明姆欧继电器（也称导纳继电器）的动作特性，其动作特性在导纳图上为

一条直线。标出该直线和坐标轴的交点。

**习题 9.2**

对于图 9.51 所示的系统，要求如下：

- 如果故障电流为 200A，计算故障电阻。
- 计算剩余补偿常数。
- 计算继电器测得的二次阻抗，如果剩余补偿系数为 1.0（100%）

注：CT 变比为 800/1，VT 变比为  $11800/\sqrt{3}:110/\sqrt{3}$

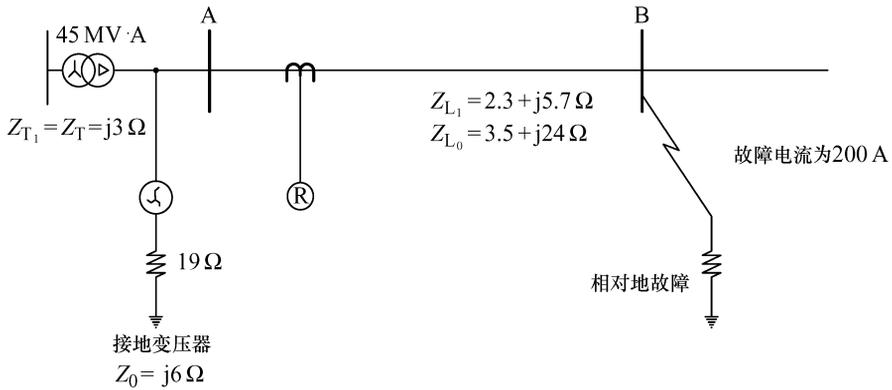


图 9.51 习题 9.2 的电力系统

**习题 9.3**

对于图 9.52 所示的电力系统，确定安装在变电站 Juanchito 的距离继电器 3 段，

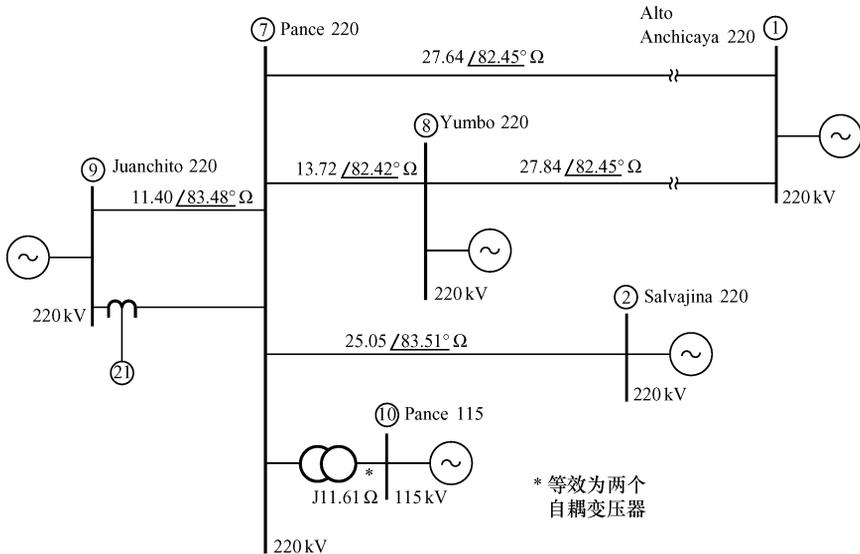


图 9.52 习题 9.3 的电力系统

在通往变电站 Pance 的线路上的保护范围（以二次阻抗表示）。

检查最大负载值。

仅考虑和母线 7 相关的电源，计算在相邻和远端线路上的馈入常数。

提示：

- CT 和 PT 的变比分别为 800/5 和 2000/1。
- 母线 7 故障时的三相短路电流（对应的线电流值），如图 9.53 所示。
- 继电器整定角度为  $75^\circ$ 。
- 线路 Juanchito—Pance 的每个回路的最大负载为  $40\text{MV}\cdot\text{A}$ ，相角为  $\pm 30^\circ$ 。

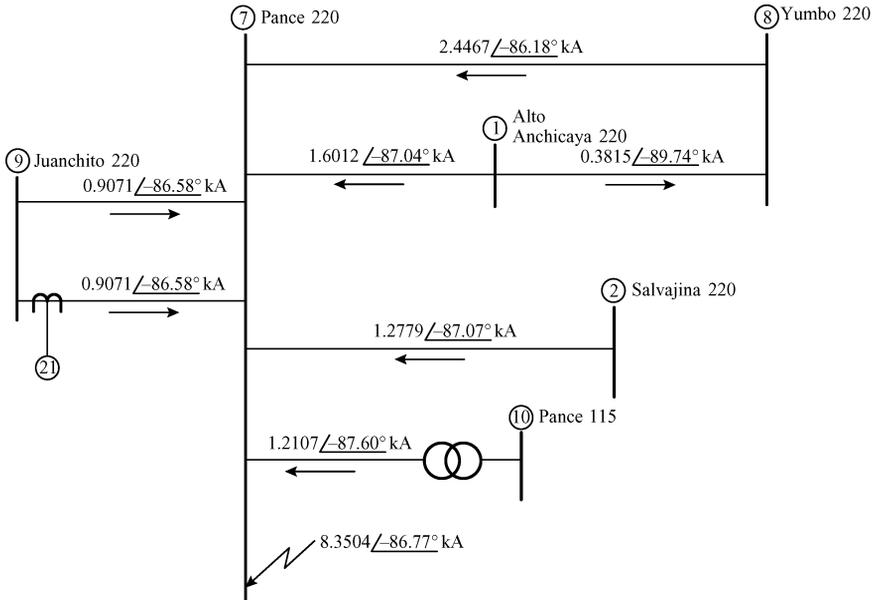


图 9.53 习题 9.3 的故障电流

# 第 10 章 工业系统的保护

随着工厂电力系统规模越来越大，系统短路时电流很大，这就要求正确设计工厂的继电保护系统，设置适合的整定值，以确保工厂的正常运行和设备的持续供电。确保工厂用电的持续性是极其重要的，同时，工厂用电与公共电网系统的连接在其中又起着举足轻重的作用。主要的工业用电电源和电力系统电源的保护配合是十分关键的。

## 10.1 保护设备

除了本书第 5 章介绍的过电流继电器外，塑壳断路器（MCCB）、热继电器接触器和熔断器都常被用于工业电力系统的保护中。本章将详细进行介绍。

### 10.1.1 过电流继电器

这种继电器通常配有速断和/或延时单元。延时单元可以是反时限、非常反时限和极端反时限的；当有必要防止继电器在某一方向动作时，还需要增加方向器件。在环形系统或网络中有多个电源点时，延时继电器应用非常普遍。

### 10.1.2 普通断路器和塑壳断路器的直接动作器件

如同其名称的含义，直接动作器件就是直接使断路器动作的设备，而不需要脱扣用的交直流线圈。直接动作器件在 600V 以下的断路器操作中非常常见，但是有时也用在更高电压等级的断路器上，并从电流互感器取电。

直接动作器件可由以下部件操作：

- 故障电流流过跳闸线圈，产生电磁力，电磁力作用于电枢；
- 由故障电流产生的热量启动双金属片。

这些器件的特性曲线通常结合了速断单元和长/短延时继电器的特性曲线。长延时单元的启动电流一般可设为额定值的 80%、100%、120%、140%、160%。短延时继电器的校准值一般为额定值的 5、7.5 和 10 倍。

一般可以用一个时延单元和速断单元结合（常有双金属片或磁性器件），采用断路器保护低电流容量的回路。这种情况下，工厂里通常可以基于额定值来进行整定。

### 10.1.3 热继电器、接触器和熔断器组合使用

热继电器、接触器和熔断器组合使用，在低功率系统的保护中应用及其广泛。

熔断器对短路情况进行保护，热继电器防止过载。如果热继电器直接使接触器动作，那么就要特别注意防止使继电器动作的故障电流可能已经超过了接触器的容量。如果无法避免，就需要选择一个更为快速的熔断器，以确保电流在大于接触器开断容量的情况下熔断器都可以动作。

## 10.2 电机相关过电流保护的整定原则

选择低电压过电流设备的额定值和整定范围，如热继电器和塑壳断路器等常用在工厂中的设备，其选择的原则和本书第 5 章所述的过电流继电器原则是相似的。但有一点需要注意，即由于电力公司或工厂操作人员采用不同的整定原则，其整定值也会随之变化（假设整定值可以满足系统保护的要求）。因此，无论依据何种整定原则，其整定值都应大于电机锁定的转子电流，小于电机热容量限值。

### 10.2.1 热继电器

热继电器主要有 3 个可以调整的参数：线圈额定值，热器件的抽头，速断器件的范围。

#### 10.2.1.1 线圈额定值

为了确定线圈额定值，制造厂商们会为热继电器提供一个最大和最小电流值。线圈额定值为大于电机次级额定电流最大值的某值。电机的热继电器范围应覆盖电机次级额定电流值。不建议热继电器的最大额定电流与电机次级额定电流非常接近；一般建议采用相邻的最大范围。

##### 例 10.1

某电机参数如下：

功率 100hp，功率因数为 0.8

电压 440V

效率 100%

热保护包括 3 个单相继电器，由变比为 200/5 的电流互感器供电。这些继电器整定范围如表 10.1 所示，动作特性如图 10.1 所示。

$I_{\text{nom}} = 122.36\text{A}$ ， $I_{\text{nom(sec)}} = (122.36 \times 5/200)\text{A} = 3.06\text{A}$ 。根据表 10.1 的数据，额定电流 3.87A 的热线圈其电流范围为 3.10A ~ 3.39A。由于范围为 2.82A ~ 3.09A 的继电器电流最大值非常接近电机的  $I_{\text{nom(sec)}}$ ，因此不能选择。

##### 热元件的抽头调整范围

继电器热元件的启动电流通常写为线圈额定电流的 90%、95%、100%、105%、110%。

##### 速断元件的范围

速断元件启动电流一般为电机额定电流的 10 倍。通常为 6 ~ 150A。在本例中为

表 10.1 TMC21B 和 TMC23B 型继电器的整定范围

可调电机满载 电流/A		热线圈连续 额定电流 /A	目标单元 /A	速断单元 /A	型号编号手动重置热单元		箱体 尺寸	近似重量/lb(kg)	
最小	最大				50/60Hz <sup>①</sup> 标准时间	60Hz <sup>②</sup> 短时		净重 12(5.4)	毛重 16(7.3)
1.32	1.45	1.64	0.2/2	6~150	12TMC21B1A	12TMC23B1A	S-1		
1.46	1.59	1.82			B2A	B2A			
1.60	1.75	2.00			B3A	B3A			
1.76	1.93	2.20			B4A	B4A			
1.94	2.11	2.42			B5A	B5A			
2.12	2.33	2.65			B6A	B6A			
2.34	2.55	2.92			B7A	B7A			
2.56	2.81	3.20			B8A	B8A			
2.82	3.09	3.52			B9A	B9A			
3.10	3.39	3.87			B10A	B10A			
3.40	3.74	4.25			B11A	B11A			
3.75	4.11	4.88			B12A	B12A			
4.12	4.47	5.15			B13A	B13A			
4.48	4.97	5.15			B14A	B14A			

① 这种继电器的时间/电流曲线适用于大部分普通用途的交流电机，50/60Hz。

② 这种继电器跳闸速度很快，适用于电机在停滞状态升温很快的情况。

$$I_{\text{inst}} = 10I_{\text{nom}} = (10 \times 122.36 \times 5/200) \text{A} = 30.59 \text{A} \text{ 二次}$$

这样就确认了 6~150A 的范围是合适的。

## 10.2.2 低压断路器

用来保护电机的低压断路器一般有两个部件：一个延时单元对应长时过载情况，一个速断单元对应短路情况。短时器件是可选的，但仅建议用于保护更大功率的电机，或者可能存在保护失配（与更靠近电源方向的其他断路器间）的情况下。

断路器保护应注明以下参数：额定电流，延时单元的整定范围，速断单元，短时单元（若适用）。

### 10.2.2.1 额定电流

断路器额定值一般选择比以下公式所得值高一级的值：

$$I_{\text{breaker}} = 1.05SF I_{\text{nom, motor}}$$

式中，SF 为服务系数，是由制造厂商提供的过载裕量。

如果断路器还保护电机控制中心（Motor Control Centre, MCC），那么其额定值

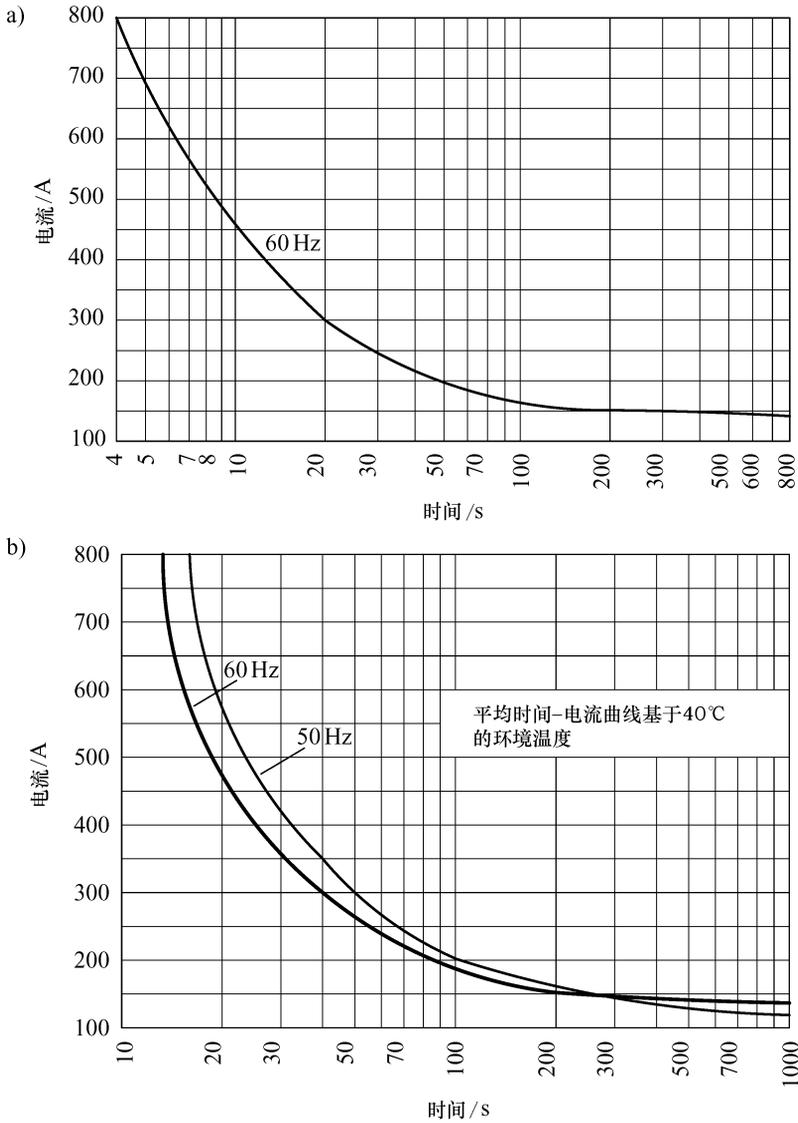


图 10.1 GE 的 TMC 系列热继电器的整定值范围和动作特性

a) TMC23B 型热继电器典型的时间/电流特性曲线

b) TMC21B、24B 和 24D 型热继电器基于 40℃ 的平均时间/电流曲线

用以下公式选择：

$$I_{\text{nom}} = 1.2 I_{\text{FL}}$$

式中， $I_{\text{FL}}$  为满载电流，考虑了所有电机的额定功率及电源供给的所有其他负载功率。要计算  $I_{\text{FL}}$ ，就要将最大的电机的额定电流和其他负载电流分别乘以需求系数，两者再相加。

### 10.2.2.2 时间段的整定

当选择时间段时，在一个断路器和后备保护断路器间应留有 0.2s 的配合裕度。对于和电机控制中心相关的断路器，应检查其时间整定值，当剩余负载承载额定功率时，可以确保最大的电机正常起动。

转子锁定电机的电流应根据标准估算，如美国国家电气规范（National Electric Code, NEC）430-7 条款，并采用规范的代码。当不是这种电机时，根据 NEC 430-7 的表 430-151，电流应为满负载电流的 6 倍。每种电机的启动电流计算都应考虑其特别的启动方式。此外，还需检查断路器的动作特性，以确保相关导体的热容量特性可以满足要求。表 10.2 给出了电机各起动方法的对比。

表 10.2 电机各起动方法的对比（Beeman, D. ; Industrial Power System Handbook）

起动器类型 <sup>①</sup>		电机电压	起动转矩	线电流
		线电压	全电压起动转矩	全电压起动电流
全电压起动器		1.0	1.0	1.0
自耦变压器	80% 抽头	0.80	0.64	0.68
	65% 抽头	0.65	0.42	0.46
	50%	0.50	0.25	0.30
电阻起动器，单步 (电机电压为 80% 线电压时)		0.80	0.64	0.80
电抗	50% 抽头	0.50	0.25	0.50
	45% 抽头	0.45	0.20	0.45
	37.5% 抽头	0.375	0.14	0.375
局部绕组起动器 (仅限低速电机)	75% 抽头	1.0	0.75	0.75
	50% 抽头	1.0	0.50	0.50

注：线电压等于电机额定电压。

① 整定值时每个型号的常用值。

### 10.2.2.3 短时单元的整定

在考虑动作电流（包括锁定转子的电机电流）时，会特别提到短时单元。动作电流一般为 6~7 倍的电机额定电流。短时单元的整定范围通常表示为长延时单元的启动电流的倍数。

### 10.2.2.4 速断单元的整定

速断单元在短路时提供保护，当有严重故障时可以大大缩短断路器的动作时间。速断单元的整定用下面的公式计算：

$$I_{\text{inst}} = 10I_{\text{FL}}$$

式中， $I_{\text{FL}}$  为相关馈线的满载电流。

**例 10.2**

如图 10.2 所示, 确定热继电器、200A 和 600A 断路器的整定值, 已知以下条件:

感应电机

500hp, 2400V, 功率因数为 0.8;

服务系数为 1.0;

代码为 G;

锁定转子的热容量限值为 5.5s;

直接启动时间为 1.0s。

热继电器(见图 10.1)

线圈额定电流为 3.87A;

可调范围为 90%~110% 的线圈额定值。

CT 变比为 150/5。

断路器

整定值和特性曲线如表 10.3 和图 10.3

所示。

**答案**

电机额定电流

$$I_N = \frac{(500 \times 0.746) \text{ kW}}{\sqrt{3} \times 0.8 \times 2.4 \text{ kV}} = 112.16 \text{ A}$$

锁定转子电流

根据 NEC 中表 430-7 (b), 代码为 G 的电机按  $6.29 \text{ kV} \cdot \text{A} / \text{hp}$  评估,

$$I_{LR} = \frac{(500 \times 6.29) \text{ kV} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 2.4 \text{ kV}} = 756.57 \text{ A}$$

热继电器的整定

$$I_{\text{start}} = (1.05 \times 1.0 \times 112.16) \text{ A} = 117.8 \text{ A}$$

整定值为  $117.8 \times \frac{5}{150} \times \frac{1}{3.87} \times 100\% = 101.46\%$

100% 的整定值, 有

$$I_{\text{start}} = 1.0 \times 3.87 \text{ A} \times (150/5) = 116.10 \text{ A} \quad \text{过载 } 3.5\%$$

200A 断路器的整定

• 长时元件

范围为 100/125/150/175/200/250A, 有

$$I_{\text{start}} = (1.05 \times 1.0 \times 112.16) \text{ A} = 117.8 \text{ A}$$

设为 125A (过载 11.45%)。

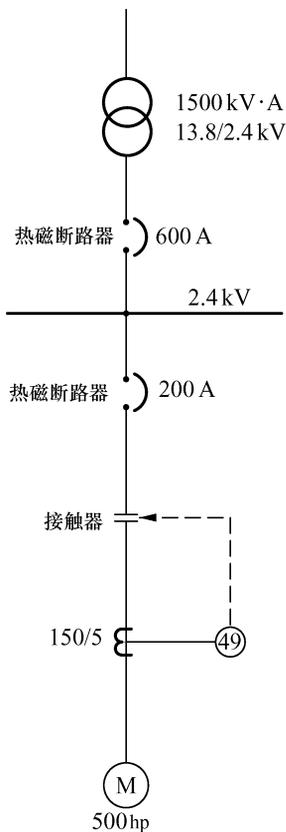


图 10.2 例 10.2 的系统图

表 10.3 Siemens Allis 断路器的整定值范围

断路器型号 和外型尺寸	变压器跳闸 的额定值 (一次电流) /A	由启动整定值校准 的长时元件电流/A							最大连续 额定值 /A	由启动整定值校准 的接地元件/A			
		A	B	C	D	E	F	G		15%	25%	50%	100%
LA - 600A 和 LA - 800A	80	40	50	60	70	80	90	100	100	×	×	40	80
仅 LA - 800A	200	100	125	150	175	200	225	250	250	30	50	100	200
	400	200	250	300	350	400	450	500	500	60	100	200	400
	600	300	375	400	525	600	675	750	600 <sup>①</sup>	90	150	300	600
	800	400	500	600	700	800	900	1000	800	120	200	400	800
LA - 1600A	200	100	125	150	175	200	225	250	250	—	50	100	200
	400	200	250	300	350	400	450	500	500	60	100	200	400
	800	400	500	600	700	800	900	1000	1000	120	200	400	800
	1600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	1600	240	400	800	1600
LA - 3200A	2000	1000	1250	1500	1750	2000	2500	2500	2500	300	500	1000	2000
	3200	1600	2000	2400	2800	3200	3600	4000	3200#	480	800	1600	3200
LA - 4000A	4000	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	4000	600	1000	2000	4000

① 对 LA - 800A 为 750。

② 对 LAF - 3000A 为 3000。

注：×表示可能不跳闸。

时间段选择, 长时元件应允许电机启动; 启动点为  $I = 756.57\text{A}$ , 转子锁定电流,  $t = 1.0\text{s}$ 。

断路器启动时的动作,  $I/I_{\text{启动}} = 756.7\text{A}/125\text{A} = 6.05$ 。

要求  $1.4\text{s}$  的跳闸时间。由图 10.3 所示可知,  $1.4\text{s}$  和  $6.05$  倍的交点在下面一个曲线上的时间段 1。因此, 这种情况选择时间段 2, 以保证  $0.4\text{s}$  的时间级差。

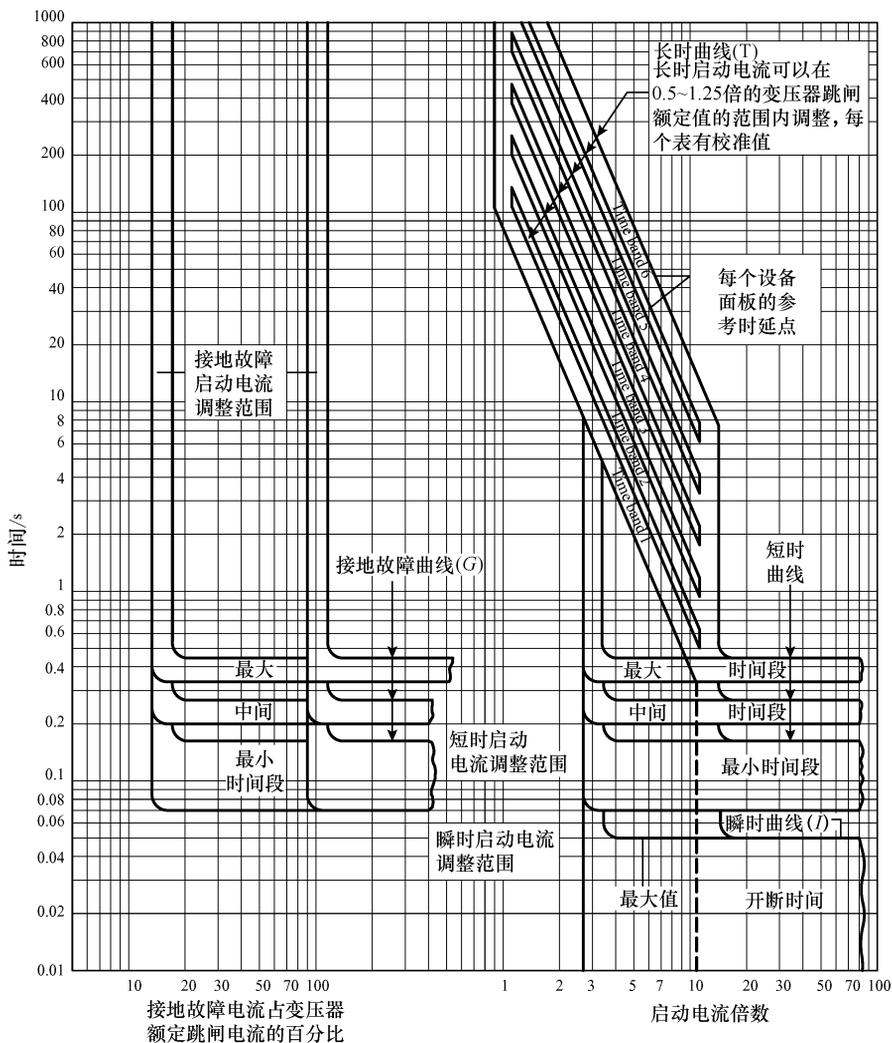


图 10.3 Siemens Allis 断路器的动作特性曲线

#### • 短时单元

范围为  $3/5/8/12$  倍的长时启动电流, 有

$$I_{\text{start1}} = 6 \times 112.16 \text{ A} = 672.96 \text{ A}$$

已知上式的值小于电机起动电流，那么就需要提高整定值。尝试 8 倍，得

$$I_{\text{start2}} = 8 \times 112.16 \text{ A} = 897.28 \text{ A}$$

整定值为  $897.28 \text{ A} / 125 \text{ A} = 7.18$ 。

整定值选择， $8 \times 125 \text{ A} = 1000 \text{ A}$ 。

时间段，选择中间段以提供和速断单元间必要的动作时间级差（见图 10.3）。

- 速断单元

范围为 3/5/8/12 倍的长时启动电流，有

$$I_{\text{start}} = 12 \times 112.16 \text{ A} = 1345.92 \text{ A}$$

整定值为  $1345.92 \text{ A} / 125 \text{ A} = 10.77$ 。

选择的整定值， $11 \times I_{\text{pickup}}$ （1375 A）。

600 A 断路器的整定

- 长时单元

范围为 300/375/400/525/600/750 A。

变压器额定电流为

$$I_n = \frac{1500 \text{ kV} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 2.4 \text{ kV}} = 360.84 \text{ A}$$

整定值为 400 A，过载为  $400 / 360.84 = 1.108$ ，即过载 10.8%，是可以接受的。则有

$$I_{\text{start}} = 1.10 \times (360.84 \text{ A}) = 396.92 \text{ A}$$

选择时间段。

在长时单元限值内的电机断路器的动作， $I / I_{\text{start}} = 1000 \text{ A} / 125 \text{ A} = 8$ 。8 倍时，在时间段 2， $t = 1.5 \text{ s}$ 。

变压器断路器的动作， $I / I_{\text{start}} = 1000 \text{ A} / 400 \text{ A} = 2.5$ 。2.5 倍时，在时间段 2， $t = 1.7 \text{ s}$ ，选择可能的最低时间段 1。由于两个低压断路器之间要互相配合，两者有 0.2 s 的动作时间级差。

- 短时元件

$$I_{\text{start}} = 6 \times (360.84 \text{ A}) = 2165.04 \text{ A}$$

整定值为  $2165.04 \text{ A} / 400 \text{ A} = 5.41$ ，选为 6 倍。

由于和电机的短时元件没有重叠，选择中间段。

- 速断单元

为了确保保护的配合性，取消了速断单元。图 10.4 所示为配合曲线。

需要强调的是，尽管本例中保护设备的整定值确保了配合性，但是这些值并不是唯一的选择。如果特性曲线可以确保保护的可靠性和选择性，也可以选择其他的整定值。

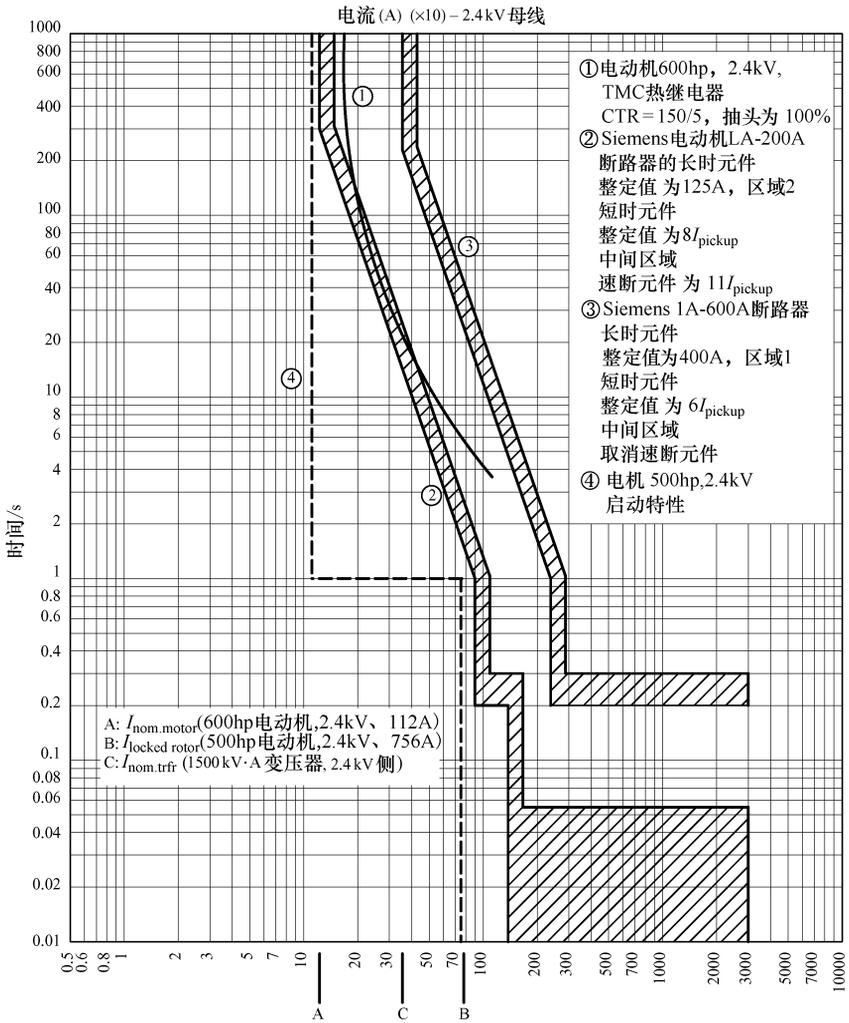


图 10.4 例 10.2 的配合曲线

# 第 11 章 工业负载切除系统

在各种异常的工作状态下，如网络故障、部分或全部电源切断、可能导致系统电源减少的回路断开等，所有含有发电设备的电力系统都应可靠地应对这些异常情况。在这些异常情况下，由于过载影响了汽轮机和发电机辅助设备，造成频率下降，并最终可能导致系统完全崩溃，因此在频率下降之前，现存的负载和剩余的发电设备应尽可能保持平衡。

要恢复系统平衡，可以使用频率继电器。当频率下降至一定水平，意味着过载或者电源出力减少，此时频率继电器可以断开不重要的负载。工厂的室内电源和公共电网同步时，这种保护非常有用。本章将介绍基于频率继电器的自动减载系统的设计，包括其系统设计的概念、标准和详细情况。

## 11.1 失电后的系统运行

当系统全部断电或部分断电时，第一个变化就是电压和频率的降低。但是，电压降也可能由系统故障引起，所以一般来说，频率下降作为系统断电的信号更为可靠。系统突然失电会引起频率下降，下降速度取决于过载情况和系统的惯性常数。

从下面一个简单发电机的振荡公式，可以推导出在电源或/和负载发生突然变化时，频率随时间的变化关系：

$$\frac{GH}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_A \quad (11.1)$$

式中， $G$  为目标发电机的额定功率（MW）； $H$  为惯性时间常数（s）； $\delta$  为发电机转矩角度； $f_0$  为额定频率； $P_A$  为加速或减速的净功率（MW）。

任一时刻发电机的转速可由下式推导：

$$W = W_0 + \frac{d\delta}{dt} = 2\pi f \quad (11.2)$$

式中， $W_0$  为同步速度，即额定频率的额定转速。

式（11.2）对时间求导，有

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 2\pi \frac{df}{dt} \quad (11.3)$$

将式（11.3）代入式（11.1）得到

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_A f_0}{2GH} \quad (11.4)$$

式 (11.4) 定义了频率的变化速度 (单位为 Hz/s), 这个公式可以用于一个单一发电机的系统, 也可以等效表示一个系统的所有电源。在后一种情况下, 惯性系数可以由下式计算:

$$H = \frac{H_1 G_1 + H_2 G_2 + \cdots + H_n G_n}{G_1 + G_2 + \cdots + G_n} \quad (11.5)$$

式中, 下标 1, 2, ...,  $n$  代表各发电机;  $G$  为发电机额定功率 (MW)。式 (11.5) 中的常数  $H$  对应着以 MW 为单位的系统总的发电能力。

式 (11.4) 中加速功率  $P_A$  反应频率的变化, 可以由下式计算:

$$P_A = P_M - P_E \quad (11.6)$$

式中,  $P_M$  为输入发电机的机械能;  $P_E$  为发电机输出的电能。

在稳态情况下,  $P_A = 0$ , 频率不会变化。在过载情况下,  $P_E > P_M$ 。  $P_A < 0$  时, 系统频率下降。

## 11.2 自动减载系统的设计

为设计一个自动减载系统, 首先要定义一个可以代表不同发电机的模型, 然后定义负载参数和频率继电器的整定原则。

### 11.2.1 简单发电机模型

在说明减载系统时, 先介绍系统模型中的单发电机模型。单发电机的情况就是假设各发电机单元间连接中的振荡可以忽略, 系统中频率是一样的, 并忽略调波设备的影响。负载用一个功率常量表示, 意味着在意外情况发生后, 电压和频率下降时, 负载功率没有下降。这个模型是系统的简单模拟, 频率下降导致的减载及调压速度的影响都忽略不计。此模型采用式 (11.5) 计算系统的惯性时间常数。

在以下假设条件下, 可以用式 (11.4) 来计算频率变化的速度:

- 输入发电机的机械功率没有变化, 幅值等于默认值。
- 负载幅值不随时间、电压或频率变化。仅在自动减载的情况下, 部分负载断开时负载幅值才会减小。

这是个较为简单的发电机模型, 负载为一个功率常量。这种模型可以用来确定频率继电器的整定值, 并验证意外情况前可能的最小频率, 主要原因如下:

- 采用迭代法设计减载系统是很容易的。
- 忽略了电压下降引起的负载变化, 因此留有适合的安全裕度。这意味着频率变化速度更快, 保护动作更快。

### 11.2.2 建立减载系统的参数

为了建立一个减载系统, 需要定义下述的参数。

### 11.2.2.1 断开的最大负载

一般来讲，最严酷的情况之一是公共电网和工厂内部系统连接完全断开。这种情况下，发电机和负载的不平衡量相当于最大输入功率，需要将相同数量的负载从电网中切除。

### 11.2.2.2 减载系统的起始频率

减载系统应该在频率低于正常工作值时启动。考虑到公共电网固有振荡引起的频率波动，启动频率值一般设为额定系统频率的 93%。然而，如果系统中可能发生更严重的振荡时，就建议安装一个监控系统，并采用过电流继电器，这样就可以发现工厂和公共电网断开的情况，以避免保护误动作。

### 11.2.2.3 最小允许频率

汽轮机工作在额定机械速度、输出额定频率时，可以避免内部元件（如涡轮页片的共振）的剧烈振动和压力。然而，当低于额定速度和频率下运行时，可能会由于剧烈的振动形成累积的伤害。因此，在低频时的运行时间不能超过表 11.1 给出的时间限值。然而在暂态运行且低于额定负载时，多数的情况下允许频率降低至 93%，汽轮机或者涡轮发电机辅助润滑和冷却系统不会受到损伤。

表 11.1 汽轮机的典型运行时间（满载）

满载时的额定频率百分比 (%)	最大允许时间/min
99.0	连续
97.3	90
97.0	10
96.0	1

## 11.3 整定频率继电器的原则

确定频率继电器整定值是个迭代过程，最后的整定值要满足保护速度和配合的要求。在这个过程中，要检查负责断开连续负载的继电器之间的配合性，以确保断开最少的负载。

### 11.3.1 动作时间

选择整定值时，还要考虑系统频率衰减的时间间隔（从继电器启动到负载被有效切除）。这个时间间隔包含继电器启动时间、继电器的预置时延（如有要求），以及断路器分断时间。

工业系统中通常采用以下值：

- 继电器启动时间为 50ms。
- 断路器分断时间为 100ms。

### 11.3.2 确定频率波动

计算整定值的频率波动，可以用一个简单电机模型代表系统，一个功率为常数的模型来代表负载。假定在意外情况之前和之后，连接到发电机的负载不变，且忽略任何形式的衰减。在这个假定条件下，频率降低速度的计算值是相当悲观的，基于此值的整定可以使系统频率快速恢复到额定值，确保系统的安全。

## 11.4 计算和整定某工厂的频率继电器的案例

本节将给出一个典型的工厂用频率继电器的计算过程。图 11.1 所示为计算频率继电器整定值示例的系统示意图，图中给出了基本的数据。

### 11.4.1 过载计算

起始的负载情况如下：

- 总负载，24.0MW；
- 户内发电机，8.0MW；
- 总输入，16MW；
- $GH$  常数，35.43MW·s。

电网电源输入降低的意外情况下，户内发电机将承受以下过载量：

$$\frac{24.0 - 8.0}{8.0} \times 100\% = 200\%$$

### 11.4.2 需要切除的负载

电网电源断电，失去 16MW 的功率，这部分功率就必须由户内发电机来承受。等于或大于这个功率的负载必须切除，以减轻发电机的负载。因此，要切除的负载为  $(24 - 8) \text{ MW} = 16\text{MW}$ 。需要注意的是，总共有 8.02MW 的高优先级负载不能被切除。

### 11.4.3 频率水平

当频率降至 59Hz 时，意味着电源断电，此时就要开始切除负载。可接受的最低频率为 56Hz。

### 11.4.4 负载切除阶段

假设已经设置了切除负载的 3 个阶段，总共需切除输入回路 15.98MW 的负载，如表 11.2 所示。这种情况下，户内发电机可以继续为 8.02MW 高优先级的负载供电。

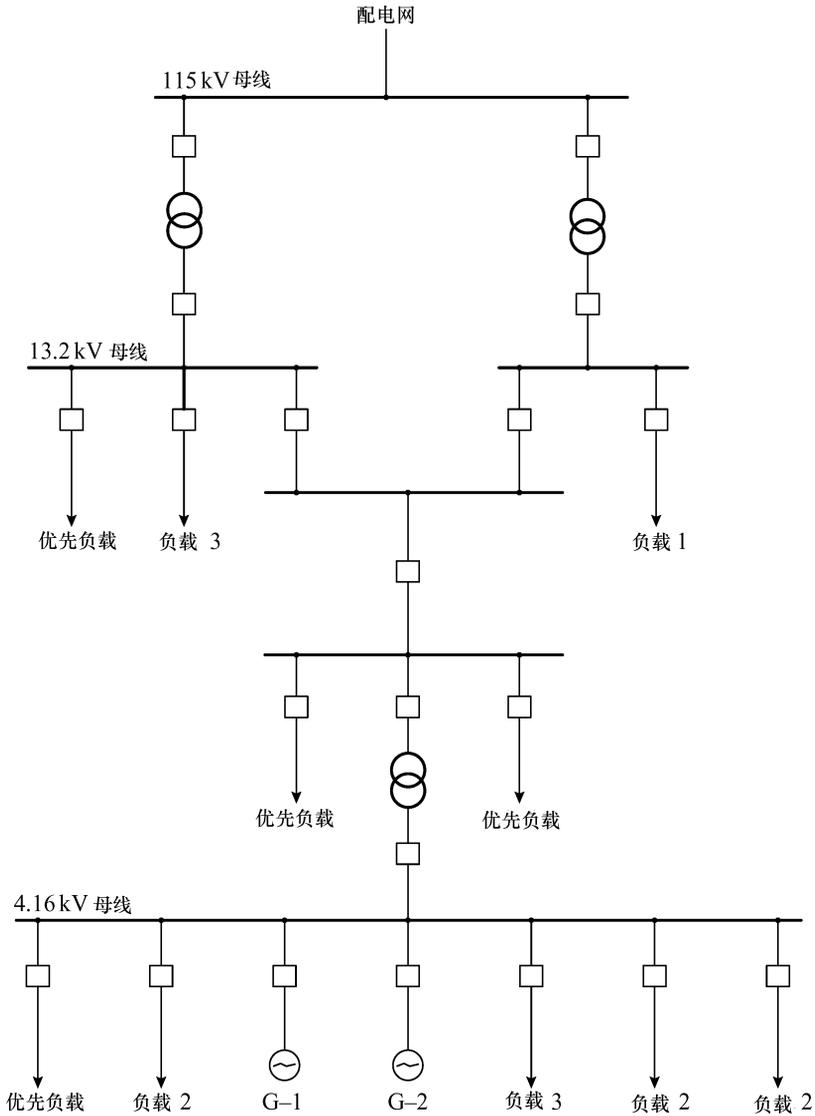


图 11.1 计算频率继电器整定值示例的系统示意图

表 11.2 负载切除阶段

优 先 级	名 称	负载功率/MW
1	负载 1	6.03
2	负载 2	4.73
3	负载 3	5.22

注：要切除的负载为 15.98MW

### 11.4.5 确定频率继电器整定值

频率继电器整定值，仅在频率降低至某一预定值时，各个阶段才切除相应的负载（见表 11.2）。通过计算由于过载引起的系统频率的减小值，可以确定各个阶段继电器动作的频率整定值。

#### 11.4.5.1 第一阶段整定值

频率为 59Hz 时切除第一阶段的负载。

#### 11.4.5.2 第二阶段整定值

考虑和第一阶段相等的过载情况，下降的频率由下式决定：

$$\frac{df}{dt} = \left( \frac{-6.03\text{MW}}{2GH} \right) \times 60\text{Hz} = -5.106\text{Hz/s}$$

图 11.2 所示为计算频率继电器整定值的频率-时间函数关系图， $f = 60\text{Hz} - 5.106 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}t$ 。

第一阶段的脱扣时间为

$$\begin{aligned} t_{\text{trip}} &= t_{\text{pick-up}} + t_{\text{breaker}} + t_{\text{relay}} \\ t_{\text{pick-up}} &= [(60 - 59)/5.106]\text{s} = 0.196\text{s} \\ t_{\text{trip}} &= (0.196 + 0.100 + 0.05)\text{s} = 0.346\text{s} \end{aligned}$$

频率降低至第一阶段的动作值  $f = [60 - 5.106 \times (0.346)]\text{Hz} = 58.233\text{Hz}$ 。第二阶段整定值低于此值，为 58.15Hz。

#### 11.4.5.3 第三阶段整定值

在过载不超过  $(6.03 + 4.73)\text{MW} = 10.76\text{MW}$ （即第一和第二阶段）的情况下，第三阶段不动作。

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt} &= \left( \frac{-10.76\text{MW}}{2GH} \right) \times 60\text{Hz} = -9.111\text{Hz/s} \\ f &= 60\text{Hz} - 9.111 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}t \end{aligned}$$

第一阶段的启动时间为  $t = [(60 - 59)/9.111]\text{s} = 0.110\text{s}$ ，脱扣时间为

$$t_{\text{trip1}} = (0.110 + 0.05 + 0.100)\text{s} = 0.260\text{s}$$

因此频率降低至  $f = (60 - 9.111 \times 0.26)\text{Hz} = 57.631\text{Hz}$ 。

第二阶段的启动值为  $t = [(60 - 58.15)/9.111]\text{s} = 0.203\text{s}$ ，因此脱扣时间为

$$t_{\text{trip2}} = (0.203 + 0.05 + 0.100)\text{s} = 0.353\text{s}$$

频率公式显示第一阶段的跳闸时间  $t_{\text{trip1}} = 0.260\text{s}$ ，由于切断了 6.03MW 负载，斜率有所变化，如图 11.2 所示。在此之后，加速功率仅为 4.73MW。

因此有

$$\frac{df}{dt} = \frac{-4.73\text{MW}}{2GH} \times 57.631\text{Hz} = 3.847\text{Hz/s}$$

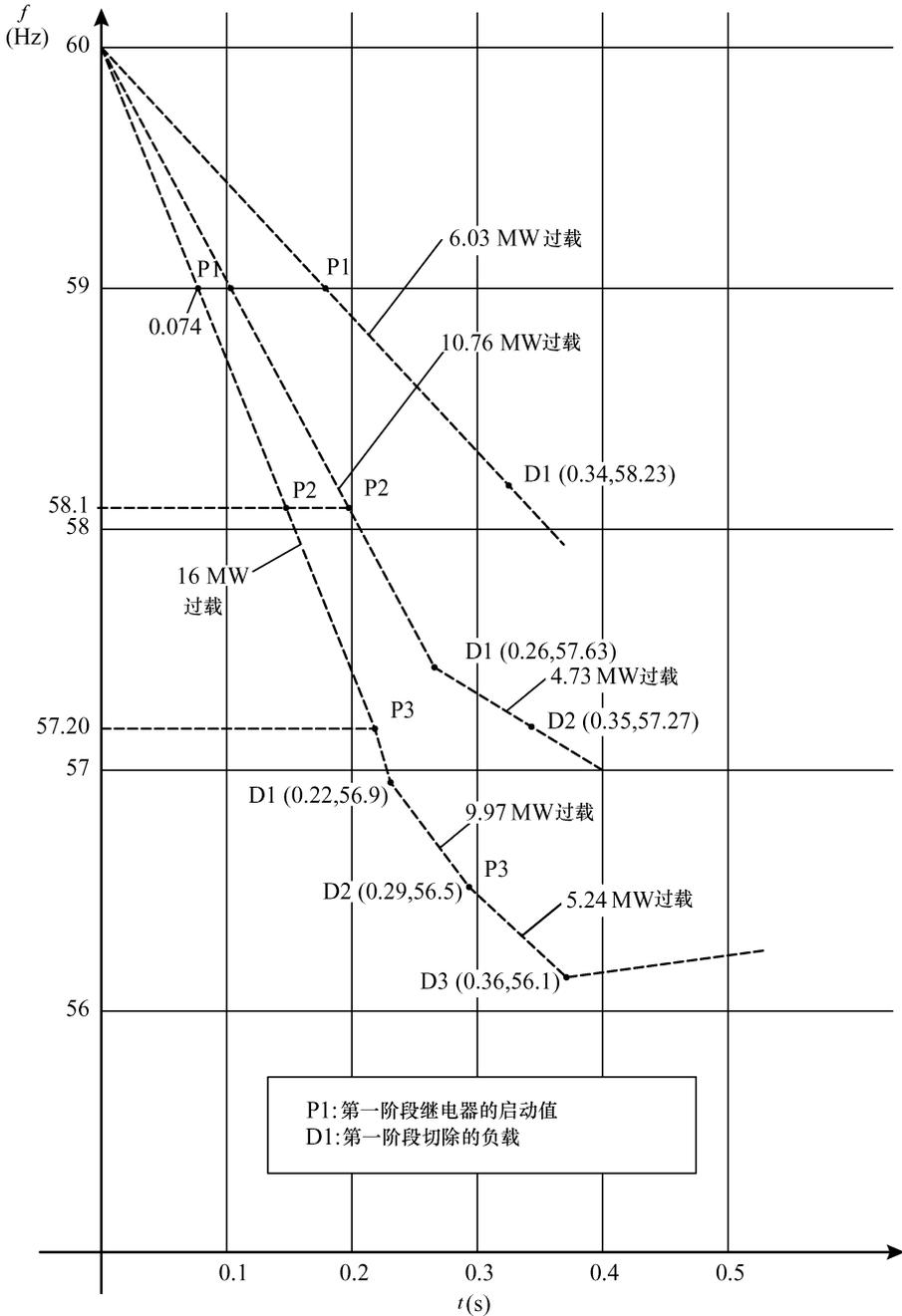


图 11.2 计算频率继电器整定值的频率-时间函数关系图

由频率公式可得

$$f - 57.632\text{Hz} = -3.847 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}(t - 0.26), t > 0.26\text{s}$$

$$f = 58.632\text{Hz} - 3.847 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} t$$

频率降低到第二阶段, 有

$$f = 58.632\text{Hz} - 3.847 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} t_{\text{trip}2}$$

得到  $f = 57.274\text{Hz}$ 。第三阶段的整定值选为  $57.20\text{Hz}$ 。

最终的整定值如表 11.3 所示。

表 11.3 频率继电器整定值

阶段	频率整定值/Hz	延时/s
第一	59.00	瞬时
第二	58.15	瞬时
第三	57.20	瞬时

和配电网连接完全断开时系统的动作特性如图 11.2 所示。

#### 11.4.6 动作的验证

为了验证系统的动作特性, 可以用以下两种方法来研究切除负载过程中频率的下降: 方法一是将负载作为功率常数, 方法二是将负载作为阻抗, 来模拟电压降落的结果。在方法二中, 要使用瞬态稳定程序。

##### 11.4.6.1 将负载作为功率常数

此种情况假设负载幅值是常数, 不随电压变化而变化。和实际情况相比, 这种假设更为恶劣, 因此能够提供一些安全裕度。假设断路器最大的分断时间为  $100\text{ms}$ , 用式 (11.4) 来进行频率分析, 频率继电器的整定值如表 11.3 所示。

如图 11.3 所示, 系统总负载为  $24\text{MW}$ , 图中为电源在  $t = 0\text{s}$  时断开后的频率变化。表 11.4 给出了电网电源断开后事件发生的顺序。最终在  $0.357\text{s}$  时由负载切除系统切断部分负载, 解决了最严重的过载问题。在此期间, 频率将降低至  $56.17\text{Hz}$ , 工厂用电系统完全可以接受。在  $t = 0.357\text{s}$  之后, 系统频率开始恢复。

表 11.4 电网电源断开后事件发生的顺序

时 间	频率/Hz	事 件	频率变化 速度/(Hz/s)	切除负载 /MW	发电机保留的 过载容量/MW
0.000	60.00	电网电源断开	-13.46	—	16.00
0.074	59.00	第一阶段继电器启动	-13.45	—	16.00
0.137	58.15	第二阶段继电器启动	-13.45	—	16.00
0.207	57.20	第三阶段继电器启动	-13.45	—	16.00
0.224	56.90	第一阶段负载切除	-8.00	6.03	9.97
0.287	56.50	第二阶段负载切除	-4.20	4.73	5.24
0.357	56.10	第三阶段负载切除	0.00	5.22	0.02

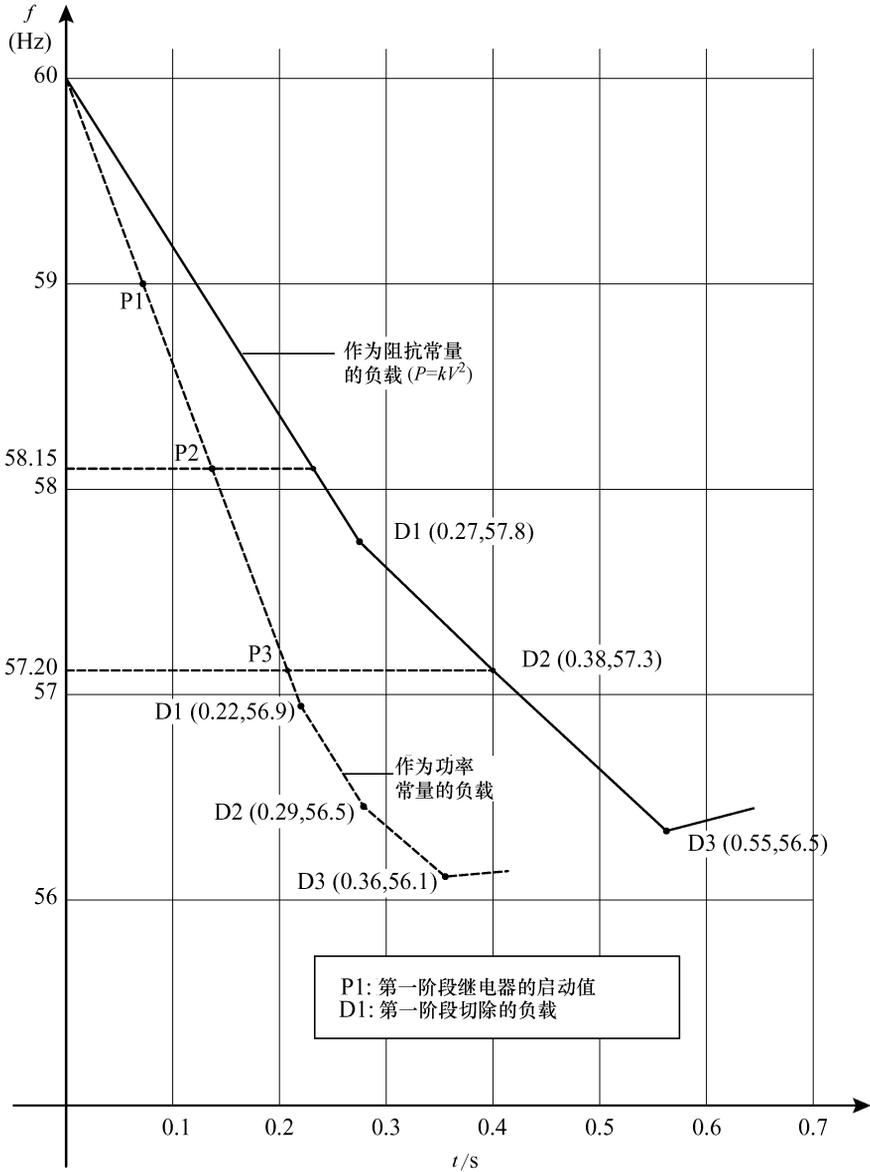


图 11.3 切除负载时的频率变化

要得到表 11.4 中的值，就必须记住，最初的过载为 16MW，那么有

$$\frac{df}{dt} = \frac{-16\text{MW}}{2GH} \times 60\text{Hz} = -13.45\text{Hz/s}$$

因此，第一阶段的启动时间为

$$t_p = \left( \frac{60 - 59}{13.45} \right) \text{s} = 0.074\text{s}$$

和第一阶段负载切除有关的断路器分断时间为  $t_d = (0.074 + 0.100 + 0.05) \text{ s} = 0.224 \text{ s}$ ，此时的频率为  $f = 60 - 13.45t_d = 56.9 \text{ Hz}$ 。其他阶段的负载切除可以用相同方法计算，如表 11.4 所示。

#### 11.4.6.2 由于电压降引起的负载下降模型 ( $P = kV^2$ )

使用稳态程序来设置负载最初的情况，模拟  $t = 0 \text{ s}$  时刻电源断开、随后频率继电器动作切除负载的过程。

计算机负载模型采用了导纳常数，其模型的频率特性如图 11.3 所示。由于电压下降，负载功率减小，所以这一方法没有功率常量模型严酷。过载减轻时，降低的频率比采用第一个模型时要少。尽管频率最小值最终达到了  $56.55 \text{ Hz}$ ，比预定的最低频率  $56 \text{ Hz}$  要高，但频率继电器的整定值导致断路器的跳闸速度大大降低，如图 11.3 所示。由图 11.3 所示和稳态程序的计算结果可知，第三阶段负载切除后的频率恢复速度为  $0.67 \text{ Hz/s}$ 。这意味着要恢复到额定的  $60 \text{ Hz}$ ，大约需要  $2.345 \text{ s}$ 。

使用上述两种方法建模，可以得到频率随时间变化的图形，对应着系统最恶劣和最极端的情况。这两种模型获得的曲线就画出了电网电源断开前系统的动作区域。

#### 11.4.6.3 电源完全断开的电压分析和负载切除系统的动作

系统电源断开不仅会使频率降低，还会引起电压降低。自动负载切除系统应能够阻止系统电压过低，系统电压过低会引起工厂的电机接触器分断。

对系统的电压水平应进行检查，步骤如下：

- 采用潮流计算程序，确定每条母线的初始电压。
- 确定电网电源断开后及负载切除系统动作后的每条母线的电压变化。此时采用暂态稳定性程序，来获得每个负载切除阶段的母线电压。
- 画出重要负载供电母线的电压随时间变化的曲线。

## 第 12 章 保护方案和变电站设计图

前面的章节详细介绍了各种类型的保护继电器的特性和组成。本章主要介绍组合型继电器，用于保护系统设备的不同部分；此外还简要介绍了变电站设计图。变电站设计图对于理解继电器应用背景是很有帮助的。

### 12.1 保护方案

准确定义配电系统的保护方案有一定困难，每种情况都有大量的方案可选，但是可以给出一些方案作为系统各设备保护的指导。任何一个保护方案都要在技术性和经济性中寻求平衡，如成熟完善的保护设备一般不会用于小型或者次要的器件中。

#### 12.1.1 发电机保护

发电机保护应考虑发电机的重要性及其技术特性，如功率、电压、接地方式及经济因素等。复杂的保护方案可以在任意故障状态下保护发电机。但是这对于所有的电站来说是不太现实的，尤其是小型的发电单元。因此，就需要针对各种不同规模的发电机定义不同的保护方案。

基于制造厂的建议，下面给出两个发电机保护方案。

##### 12.1.1.1 小型发电机

对于不到  $5\text{MV} \cdot \text{A}$  的小型发电机，有必要考虑以下保护：

- 内部故障保护；
- 外部保护的后备保护，外部保护采用带有电压限制的过电流继电器；
- 反向功率保护；
- 采用过电流继电器的接地故障保护；
- 采用热继电器的过载保护。

图 12.1 所示为小型发电机的保护方案（继电器类型见本书 3.1.4 节）

##### 12.1.1.2 大型发电机

对大于  $5\text{MV} \cdot \text{A}$  的大型发电机，保护方案如图 12.2 所示，通常包括以下几项：

- 涵盖内部故障的差动保护；
- 采用高阻抗继电器的接地故障保护；
- 后备保护采用带有电压限制的距离或过电流保护；
- 反向功率保护；
- 负序保护；

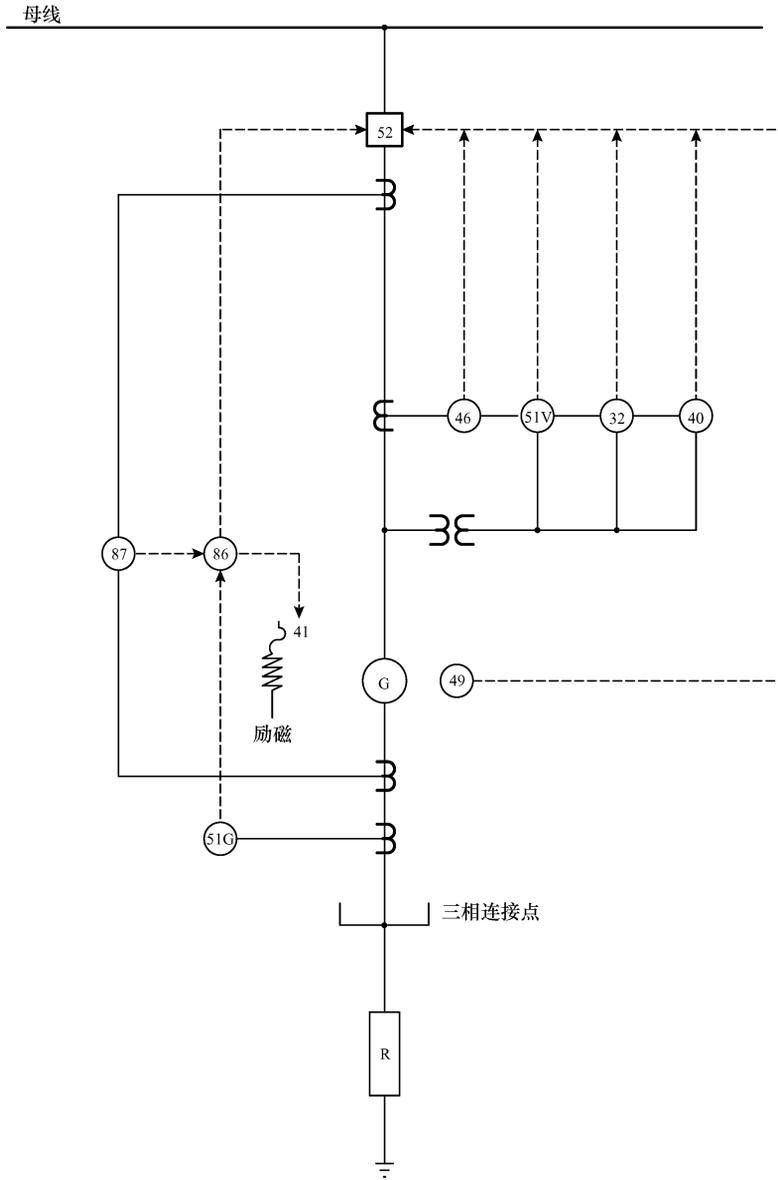


图 12.1 小型发电机的保护方案

- 失磁保护；
- 采用热继电器的过载保护。

### 12.1.2 电动机保护

电动机的保护数量和类型与电动机的重要性、潜在的危险、运行方式、保护配

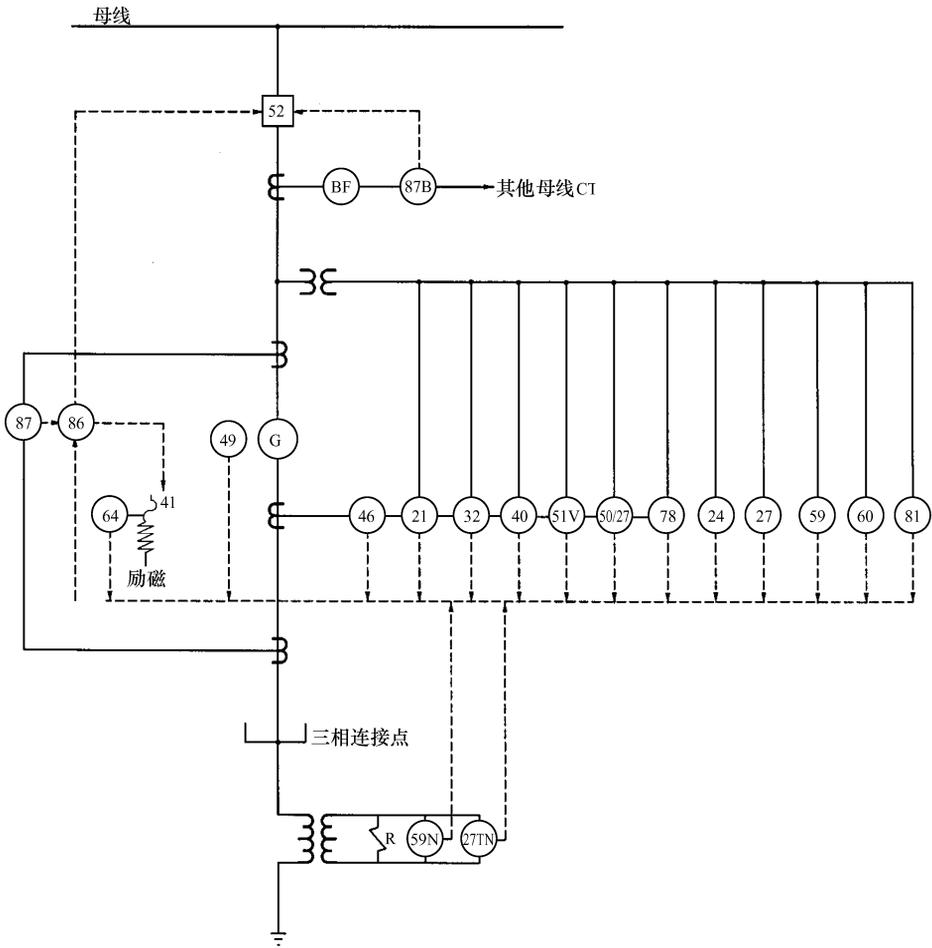


图 12.2 大型发电机的保护方案

合的要求及保护方案的成本有关。此处介绍的保护方案具有一定的代表性和实用性，是世界范围接受的对不同功率的电动机保护的建议，主要分为以下四种类型：

- 低功率电动机保护（低于 100hp）；
- 低于 1000hp 的电动机保护；
- 大于 1000hp 的电动机保护；
- 同步电动机的附加保护。

相关各图没有标明各电动机的启动设备。

### 12.1.2.1 低功率电动机的保护

低功率电动机保护通常由熔断器和热过载继电器（配有双金属元件）组成，熔断器保护如图 12.3 所示；断路器有电磁元件可以在短路情况下瞬时分断时，保护由低压断路器和热过载继电器组成，如图 12.4 所示。

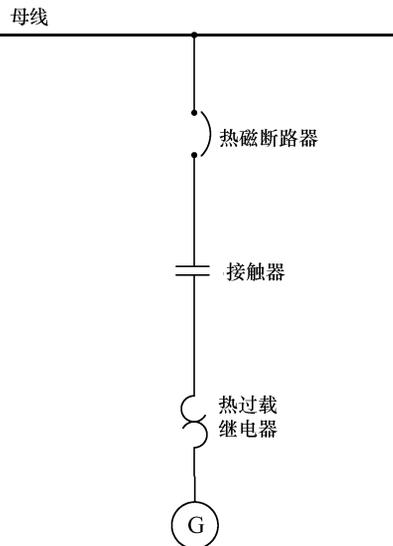
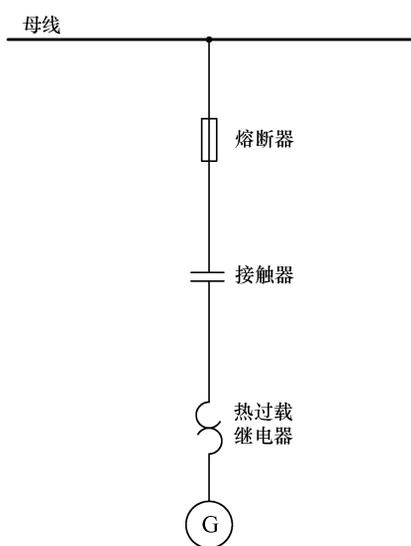


图 12.3 低功率电动机的熔断器保护方案 图 12.4 低功率电动机的低压断路器保护方案

### 12.1.2.2 低于 1000hp 的电动机保护

保护方案应包括过载和短路情况的过热保护（49/50）、转子（51）锁定保护、接地故障保护（50G），如图 12.5 所示。

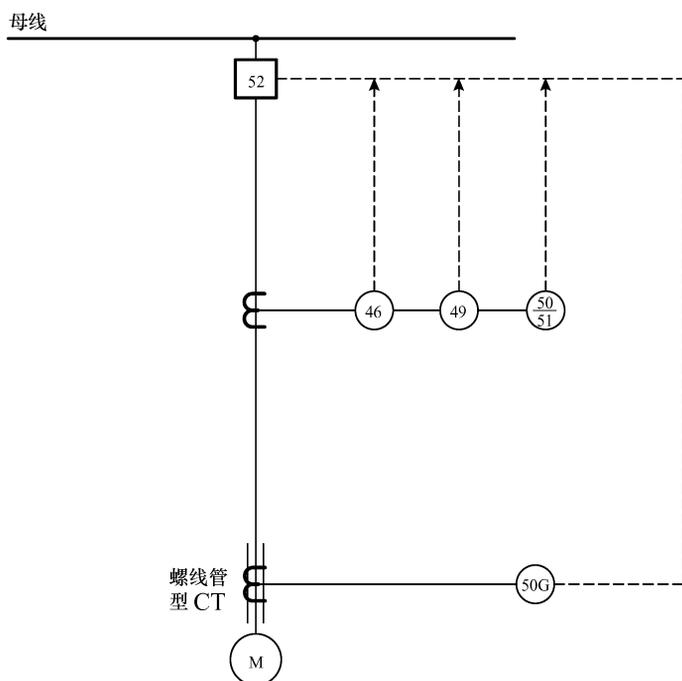


图 12.5 低于 1000hp 的电动机保护方案

### 12.1.2.3 大于 1000hp 的电动机保护

图 12.6 所示的大于 1000hp 的电动机保护方案包括不平衡保护 (46)、过载的热保护、转子锁定保护 (51)、内部故障的差动保护 (87)、短路的后备保护 (50)、接地故障保护 (50G)。

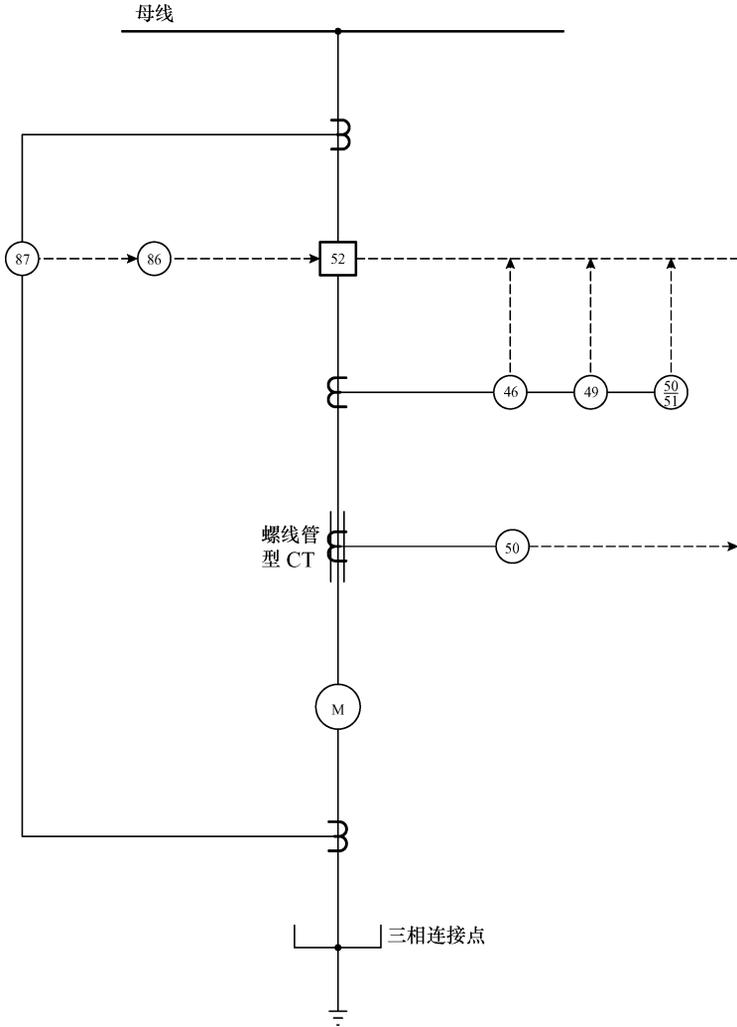


图 12.6 大于 1000hp 的电动机保护方案

### 12.1.2.4 大于 1000hp 的同步电动机附加保护

除了图 12.4 和图 12.5 所示的保护装置外，一个大型的同步电动机还要求有绕组保护、低功率因数继电器 (55) 和低电压保护，以及高/低频率继电器 (81) 保护以防止电动机在低频状态下运转。图 12.7 所示为大于 1000hp 的同步电动机的保护方案。

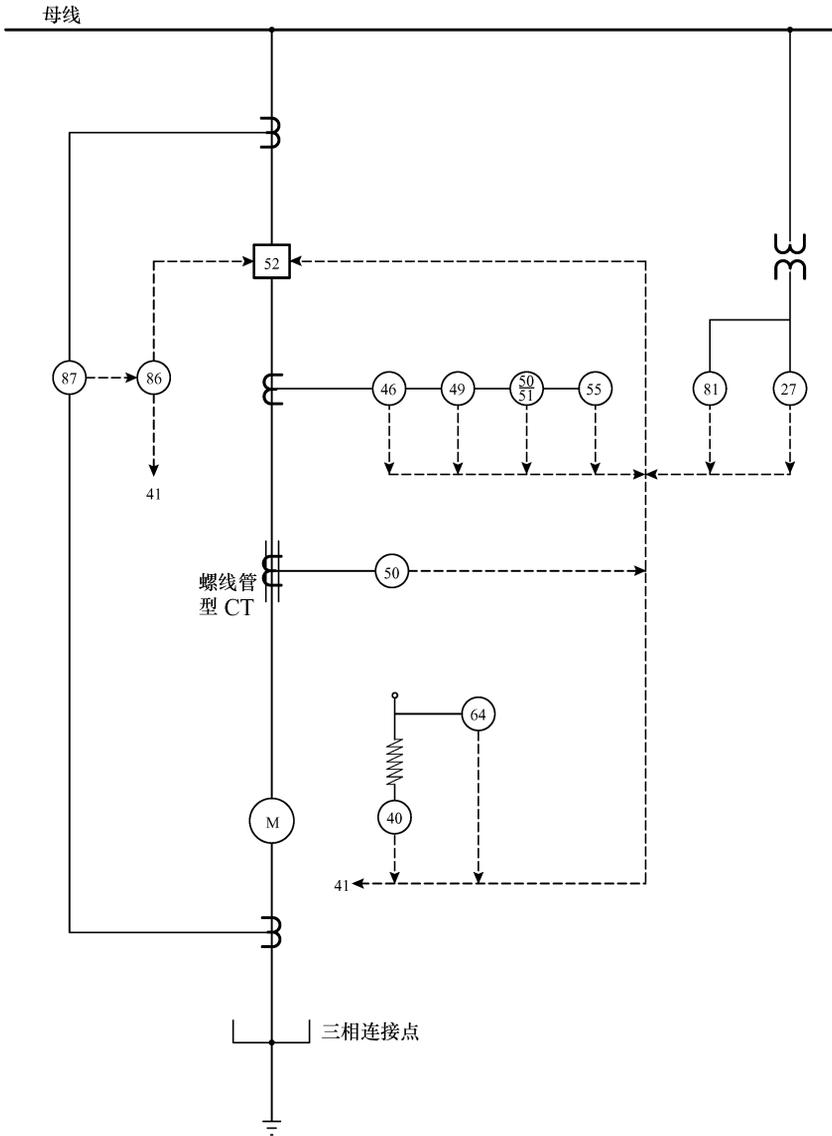


图 12.7 大于 1000hp 的同步电动机的保护方案

### 12.1.2.5 励磁绕组保护

励磁绕组保护要求有接地故障继电器（64）和励磁继电器（40）来应对没有励磁电流的情况。

### 12.1.3 变压器保护

变压器保护应考虑功率、电压、矢量组、在系统中的重要性等因素。根据这些因素的不同，变压器可以归为两类，在本章 12.1.3.1 和 12.1.3.2 节将分别介绍。

### 12.1.3.1 MV/LV 变压器

这种变压器保护应包括 MV 和 LV 绕组的过电流保护、过电压保护（气体保护）和过热保护，如图 12.8 所示。变电站 MV/LV 变压器的典型电压比为 33kV/11kV、34.5kV/13.2kV、13.2kV/4.16kV。

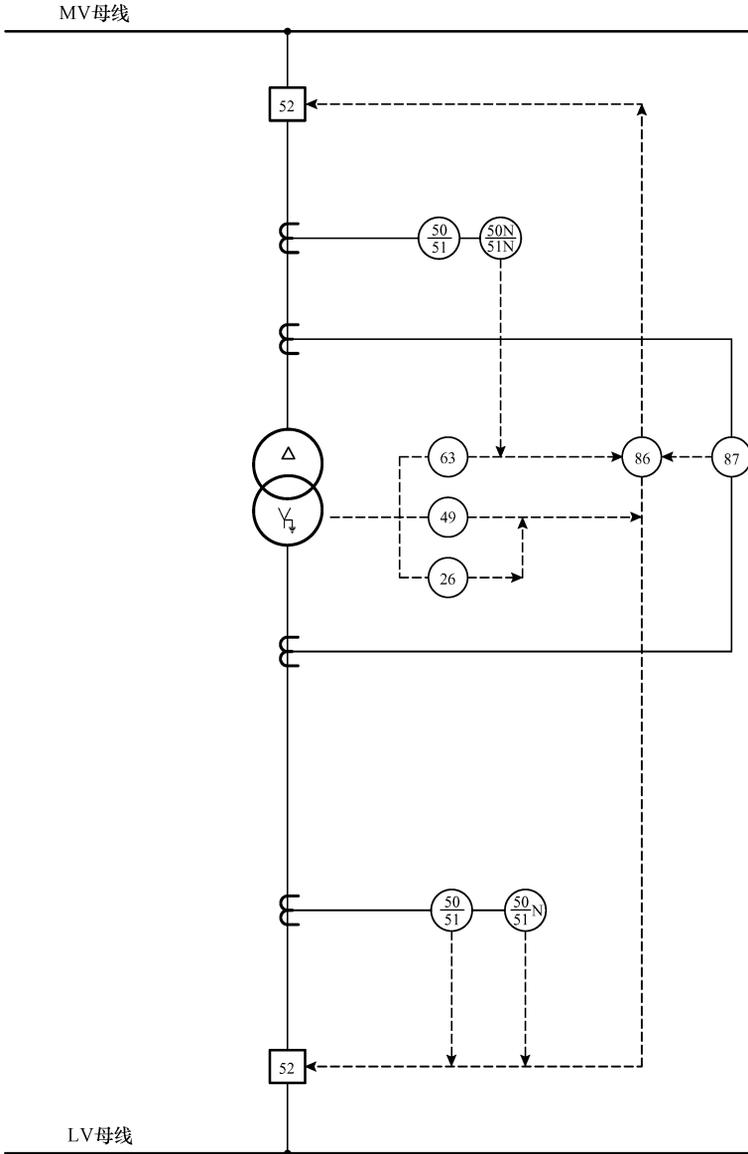


图 12.8 MV/LV 变压器的保护方案

### 12.1.3.2 HV/MV/LV 变压器和自耦变压器

除了 MV/LV 变压器包含的保护外，此种变压器保护还包括差动保护，因为差动保

护可靠性高、动作速度快。如图 12.9 所示，变压器有三个绕组，需要一个三端口的差动保护。图中还包含母线差动保护，通常安装在大型变压器的连接 HV 母线上。变压器有一个 LV 绕组，LV 绕组包含过电流保护。HV/MV 变压器典型电压比为 132kV/33kV、145kV/11kV、132kV/11kV、115kV/34.5kV、115kV/13.2kV。

涉及大功率且电压比在 2:1 左右时，常采用自耦变压器。自耦变压器的典型电压比为 275kV/132kV 和 130kV/115kV。自耦变压器的保护方案和 HV/MV/LV 变压器类似，因为自耦变压器可以看作三个绕组单元。这种变压器的保护基本上和上述一样，仅过电流继电器的连接有所改动（见图 12.9）。

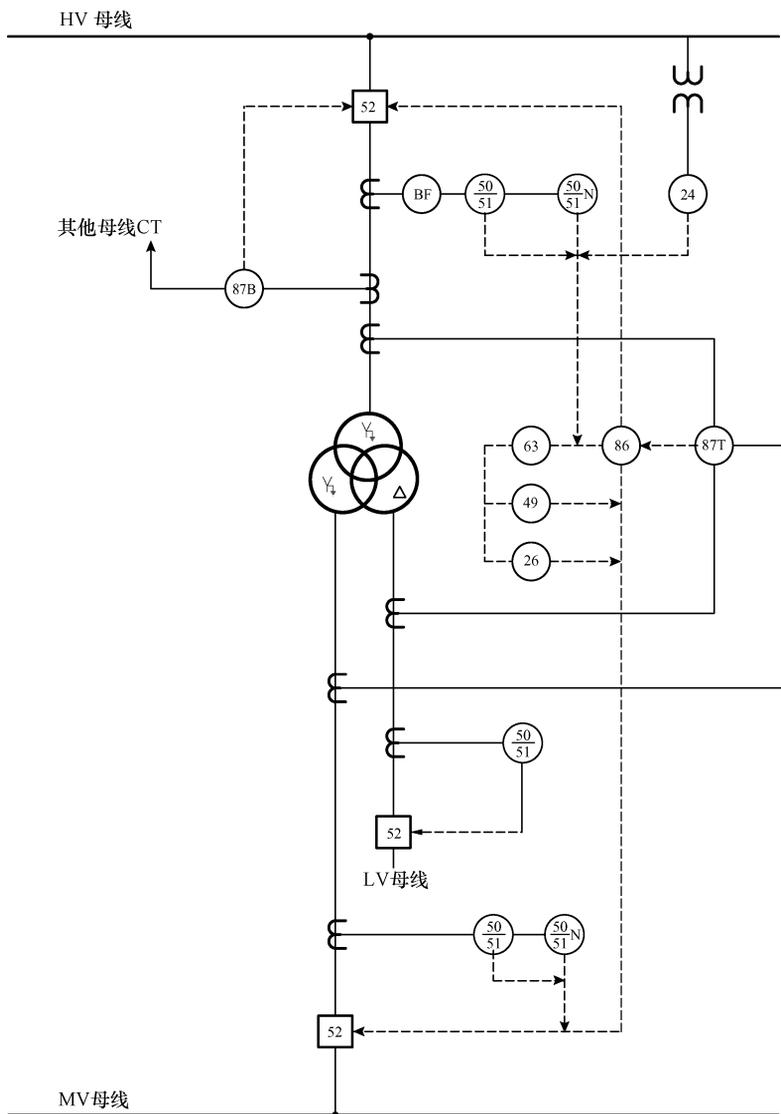


图 12.9 HV/MV/LV 变压器的保护方案

### 12.1.4 线路保护

线路保护包含过电流、距离、方向过电流继电器，取决于运行线路的电压水平。下面介绍其保护方案。

#### 12.1.4.1 MV 线路

MV 线路应采用过电流继电器，MV 环形网络应采用方向过电流继电器，MV 辐射状回路还要采用重合闸继电器。图 12.10 所示为馈线和 MV 环形网络的保护方案。MV 馈线中常采用速断继电器和重合闸继电器。这样就确保了重合闸继电器可以由保护继电器启动，进行重合闸操作。时延单元常用于产生一个定时的跳闸信号，用于不可能有重合闸操作的情况。

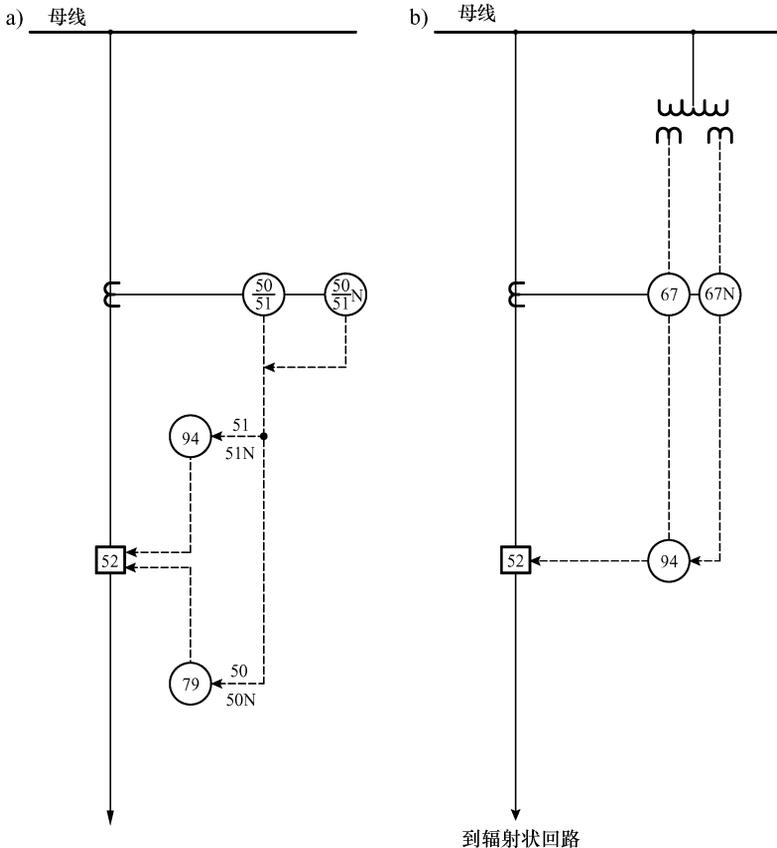


图 12.10 馈线和 MV 环形网络的保护方案

a) 馈线保护 b) MV 环形网络保护

#### 12.1.4.2 HV 线路

HV 线路通常有距离和方向过电流保护，以及载波接收器和重合闸继电器。在重要线路上的保护有时会采用调整后的主保护方案，或者采用其他类型的保护



电气设计范围，使用的基本的示意图就是单线图、变电站设备分布图、AC 和 DC 连接图、二次接线图和逻辑图。以下将对此进行简要介绍。

### 12.2.1 单线图

单线图采用简单的方式和国际通用的符号代表各种设备，如变压器、断路器、隔离开关等，通常采用一根线表示三相连接，显示变电站或网络中设备的布置。图中通常包含了 HV 设备的主要数据。更详细的单线图还包括互感器、保护、测量和控制设备、相关的二次接线等。

### 12.2.2 变电站布置图

变电站布置图提供了变电站每个设备的位置图，包括平面图和正面图。尽管每个供电部门可能有各自的版本，但是由于合同和投标的需要，全球范围内这种布置图都已经高度标准化。图 12.12a 和 b 所示为双 115kV 变电站的总体布置图和 A-A' 正面图。一个变电站连接输电线路，另一个连接局域变压器的 HV 侧，两者中间连接至一条 115kV 的母线。右上角的图 12.12c 为等效的单线图。

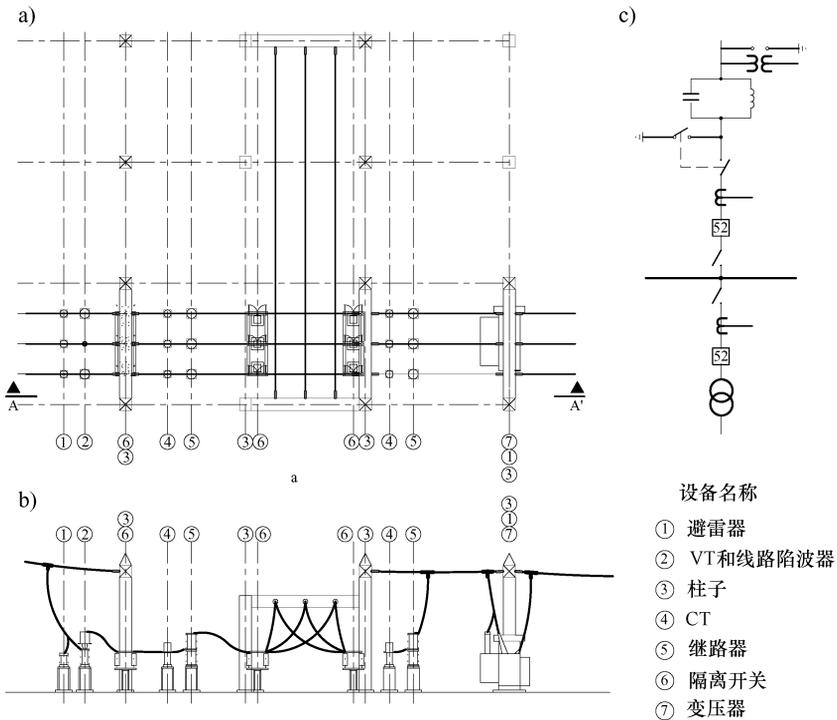


图 12.12 双 115kV 变电站的一般布置

a) 总体布置 b) A-A'正面图 c) 单线图

尽管保护工程师可能不会直接进行布置图的设计，但是布置图却显示了主要设备和相关保护所在位置的关系。例如，电压和电流互感器可能和其他设备分开放置，也可能放在诸如断路器等的高压设备内。这样，保护工程师就可以确保将保护设备安全布置在变电站中。

### 12.2.3 交流连接图

AC 连接图，一般用来表示变电站电力设备的三相布置，以及与测量控制和保护设备相关的 AC 回路。典型变电站的 AC 连接图包含了变电站进线、母线段、母线连接、电力变压器、MV 馈电回路等的信息。此外，还应有图示包含 AC 运行的电动机和加热系统的信息。

AC 连接图的布置应考虑以下几点。每张图都应包含所有相关的设备，断路器、隔离开关和变压器等用图形标记表示。CT 电流回路中，仅画出测量设备的电流线圈和保护继电器，明确显示出哪个线圈连接至哪一相或中性点。图中还应标明设备极性。采用虚线表示设备未来可能的安装布置。

固态继电器应用方块表示，标明端口数及电压电流信号线路的连接方法。存在接地连接时，应在图中标明连接点，如标明互感器中性点为星形联结。

主要的额定特性应标在靠近设备的位置。例如，应提供电力变压器的电压比，额定功率和矢量组；对断路器来说，应标明额定电流和短路电流；还应标明电压和电流互感器的变比、避雷器的额定电压等。图中电压互感器回路应从物理上与其他回路分隔，标明与电压信号连接的线圈。变压器的 AC 示意图应至少包含高压母线和变压器二次套管间的所有设备。

### 12.2.4 直流连接图

DC 连接图显示了变电站的 DC 回路连接，图中应明确绘出 DC 辅助设备的各种连接。图中应包含 DC 运行的断路器、隔离开关、变压器的保护和控制设备、母线、传输线和馈入电源、信号系统、电动机和加热回路、应急照明和插座等的信息。变电站中所有由 DC 系统供电的设备连接都应在图中标明。

正极性电源通常在示意图的顶部，负极在底部，图中的设备都应画在正极母线和负极母线之间。由于变电站保护和控制设备数量很大，通常可以将 DC 连接分为几个不同的功能组，如控制和保护设备，以及其他回路如电动机、加热系统等。

实际中，经常采用水平虚线来表示开关柜内设备和继保设备间的分界线。如果继电器和控制面板的信号采集和控制设备位于图中的某一部位，保护设备位于另一部位，这种情况下分界线很有用。图中每个端口都应有唯一标示。如果可能的话，每个设备的触头、线圈、按键和开关都应画在一起，并用虚线的三角形标出，这样就很容易了解相关的设备及其在回路中的作用。

如果在虚线的三角形中，已经明确显示了设备的动触头和与其他设备的接点，

那么就不用画出保护设备的内部回路。而距离继电器结构较为复杂，就可能需要单独绘制一张示意图，显示它们同 DC 系统的连接及各个端口的互相连接。对于变压器和母线差动保护来说也可能需要另外绘制示意图。

每个电力设备都应有两个 DC 回路：一个为保护设备供电，另外一个独立的回路用于信号采集、断路器及隔离开关的控制。两个 DC 电源应保持独立，并避免在两个电源间连接任何设备。

### 12.2.5 接线图

接线图显示出多芯电缆的内部连接，如开关设备和相关的控制面板，在继电器和控制面板标出装设的各个线路的路径。在变电站建设时期，这些连接图应便于测量、保护和控制设备的连接。连线应根据 AC 和 DC 图来进行。

在接线图中，各个设备的布置应该与实际观察角度相同，从继电器末端和控制面板侧的角度来绘制。每个设备应由图标表示，标明每个端口在面板上的实际位置。用统一的标记表示每个导体和端口连接，根据预定的代码标示每个导体的末端。为了更易于接线和安装，接线图上各个线路的位置应与实际位置相符。并且，以下各个元件需特殊标识：包括端子、端子组、连接开关的多芯电缆、从某端子到继电器和控制面板内的设备的连线、安装在继电器和控制面板中的设备。

#### 12.2.5.1 多芯电缆

每个多芯电缆都应有识别号；此外每个电缆中的每根导体都应编号。通常按电压水平的顺序来进行多芯电缆的编号。这样可以有足够的数字来编号，如每个电压水平乘以 100，即使将来增加电缆，也有足够的空余编号。接线图中，应标识出每个导体的末端。

### 12.2.6 逻辑图

在不同变电站的保护系统中，逻辑图都采用标准化的结构，这样可以用规范的形式，显示出变电站保护系统在意外发生时的动作。图 12.13 所示为某变电站 115kV 线路的保护逻辑图。

### 12.2.7 电缆列表

电缆列表提供了各设备间的多芯电缆的信息，有助于在维护时确认变电站的接线。列表应包含以下信息：

- 多芯电缆的编号、长度、型号；
- 多芯电缆中每个导体的颜色或编号；
- 导线末端的标识；
- 导线末端的设备标识；
- 导线的用途。

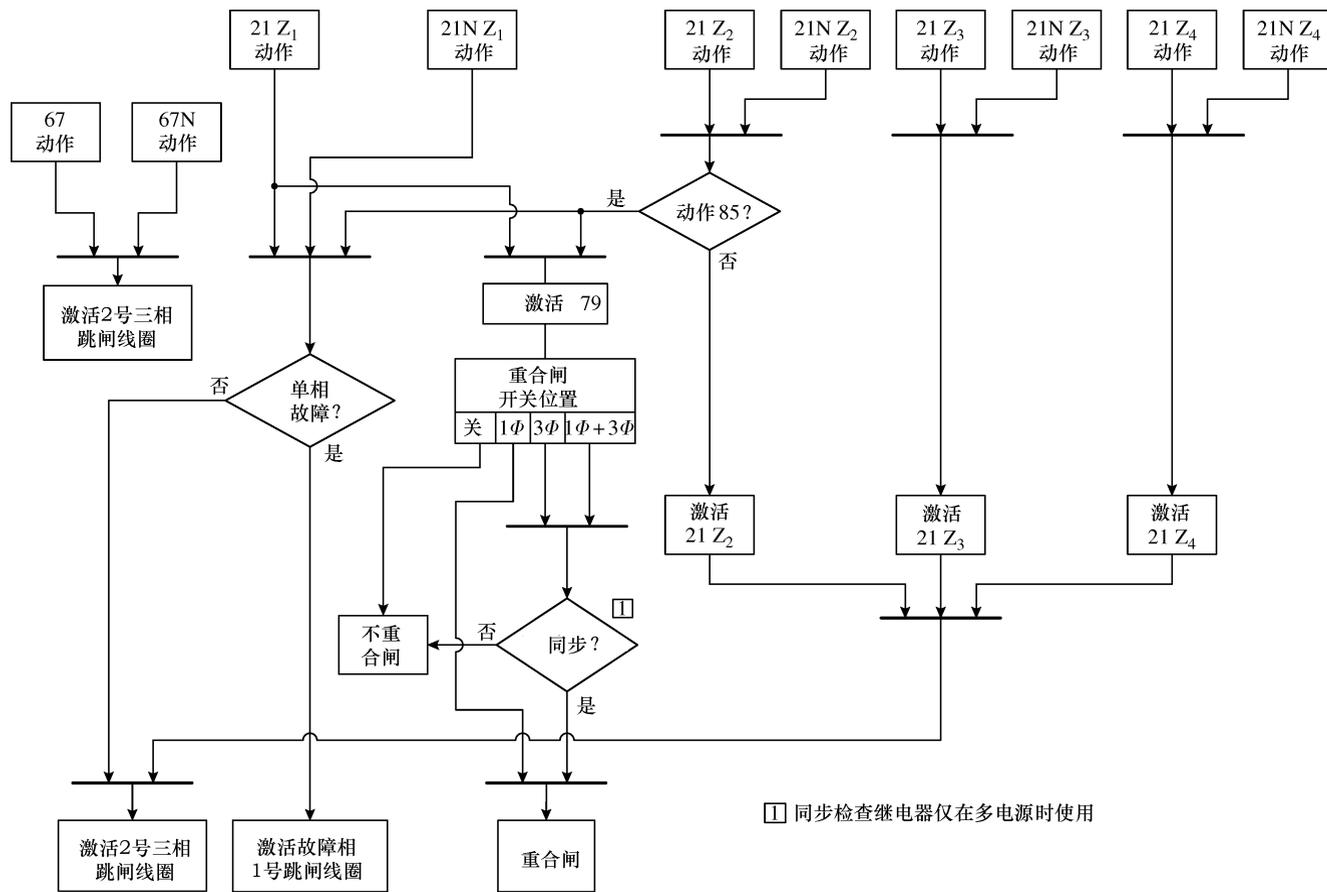


图 12.13 某变电站 115kV 线路的保护逻辑图

## 第 13 章 电力系统自动化的通信网络

电力系统运行方式及设备与以前是一样的，因此保护功能的基本原理也是相同的。但是，近年来随着通信技术和数字技术的发展，出现了更为快速的继电器，保护动作的速度大大加快。

通信技术的发展不仅加快了保护动作的速度，还大大简化了设备硬件，使得设备更为可靠，性价比更高。

因此不仅继保，而是所有电力系统自动化的应用都必须考虑采用现代的通信技术，特别是标准 IEC 61850。

以前设计的变电站都采用单一的保护和控制方案，应用电动或静态继电器，依靠硬件实现控制逻辑。但监控与数据采集（Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA）系统的功能非常集中，仅限于监测回路负载、母线电压、集中报警，控制断路器和分接开关等。干扰记录和事故数据都集中在一起送至变电站。

随着基于微处理器的多功能智能电子设备（Intelligent Electronic Device, IED）的出现，多种功能可以集成在少数几个设备中，使设计更为简化、接线更为简单。此外，由于 IED 通信功能强大，可以远程得到很多信息，因此减少了变电站的巡查工作。

由于微机继保非常适用于已存在的继保网络，节约了可观的费用，因此是非常成功的。一台基于微处理器的 IED 设备可以取代一系列的电磁继电器，并保持外部接线不变，而由集成的继电器逻辑线路取代内部直流线路。用户可以完全控制各个保护功能块。由于与外部设备的连线不变，所以和已有外部设备（互感器、其他继电器、开关等）的交互关系不变。

通过 SCADA 系统的集成，第一代的微机继保比较成功，尤其是终端用户采用一个供应商时。但是，由多个供应商生产的 IED 设备构成的集成系统，在 SCADA 系统中就存在协同工作的问题，需要提供专门的集成方案。

这些系统的供应商还要提供长期的支持和维护。在这期间，出现了两种主要的协议：DNP 3.0 和 IEC 60870。

在 20 世纪 90 年代，为简化变电站保护、控制、监测及对话等各系统的设计，变电站通信架构开始发展。其主要的目标是简化由多个供应商提供的变电站自动化系统（Substation Automation System, SAS），进行高度集成，进一步减少工程量和接线量。由美国电力研究所（Electric Power Research Institute, EPRI）资助的“公共通信体系（Utility Communications Architecture, UCA）”就是这些工作的成果，也

是标准 IEC 61850 的基础。

## 13.1 IEC 61850 概述

EPRI/IEEE 在 1994 年开始专注于变电站总线的 UCA2。1996 年, IEC 第 57 技术委员会 (Technical Committee 57, TC57) 开始编写标准 IEC 61850, 定义了变电站总线。在此基础上, 1997 年又定义了一个通用的国际标准, 整合了前面两部分的工作, 使得所有供应商的设备都可以连接在一起, 分享数据、服务和功能。这就是第 1 版 IEC 61850 《自动化变电站的通信网络和系统 (Communication Networks and Systems in Substation Automation)》。

IEC 61850 于 2005 年发布, 旨在将自动化变电站和远程控制连接中所有的 IED 设备间的信息交换标准化。IEC 61850 为变电站整合提供了一个标准的架构, 明确了通信要求、功能特性、设备的数据结构、数据命名约定、应用间的互相作用、设备控制、如何验证与标准的一致性。

IEC 61850 一直在不断完善, 2010 年发布了第 2 版。第 1 版的 IEC 61850 没有定义 SAS, 但是由于应用范围扩大, 标准中增加了相应内容——由 IEC 61850 第 2 版的名称《电力系统自动化的通信网络和系统 (Communication Networks and Systems for Power Utility Automation)》即可看出。

IEC 61850 越来越多地用于工业用电的配电控制系统中, 以便于设备的整合。在水电和风电领域中, IEC 61850 也开始使用。

IEC 61850 的一些优点如下:

- 减小了对许多协议的依赖性;
- 高度集成;
- 减少了大量的接线, 降低了成本;
- 灵活的可编程保护方案;
- 通信网络取代了以前的连接;
- 先进的管理能力;
- 高速的对等网络通信;
- 改进的安全/整体性;
- 制造和调试安装时间减少。

用以太网 (Ethernet) 光纤取代传统导线, 意味着控制和保护功能不再需要二进制输入和输出。通过 Ethernet 或者光纤传输的面向通用对象的变电站事件 (Generic Object Oriented Substation Event, GOOSE) 信息可以断开断路器, 取代了通过触头断开断路器的传统方法。

## 13.2 IEC 61850 的内容和特点

IEC 61850 包含 10 个文件，覆盖了一个 SAS 需满足的所有要求。但科技发展极为迅速，因此常会有新的变化。下面是在本书写作时，标准的部分内容：

IEC 61850-1 概论

IEC 61850-2 术语

IEC 61850-3 总体要求

IEC 61850-4 系统和项目管理

IEC 61850-5 功能和设备模型的通信要求

IEC 61850-6 与变电站 IED 相关的通信配置描述语言（第 2 版）

IEC 61850-7 变电站和馈线设备基本通信结构

IEC 61850-7-1 原理和模型（第 2 版）

IEC 61850-7-2 抽象通信服务接口（Abstract Communication Service Interface, ASCI）（第 2 版）

IEC 61850-7-3 公用数据类（第 2 版）

IEC 61850-7-4 兼容的逻辑节点类和数据类（第 2 版）

IEC 61850-8 特定通信服务映射（Specific Communication Service Mapping, SC-SM）

IEC 61850-8-1 映射至 MMS（ISO/IEC 9506-1 和 ISO/IEC 9506-2）（第 2 版）

IEC 61850-9 特定通信服务映射

IEC 61850-9-1 通过串行单向多点共线点对点链路传输采样值

IEC 61850-9-2 通过 ISO/IEC 8802-3（第 2 版）传输采样值

IEC 61850-10 一致性测试

IEC 61850 包含如下一些功能：

- 数据建模

- 报告单

- 通用变电站事件（Generic Substation Event, GSE）快速传输，即 GOOSE 和通用变电站状态事件（Generic Substation Status Event, GSSE）

- 命令

- 采样数据传输

- 整定组

- 数据存储——变电站配置语言（Substation Configuration Language, SCL）

**数据建模**

在 IEC 61850 中，实际设备的很多功能都分解为最小的模块，用于不同设备间的

信息交换。这些模块称为逻辑节点。所有变电站的功能都建为模型，成为不同的标准逻辑节点。逻辑节点是实际功能的虚拟表示方法。变电站产生的所有数据，都可以分配到这些逻辑节点中。不同实体设备的几个逻辑节点可以构成一个逻辑设备。

逻辑设备、逻辑节点和数据对象都是虚拟量。它们代表了用于通信的实际数据。一个设备（如控制单元）仅和逻辑节点或者另一设备（如 IED）的数据对象进行通信。逻辑节点所代表的实际数据被隐藏起来，不能直接得到。这种方式的优点是，通信和信息模型不依赖操作系统、存储系统和编程语言。虚拟化变电站如图 13.1 所示，图右侧的设备被虚拟化为图中间的一个虚拟模型。逻辑设备（变电站）中定义的逻辑节点（如 XCBR、断路器）对应于真实设备的常见功能。本例中，逻辑节点 XCBR 表示变电站右侧的一个特定断路器。

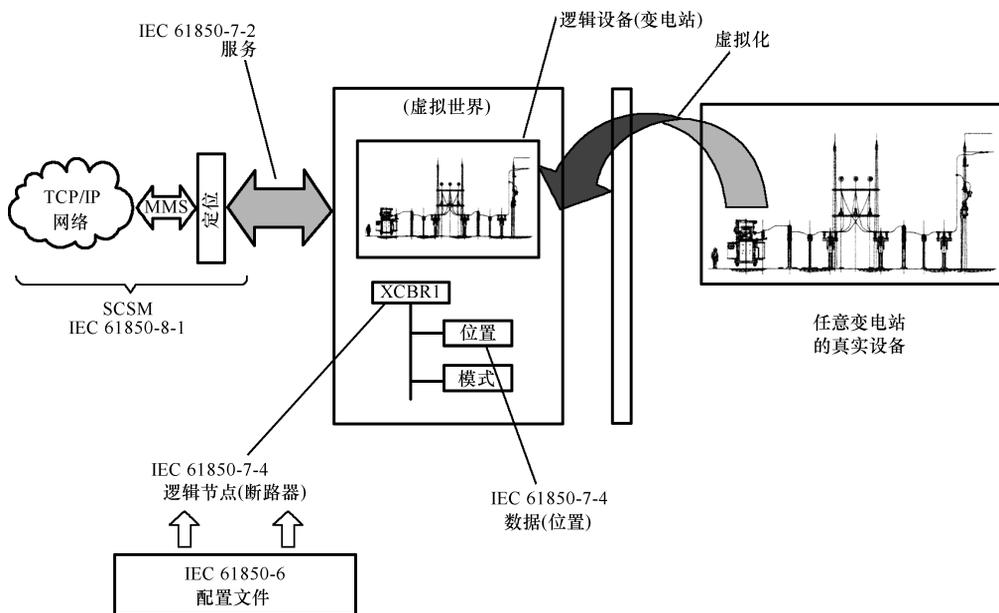


图 13.1 真实和虚拟世界

基于实际的功能，一个逻辑节点包含一系列具有专用属性的数据（如位置）。这些数据有特定的结构和语义。根据定义好的规则和要求达到的功能，数据代表的信息和属性可以通过通信设备进行交换。

为了更清楚地描述逻辑设备、逻辑节点、类、数据概念图，可以将 IED 想象为一个容器，如图 13.2 所示。

容器为一个物理装置，包含一个或多个逻辑设备。每个逻辑设备包含一个或多个逻辑节点，每个逻辑节点包含一组预定的数据类。每个数据类包含许多数据属性（状态值、数值等）。

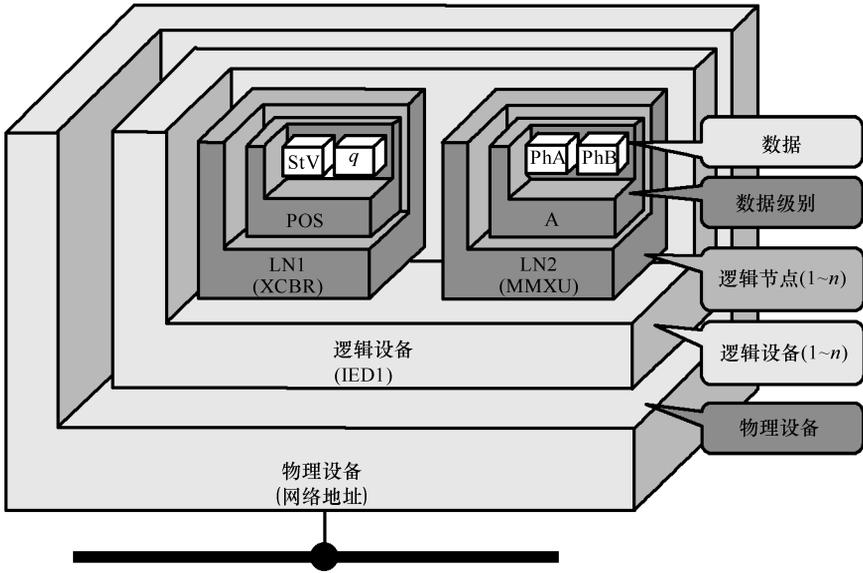


图 13.2 物理和逻辑设备

IEC 61850-7-4 定义了 91 个逻辑节点，分为 13 个逻辑组，如表 13.1 所示。

表 13.1 IEC 61850-7-4 定义的逻辑节点

逻辑组	名称	逻辑节点数量
L	LN 系统	2
P	保护	28
R	相关保护	10
C	控制	5
G	类属	3
I	接口和归档	4
A	自动控制	4
M	计量和测量	8
S	传感器和监视	4
X	开关	2
T	互感器	2
Y	电力变压器	4
Z	其他电力系统设备	15

IEC 61850-7-4 定义的保护逻辑节点如表 13.2 所示。

表 13.2 IEC61850-7-4 定义的保护逻辑节点

名 称	IEEE 保护功能	保 护 功 能
PDIF	87, 87P, 87L, 87N, 87T, 87B, 87M, 87G	差动
PDIR	87B	方向比较
PDIS	21	距离保护
PDOP	32	过功率方向保护
PDUP	32, 37, 40	低功率方向保护
PFRC	81	频率变化率
PHAR	87T	谐波限制
PHIZ	64	接地探测器
PIOC	50	瞬时过电流
PMRI	49R, 66, 48, 51LR	禁止电动机重起
PMSS		电动机起动监测
POPF	55	过功率因数
PPAM		相角测量
PSCH	21, 85	保护方案
PSDE		接地故障灵敏方向保护
PTEF		暂态接地故障
PTOC	46, 51, 60, 64R, 64S, 64W, 67, 67N, 76	时间过电流
PTOF	81	过频率
PTOV	47, 59, 59DC, 60	过电压
PTRC		
PTTR	49, 49R, 49S	热过载
PTUC	37	低电流
PTUV	27	低电压
PTUF		低频率
PUPF	55	低功率因数
PVOC	51V	电压控制时间过电流
PVPH	24	V/Hz
PZSU	14	零速或低速

### 报告方案

一个服务器通过一个服务器-客户端关系来报告数据，并可以基于预定的触发条件进行触发，这种方式的报告方案有很多种（BRCB<sup>⊖</sup>和URCB<sup>⊖</sup>）。

### 事件快速传输

GSE 为对等通信模式下的事件快速传输数据。可以分为 GOOSE 和 GSSE，用 UCA GOOSE 提供向后兼容。

- 
- ⊖ BRCB: Buffered Report Control Block, 有缓存的报告控制块。
  - ⊖ URCB: Unbuffered Report Control Block, 无缓存的报告控制块。

### 整定组

整定组控制块 (Setting Group Control Block, SGCB) 用于处理整定组, 这样用户就可以根据要求转换至任何活跃组。

### 采样数据传输

采用采样值控制块 (Sample Value Control Block, SVCB) 处理采样值的传输。

### 命令

在正常和增强的安全配置下执行命令之前 (Select Before Operate, SBO), IEC 61850 包含方向和选择, 并支持各种命令类型。

### 数据存储

为了完整存储变电站配置数据, SCL 采用一种特定的格式。SCL 最初是针对变电站的, 现在 IEC 61850 规定它还可以用于变电站之外的场所, 因此 SCL 泛指系统配置语言 (System Configuration Language)。

## 13.3 系统配置语言

IEC 61850 是国际标准, 只要继电器遵守 IEC 61850, 那么不同厂商的继电器就可以交换信息。

为了确保设备的互操作性、加强配置功能, IEC 61850-6 介绍了一种通用语言——SCL, 它可以使不同厂商产品间交换信息。

每个专有工具都必须有一个功能, 就是允许将 IED 的描述输出, 转为通用的 XML 语言。IED 能力描述 (IED Capability Description, ICD) 文件包含所有关于 IED 的信息, 使得用户可以配置 GOOSE 信息。

基于 IEC 61850 的项目的开发过程, 主要取决于使用 SCL 语言的软件工具。SCL 规定了一个通用的文件格式 (用以描述 IED 功能), 一个系统特定的标签 (在单线图中), 以及一个 SAS 描述。IEC 61850-6 介绍了 4 种类型的通用文件。这些文件是 ICD、配置的 IED 描述 (Configured IED Description, CID)、变电站配置描述 (Substation Configuration Description, SCD), 以及系统参数描述 (System Specification Description, SSD) 文件。IEC 61850-6 第 2 版介绍了新的“规范 IED 描述” (Instantiated IED Description, IID) 文件。图 13.3 所示为采用 SCL 的完整变电站流程。

可以利用独立于制造商的工具——IEC 61850 系统配置程序, 来进行配置。一些制造商改进了它们的专有工具, 使得这些工具可以在 IEC 61850 系统配置程序中使用; 同时, 还有很多第三方的工具。所有 ICD 文件进入 IEC 61850 系统配置程序, 通过标明信息的发送机 (公布方) 和接收机 (用户), 可以对 GOOSE 信息编程。最后, 整个系统的描述, 包括 GOOSE 信息的描述, 都可以存储在 SCD 文件中。每个专用工具必须能够导入这些 SCD 文件, 提取 IED 需要的信息。从 SCD 文

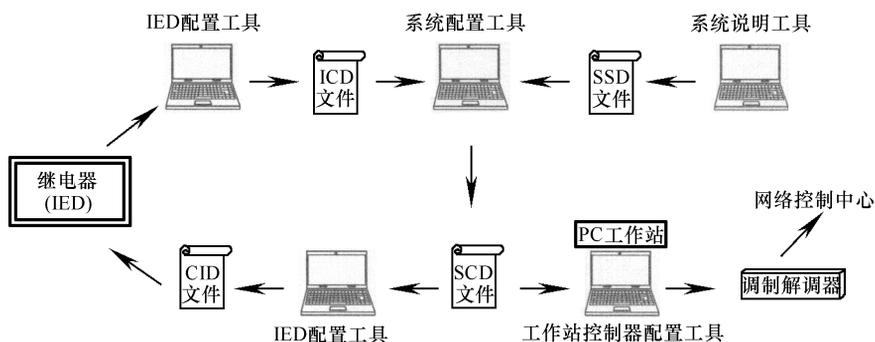


图 13.3 采用 SCL 语言的完整变电站流程

件中提取的信息一般为一个列表，包含 GOOSE 信息、注册的设备、由设备发出的 GOOSE 信息的注册方。

SCL 不能涵盖 IED 的所有功能。实际上，由于各个厂商的设备功能千差万别，IEC 61850 的目的也不是为了将 IED 全面标准化。

除了 IEC 61850 第 6 部分说明的配置信息外，还应该了解，为了配置设备参数，获得所有内部功能，就需要采用制造商提供的专用 IED 配置工具来完成 IED 设备的所有配置。

采用供应商工具可以建立的一些功能如下：

- 逻辑和跳闸公式；
- IED 的 HMI 的图像显示；
- 内部映射；
- 非 IEC 61850 和特定供应商参数。

目前经常需要将笔记本式计算机直接连接到 IED 端口，尽管这种方式似乎迟早会过时，通过 LAN 的远程通信很可能取而代之，但是仍有一些操作需要在继电器侧进行，尤其是在最初安装调试时。同样，可以预见，各个供应商的 IED 配置法仍然会是独特的。尽管已经采取了一些措施，但是随着 IED 设计的不断发展及市场竞争的日益激烈，IED 配置软件的标准化仍然会受到阻碍。

采用专用工具进行的最终配置，可能会有特殊的格式或者标准的 CID 格式，对于每个 IED 可能都会有所不同。现在，很多供应商决定采用具有专用格式的 CID 文件，也有供应商采用类似 ICD 文件的方式来创建 CID 文件。

## 13.4 IEC 61850 设备测试的问题

测试 IEC 61850 设备的困难在于，很多工程师对标准不了解，对测试系统的功能和使用不熟悉。要了解哪些 GOOSE 信息是用于监控的，使用者必须清楚 IEC

61850 中的术语。例如，SCL 文件包含所有关于变电站如何配置的信息，但是最重要的是可以获得哪些 GOOSE 信息。图 13.4 所示为基于 IED 的独立 IEC 61850 设备的试验连接，表明 TRIP-GOOSE 信息如何从一个数字继电器传送到以太网交换机，再传送到系统的保护继电器。

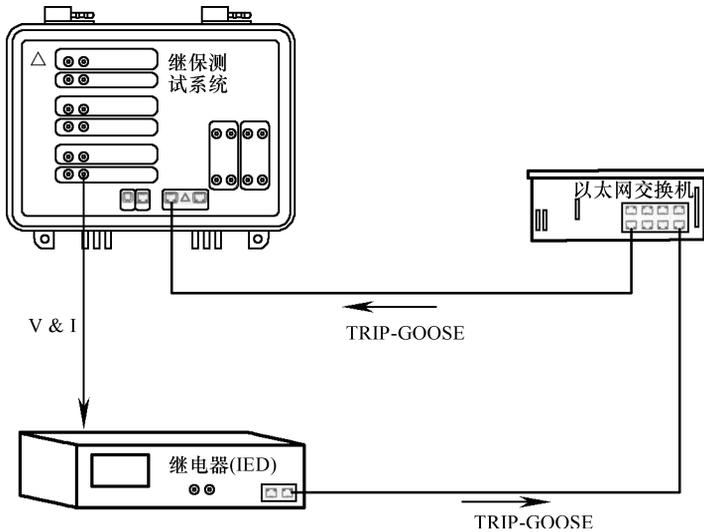


图 13.4 基于 IED 的独立 IEC 61850 设备的试验连接

现代测试系统必须能够通过变电站 LAN 接收和发送 GOOSE 信息。这要求测试系统能够查询网络，在 2ms 内获得正确的 GOOSE 信息，并停止信息进入或中断定时器。同时，测试系统必须读取 SCL 文件，将输入定位至 SCL 中不同的 GOOSE 信息。如果没有 SCL 文件，那么测试系统必须查询网络，显示网络中所有的 GOOSE 信息，允许用户将这些信息定位至测试系统的二进制输入。

例如，用户采用 IEC 61850 标准进行重合闸功能的测试，需要进行以下步骤：首先，他或她将测试系统连接至网络，以确定是否有 GOOSE 信息。这可以通过 SCL 文件来实现。在获得所有感兴趣的 GOOSE 信息后，这些信息被内部定位至测试系统（类似通过测试引线，将继电器的二进制输入和输出连接至测试系统的二进制输入）的二次输入和输出。输入测试值，继电器会动作，并通过 GOOSE 将断开信号传送到网络。

此时，测试系统必须检测到信息并记录分断时间。为了模拟断路器分断，在几个周波的延时后，测试系统将发送一个 GOOSE 信息到网络中，模拟断路器分断状态 (52A)。继电器接收到信息，开始重合闸。一旦超过重合闸时间，继电器将发送另外一个 GOOSE 信息，重新合上断路器。此时，测试系统得到信息发送另外一个 GOOSE 信息模拟断路器合闸。如此循环，直到继电器进行最后一次重合闸为止。这就是测试一个典型 IEC 61850 设备的过程。

## 13.5 GOOSE 信息的配置和验证

本节将介绍如何对一个自动化的 IEC 61850 变电站，进行 GOOSE 信息的配置和验证。使用基于通信的断路器故障图来说明配置过程。图 13.5 所示为系统单线图。

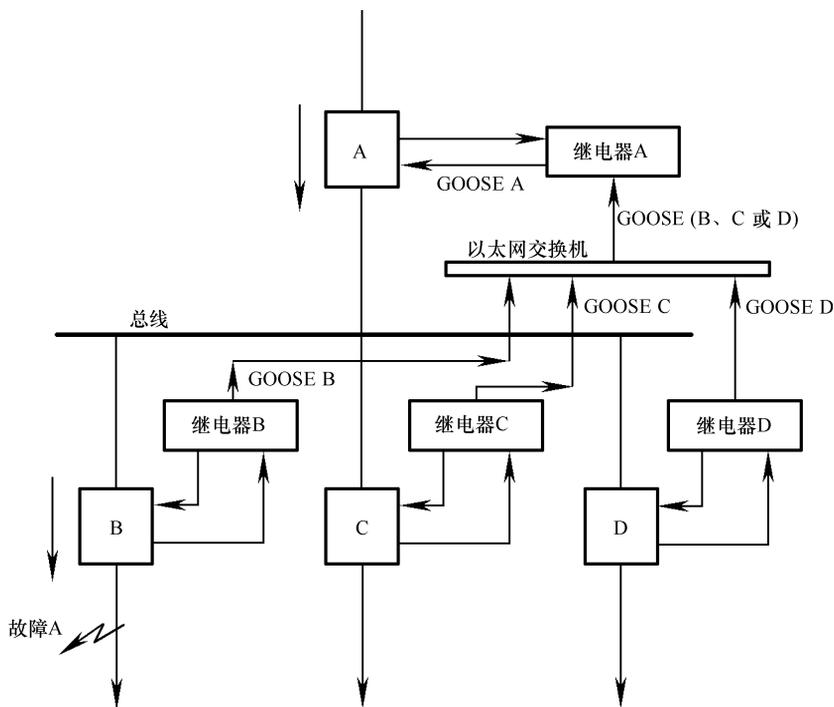


图 13.5 系统单线图

系统有 4 个 IED，由不同供应商提供，图 13.5 所示的继电器 A、B、C 和 D。继电器 B、C 和 D 是主馈线保护，继电器 A 为后备保护。

图中未给出断路器柜中的 IED 设备，它们从各个继电器获取 GOOSE 信息，将其转换为物理输出，使断路器线圈带电。本例中，单线图 A 处发生故障。继电器 B 的瞬时过电流单元将一个跳闸 GOOSE 信号传送至断路器 B。同时，继电器 A 从继电器 B 处接到跳闸 GOOSE 信号，作为断路器故障起始信号。继电器 A 接收跳闸 GOOSE 信号，启动断路器故障计时器，计时器在 10 个周波后停止。如果由于各种原因，没有接收到断路器故障起始信号，断路器 B 就不会分断，继电器 A 将在过电流情况下 15 个周波内固定时间内动作。系统其他 IED 也是如此工作的。图 13.6 所示为断路器故障的逻辑图。

这个逻辑图的编程可以分为两部分。第一部分为各 IED 设备的编程，已获得系统配置所需的 SCL 文件。这些文件包含每个 IED 发布的 GOOSE 信息。有了这些信息，就可以完成整个系统的配置。在进行任何配置之前，创建一个虚拟的线路定

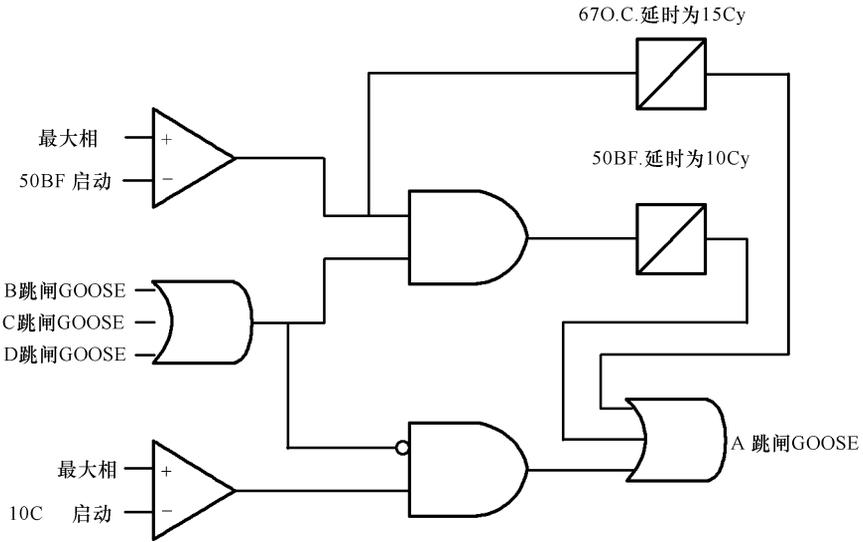


图 13.6 断路器故障的逻辑图

位图是非常实用的。这个定位图显示了配置相关系统所需的信息，并且显示了每个 IED 将会发布和预订哪些 GOOSE 信息。

IED 通过专有配置工具进行配置。配置一个遵循 IEC 61850 的保护方案的最大难题就是熟悉不同的 IED 配置软件包。非常重要的一点就是要熟悉每个配置工具是如何工作的。长远来看，这样可以节省时间，尤其是在配置系统方案时。配置 IED 的主要目标就是获得系统配置所需的必要 SCL 文件。图 13.7 给出了配置 IED 的配置工具的例子。

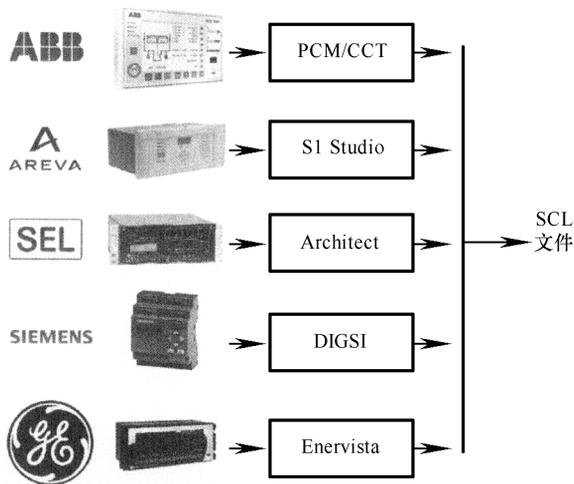


图 13.7 配置 IED 的专用配置工具

SCL 文件提供了整体的信息，包括如何配置继电器，但是最重要的是 IED 要发布和预定哪些 GOOSE 信息。配置过程从配置 IED 开始，这些 IED 发布和预定最少数量的 GOOSE 信息。

IED 配置好之后，就输出 SCL 文件。如此循环，直到所有相关 IED 配置好，生成 SCL 文件。

如果需要的话，还可以用一个简单的测试来验证发布的 GOOSE 信息是否正确。连接网络分析仪，在网络中捕捉 GOOSE 信息，这样就可以进行测试了。

由于 IED 配置的差异，还有一些 GOOSE 配置的细节没有介绍。比如，有些 IED，通过 Generic GOOSE I/O (GGIO) 来发布 GOOSE 信息，有些则通过保护节点如 PDIS 或 PTOC 来发布。这些差异有时会导致 IED 中 GOOSE 信息的固定时延。为了避免这个问题，建议阅读 IED 的使用手册，确认 IED 在哪里发布高速 GOOSE。

### 13.5.1 系统配置

要配置系统，必须获得所有的 ICD 文件。这些文件要用于系统配置工具或 IED 个体配置工具中。系统配置可以采用变电站配置工具。这种工具输入所有系统配置所需的 ICD 文件。变电站配置工具生成一个 SCD 文件。另外一种方法是打开 IED 的配置工具，预定 GOOSE 信息。

例如，将所有 ICD 文件引入配置工具，就可以完成继电器 A 的配置。ICD 文件作为 IED 类型的临时文件，可以多次作为建立一个系统的示例（如每个馈线）。

系统配置好后，应进行系统验证试验。验证试验可以发现系统配置中的问题。系统第一次配置时，可能会出现一些配置中的问题。这些问题常是由于 IED 配置的差异造成的。一些 IED 要求手工操作，而另外一些 IED 则自动化程度更高。

### 13.5.2 系统验证试验

系统验证试验可以发现系统的配置冲突。试验所需的工具为网络分析仪（软件）和符合 IEC 61850 的现代测试设备。测试设备必须能够通过变电站 LAN 接收和发送 GOOSE 信息。这就要求测试系统能够询问网络，要求获得正确的 GOOSE 信息，在几乎不影响时间的基础上停止定时器。

## 13.6 变电站 IT 网络

由于变电站通信在电网的保护和控制中起着极其重要的作用，对于保护工程师来说，了解 IT 网络的基本原理是非常重要的。保护工程师还必须了解相关设备的特性，如以太网交换机、以太网端口和路由器；以及相关术语，如 LAN、VLAN、MAC 地址、网络拓扑、延迟时间、优先级标签、防火墙等。

由于很多保护工程师们都没有认知到了解 IT 网络特性的必要性，使得许多有

着多年经验的保护工程师都会觉得 IT 网络问题很多并且很难。在现代变电站中，为了使其运行可靠、稳定、安全、易维护，了解以太网交换机同了解保护继电器特性是同样重要的。

### 13.7 过程总线

IEC 61850 的第 9.2 部分定义了过程总线。过程总线是变电站中所有模拟信号的数字化传输途径。通过连接所有电流互感器、电压互感器和控制电缆到合并单元就可以实现。合并单元将模拟信号转为二进制信号，并通过过程总线发送至所有预定该信息的设备中。这是一项新的技术，很多厂商还不能实现；但是实际上已经有一些示范工程采用了这一技术。图 13.8 所示为全部使用 IEC 61850 过程总线和站用总线的变电站网络。

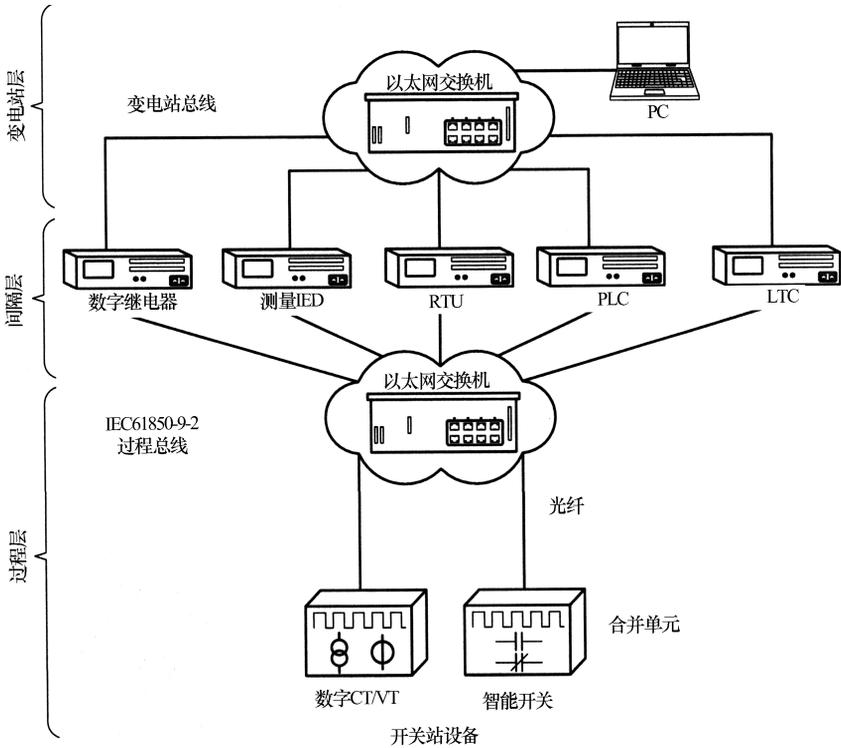


图 13.8 全部使用过程总线和站用总线的变电站网络

# 第 14 章 保护系统的安装、测试和维护

尽管本书的主旨是提供一些基本的信息，以确定配电网络适用的继保整定方案，但是还是有必要介绍一些保护系统安装、测试和维护方面的内容。无论继保方案多么完美，如果不能确保实际工作时的正常运行，这个方案都是无意义的。在此要特别强调保护方案不仅包括继电器，还包括 CT 和 PT，以及故障发生时接收跳闸信号断开回路的断路器。

## 14.1 保护设备的安装

继保的安装应按照制造厂商提供的服务手册来进行。继电器装在控制面板上，安装环境应没有灰尘、湿气、过度的振动和高温。旧式型号的继电器可能装在面板上或者箱体内部。多功能继电器一般装在标准的 19in<sup>⊖</sup> 的箱架内。箱体高度随支架数目而不同，一般为 2~5 个支架单元。支架长度取决于继电器的型号。有些型号的继电器可以直接在箱体内部测试；有些继电器还需要外接设备才能在箱体内部测试。图 14.1 所示为 HV 和 MV 变电站保护系统控制面板的典型布置。其尺寸是很多厂商典型设备的尺寸。

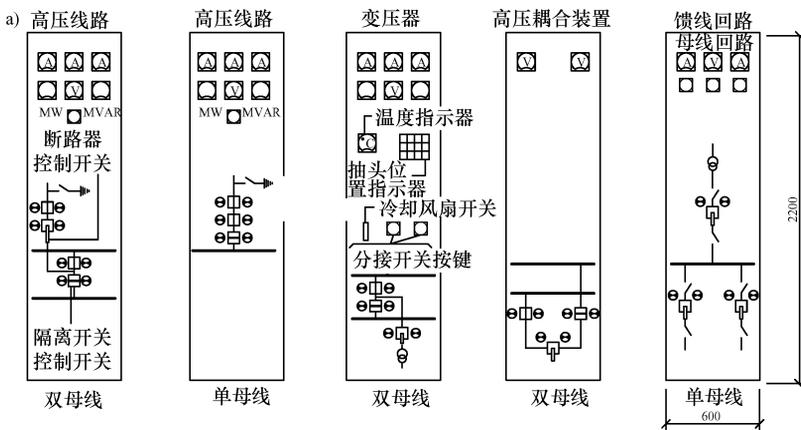


图 14.1 HV 和 MV 变电站保护系统控制面板的典型布置

a) 面板正面视图

⊖ 英寸，1in=2.54cm。

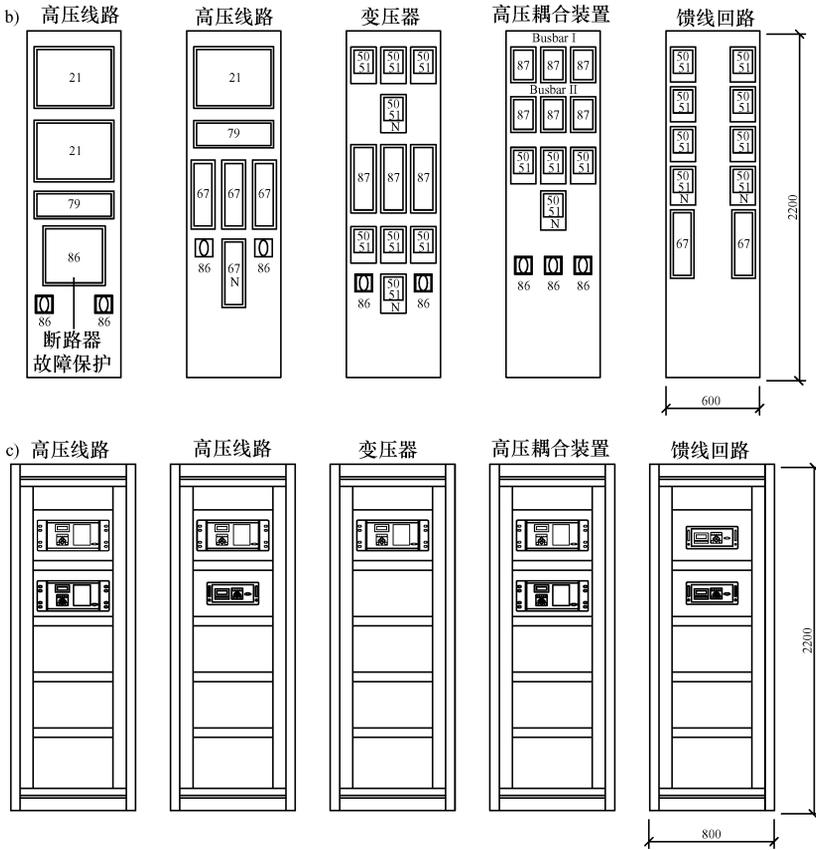


图 14.1 HV 和 MV 变电站保护系统控制面板的典型布置 (续)  
 b) 带有电磁继电器的面板后视图 c) 带有数字继电器的面板后视图

继电器端口的电气连接，应尽可能采用软性绞铜线，端口的设计应确保直接连接时没有电阻。应特别注意 CT 一次绕组流过电流时二次回路不得开路，因为这样二次电压过高会损坏继电器、连线和 CT。在测试继电器之前，应去除制造厂商在运输过程中为防止移动部件晃动而放置的所有机械固定部件。

## 14.2 测试保护方案

保护设备的测试分为以下三种类型：

- 工厂测试
- 安装前测试
- 周期维护测试

### 14.2.1 工厂测试

在保护设备交货和投运前，继保制造厂商要对所有设备进行测试。因为继保设备必须在系统异常情况下动作，那么对继保设备最基本的要求就是要确保在这些情况下正常动作。在设备制造和验证阶段，通常要模拟实际运行情况对设备进行测试。这些测试应模拟可能发生的最严酷的情况，以确保保护设备在经过了运输和安装过程后，在变电站可以正常运行。

工厂运行测试可以分为两部分：一部分是对继电器参数进行测试；一部分是模拟实际环境，如温度、振动、机械撞击、电脉冲等情况。某些工程中，两部分的测试可以同时进行。

### 14.2.2 安装前测试

最重要的安装前测试和在线检查包括以下几项：

- 分析接线图，确认连接线的极性、正序和负序旋转等；
- 设备的一般检查，确认继电器和面板端口的所有连接；
- 测量保护设备的绝缘电阻；
- 继电器检查和二次输入测试；
- 测试电流互感器；
- 检查保护设备的跳闸和报警回路的运行。

应认真计划安装前的测试，确保测试顺序合理而高效，这样在后面的试验中就不用重复对试品进行测试。在开始测试前，要确保所有特殊部件的安装已经完成。此外，试验项目应按时间顺序安排，并考虑到所有的注意事项。下面简单介绍一些常见试验项目。

#### 14.2.2.1 绝缘电阻测量

试验应采用 1000V 的绝缘电阻表（俗称兆欧表）。绝缘电阻值很难获得一个精确的值。天气会对结果有一定的影响——潮湿的天气电阻值低，干燥的天气电阻值可能会高。

#### 14.2.2.2 二次输入测试

这一测试的目的是为了重现继电器的运行状态，测试仅限于保护功能，那么理解继电器操作手册（应用、操作、技术特性、安装和维护）就非常重要。为了进行试验，需要采用试验插头或者将继电器从箱体内取出，才能将继电器与其他部分电隔离。尽管制造厂商已经对继电器进行了细致的测试，继电器安装在控制面板上以后，还是有必要进行一些现场的检查，以确保在运输和安装过程中设备没有损坏。实际进行的测试项目根据继电器型号的不同而异。

进行二次输入测试可以确保继保设备根据预定的整定值运行。在进行试验前，必须切断继电器的输入和输出。试验设备提供继电器的输入电压和电流，并模拟不

同的故障和运行情况。逐步改变输入信号的幅值，达到继保的启动值，并同时测量继保动作时间。试验过程中，必须监测动作触头情况，以确保继电器按照制造厂商的技术参数和整定值运行。如果要在很多点或角度测量继电器的曲线和特性，用测试仪器可以自动进行测试，非常方便。

现代继电器测试仪可以在软件程序的辅助下，自动进行试验，测试过程更快更准确。此外，继电器故障时间要最小化。图 14.2 所示为继电器测试仪的示例。在进行方向保护测试时，继电器测试仪可以提供输入电压、电流和相位移。因此，继电器测试仪可以进行多种类型的继电器的测试，包括过电流、方向过电流、反向功率、距离、欠电压/过电压单元等。

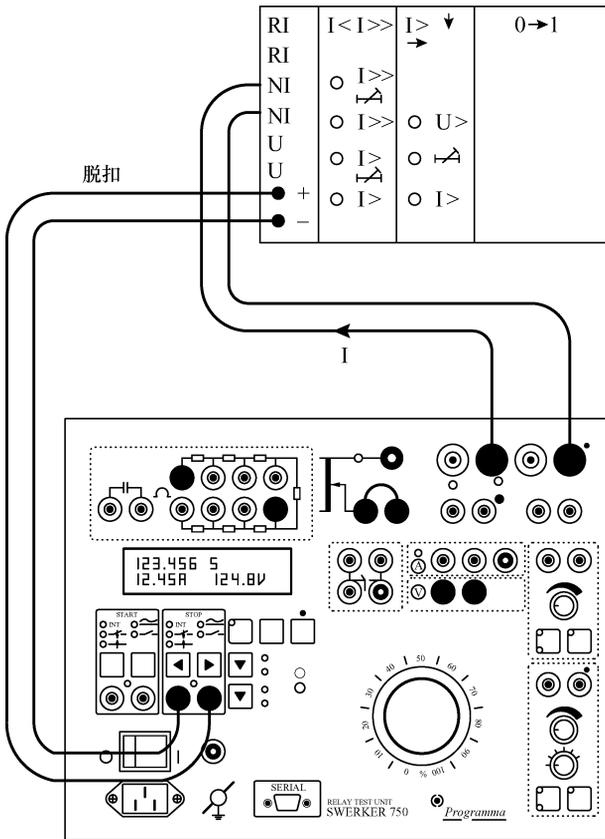


图 14.2 继电器测试仪的示例 (Programma Sverker 750)

非常重要的一点是要记录所有的测试结果，每种继电器测试最好有专用的表格。例如，如图 14.3 所示，过电流继电器的安装前检测应包含以下信息：

- 继电器供电回路的基本数据；
- 试验进行前的整定值，整定值根据保护配合的原则设定。这一信息应包含启

动电流，时间整定值和瞬时整定值；

检测报告		日期:		检测人:			
项目:		50/51-50/51N相地过电流继电器		批准人:			
制造商: SEL	型号: 551	地点: R-ER-1	出厂编号: 2000263015	回路: R-MSW1-M-B			
1. 整定值							
参数		相别	中性点/接地				
电流互感器[CT一次电流(A)]		600	600				
电流互感器[CT二次电流(A)]		5	5				
51继电器曲线		U4 (极端反时限)	U3 (非常反时限)				
51一次启动电流 (A)		520	535				
51抽头		4.3	4.5				
51时间刻度		2.5	2				
50一次启动电流		不使用	不使用				
50抽头		不使用	不使用				
50时间继电器(原波)		不使用	不使用				
2. 相单元测试							
2.1. 过电流启动							
参数		相别	理论值	结果	误差		
启动电流/A		A	4.30	4.30	0.00%		
		B		NA			
		C		4.31	0.23%		
2.2. 动作时间曲线验证参数							
Parameter		启动电流倍数					
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
注入电流/A	固定值	8.60	10.75	12.90	15.05	17.20	19.35
动作时间/s	理论值	4.813	2.788	1.860	1.348	1.033	0.824
动作时间(A相)/s	测量值	4.90	2.75				
A相误差		1.81%	1.36%				
动作时间(B相)/s	测量值	NA	NA				
B相误差		NA	NA				
动作时间(C相)/s	测量值	4.79	2.78				
C相误差		0.48%	0.29%				
2.3. 动作曲线 (极端反时限)							
2.4. 速断启动							
参数		相别	理论值	结果	误差		
速断启动(A)近似值		A	NA				
		B					
		C					
2.5. 速断启动							
参数		相别	理论值	结果	误差		
动作时间 (周波)		A	NA				
		B					
		C					
2.6. 信号传输测试							
试验		相别	信号传输	试验	相别	信号传输	
时间过电流		A	OK	速断过流	A	NA	
		B	OK		B	NA	
		C	OK		C	NA	
3. 使用的检测设备							
4. 评论							
头衔签名 审核      批准							

图 14.3 过电流继电器的检测报告表格

- 校准试验测量的不同时间倍数下的动作时间。应与制造厂商提供的数据进行核对；
- 瞬时单元的测试数据；
- 试验中使用的设备，以及任何相关的观察结果，试验参加人员的详细信息。

需要指出的是，上面提到的测试都是针对稳态的，保护测试仪是采用传统技术的。随着科技的发展，现在有更为成熟的设备，可以模拟非常接近故障情况的信号来进行测试。由于要求继电器在系统故障的暂态情况下作出响应，那么模拟这些暂态情况下进入继电器的信号，就可以得到继电器真实的响应状态。有些厂商可以提供这种保护测试仪，能够进行动态和暂态模拟实验。动态实验意味着多个电力系统同时在各状态间切换，但是不能体现电力系统的一些特性，如高频和直流衰减。暂态模拟实验的信号可以用频率、幅值和持续时间表示出系统故障时继电器收到的真实信号。

#### 14.2.2.3 电流互感器试验

安装保护系统时，建议对电流互感器的以下特性进行测试：

- CT 安装引起的保护范围重叠。当 CT 的安装位置使得一个故障发生的地点会在两个保护区域的范围内时，那么就需要认真检查保护范围的重叠情况。这可以通过肉眼观察。如果肉眼观察比较困难，那么就要在两个 CT 间进行断路检查试验。

- CT 的正确连接。在同一个套管内 CT 有多重组合方式，需要仔细确认 CT 和相应保护的正确连接。有时所有的 CT 都有相同的变比但是特性不同，或者是变比不同但 CT 间距离很近，这时就容易搞错。

- 极性。每个 CT 都应该单独进行检查，并确认一次和二次绕组的极性是否正确。连接至 CT 二次侧的继电器测试仪应为高阻抗的电压表或者动圈式电流表（中间指示为 0）。还应串联一个带按钮的低压电池，为主回路提供能量。如果极性正确，当断路器闭合时，继电器测试仪应有一个较小的正向偏移，断路器断开时为反向偏移。

#### 14.2.2.4 一次输入试验

这个实验检查包括 CT 在内的整个保护系统。主要的目的是确认 CT 变比和所有相关设备的二次接线，以便确保跳闸、信号传输和报警回路的正常运行。

图 14.4 所示为进行一次输入试验示意图。试验电流一般为 100 ~ 400A。一次输入设备的两个端子在图中标为①和②，连接至被试 CT 的两端。

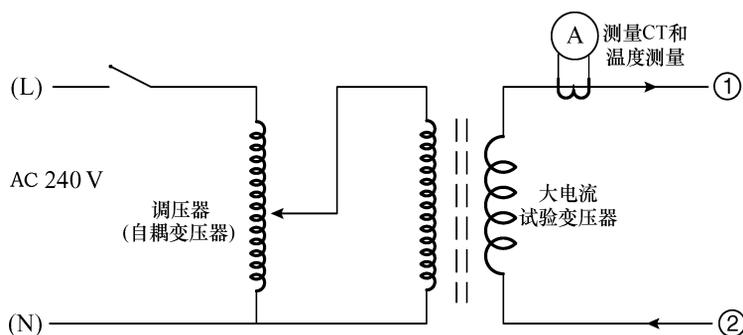


图 14.4 一次输入试验示意图

### 14.2.3 周期性维护

保护设备可能几个月都不会动作；但是，一旦相关的被保护设备发生故障，就要求继电迅速而准确地动作。对保护设备最苛刻的要求之一大概是，在外部但近距离地发生故障时不能动作。为了确保保护设备一直能够正常工作，必须对保护设备进行周期性的维护。

当确定了维护计划后，维护的频率取决于设备每个部分过去的状态和发生故障的可能性。也不需要保护设备进行过多的测试，因为维护计划是为了发现设备故障而不是引起故障。根据保护设备类型的不同，维护的频率区别也很大。有些部件需要连续地检查，有些则可能每周、每月甚至一年才需要检查。

需要维护的设备分为以下几种：

- 保护继电器
- 辅助控制继电器
- 报警系统
- 附加控制设备（手柄、键盘、连锁等）
- 故障记录（独立系统）

对于电力部门来说，限制用电带来的后果可能会很严重，所以设备维护和检修的时间应尽可能缩短，合理安排维护计划，以避免威胁到电能供应。保护设备的维护应尽可能与一次设备检修安排在同一时间。

#### 14.2.3.1 方法

为了达到维护的目的，应制订合理的工作计划和评估机制，并不断修订计划：

- 制订半年或 1 年的维护计划，针对设备每个部分确定维护工作的日期。
- 每半年对维护计划的效果进行评估，得出分析结果。
- 在准备新的维护计划时，要充分考虑之前维护工作的结果，特别是设备每一部分的维护频率。
- 当要求即时维护时，要重新制定预防性维护计划。

- 如果其他设备也要检修，事先与其他维护工作组沟通。
- 为了改进维护效果、降低成本，要对每次维护的结果进行记录分析并存档。

### 14.2.3.2 维护原则

在维护计划中，不同类型的工作可以分为几组并用常用术语表示。预防性维护是基于维护计划的。纠错性维护是指计划外的但需要立即引起注意的维护工作。

此外，还有两种方式，即在线维护和离线维护。在线维护是指，不用将高压设备断电，就可以对继保设备进行检查。离线维护则需要对高压设备断电。

建立维护原则的主要依据如下：

- 制造商的建议
- 故障数据分析
- 网络电压水平
- 继电器或仪器类型
- 被保护设备的重要性
- 维护经验
- 设备之前的运行状况
- 故障类型（如果有故障记录的话）

和电力设备的运行时间相比，继电器的工作时间是很短的，因此继保设备测试的基本原则是以最少的检测得到最佳的运行状态。那么依据环境的不同，维护间隔应尽可能长。检查的间隔要根据多种因素来确定，如设备之前的状态、保护类型（电磁、固态、微处理器或数字等）、被保护设备的重要性、继电器误动作的后果、环境条件等。基于上述因素，根据预防性或纠错性维护工作的不同，可以确定保护设备的维护频率。

## 14.3 安装数字保护

如本书3.4节所述，数字保护是基于多种微处理器开发的，可以编程实现几乎所有类型的保护。和传统继保系统相比，数字保护的优点是可靠性高、体积小、成本低。数字继保整定值的计算方法和传统保护的计算方法是一样的。但是，在检测和安装这种保护系统时与传统继保有很大的区别。采用数字保护时，传统继电器的连线大多被可编程逻辑器件代替，其优点是可以有多种组合和整定值。因此，所有的制造、安装和测试过程的文件中，关于整定部分的内容都要包括可编程逻辑器件的信息。

### 14.3.1 设置参数

设置数字保护的方法和传统电磁继电器有很大的不同。数字保护的参数设定，涉及系统设置、保护、控制、通信、警报、记录等功能。和传统继电器一样，非单



此通常不允许在现场进行校准。在发送给客户之前，制造厂商必须对每台设备进行测试，测试通过后才能出厂。

多数的数字继电器可以通过面板（即人机接口）登录，或者是通过个人计算机的串口连接登录。采用个人计算机登录，可以很方便地进行稳态和动态测试。有些情况下，这是唯一的进行逻辑编程的途径。

在安装数字继电器时，为了确认继电器的状态和动作值在制造厂商规定的技术参数范围内，应采用以下的测试方法。

#### ( i ) 验收试验

传统的验收试验用来确定继电器系统配置、保护、控制、测量、通信、警报和报告功能可以正常工作，并且其响应和制造厂商的技术规范一致。验收试验还可以确认继电器安装是否正确。和传统继保的验收试验相同，数字继保的验收试验包括二次电流和电压测量相关的校准。测试设备可以控制和监视输入的电流、电压、频率、相角关系等。现在，最新的保护测试仪有图形界面的编程软件，可以预设测试顺序，可以储存个人的测试顺序以用于类似的继保测试中。多数的软件界面不要求具备计算机的编程技术，就可以开发自动测试程序。

数字保护典型的常规验收试验步骤如下：

- 断开继电器所有的输入和输出信号。
- 确认极性正确和电源电压。
- 确认所有模拟和数字的输入和输出信号的连线是正确的。
- 绝缘试验。
- 所有硬件元件的功能性试验
  - 二进制输入输出；
  - LCD 显示、LED 和键盘；
  - 通信接口；
  - 其他硬件。
- 根据整定报告设置参数。
- 采用前面提到的方法，输入二次电流和电压对所有的保护功能进行测试。测试时，应禁用或者暂时改动某些部分。
  - 确认运行测量值。
  - 可编程逻辑方案的测试。
  - 目标和输出触头测试。
  - 确认报告和警报功能。
  - 重装/确认在线整定值。

#### ( ii ) 功能试验

验收试验验证了继保可以满足相关的要求后，接着就要进行功能性测试。根据保护类型和逻辑编程方案的不同，每个继保都有特定的测试步骤。数字保护一般的

测试步骤如下：

- 确认外部 AC 和 DC 输入信号。
- 确认外部输入触头。
- 确认跳闸和信号传输。
- 确认远端/转移跳闸。
- 确认和 SCADA 系统（若适用）的互动。
- 根据逻辑整定确认整定组的变化。

如果采用了数字保护先进的测量和报告工具，功能性试验很容易进行，如逻辑状态报告、在线读数、测量数据、事件报告、示波图等。其中事件报告和示波图不仅用于运行测试中，还用于故障维修。

### （iii）动态试验

动态试验中，当分析故障前、故障中和故障后状态时，必须正确调整相量，使之表示电力系统的真实情况。在这一试验中，不会出现如高频和直流分量等那些电力系统的典型特性。在整个试验过程中，相量（幅值和相位）的调整幅度不能过大。

### （iv）暂态模拟试验

暂态模拟的测试信号表示系统发生故障时继电器实际的外部信号，包括频率、幅值和持续时间。这些信号可能包含一个偏置量（DC 偏置）、CT 饱和的影响、暂态电压避雷器的响应等。

### （v）点到点双向测试

点到点双向测试方法用于确认通信方案及电力线的保护系统。标准的点对点双向测试法在线路的每一端采用下列设备：

- 带有适合的通信和暂态模拟能力的三相继保测试仪。
- 为保持时间的同步性，测试仪可以与某一种设备结合使用——GPS 卫星接收器（是目前最常用的方法）、电缆、光纤或电力线。
- 故障模拟计算（如电磁暂态计算程序 EMTP）或取自故障记录仪的实际暂态文件。

电磁暂态计算程序是模拟电力系统中高速暂态效果的计算机程序。程序包含强大的建模功能，包括从微秒到秒范围的振荡时间。

暂态记录仪根据标准 IEEE COMTRADE 《暂态数据交换的统一格式（Common Format for Transient Date Exchange, COMTRADE）》生成图形文件。采用相应的软件，可以将这些文件输入继保测试仪，测试仪能产生相应的信号并输入待测继电器，这样就可以对特定的故障进行详细的分析。

## 附录 习题答案

为了有助于理解答案，这里给出了习题中的原图，此外还有其他的示意图来说明计算过程。

### 习题 1.1 答案

故障  $F_1$  应由断路器 2 和 5 切除；因此断路器 3 和 4 误动，应写在第 3 列。

故障  $F_2$  应由断路器 25 和 26 切除，但是第 2 列中没有列出这两台断路器；因此应放在第 3 列。断路器 21 和 22 应由后备保护断开，第 5 列中显示。故障电流方向与整定方向相反时，断路器 23 和 24 不应断开，因此应放在第 3 列。由于断路器 25 没有动作，故障最后由后备保护断路器 27 切除，那么在第 5 列中就列出了断路器 27。

故障  $F_3$ ，应由断路器 11 和 17 分断，如第 2 列所列。那么断路器 10 和 19 的分断就是没有必要的，这两个断路器应列在第 3 列。

完整的动作情况如表 A.1 所示。

表 A.1 习题 1.1 断路器完整的动作情况

案例	动作的断路器	误动或失灵的断路器	由主保护断开的断路器	由后备保护断开的断路器
$F_1$	2, 3, 4, 5	3, 4	2, 5	—
$F_2$	21, 22, 23, 24, 27	25, 26, 23, 24	—	21, 22, 27
$F_3$	10, 11, 17, 19	10, 19	11, 17	—

### 习题 5.1 答案

为了得到正序网络图，计算短路电流，在相同的电压等级下计算了所有回路（见图 A.1）的等效阻抗：

$$Z_{\text{source}} = \frac{V^2}{P_{\text{sc}}} = \left[ \frac{(115 \times 10^3)^2}{1400 \times 10^6} \right] \Omega = 9.45 \Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{transf}} &= Z_{\text{pu(transf)}} Z_{\text{base(transf)}} = \left[ 0.048 \times \frac{(115 \times 10^3)^2}{58.45 \times 10^6} \right] \Omega \\ &= 10.86 \Omega \quad \text{折算至 115kV 侧} \end{aligned}$$

$$Z_{\text{line}} = 85.35 \Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

等效电路图如图 A.2 所示。

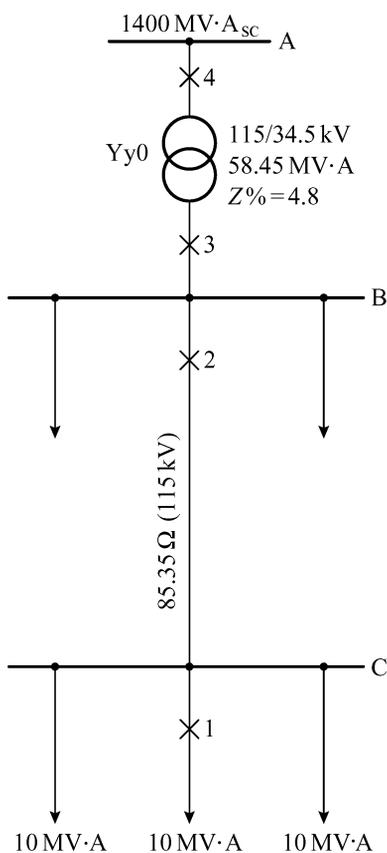


图 A.1 习题 5.1 的示意图

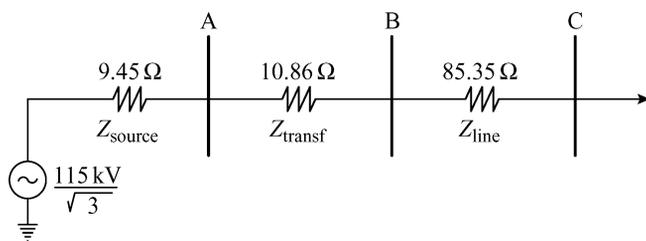


图 A.2 习题 5.1 的等效电路图

计算短路电流

母线 A 为

$$I_{sc(A)} = \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3} Z_{source}} = \left( \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 9.45} \right) \text{A} = 7025.96 \text{A} \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

母线 B 为

$$\begin{aligned}
 I_{sc(B)} &= \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3}(Z_{\text{source}} + Z_{\text{transf}})} = \left[ \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (9.45 + 10.86)} \right] \text{A} \\
 &= 3269.09 \text{A} \quad \text{折算至 115kV 侧} \\
 &= \left[ 3269.09 \times \frac{115 \times 10^3}{34.5 \times 10^3} \right] \text{A} \\
 &= 10896.97 \text{A} \quad \text{折算至 34.5kV 侧}
 \end{aligned}$$

母线 C 为

$$\begin{aligned}
 I_{sc(C)} &= \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3}(Z_{\text{source}} + Z_{\text{transf}} + Z_{\text{line}})} \\
 &= \left[ \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (9.45 + 10.86 + 85.35)} \right] \text{A} \\
 &= 628.39 \text{A} \quad \text{折算至 115kV 侧} \\
 &= \left[ 628.39 \times \frac{115 \times 10^3}{34.5 \times 10^3} \right] \text{A} \\
 &= 2094.62 \text{A} \quad \text{折算至 34.5kV 侧}
 \end{aligned}$$

计算额定电流

$$\text{继电器 1: } I_{\text{nom1}} = \frac{P_{\text{nom1}}}{\sqrt{3}V_1} = \frac{10 \times 10^6 \text{V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 34.5 \times 10^3 \text{V}} = 167.35 \text{A} \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

$$\text{继电器 2: } I_{\text{nom2}} = 3I_{\text{nom1}} = 502.04 \text{A} \quad \text{折算至 34.5kV 侧}$$

$$\text{继电器 3: } I_{\text{nom3}} = \frac{P_{\text{nom3}}}{\sqrt{3}V_3} = \frac{58.45 \times 10^6 \text{V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 34.5 \times 10^3 \text{V}} = 978.15 \text{A} \quad \text{折算至 34.5kV 侧}$$

$$\text{继电器 4: } I_{\text{nom4}} = \frac{P_{\text{nom4}}}{\sqrt{3}V_4} = \frac{58.45 \times 10^6 \text{V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 115 \times 10^3 \text{V}} = 293.44 \text{A} \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

选择 CT 变比

CT 变比选择以下两值中较大的一个:

- 额定电流;
- 没有饱和情况下的最大短路电流 ( $0.05I_{sc}$ )。

根据以上原则计算的 CT 变比如表 A.2 所示。

表 A.2 习题 5.1 的 CT 变比计算值汇总

继电器 编号	$P_{\text{nom}}$ /(MV·A)	$I_s$ /A	$0.05I_{sc}$ /A	$I_{\text{nom}}$ /A	CT 变比
1	10.00	2094.62	104.78	167.35	200/5
2	30.00	10896.97	544.85	502.04	600/5
3	58.45	10896.97	544.85	978.15	1000/5
4	58.45	7025.96	351.30	293.44	400/5

### 瞬时单元的整定

瞬时单元整定值可以在 6~144A 范围内设定, 步进为 1A。馈线上的瞬时单元整定值基于母线 C 的  $0.5I_{sc}$ 。

继电器 1:

$$\begin{aligned} I_{inst} &= 0.5I_{sc(C)} = (0.5 \times 2094.62) \text{ A} = 1047.31 \text{ A} \quad \text{一次电流} \\ &= [1047.31 \times (5/200)] \text{ A} = 26.18 \text{ A} \quad \text{二次电流} \end{aligned}$$

整定值设为 27A, 相当于一次电流为 1080A。

继电器 2:

其整定值取变电站最大故障电流的 125%。

$$\begin{aligned} I_{inst} &= 1.25 \times I_{sc(C)} = (1.25 \times 2094.62) \text{ A} = 2618.28 \text{ A} \quad \text{一次电流} \\ &= [2618.28 \times (5/600)] \text{ A} = 21.82 \text{ A} \quad \text{二次电流} \end{aligned}$$

二次电流整定值为 22A, 相当于一次电流为 2640A。

继电器 3:

为了与变压器保护配合, 瞬时单元。

继电器 4:

整定值为 34.5kV 侧短路电流的 125%, 折算至 115kV 侧。

$$\begin{aligned} I_{inst} &= 1.25I_{sc(B)} \quad \text{折算至 115kV 侧} \\ &= 1.25 \times 3269.09 \text{ A} \\ &= 4086.36 \text{ A} \quad \text{一次电流} \\ &= [4086.36 \times (5/400)] \text{ A} = 51.08 \text{ A} \quad \text{二次电流} \end{aligned}$$

二次整定电流 52A, 相当于一次电流 4160A。

### 选择启动整定值

由式 (5.5) 可得, 启动整定值为  $OLF I_{nom} (1/CTR)$

采用过载系数 1.5, 启动整定值为

$$\text{继电器 1: } PU_1 = 5 \times 167.35 \times (5/200) = 6.28 \quad \text{设为 7}$$

$$\text{继电器 2: } PU_2 = 1.5 \times 502.04 \times (5/600) = 6.28 \quad \text{设为 7}$$

$$\text{继电器 3: } PU_3 = 1.5 \times 978.15 \times (5/1000) = 7.34 \quad \text{设为 8}$$

$$\text{继电器 4: } PU_4 = 1.5 \times 293.44 \times (5/400) = 5.5 \quad \text{设为 6}$$

### 时间整定值

继电器 1:

由于此继电器位于回路末端, 不需要和任何其他保护设备配合, 所以选择最小的时间整定值, 为 1/2。

继电器 1 的动作时间应从其瞬时单元动作前算起。一次整定值为 1080A, 启动整定值为 7, 插针整定倍数 (PSM) 为

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= I_{\text{inst. prim. 1}} (1/\text{CTR}_1) (1/\text{PU}_1) = 1080 \times (5/200) \times (1/7) \\ &= 3.86 \end{aligned}$$

当时间整定值为 1/2、PSM = 3.86 倍，由继电器曲线得  $t_1 = 0.16\text{s}$ 。

继电器 2:

计算继电器 1 的后备时间为  $t_2 = (0.16 + 0.4)\text{s} = 0.56\text{s}$

基于与继电器 1 相关的 CT 的一次电流为 1080A，计算整定倍数。

$$\text{PSM}_{2a} = 1080\text{A} (1/\text{CTR}_2) (1/\text{PU}_2) = 1080 \times (5/600) \times (1/7) = 1.29$$

当 PSM<sub>2a</sub> = 1.29 倍、 $t_{2a} = 0.56\text{s}$ ，由继电器曲线得时间整定值为 1/2。

继电器 2 的动作时间应从瞬时单元动作之前计算，有

$$\begin{aligned} \text{PSM}_{2b} &= I_{\text{inst. prim. 2}} (1/\text{CTR}_2) (1/\text{PU}_2) \\ &= 2640 \times (5/600) \times (1/7) \\ &= 3.14 \end{aligned}$$

当时间整定值为 1/2、PSM<sub>2b</sub> = 3.14 倍，由继电器曲线得  $t_{2b} = 0.25\text{s}$ 。

继电器 3:

计算继电器 2 的后备时间为  $t_{3a} = (0.25 + 0.4)\text{s} = 0.65\text{s}$

基于与继电器 2 相关的 CT 的一次电流为 2640A，计算整定倍数。

$$\begin{aligned} \text{PSM}_{3a} &= 2640 (1/\text{CTR}_3) (1/\text{PU}_3) = 2640 \times (5/1000) \times (1/8) \\ &= 1.65 \end{aligned}$$

当时间整定值为 1/2、PSM<sub>3a</sub> = 1.65 倍， $t_{3a} = 0.65\text{s}$ 。

当瞬时单元越控<sup>⊖</sup> (overridden)，用短路电流计算倍数。

$$\begin{aligned} \text{PSM}_{3b} &= I_{\text{sc. 3}} (1/\text{CTR}_3) (1/\text{TAP}_3) = 10896.97 \times (5/1000) \times (1/8) \\ &= 6.81 \end{aligned}$$

当时间整定值为 1/2、PSM = 6.81 倍， $t_3 = 0.07\text{s}$ 。

继电器 4:

计算继电器 3 的后备时间为  $t_4 = (0.07 + 0.4)\text{s} = 0.47\text{s}$

基于与继电器 3 相关的 CT 的一次电流为 10896.97A，折算至 115kV 侧，计算整定倍数。

$$\begin{aligned} \text{PSM}_4 &= 10896.97 \times (34.5/115) (1/\text{CTR}_4) (1/\text{PU}_4) \\ &= 10806.97 \times (34.5/115) \times (5/400) \times (1/6) = 6.81 \end{aligned}$$

当时间整定值为 4、PSM = 6.81 倍， $t_4 = 0.47\text{s}$ 。整定值汇总如表 A.3 所示。

⊖ 越控，指早于输入回路闭合。若此时输入回路闭合后立即断开，会自动复位；如果输入回路再次闭合，则会发生继电器反复通断，会产生不可预料的后果。

表 A.3 习题 5.1 继电器整定值汇总

继电器编号	CT 变比	启动电流/A	时间整定	瞬时单元	
				一次电流/A	二次电流/A
1	200/5	7	1/2	1080	27
2	600/5	7	1/2	2640	越控
3	1000/5	8	1/2	越控	越控
4	400/5	8	4	4160	52

## 习题 5.2 答案

图 A.3 所示为习题 5.2 的变电站单线示意图。

短路电流计算

13.2kV 母线:

由图 A.3 (与图 5.28 相同) 所示可知, 13.2kV 侧母线的短路电流约为 21900A, 再考虑到系统等效阻抗, 可得

$$\begin{aligned}
 I_{sc(13.2kV)} &= 21900A \quad \text{折算至 13.2kV 侧} \\
 P_{sc} &= \sqrt{3} \times 13200V \times 21900A = 500.70125MV \cdot A \\
 Z_{source} &= \frac{V^2}{P_{sc}} = \left[ \frac{(13.2 \times 10^3)^2}{500.70125 \times 10^6} \right] \Omega \\
 &= 0.348\Omega \quad \text{折算至 13.2kV 侧} \\
 &= \left[ 0.348 \times \left( \frac{115 \times 10^3}{13.2 \times 10^3} \right)^2 \right] \Omega \\
 &= 26.414\Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}
 \end{aligned}$$

115kV 侧:

为了计算短路电流, 需要知道母线后的等效阻抗:

$$Z'_{source} + Z_{transf} = Z_{source}$$

式中,  $Z'_{source}$  为 115kV 母线后的等效阻抗;  $Z_{transf}$  为两个变压器的等效阻抗。

$$Z_{transf1} = \left[ 0.0963 \times \frac{(115 \times 10^3)^2}{20 \times 10^6} \right] \Omega = 63.6784\Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

$$Z_{transf3} = \left[ 0.101 \times \frac{(115 \times 10^3)^2}{41.7 \times 10^6} \right] \Omega = 32.0318\Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

两个变压器的等效阻抗为

$$Z_{transf} = (63.6784 \parallel 32.0318)\Omega = 21.3116\Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

那么

$$Z'_{source} + Z_{transf} = 26.414\Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

$$Z'_{source} = (26.414 - 21.3116)\Omega = 5.1024\Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

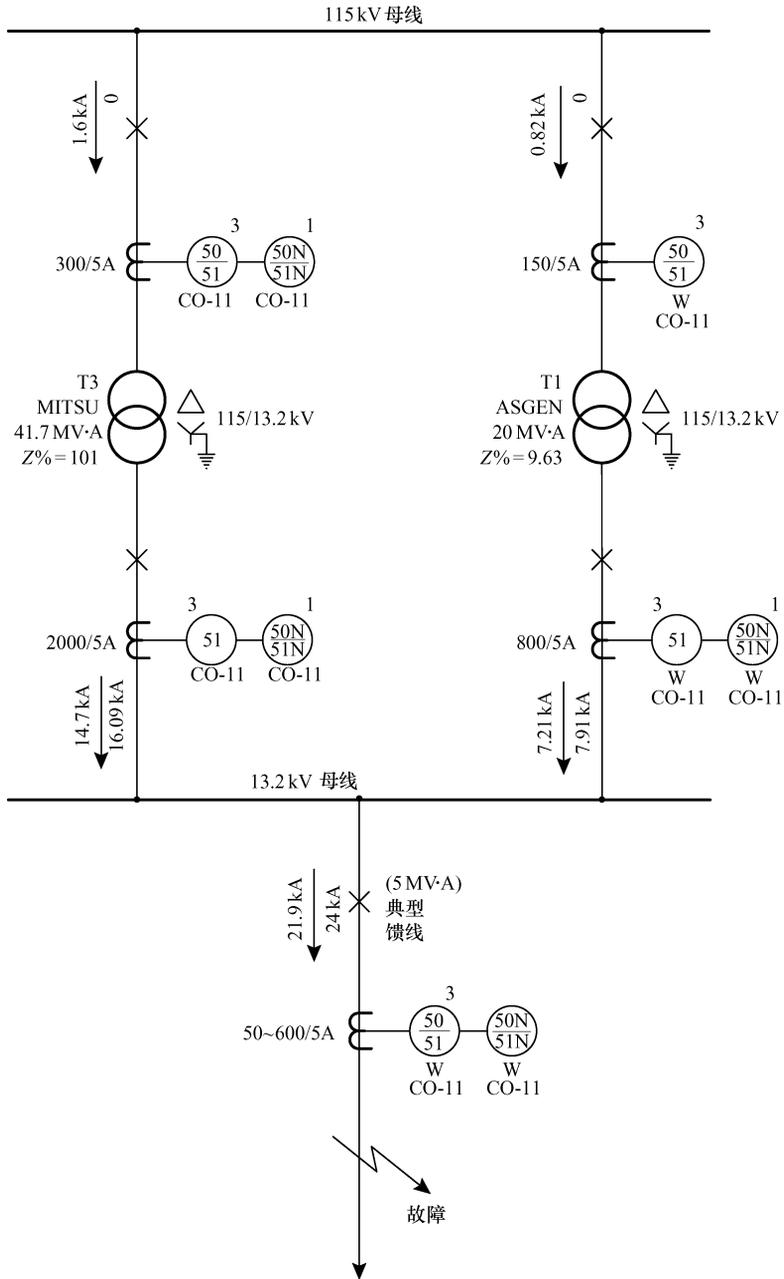


图 A.3 习题 5.2 的变电站单线示意图

有了等效阻抗，115kV 母线侧的短路电流为

$$I_{sc(115kV)} = \left( \frac{115 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 5.1024} \right) \text{A} = 13012.56 \text{A} \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

计算额定电流

变压器 T1 高压侧的继电器:

$$I_{\text{nom(HV, T1)}} = \frac{P_{\text{nom.trans1}}}{\sqrt{3}V} = \frac{20 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 115 \times 10^3 \text{ V}} = 100.41 \text{ A} \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

变压器 T1 低压侧的继电器:

$$I_{\text{nom(LV, T1)}} = \frac{P_{\text{nom.trans1}}}{\sqrt{3}V} = \frac{20 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 13.2 \times 10^3 \text{ V}} = 874.77 \text{ A} \quad \text{折算至 13.2kV 侧}$$

变压器 T3 高压侧的继电器:

$$I_{\text{nom(HV, T3)}} = \frac{P_{\text{nom.trans3}}}{\sqrt{3}V} = \frac{41.7 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 115 \times 10^3 \text{ V}} = 209.35 \text{ A} \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

变压器 T3 低压侧的继电器:

$$I_{\text{nom(LV, T3)}} = \frac{P_{\text{nom.trans3}}}{\sqrt{3}V} = \frac{41.7 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 13.2 \times 10^3 \text{ V}} = 1823.9 \text{ A} \quad \text{折算至 13.2kV 侧}$$

典型馈线上的继电器:

$$I_{\text{nom(feeder)}} = \frac{P_{\text{nom.feeder}}}{\sqrt{3}V} = \frac{5 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 13.2 \times 10^3 \text{ V}} = 218.69 \text{ A} \quad \text{折算至 13.2kV 侧}$$

瞬时单元的整定

典型馈线上的继电器:

与馈线相关的继电器瞬时单元的整定值, 采用继电器测得的短路电流的中间值计算, 为

$$I_{\text{inst}} = 0.5 I_{\text{sc}(13.2\text{kV bus})} = 0.5 \times 21900 \text{ A} (\text{一次电流}) = 10950 \text{ A}$$

变压器 T1 高压侧的继电器:

$$I_{\text{inst}} = 1.25 I_{\text{sc}(13.2\text{kV bus})}$$

折算至 115kV 侧为  $1.25 \times 7210 \text{ A} \times (13.2/115) = 1034.48 \text{ A}$  (一次电流)

所以二次电流为  $1034.48 \text{ A} \times (5/150) = 34.8 \text{ A}$

设置继电器整定值为 35A (二次电流), 相当于一次电流为 1050A。

变压器 T1 低压侧的继电器:

忽略瞬时单元, 以避免无法区分变压器二次保护。

变压器 T3 高压侧的继电器:

整定值为继电器测得的 13.2kV 母线的短路电流的 125% (折算至 115kV 侧), 为

$$I_{\text{inst}} = 1.25 I_{\text{sc}(13.2\text{kV})}$$

折算至 115kV 侧为  $1.25 \times 14700 \text{ A} \times (13.2/115) = 2109.13 \text{ A}$  (一次电流)

所以二次电流为  $2109.13 \text{ A} \times 5/300 = 35.15 \text{ A}$

设置继电器整定值为 36A (二次电流), 相当于一电流为 2160A。

变压器 T3 低压侧的继电器:

忽略瞬时单元, 以避免无法区分变压器二次保护。

启动整定值的选择

典型馈线上的继电器:

$$PU_{\text{feeder}} = 1.5 \times 218.69 \times (5/300) = 5.47, \text{ 则整定为 } PU_{\text{feeder}} = 6$$

变压器 T1 高压侧的继电器:

$$PU_{\text{HV.T1}} = 1.5 \times 100.41 \times (5/150) = 5.02, \text{ 则整定为 } PU_{\text{HV.T1}} = 6$$

变压器 T1 低压侧的继电器:

$$PU_{\text{LV.T1}} = 1.5 \times 874.77 \times (5/900) = 7.28, \text{ 则整定为 } PU_{\text{LV.T1}} = 8$$

变压器 T3 高压侧的继电器:

$$PU_{\text{HV.T3}} = 1.5 \times 209.35 \times (5/200) = 5.23, \text{ 则整定为 } PU_{\text{HV.T3}} = 6$$

变压器 T3 低压侧的继电器:

$$PU_{\text{LV.T3}} = 1.5 \times 1823.9 \times (5/2000) = 6.84, \text{ 则整定为 } PU_{\text{LV.T3}} = 7$$

时间整定

典型馈线上的继电器:

采用最小时间整定值, 以便和回路末端继电器配合; 时间整定值为 1/2。

有必要在瞬时单元动作前计算继电器动作时间:

$$\begin{aligned} PSM_{\text{feeder}} &= I_{\text{inst. prim}} (1/CTR) (1/PU_{\text{feeder}}) = 10950 \times (5/300) \times (1/6) \\ &= 30 \end{aligned}$$

当时间整定值为 1/2、 $PSM_{\text{feeder}} = 30$  倍, 由继电器动作曲线  $t_{\text{feeder}} = 0.024\text{s}$ 。

变压器 T1 低压侧的继电器:

馈线继电器的后备保护时间计算为

$$t_{\text{LV.T1}} = (0.024 + 0.4)\text{s} = 0.424\text{s}$$

整定倍数基于和馈线相关的 CT 一次电流 10950A:

$$\begin{aligned} PSM_{\text{LV.T1}} &= I_{\text{inst. prim}} (1/CTR_{\text{LV.T1}}) (1/PU_{\text{LV.T1}}) = 10950 \times (5/900) \times (1/8) \\ &= 7.6 \end{aligned}$$

继电器后备保护时间为 0.424s,  $PSM_{\text{LV.T1}} = 7.6$ , 由继电器曲线得时间整定值为 4。

由于忽略了瞬时单元, 三角/星形联结的变压器保护整定值采用继电器测得的短路电流乘以 0.86, 有

$$\begin{aligned} PSM &= 0.86 I_{\text{sc. LV.T1}} (1/CTR_{\text{LV.T1}}) (1/PU_{\text{LV.T1}}) \\ &= 0.86 \times 7210 \times (5/900) \times (1/8) = 4.3 \end{aligned}$$

当时间整定值为 4、 $PSM = 4.3$  倍, 由继电器曲线得  $t_{\text{HV.T1}} = 1.4\text{s}$ 。

变压器 T1 高压侧的继电器:

低压侧继保的后备保护的的动作时间要求为  $(1.4 + 0.4)\text{s} = 1.8\text{s}$ 。

变压器 T1 低压侧继电器相关的 CT 一次电流 7210A (以 115kV 为基准), 基于此计算整定倍数为

$$\begin{aligned} \text{PSM}_{\text{HV.T1}} &= 7210\text{A} \times (13.2\text{kV}/115\text{kV}) (1/\text{CTR}_{\text{HV.T1}}) (1/\text{PU}_{\text{HV.T1}}) \\ &= 7210 \times (13.2\text{kV}/115\text{kV}) \times (5/150) \times (1/6) = 4.6 \end{aligned}$$

当  $\text{PSM}_{\text{HV.T1}} = 4.6$  倍、后备保护时间为 1.8s, 由继电器曲线得时间整定值为 6。

变压器 T3 低压侧的继电器:

馈线继电器后备保护时间为  $(0.024 + 0.4)\text{s} = 0.424\text{s}$ 。

变压器 T1 低压侧继电器相关的 CT 一次电流 10950A, 基于此计算整定倍数为

$$\begin{aligned} \text{PSM}_{\text{LV.T3}} &= 10950\text{A} (1/\text{CTR}_{\text{LV.T3}}) (1/\text{PU}_{\text{LV.T3}}) = 10950 \times (5/2000) \times (1/7) \\ &= 3.9 \end{aligned}$$

当  $\text{PSM}_{\text{LV.T3}} = 3.9$  倍、后备保护时间为 0.424s, 由继电器曲线得时间整定值为 2。

由于忽略瞬时单元, T3 低压侧继电器测得的短路电流乘以 0.86, 所得的值用于三角/星形联结变压器的保护整定中, 有

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= 0.86 I_{\text{sc.LV.T3}} (1/\text{CTR}_{\text{LV.T3}}) (1/\text{PU}_{\text{LV.T3}}) \\ &= 0.86 \times 14700 \times (5/2000) \times (1/7) = 4.5 \end{aligned}$$

当时间整定值为 2、 $\text{PSM} = 4.5$ , 由继电器曲线得  $t_{\text{LV.T3}} = 0.6\text{s}$ 。

变压器 T3 高压侧的继电器:

低压侧继电器后备保护时间要求为  $(0.6 + 0.4)\text{s} = 1.0\text{s}$ 。

变压器 T3 低压侧继电器相关的 CT 一次电流为 14700A (以 115kV 为基准), 基于此计算整定倍数为

$$\begin{aligned} \text{PSM}_{\text{HV.T3}} &= 14700\text{A} (13.2\text{kV}/115\text{kV}) (1/\text{CTR}_{\text{HV.T3}}) (1/\text{PU}_{\text{HV.T3}}) \\ &= 14700 \times (13.2\text{kV}/115\text{kV}) \times (5/300) \times (1/6) = 4.7 \end{aligned}$$

当  $\text{PSM}_{\text{HV.T3}} = 4.7$  倍、后备保护时间为 1.0s, 由继电器曲线得时间整定值为 4。

### 习题 5.3 答案

图 A.4 所示为习题 5.3 的单线示意图。

最大短路电流

为了计算短路电流, 画出正序阻抗图, 计算了所有回路的等效阻抗, 并折算至同一电压水平侧。

$$Z_{\text{source}} = \frac{V^2}{P_{\text{sc}}} = \left[ \frac{(115000\text{V})^2}{2570.87\text{MV} \cdot \text{A}} \right] \Omega = 5.144\Omega \quad \text{折算至 115kV 侧}$$

$$= \left[ 5.144 \times \left( \frac{34.5}{115} \right)^2 \right] \Omega = 0.463\Omega \quad \text{折算至 34.5kV 侧}$$

$$Z_{\text{transfl}} = 0.117 \times \frac{(34500\text{V})^2}{10.5 \times 10^6 \text{V} \cdot \text{A}} = 13.26\Omega \quad \text{折算至 34.5kV 侧}$$

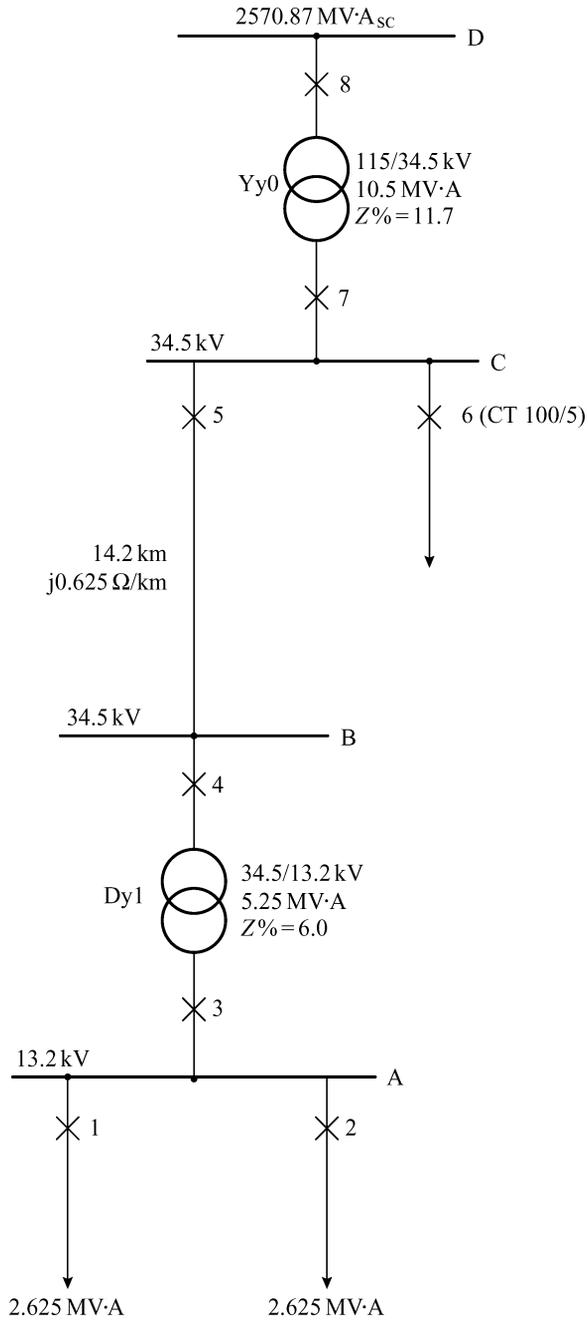


图 A.4 习题 5.3 的单线示意图

$$Z_{\text{transf2}} = 0.06 \times \frac{(34500\text{V})^2}{5.25 \times 10^6 \text{V} \cdot \text{A}} = 13.6\Omega \quad \text{折算至 } 34.5\text{kV 侧}$$

$$Z_{\text{lineBC}} = 0.625\Omega/\text{km} \times 14.2\text{km} = 8.875\Omega \quad \text{折算至 } 34.5\text{kV 侧}$$

等效电路如图 A.5 所示。

短路电流的计算

母线 A:

$$\begin{aligned} I_{\text{sc(A)}} &= \left[ \frac{34.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (0.463 + 13.26 + 8.875 + 13.6)} \right] \text{A} \\ &= 881.43\text{A} \quad \text{折算至 } 34.5\text{kV 侧} \\ &= [550.26 \times (34.5/13.2)] \text{A} \\ &= 1438.18\text{A} \quad \text{折算至 } 13.2\text{kV 侧} \end{aligned}$$

母线 B:

$$\begin{aligned} I_{\text{sc(B)}} &= \left[ \frac{34.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (0.463 + 13.26 + 8.875)} \right] \text{A} \\ &= 881.43\text{A} \quad \text{折算至 } 34.5\text{kV 侧} \end{aligned}$$

母线 C:

$$\begin{aligned} I_{\text{sc(C)}} &= \left[ \frac{34.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (0.463 + 13.26)} \right] \text{A} \\ &= 1451.47\text{A} \quad \text{折算至 } 34.5\text{kV 侧} \end{aligned}$$

母线 D:

$$I_{\text{sc(D)}} = 12906.89\text{A} \quad \text{折算至 } 115\text{kV 侧}$$

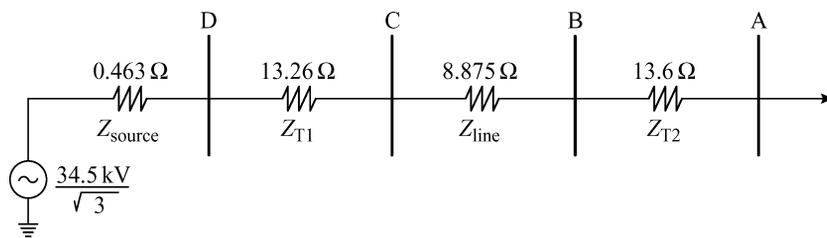


图 A.5 习题 5.3 的系统等效电路

计算最大峰值电流

断路器 1:

$$I_{\text{peak}} = 2.55 I_{\text{rms, sym. bkr1}} = 2.55 \times 1438.14\text{A} = 3667.36\text{A} \quad (\text{峰值})$$

断路器 5:

$$I_{\text{peak}} = 2.55 I_{\text{rms, sym. bkr5}} = 2.55 \times 1451.47\text{A} = 3701.25\text{A} \quad (\text{峰值})$$

断路器 8:

$$I_{\text{peak}} = 2.55 I_{\text{rms, sym. bkr8}} = 2.55 \times 12906.89\text{A} = 32912.57\text{A} \quad (\text{峰值})$$

计算不对称电流的有效值

$$I_{\text{rms, asym}} = I_{\text{rms, sym. int}} \sqrt{2e^{-2(R/L)t} + 1}$$

式中,  $t = 5$  个周波 = 83.33ms;  $L/R = 0.2$ , 所以  $R/L = 5$

断路器 1:

$$\begin{aligned} I_{\text{rms, asym.}} &= (1438.18 \times \sqrt{(2e^{-2 \times 0.08333 \times 5}) + 1}) \text{ A} \\ &= (1438.18 \times 1.3672) \text{ A} = 1966.27 \text{ A} \end{aligned}$$

断路器 5:

$$\begin{aligned} I_{\text{rms, asym.}} &= (1451.47 \times \sqrt{(2e^{-2 \times 0.08333 \times 5}) + 1}) \text{ A} \\ &= (1451.47 \times 1.3672) \text{ A} = 1984.45 \text{ A} \end{aligned}$$

断路器 8:

$$\begin{aligned} I_{\text{rms, asym.}} &= (12906.89 \times \sqrt{(2e^{-2 \times 0.08333 \times 5}) + 1}) \text{ A} \\ &= (12906.89 \times 1.3672) \text{ A} = 17646.3 \text{ A} \end{aligned}$$

计算 CT 变比

采用额定电流或没有饱和时的最大短路电流 ( $0.05I_{\text{sc}}$ ) 中更大的一个电流值, 来确定 CT 的变比。

$$\begin{aligned} \text{继电器 1、2: } I_{\text{nom1}} = I_{\text{nom2}} &= \frac{P_{\text{nom1}}}{\sqrt{3}V_1} = \frac{2.625 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 13.2 \times 10^3 \text{ V}} \\ &= 114.81 \text{ A} \quad \text{折算至 } 13.2 \text{ kV 侧} \end{aligned}$$

$$\text{继电器 3: } I_{\text{nom3}} = \frac{P_{\text{nom3}}}{\sqrt{3}V_3} = \frac{5.25 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 13.2 \times 10^3 \text{ V}} = 229.63 \text{ A} \quad \text{折算至 } 13.2 \text{ kV 侧}$$

$$\text{继电器 4: } I_{\text{nom4}} = \frac{P_{\text{nom4}}}{\sqrt{3}V_4} = \frac{5.25 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 34.5 \times 10^3 \text{ V}} = 87.86 \text{ A} \quad \text{折算至 } 34.5 \text{ kV 侧}$$

$$\text{继电器 5: } I_{\text{nom5}} = I_{\text{nom4}} = 87.86 \text{ A} \quad \text{折算至 } 34.5 \text{ kV 侧}$$

$$\text{继电器 7: } I_{\text{nom7}} = \frac{P_{\text{nom7}}}{\sqrt{3}V_7} = \frac{10.5 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 34.5 \times 10^3 \text{ V}} = 175.72 \text{ A} \quad \text{折算至 } 34.5 \text{ kV 侧}$$

$$\text{继电器 8: } I_{\text{nom8}} = \frac{P_{\text{nom8}}}{\sqrt{3}V_8} = \frac{10.5 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 115 \times 10^3 \text{ V}} = 52.71 \text{ A} \quad \text{折算至 } 115 \text{ kV 侧}$$

依据上面的标准, 短路电流和负载电流及 CT 变比如表 A.4 所示。

表 A.4 习题 5.3 的 CT 变比计算汇总

继电器编号	$P_{\text{nom}} / (\text{MV} \cdot \text{A})$	$I_s / \text{A}$	$0.05I_{\text{sc}} / \text{A}$	$I_{\text{nom}} / \text{A}$	CT 变比
1、2	2.625	1438.18	71.91	114.81	150/5
3	5.25	1438.18	71.91	229.63	250/5
4	5.25	881.43	44.07	87.86	100/5
5	5.25	1451.47	72.57	87.86	100/5
6	—	1451.47	72.57	—	100/5
7	10.5	1451.47	72.57	175.72	200/5
8	10.5	12906.89	645.34	52.71	700/5

瞬时、启动和时间整定

### 1. 计算瞬时整定值

继电器 1 和 2:

$$I_{inst} = 0.5I_{sc} = 0.5 \times 1438.18\text{A} = 719.09\text{A} \text{ (一次电流)}$$

则二次电流为  $719.09\text{A} \times 5/150 = 23.97\text{A}$ .

整定值设为 24A (二次电流), 相当于一电流为 720A。

继电器 3: 为避免无法区分变压器二次保护, 忽略瞬时单元。

继电器 4: 变压器低压侧母线的短路电流的 125%, 折算至高压侧, 为整定值。

$$I_{inst} = 1.25I_{sc}$$

折算至 34.5kV 侧为  $1.25 \times 1438.18\text{A} \times (13.2/34.5) = 687.83\text{A}$  (一次电流)

所以二次电流为  $687.83\text{A} \times 5/100 = 34.39\text{A}$

整定值设为 35A (二次电流), 相当于一电流为 700A。

继电器 5: 下一座变电站的最大故障电流的 125%, 基于此值计算整定值。

$$I_{inst} = 1.25I_{sc(B)} = 1.25 \times 881.43\text{A} = 1101.79\text{A} \text{ (一次电流)}$$

所以二次电流为  $1101.79 \times 5/100 = 55.09\text{A}$

整定值设为 56A (二次电流), 相当于一电流为 1120A。

继电器 6:

一次电流为 1000A, 二次电流为 50A

继电器 7:

为避免无法区分变压器二次保护, 忽略瞬时单元。

继电器 8:

下一座变电站最大故障电流的 125%, 基于此计算整定值。

$$I_{inst} = 1.25I_{sc(C)}$$

折算至高压侧为  $1.25 \times 1451.47\text{A} \times (34.5/115) = 554.3\text{A}$  (一次电流)

所以二次电流为  $554.3\text{A} \times 5/700 = 3.88\text{A}$

整定值设为 6A (二次电流, 最小整定值), 相当于一电流为 840A。

### 2. 计算启动电流整定值

启动电流整定值为  $OLFI_{nom}(1/CTR)$

过载系数取 1.5。

继电器 1 和 2:

$$PU_{1,2} = 1.5 \times 114.81 \times (5/150) = 5.74 \text{ 设为 } 6$$

继电器 3:

$$PU_3 = 1.5 \times 229.63 \times (5/250) = 6.89 \text{ 设为 } 7$$

继电器 4:

$$PU_4 = 1.5 \times 87.86 \times (5/100) = 6.59 \text{ 设为 } 7$$

继电器 5:

$$PU_5 = 1.5 \times 87.86 \times (5/100) = 6.59 \quad \text{设为 } 7$$

继电器 6:

$$PU_6 = 7$$

继电器 7:

$$PU_7 = 1.5 \times 175.72 \times (5/200) = 6.59 \quad \text{设为 } 7$$

继电器 8:

$$PU_8 = 1.5 \times 52.71 \times (5/700) = 0.56 \quad \text{设为 } 1$$

### 3. 计算时间整定值

对于与断路器 1、2 相关的继电器，选择较小的时间整定值，并计算引起瞬时单元动作的更大电流值的动作时间。

继电器 1、2:

时间整定值为 1/2

$$PSM = I_{\text{inst. sec}} (1/PU_{1,2}) = 24 \times (1/6) = 4$$

当 PSM = 4 倍、时间整定值 1/2，由继电器的动作特性得  $t_1 = 0.16\text{s}$ 。

继电器 3:

继电器 3 是继电器 1、2 的后备保护；因此要求动作时间  $t_3 = (0.16 + 0.4)\text{s} = 0.56\text{s}$ 。

PSM<sub>3</sub> 基于继电器 1 和 2 相关的一次电流 720A 来计算，为

$$PSM_{3a} = 720 (1/CTR_3) (1/PU_3) = 720 \times (5/250) \times (1/7) = 2.06$$

当 PSM<sub>3a</sub> = 2.06 倍、后备保护动作时间为 0.56s，由继电器的动作特性得时间整定值为 1/2。

继电器 3 作为继电器 1 和 2 的后备保护，实际的动作为 0.7s。瞬时单元被忽略，采用了短路电流，并乘以 0.86 的系数，以覆盖三角/星形联结的变压器。因此

$$\begin{aligned} PSM_{3b} &= 0.86 I_{\text{sc}(A)} (1/CTR_3) (1/PU_3) \\ &= 0.86 \times 1438.18 \times (5/250) \times (1/7) = 3.53 \end{aligned}$$

当时间整定值 1/2 倍、PSM<sub>3b</sub> = 3.53、后备保护动作时间为 0.56s，由继电器的动作特性得  $t_3 = 0.6\text{s}$ 。

继电器 4:

继电器 4 为继电器 3 的后备保护，其动作时间  $t_3 = (0.2 + 0.4)\text{s} = 0.6\text{s}$ 。

PSM<sub>4a</sub> 基于继电器 3 相关的 CT 一次电流 1438.18A 来计算，有

$$PSM_{4a} = 1438.18 \times (13.2/34.5) \times (5/100) \times (1/7) = 3.93$$

当 PSM<sub>4a</sub> = 3.93 倍、后备保护动作时间为 0.6s，则时间整定值为 2。继电器 4 作为继电器 3 的后备保护，动作时间为 0.78s。

此时有必要计算在瞬时单元动作前的继电器 4 的动作时间，即

$$PSM_{4b} = I_{\text{inst. prim. 4}} (1/CTR_4) (1/PU_4) = 700 \times (5/100) \times (1/7) = 5$$

当时间整定值为 2、PSM = 5 倍，则  $t_4 = 0.49s$ 。

继电器 5：

继电器 5 为继电器 4 的后备保护，其动作时间  $t_5 = (0.49 + 0.4)s = 0.89s$ 。

PSM<sub>5</sub> 基于继电器 4 相关的 CT 一次电流 700A 来计算，有

$$PSM_5 = 700A(1/CTR_5) \times (1/PU_5) = 700 \times (5/100) \times (1/7) = 5$$

当 PSM<sub>5</sub> = 5 倍、后备保护动作时间为 0.89s，则时间整定值为 4。继电器 5 作为继电器 4 的后备保护，动作时间为 1s。

此时有必要计算在瞬时单元动作前的继电器 5 的动作时间，即

$$PSM_{5a} = I_{inst. prim. 5} (1/CTR_5) (1/PU_5) = 1120 \times (5/100) \times (1/7) = 8$$

当时间整定值为 4、PSM = 8 倍，则  $t_5 = 0.45s$

继电器 6：

时间整定值为 5。

继电器 7：

继电器 7 为继电器 5、6 的后备保护，并且和其中动作慢的一个相配合。

继电器瞬时单元一次电流 1000A，小于继电器 5 一次电流 1120A。因此，继电器 6、7 的动作时间都应按 1000A 来计算。

对继电器 6  $PSM_6 = 1000 \times (5/100) \times (1/7) = 7.14$

当 PSM<sub>6</sub> = 7.14 倍，时间整定值为 5，则  $t_6 = 0.7s$ 。

对继电器 5  $PSM_5 = 1000 \times (5/100) \times (1/7) = 7.14$

当 PSM<sub>5</sub> = 7.14 倍、时间整定值为 4，则  $t_5 = 0.52s$ 。

表 A.5 习题 5.3 的整定值汇总

继电器编号	CT 变比	启动电流/A	时间	瞬时单元	
				一次电流/A	二次电流/A
1、2	150/5	6	1/2	720	24
3	250/5	7	1/2	越控	越控
4	100/5	7	2	700	35
5	100/5	7	4	1120	56
6	100/5	7	5	1000	50
7	200/5	7	3	越控	越控
8	700/5	1	2	840	6

因此，为了比继电器 6 动作速度慢，后备保护时间应为  $t_7 = (0.7 + 0.4)s = 1.1s$ 。

继电器 6 相关的 CT 一次电流为 1000A，继电器 6、7 需互相配合，基于此计算 PSM。

$$\text{PSM}_7 = 1000\text{A}(1/\text{CTR}_7)(1/\text{PU}_7) = 1000 \times (5/200) \times (1/7) = 3.57$$

当  $t_7 = 1.1\text{s}$ 、 $\text{PSM} = 3.57$  倍，由继电器动作曲线得时间整定值为 3。

由于忽略了瞬时单元，要采用母线 C 短路时的故障电流来计算倍数，即

$$\text{PSM}_7 = I_{\text{sc}7}(1/\text{CTR}_7)(1/\text{PU}_7) = 1451.47 \times (5/200) \times (1/7) = 5.18$$

当  $\text{PSM}_7 = 5.18$  倍、时间整定值为 3， $t_7 = 0.7\text{s}$ 。

继电器 8：

继电器 7 的后备保护继电器 8 的动作时间  $t_8 = (0.7 + 0.4)\text{s} = 1.1\text{s}$ 。

现在计算继电器 8 的整定倍数，根据折算至 115kV 侧的一次电流为 1451.47A，则

$$\text{MULT}_8 = 1451.47 \times (34.5/115) \times (5/700) \times 1 = 3.11$$

当  $\text{MULT}_8 = 3.11$  倍、 $t_8 = 1.1\text{s}$ ，由继电器曲线得  $\text{DIAL}_8 = 2$ 。

保护覆盖范围

覆盖范围为

$$\frac{K_s(1 - K_i) + 1}{K_i}$$

其中

$$K_i = \frac{I_{\text{sc.pickup}}}{I_{\text{sc.end}}} = \frac{I_{\text{inst.prim.5}}}{I_{\text{sc(B)}}} = \frac{1120\text{A}}{881.43\text{A}} = 1.2707$$

$$K_s = \frac{Z_{\text{source}} + Z_{\text{T1}}}{Z_{\text{line}}} = \frac{0.463 + 13.26}{8.875} = 1.5463$$

则覆盖范围为

$$\frac{1.5463(1 - 1.2707) + 1}{1.2707} = 0.4576$$

断路器 5 相关的过电流继电器瞬时单元的保护覆盖范围是 34.5kV 线的 45.7%。

## 习题 7.1 答案

图 A.6 所示为习题 7.1 的电网示意图。

短路电流计算

母线 A：

$$I_{\text{sc}} = 6560\text{A}$$

母线 B：

(a) 环形网络闭合时，其等效电路如图 A.7 所示。

$$I_{\text{sc(B)}} = \left[ \frac{13.2 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (1.16 + 1.556)} \right] \text{A} = 2806.39\text{A}$$

考虑到网络中电流的分配，流过断路器 1 的故障电流为  $[2806.39 \times (7/9)]\text{A} =$

2182.75A, 流过断路器 2 的电流为  $[2806.39 \times (2/9)] A = 623.64A$ 。

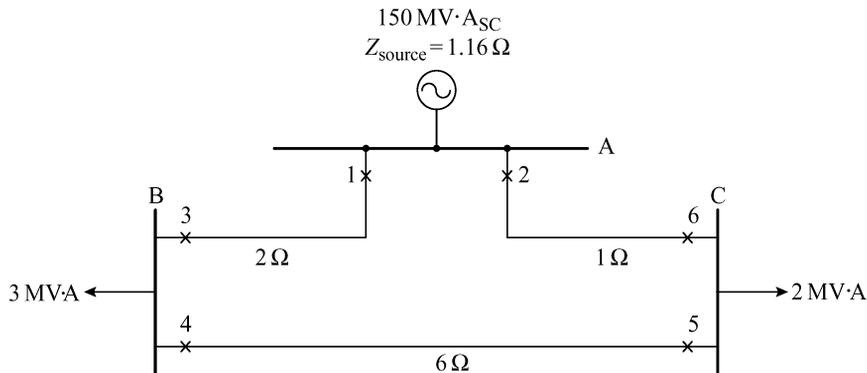


图 A.6 习题 7.1 的电网示意图

(b) 环形网络开路

断路器 1 打开, 对于继电器 3 来说, 有

$$I_{sc(B)} = \left[ \frac{13.2 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (1.16 + 7)} \right] A = 933.95 A = I_{sc, \max}$$

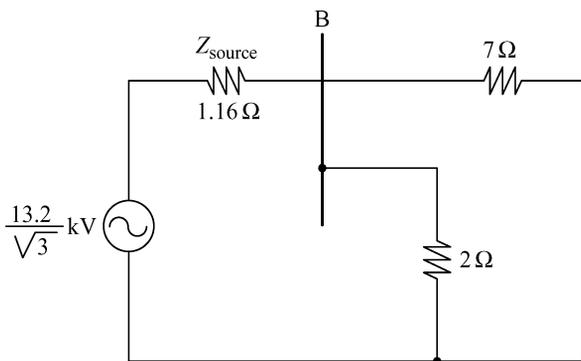


图 A.7 母线 B 故障时的等效电路

断路器 2 打开, 对于继电器 4 来说有

$$I_{sc(B)} = \left[ \frac{13.2 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (1.16 + 2)} \right] A = 2411.72 A = I_{sc, \max}$$

母线 C:

(a) 环形网络闭合时, 其等效电路如图 A.8 所示。

$$I_{sc(C)} = \left[ \frac{13.2 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (1.16 + 0.889)} \right] A = 3719.39 A$$

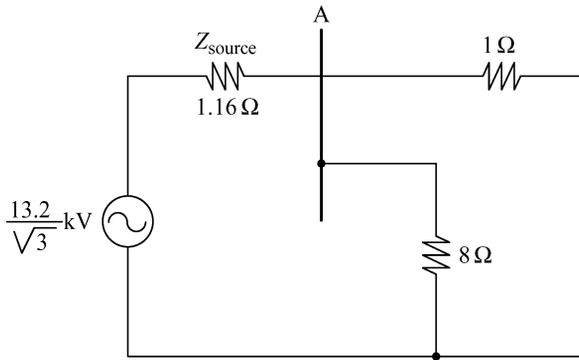


图 A.8 母线 C 故障的等效电路

考虑到网络中电流的分配，流过断路器 1 的故障电流为  $[3719.39 \times (1/9)] \text{ A} = 413.27 \text{ A}$ ，流过断路器 2 的电流为  $[3719.39 \times (8/9)] \text{ A} = 3306.12 \text{ A}$ 。

(b) 环形网络开路

断路器 1 打开，对继电器 5 来说有

$$I_{\text{sc}(C)} = \left[ \frac{13.2 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (1.16 + 1)} \right] \text{ A} = 3528.25 \text{ A} = I_{\text{sc. max}}$$

断路器 2 打开，对继电器 6 来说有

$$I_{\text{sc}(C)} = \left[ \frac{13.2 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (1.16 + 8)} \right] \text{ A} = 831.99 \text{ A} = I_{\text{sc. max}}$$

CT 变比计算

首先，计算每台断路器的最大额定电流。

断路器打开时：

$$I_{\text{max}, 2\&6} = \frac{5 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times (13.2 \times 10^3 \text{ V})} = 218.69 \text{ A}$$

$$I_{\text{max}, 4\&5} = \frac{3 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times (13.2 \times 10^3 \text{ V})} = 131.22 \text{ A}$$

$$I_{\text{max}, 1\&3} = 0$$

断路器 2 打开时：

$$I_{\text{max}, 1\&3} = \frac{5 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times (13.2 \times 10^3 \text{ V})} = 218.69 \text{ A}$$

$$I_{\text{max}, 4\&5} = \frac{2 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times (13.2 \times 10^3 \text{ V})} = 87.48 \text{ A}$$

$$I_{\text{max}, 2\&6} = 0$$

根据每台断路器的最大额定电流，以及  $0.05 I_{\text{sc}}$  最大故障电流时的饱和情况，来选择 CT。

断路器 1:  $I_{\max 1} = 218.69$ , 则  $CT_1$  变比为 250/5

断路器 4:  $I_{\max 4} = 131.22$ , 则  $CT_4$  变比为 200/5

断路器 6:  $I_{\max 6} = 218.69$ , 则  $CT_6$  变比为 250/5

### 瞬时单元的整定

为了整定继电器 1、4 和 6, 环形网络在断路器 2 处断开, 每个继电器的整定值计算都要采用其后备保护的继电器测得的最大短路电流。

继电器 1: 此继电器为继电器 4 的后备保护, 有

$$I_{\text{inst}} = 1.25I_{\text{sc}, 4} = 1.25 \times 2411.72\text{A} = 3014.65\text{A} \text{ (一次电流)}$$

二次电流为  $[3014.65 \times (5/250)]\text{A} = 60.29\text{A}$ 。整定值设为 61A, 相当于一次电流为 3050A。

继电器 4: 此继电器为继电器 6 的后备保护, 有

$$I_{\text{inst}} = 1.25I_{\text{sc}, 6} = 1.25 \times 831.99\text{A} = 1040\text{A} \text{ (一次电流)}$$

二次电流为  $[1040 \times (5/200)]\text{A} = 26\text{A}$ 。整定值设为 26A, 相当于一次电流为 1040A。

继电器 6: 将整定值设为来自电源方向的最大负载电流的 125%, 有

$$I_{\text{inst}} = 1.25I_{\max, 6} = 1.25 \times 218.69\text{A} = 273.36\text{A} \text{ (一次电流)}$$

二次电流为  $[273.36 \times (5/250)]\text{A} = 5.47\text{A}$ 。整定值设为 6A, 相当于一次电流为 300A。

### 计算启动电流值

启动值为  $OLF I_{\text{nom}} (1/CTR)$

过载系数为 1.5, 断路器 2 打开。

继电器 1:

$$PU_1 = 1.5I_{\text{nom}1} (1/CTR_1) = 1.5 \times 218.69 \times (5/250) = 6.56, \text{ 则 } PU_1 = 7$$

继电器 4:

$$PU_4 = 1.5 \times I_{\text{nom}4} \times (1/CTR_4) = 1.5 \times 131.22 \times (5/200) = 4.92, \text{ 则 } PU_4 = 5$$

继电器 6:

$$PU_6 = 1.5 \times I_{\text{nom}6} \times (1/CTR_6) = 1.5 \times 218.69 \times (5/250) = 6.56, \text{ 则 } PU_6 = 7$$

### 时间整定值计算

当考虑非常反时限继电器时, 采用本书 5.3.3 节中式 (5.7)。

继电器 6: 整定值为可能的最小时间整定值, 对于此种继电器来说为 0.1, 有

$$PSM_6 = 831.99\text{A} (1/CTR_6) (1/PU_6) = 831.99 \times (5/250) \times (1/7) = 2.38$$

当时间整定值为 0.1、 $PSM_6 = 2.38$  倍, 采用非常反时限继电器有  $\alpha = 1$ 、 $\beta = 13.5$ , 则有

$$t_6 = \left( \frac{0.1 \times 13.5}{2.38 - 1} \right) \text{s} = 0.98\text{s}$$

继电器 4: 继电器 4 作为继电器 6 的后备保护, 有  $t_4 = (0.98 + 0.4)\text{s} = 1.38\text{s}$ 。

用继电器 6 的 831.99A, 来计算继电器 4 的倍数, 有

$$\text{PSM}_4 = 831.99\text{A} (1/\text{CTR}_4) (1/\text{PU}_4) = 831.99 \times (5/200) \times (1/5) = 4.16$$

当  $t_4 = 1.38\text{s}$ 、 $\text{PSM}_4 = 4.16$  倍, 采用非常反时限继电器有  $\alpha = 13.5$ 、 $\beta = 1$ , 则有

$$t_4 \Rightarrow 1.38 = \frac{\text{时间整定值} \times 13.5}{4.16 - 1} \Rightarrow \text{时间整定值} = 0.32$$

时间整定值选为 0.4。

接下来, 用  $I_{\text{sc.max}}$  (2411.72A) 计算继电器 4 的倍数, 有

$$\text{PSM}_{4a} = 2411.72\text{A} (1/\text{CTR}_4) (1/\text{PU}_4) = 2411.72 \times (5/200) \times (1/5) = 12.06$$

当时间整定值为 0.4、 $\text{PSM}_{4a} = 12.06$  倍, 采用非常反时限继电器有  $\alpha = 1$ 、 $\beta = 13.5$ , 则有

$$t_4 = \frac{\text{时间整定值} \times 13.5}{\text{PSM}_{4a} - 1} = \frac{0.4 \times 13.5}{12.06 - 1} = 0.49\text{s}$$

继电器 1:

继电器作为继电器 4 的后备保护, 有  $t_1 = 0.49 + 0.4 = 0.89\text{s}$ 。

用继电器 4 的 2411.72A 来计算继电器 1 的倍数, 有

$$\text{PSM}_1 = 2411.72\text{A} (1/\text{CTR}_1) (1/\text{PU}_1) = 2411.72 \times (5/250) \times (1/7) = 6.89$$

当  $t_1 = 0.89\text{s}$ 、 $\text{PSM}_1 = 6.89$  倍, 采用非常反时限继电器, 有

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{\text{时间整定值} \times 13.5}{\text{PSM}_1 - 1} \Rightarrow 0.89 \\ &= \frac{\text{时间整定值} \times 13.5}{6.89 - 1} \Rightarrow \text{时间整定值} = 0.39\text{s} \end{aligned}$$

时间整定值选为 0.4。

## 习题 7.2 答案

图 A.9 所示为习题 7.2 的电网示意图。

计算短路电流

母线 B:

环形网络闭合,  $I_{\text{sc}(B)} = 2160\text{A}$ ; 环形网络断开,  $I_{\text{sc}(B)} = 2880\text{A}$ , 为继电器 B 最大的短路电流。

母线 C:

环形网络闭合,  $I_{\text{sc}(C)} = 1350\text{A}$ ; 环形网络断开,  $I_{\text{sc}(C)} = 2300\text{A}$ , 为继电器 C 最大的短路电流。

计算最大额定电流

环状电路分别在线路 C—A 的远端和断路器 A 处断开时, 计算各自的电流值, 以获得其中较大的电流值。

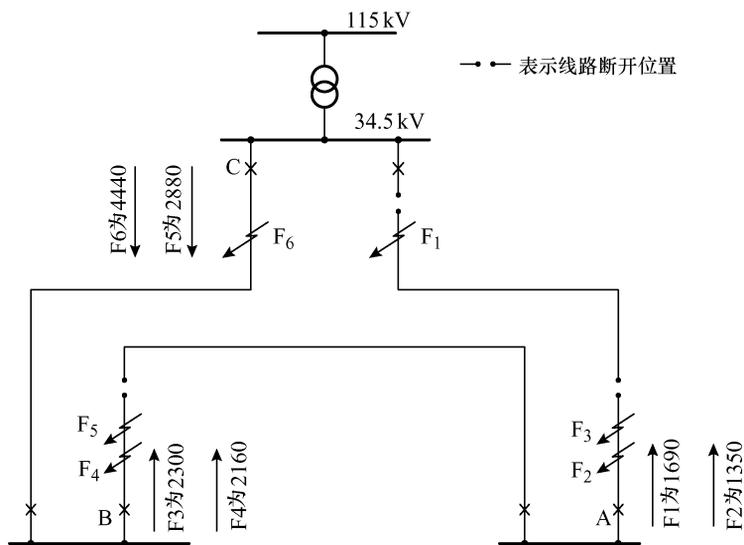


图 A.9 习题 7.2 的电网示意图

环状电路在线路 C—A 远端断开：

$$I_{\text{nom. max. (A)}} = \frac{25 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times (13.2 \times 10^3 \text{ V})} = 1093.47 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom. max. (B)}} = \frac{15 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times (13.2 \times 10^3 \text{ V})} = 656.1 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom. max. (C)}} = 0$$

环状电路在断路器 A 断开：

$$I_{\text{nom. max. (C)}} = \frac{25 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times (13.2 \times 10^3 \text{ V})} = 1093.47 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom. max. (B)}} = \frac{10 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times (13.2 \times 10^3 \text{ V})} = 437.39 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom. max. (A)}} = 0$$

CT 的选择，要考虑每个断路器的最大额定电流，并检查每台断路器在  $0.05I_{\text{sc}}$  时 CT 流过最大故障电流时是否会饱和。

断路器 A：  $I_{\text{nom. max. (A)}} = 1093.47$ ，则 CT 变比为 1100/5

断路器 B：  $I_{\text{nom. max. (B)}} = 656.10$ ，则 CT 变比为 700/5

断路器 C：  $I_{\text{nom. max. (C)}} = 1093.47$ ，则 CT 变比为 = 1100/5

瞬时单元的整定

环状电路在线路 C—A 远端断开时，进行继电器 A、B 和 C 的瞬时单元的整定，每个继电器的整定依据是其后备保护继电器所测得的最大短路电流。

继电器 A：为继电器 B 的后备保护，有

$$I_{\text{inst}} = 1.25I_{\text{sc}(B)} = 1.25 \times 2880\text{A} = 3600\text{A} \text{ (一次电流)}$$

则二次电流为  $3600\text{A} \times (5/1100) = 16.36\text{A}$

此继电器整定值为 17A (二次电流), 相当于一次电流为 3300A。

继电器 B: 为继电器 C 的后备保护, 有

$$I_{\text{inst}} = 1.25I_{\text{sc}(C)} = 1.25 \times 2300\text{A} = 2875\text{A} \text{ (一次电流)}$$

则二次电流为  $2875\text{A} \times (5/700) = 20.54\text{A}$

此继电器整定值为 21A (二次电流), 相当于一次电流为 2940A。

继电器 C: 整定值为来自电源侧的最大负载电流的 125%, 有

$$I_{\text{inst}} = 1.25I_{\text{nom.max}(C)} = 1.25 \times 1093.47\text{A} = 1366.84\text{A} \text{ (一次电流)}$$

则二次电流为  $1366.84\text{A} \times (5/1100)\text{A} = 6.21\text{A}$

继电器整定值为 7A (二次电流), 相当于一次电流为 1540A。

每个继电器的启动值为 5。

### 时间整定

环状电路在线路 C—A 的远端断开时, 确定继电器 A、B 和 C 的整定值。

继电器 C: 此继电器的整定采用最小整定值, 为 1/2, 则有

$$\text{PSM}_C = I_{\text{sc.max}(C)} (1/\text{CTR}_C) (1/\text{PU}_C) = 2300 \times (5/1100) \times (1/8) = 1.3$$

当时间整定值为 1/2、 $\text{PSM}_C = 1.3$  倍, 由继电器曲线得  $t_C = 2\text{s}$ 。

继电器 B: 继电器 B 作为继电器 C 的后备保护, 动作时间  $t_B = (2 + 0.4)\text{s} = 2.4\text{s}$

继电器 C 电流为 2300A 时, 继电器 B 的整定倍数为

$$\text{PSM}_{B1} = 2300\text{A} (1/\text{CTR}_B) \times (1/\text{PU}_B) = 2300 \times (5/700) \times (1/8) = 2.1$$

当  $t_B = 2.4\text{s}$ 、 $\text{PSM}_{B1} = 2.1$  倍, 由继电器曲线得时间整定值为 2。

计算继电器 B 为  $I_{\text{sc.max}}$  (2880A) 时的整定倍数, 即

$$\text{PSM}_{B2} = I_{\text{sc.max}(B)} (1/\text{CTR}_B) (1/\text{PU}_B) = 2880 \times (5/700) \times (1/8) = 2.6$$

当时间整定值为 2、 $\text{PSM}_{B2} = 2.6$  倍, 由继电器曲线得  $t_B = 1.8\text{s}$ 。

继电器 A: 继电器 A 作为继电器 B 的后备保护, 动作时间  $t_A = (1.8 + 0.4)\text{s} = 2.2\text{s}$

继电器 B 电流为 2880A 时, 继电器 A 的整定倍数为

$$\text{PSM}_A = I_{\text{sc.max}(A)} (1/\text{CTR}_A) (1/\text{PU}_A) = 2880 \times (5/1100) \times (1/8) = 1.7$$

当  $t_A = 2.2\text{s}$ 、 $\text{PSM}_A = 1.7$  倍, 由继电器曲线得时间整定值为 1。

## 习题 8.1 答案

图 A.10 所示为习题 8.1 的单线图。

变压器最大负载时的额定电流计算为

$$I_{\text{nom}(69\text{kV})} = \frac{20 \times 10^6 \text{MV} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 69 \times 10^3 \text{V}} = 167.35\text{A}$$

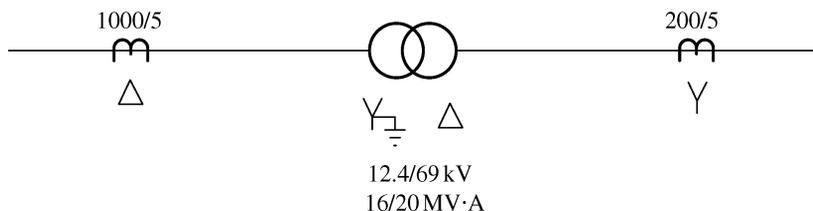


图 A.10 习题 8.1 的单线图

$$I_{\text{nom}(12.4\text{kV})} = \frac{20 \times 10^6 \text{ MV} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 12.4 \times 10^3 \text{ V}} = 931.21 \text{ A}$$

继电器电流为

$$I_{\text{relay}(12.4\text{kV})} = [931.21 \times (5/1000) \times \sqrt{3}] \text{ A} = 8.06 \text{ A}$$

因此选择 PU = 8.7。

$$I_{\text{relay}(69\text{kV})} = [167.35 \times (5/200) \times \sqrt{3}] \text{ A} = 4.18 \text{ A}$$

因此选择 PU = 4.2。

## 习题 8.2 答案

图 A.11 所示为习题 8.2 的单线图。

变压器最大负载时的额定电流计算为

$$I_{\text{nom}(161\text{kV})} = \frac{40 \times 10^6 \text{ MV} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 161 \times 10^3 \text{ V}} = 143.44 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom}(69\text{kV})} = \frac{40 \times 10^6 \text{ MV} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 69 \times 10^3 \text{ V}} = 334.7 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom}(12.4\text{kV})} = \frac{10 \times 10^6 \text{ MV} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 12.4 \times 10^3 \text{ V}} = 456.61 \text{ A}$$

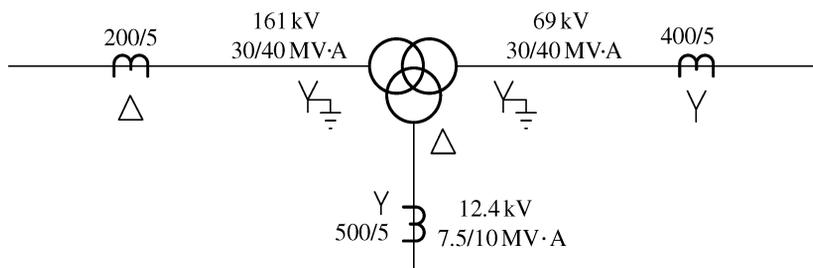


图 A.11 习题 8.2 的单线图

因此继电器电流为

$$I_{\text{relay}(161\text{kV})} = [143.44 \times (5/200) \times \sqrt{3}] \text{ A} = 6.2 \text{ A}$$

因此选择 PU = 6.2。

$$I_{\text{relay}(69\text{kV})} = [334.7 \times (5/400)] \text{ A} = 4.18 \text{ A}$$

因此选择  $PU = 4.2$ 。

$$I_{\text{relay}(12.4\text{kV})} = [456.61 \times (5/500)] \text{ A} = 4.65 \text{ A}$$

因此选择  $PU = 4.6$ 。

### 习题 8.3 答案

图 A.12 所示为习题 8.3 的电网示意图。

正常情况下的额定电流为

$$I_{\text{nom. } 34.5\text{kV}} = \frac{10 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 34.5 \times 10^3 \text{ V}} = 167.35 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom. } 13.2\text{kV}} = \frac{10 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 13.2 \times 10^3 \text{ V}} = 437.39 \text{ A}$$

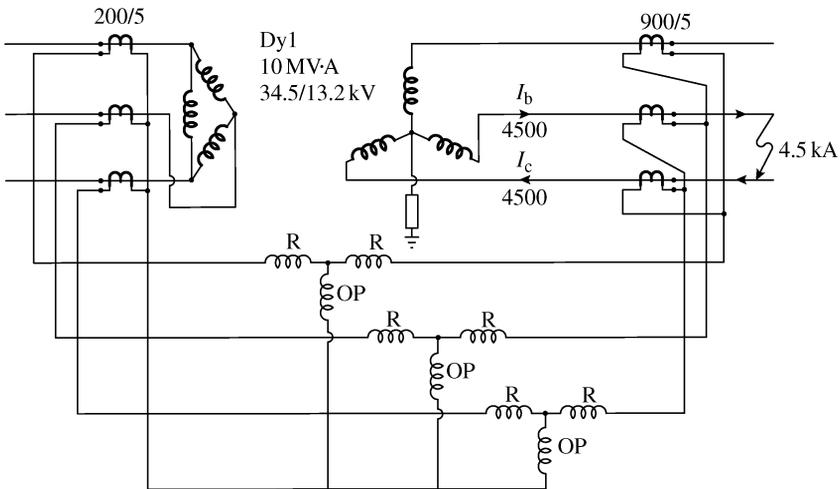


图 A.12 习题 8.3 的电网示意图

图 A.13 所示为变压器 Dy1 联结时的矢量图，A、B 和 C 相的相量旋转为顺时针方向。

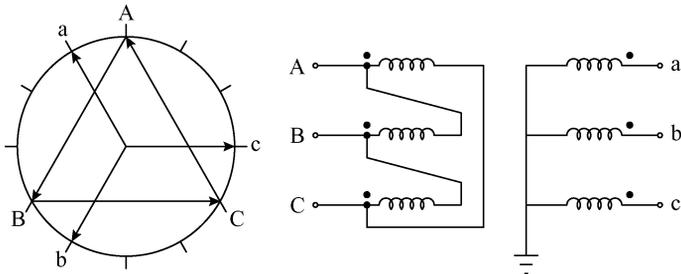


图 A.13 Dy1 联结变压器的矢量图

图 A.14 给出了变压器一次侧和二次侧，以及 CT 二次电流方向。

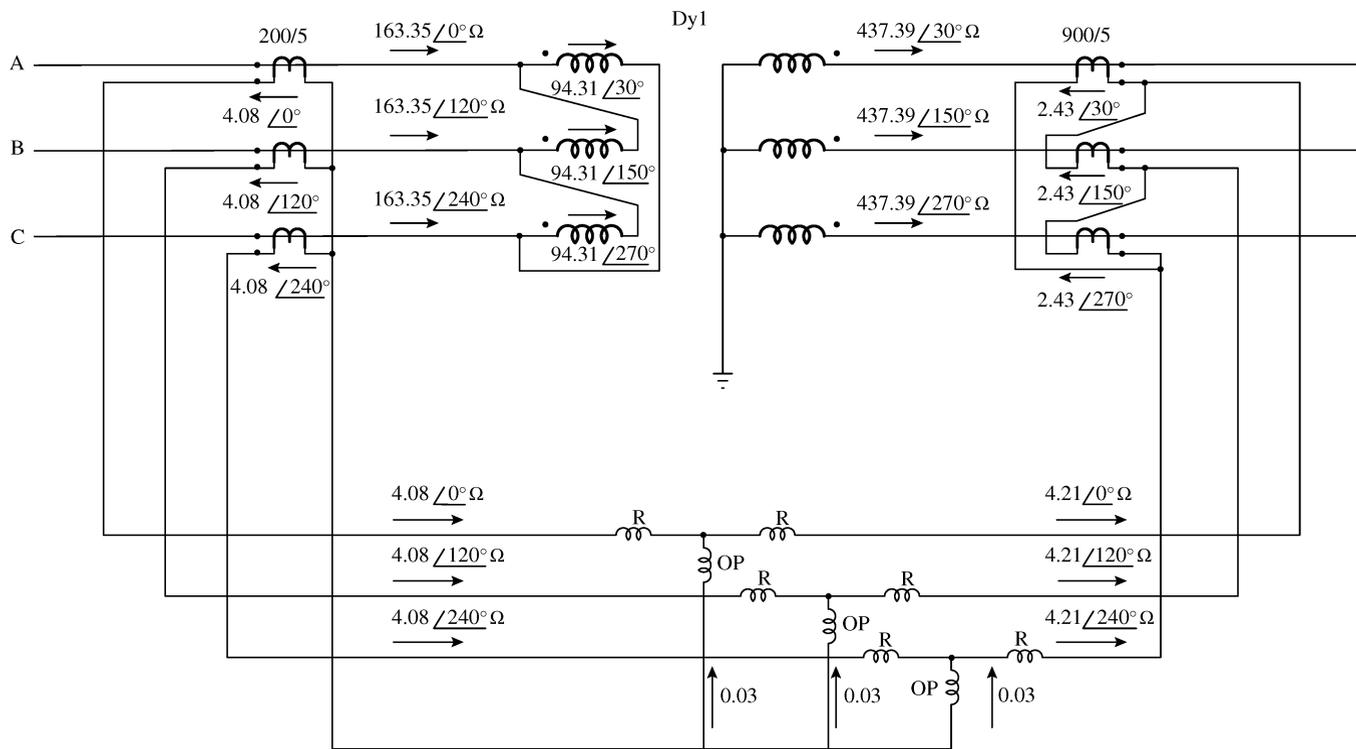


图 A.14 习题 8.3 电网正常工作情况

B、C 相间故障时，三角形联结侧感应的电流为

$$I_{\text{Delta}} = I_{\text{fault}} \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{\sqrt{3}V_1}$$

因此

$$I_{\text{Delta}} = I_{\text{fault}} \frac{V_2}{\sqrt{3}V_1} = \left( 4500 \times \frac{13.2}{\sqrt{3} \times 34.5} \right) \text{A} = 994.05 \text{A}$$

线电流为三角形联结中的两相电流和，是较大电流相的电流的两倍。

图 A. 15 所示为 B、C 相间故障，此时导体中电流的幅值和方向如图所示。根据动作线圈中是否有不平衡电流，有必要确定差动继电器是否需要动作。

如图 A. 15 所示，可以预见，差动继电器的动作线圈流过的电流很小，因为故障不会引起很大的不平衡电流，因此 B、C 相间故障时，即使相量旋转方向为反向，差动继电器也不会动作。

## 习题 8.4 答案

图 A. 16 所示为练习 8.4 的电网示意图，图 A. 17 所示为习题 8.4 的单线图。

变压器最大负载电流为

$$I_{\text{nom}(69\text{kV})} = \frac{20 \times 10^6 \text{V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 69 \times 10^3 \text{V}} = 167.35 \text{A}$$

$$I_{\text{nom}(12.4\text{kV})} = \frac{20 \times 10^6 \text{V} \cdot \text{A}}{\sqrt{3} \times 12.4 \times 10^3 \text{V}} = 931.21 \text{A}$$

继电器电流为

$$I_{69\text{kV}} = [167.35 \times (5/600)] \text{A} = 1.39 \text{A}$$

$$I_{12.4\text{kV}} = [931.21 \times (5/1200) \times (1/a) \times (1/\sqrt{3})] \text{A}$$

由于从任一侧进入继电器的电流都必须平衡，补偿变压器的电压比计算为

$$[931.21 \times (5/1200) \times (1/a) \times (1/\sqrt{3})] \text{A} = 1.39 \text{A}$$

可得  $a = 1.61$ 。

图 A. 18 所示为变压器 Yd7 联结时的矢量图，A、B 和 C 相旋转方向为正向。

由 Yd7 连接方式的相序图，可得图 A. 19 所示的正常工作情况下的三相示意图，图中给出了 CT 的连接，以及一次和二次的电流幅值和方向。

## 习题 9.1 答案

感抗示意图中姆欧继电器的特性为一个通过坐标轴原点的圆，圆心为  $(a, b)$ ，如图 A. 20 所示。



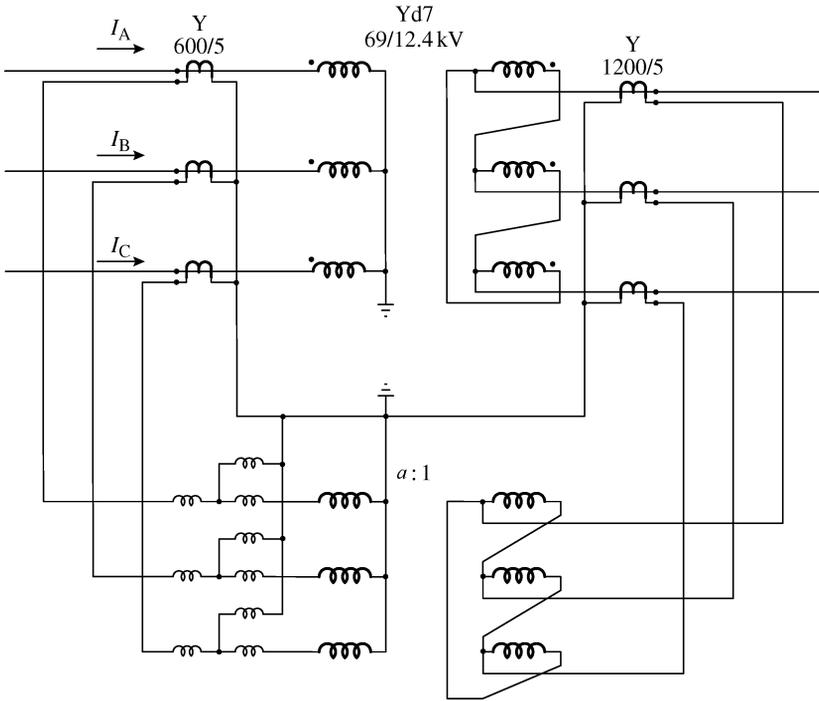


图 A.16 习题 8.4 的电网示意图

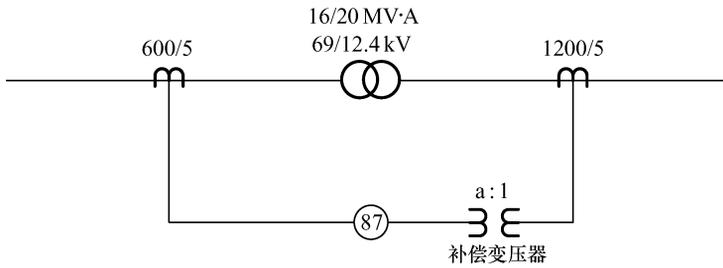


图 A.17 习题 8.4 的单线图

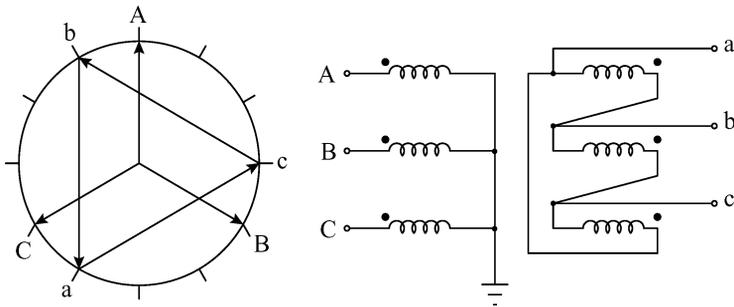


图 A.18 Yd7 变压器的矢量图

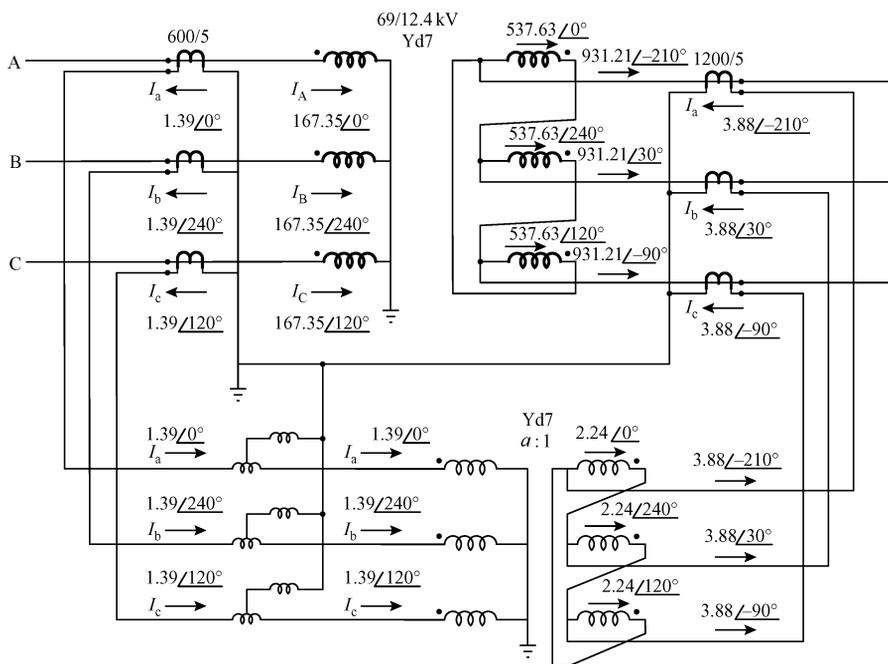


图 A.19 习题 8.4 电网正常工作情况

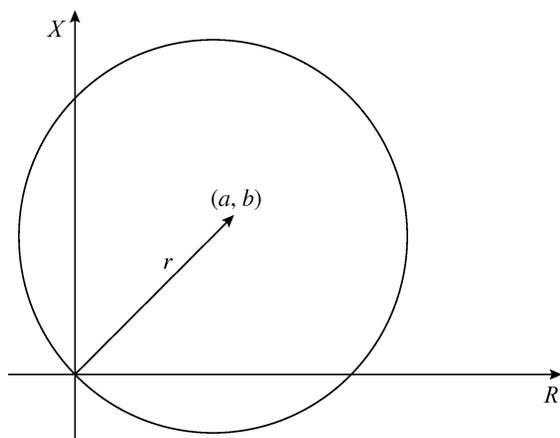


图 A.20  $X$ - $R$  坐标轴中的姆欧特性 (习题 9.1)

为了在导纳图中获得姆欧继电器的特性，需要建立继电器的特性方程：

$$Z = R + jX$$

$$Y = 1/(R + jX)$$

两边同时乘以  $(R - jX)$

$$Y = (R - jX)/(R^2 + X^2) = G + jB$$

$$G = R/(R^2 + X^2)$$

$$B = -X/(R^2 + X^2)$$

根据圆的方程式:

$$(R - a)^2 + (X - b)^2 = r^2$$

$$R^2 - 2aR + a^2 + X^2 - 2bX + b^2 = r^2$$

其中  $r^2 = a^2 + b^2$

那么

$$R^2 - 2aR + X^2 - 2bX = 0$$

除以  $(R^2 + X^2)$  可得

$$\frac{R^2 + X^2}{R^2 + X^2} - \frac{2aR}{R^2 + X^2} - \frac{2bX}{R^2 + X^2} = 0$$

$$1 - \frac{2aR}{R^2 + X^2} - \frac{2bX}{R^2 + X^2} = 0$$

用  $G$  表示  $B$ , 可得

$$1 - 2aG + 2bB = 0$$

$$B = \frac{aG}{b} - \frac{1}{2b}$$

如果  $B = 0$ , 那么  $G = \frac{1}{2a}$ ; 如果  $G = 0$ , 那么  $B = -\frac{1}{2b}$ , 所以在导纳图中姆欧继电器的特性如图 A. 21 所示。

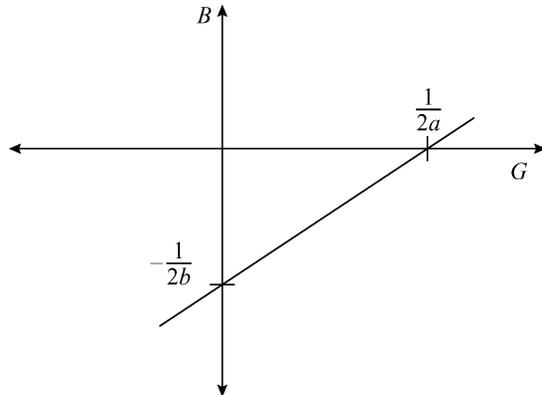


图 A. 21 在  $B$ - $G$  坐标轴中的姆欧特性 (习题 9.1)

## 习题 9.2 答案

图 A. 22 所示为习题 9.2 的单线图。

单相故障时, 三序网络图为串联连接, 如图 A. 23 所示。

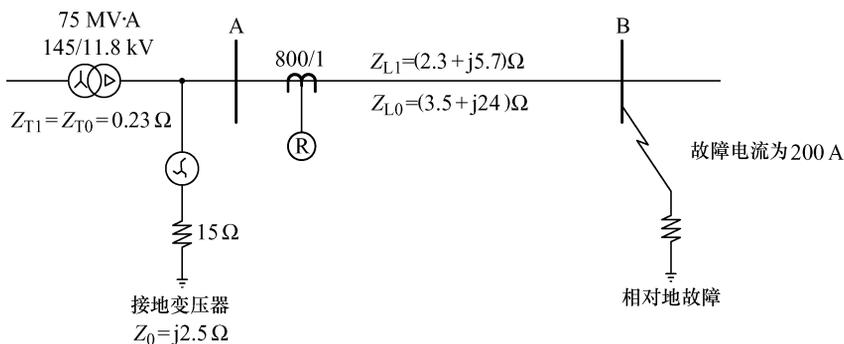


图 A.22 习题 9.2 的单线图

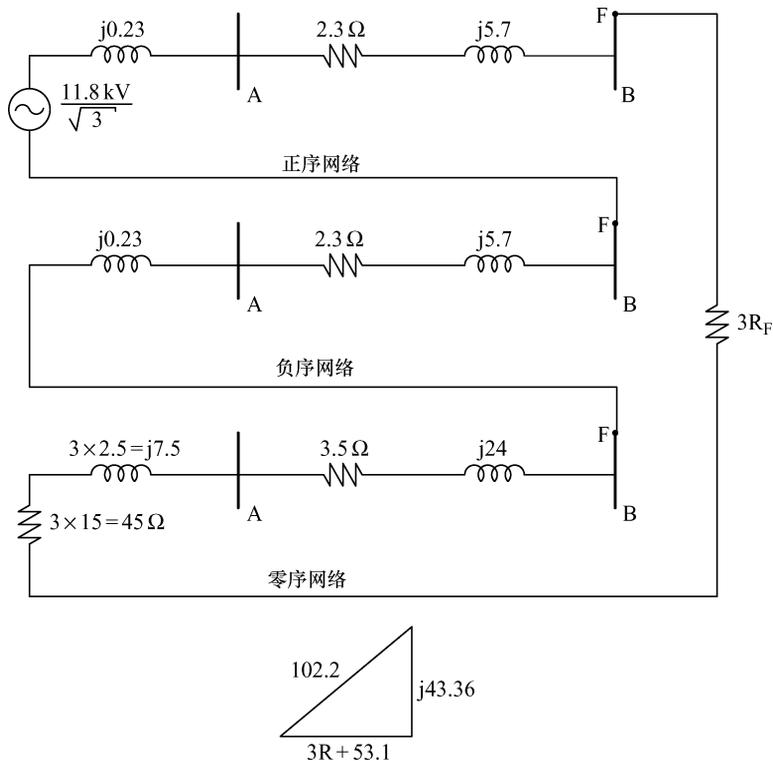


图 A.23 习题 9.2 的各序网络图

单相故障时可得

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \Rightarrow I_{a1} = I_a / 3$$

$$I_a = 3I_{a1} = \frac{3 \times (11.8 \times 10^3) V}{\sqrt{3} \times [2 \times (j0.23 + 2.3 + j5.7) + 45 + j7.5 + (3.5 + j24) + 3R_F]}$$

$$I_a = \frac{20.44 \times 10^3 V}{53.1 \Omega + 3R_F + j43.46 \Omega}$$

如果  $R_T = 53.1 + 3R_F$ , 那么

$$R_T + j43.36\Omega = 20.44 \times 10^3 \text{V} / (I_F \angle -\theta_1)$$

如果  $I_F = 200\text{A}$ , 那么

$$R_T + j43.36\Omega = 20.44 \times 10^3 \text{V} / (200\text{A} \angle -\theta_1)$$

$$R_T = (\sqrt{102.2^2 + 43.36^2})\Omega = 92.25\Omega$$

因此故障电阻为

$$R_F = [(92.25 - 53.1)/3]\Omega = 13.15\Omega$$

剩余补偿常数为

$$K = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}}$$

$$K = \frac{3.5 + j24 - 2.3 - j5.7}{3(2.3 + j5.7)} = \frac{1.2 + j18.3}{6.9 + j17.1} = 0.99$$

如果剩余补偿等于 1.0 (即 100%), 计算继电器测得的二次阻抗为

$$Z_R = \frac{V_{Ra}}{I_{Ra}} = \frac{I_0(Z_{L1} + Z_{L2} + 3R_F + Z_{L0})}{3I_0 + KI_R} = \frac{2Z_{L1} + 3R_F + Z_{L0}}{3(1 + K)}$$

且  $K = 1$ 。

由于故障时  $I_R = 3I_0$ , 那么

$$Z_R = \left[ \frac{2 \times (2.3 + j5.7) + (3 \times 13.15) + (3.5 + j24)}{6} \right] \Omega = (7.93 + j5.9)\Omega$$

二次阻抗为

$$\text{二次阻抗} \times \frac{\text{CT 变比}}{\text{VT 变比}} = \left[ (7.93 + j5.9) \times \frac{800/1}{11800/110} \right] \Omega = (59.14 + j44)\Omega$$

### 习题 9.3 答案

图 A.24 所示为习题 9.3 的电力系统。

位于 Pance 线 Juanchito 变电站的距离继电器的动作区域如下:

1 段 保护 Juanchito—Pance 线 85% 的范围。

2 段 保护 Juanchito—Pance 线 100% 的范围, 以及邻近的最短线路的 50%, 此例中为 Pance—Yumbo 线。

3 段 保护 Juanchito—Pance 线 100% 的范围及最长临近线路 Pance—Alto Anchicaya 线的 100%, 以及远端最短线路 Alto Anchicaya—Yumbo 线的 25%。

由于要计算 3 段的二次阻抗, 就要采用图 A.24 给出的阻抗, 计算最长临近线路和最短远端线路的馈入常数。

$$Z_3 = Z_{\text{protected line}} + (1 + K_2)(Z_{\text{longest adjacent line}}) + 0.25(1 + K_3)(Z_{\text{shortest remote line}}),$$

$$Z_{\text{protected line}} = 11.40 \angle 83.48^\circ \Omega (\text{Juanchito—Pance line})$$

$$Z_{\text{longest adjacent line}} = 27.64 \angle 82.45^\circ \Omega (\text{Pance—Alto Anchicaya line})$$

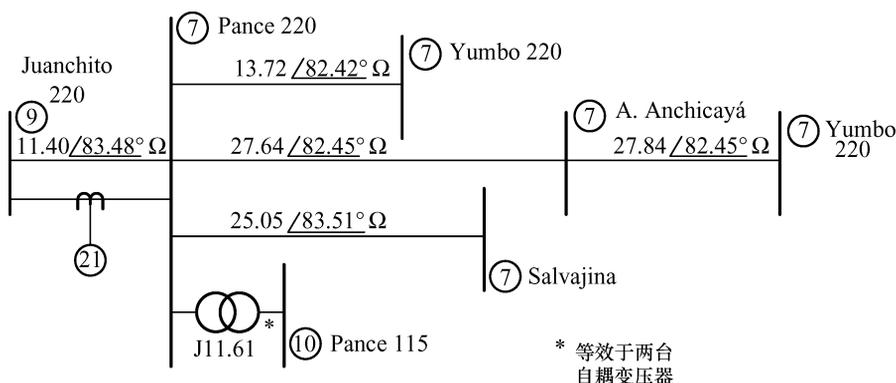


图 A.24 习题 9.3 的电力系统

$$Z_{\text{shortest remote line}} = 27.84 \angle 82.45^\circ \Omega (\text{Alto Anchicaya—Yumbo line})$$

$$K_2 = \frac{I_{\text{not seen by relay}}}{I_{\text{relay}}} = \frac{I_{2-7} + I_{10-7} + I_{8-7} + 0.5(I_{9-7})}{0.5(I_{9-7})}$$

由图 9.53 可得

$$K_2 = \frac{1278 \angle -87.96^\circ + 1210.67 \angle -87.6^\circ + 2446.77 \angle -86.18^\circ + 0.5(1814.2 \angle -86.59^\circ)}{0.5(1814.2 \angle -86.59^\circ)}$$

$$= 6.44 \angle -0.34^\circ$$

计算最短远端线路覆盖范围的第二个馈入常数  $K_3$ ，以及计算最长临近线路的第一个馈入常数  $K_2$ （计算如上）是类似的。但是，此时需要考虑 Alto Anchicaya 发电机的作用，它不会影响 Pance—Alto Anchicaya 线 3 段继电器的保护范围，但会影响远端 Alto Anchicaya—Yumbo 回路。因此

$$K_3 = \frac{I_{\text{not seen by relay}}}{I_{\text{relay}}} = \frac{I_{2-7} + I_{10-7} + I_{8-7} + 0.5(I_{9-7}) + I_{\text{contribution for genatAA}}}{0.5(I_{9-7})}$$

由 Alto Anchicaya 变电站引起的电流应该包含在上面的公式中，但此题中不计。然而，可以假设  $K_3 = K_2$ ，那么  $Z_3$  的范围会稍有减小，由于这个区域是远端的后备保护，所以影响不大（如本书 9.3 节所述）。

$$Z_3 = \{ 11.4 \angle 83.5^\circ + [(1 + 6.44 \angle -0.34^\circ) \times 27.64 \angle 82.45^\circ] \\ + [0.25(1 + 6.44 \angle -0.34^\circ) \times 27.84 \angle 82.45^\circ] \} \Omega$$

$$= 268.82 \angle 82.21^\circ \Omega \quad \text{一次阻抗}$$

$Z_3$  换算至二次阻抗为

$$Z_3 = (\text{一次阻抗}) \times (\text{CT 变比}) / (\text{VT 变比})$$

$$= [268.82 \angle 82.21^\circ \times (800/5) \times (1/2000)] \Omega = 21.5 \Omega \quad \text{二次阻抗}$$

为了确认最大负载阻抗永远不会在 3 段保护的特定范围内，必须检查最大负载的接近程度，有

$$Z_x = \frac{0.55Z_3 \sin \alpha}{\sin(\phi - 30^\circ)}$$

根据式 (9.40) 有

$$\begin{aligned}\beta &= \sin^{-1} \{0.818 \sin(\phi - 30^\circ)\} \\ \alpha &= 210^\circ - \beta - \phi\end{aligned}$$

继电器整定角度为

$$\begin{aligned}\Phi &= 75^\circ, \beta = \Phi = 35.34^\circ \\ \alpha &= 210^\circ - 35.34^\circ - 75^\circ = 99.66^\circ\end{aligned}$$

代入公式计算  $Z_x$

$$Z_x = \left[ \frac{0.55 \times 268.82 \times \sin 99.66^\circ}{\sin(75^\circ - 30^\circ)} \right] \Omega = 206.13 \Omega \quad \text{一次阻抗}$$

最大负载阻抗为

$$Z_c = \frac{V^2}{P} = \left[ \frac{(220 \times 10^3)^2}{40 \times 10^6} \right] \Omega = 1210 \Omega \quad \text{一次阻抗}$$

检查包括验证, 有

$$\frac{Z_c - Z_x}{Z_c} \geq 0.5$$

对于双回路线路, 有

$$\frac{Z_c - Z_x}{Z_c} = \frac{1210 - 206.13}{1210} = 0.829$$

大于 0.5。因此, 继电器整定值时合适的, 不用减小其覆盖范围。

## 参考文献

- ABB: 'Distribution protection', in *ABB Buyer Guide*. Vols. I–III (Protection Division ES CH- 5300 Turgi, Switzerland, 1989–1990)
- ABB: *Instrument Transformers Application Guide*. 3rd edn. (Ludvika, Sweden, 2009)
- ABB: *MOCT-P Optical Current Transformer System 72.5–800 kV Systems, 50/60 Hz*. Mount Pleasant, Pennsylvania, (2009)
- AGUILAR, R., ARIZA, J.: 'Testing and configuration of IEC 61850 multivendor protection schemes'. *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*; New Orleans, 2010
- AGUILAR, R., ARIZA, J., ESPINOSA, D., MENDOZA, J.: 'Testing Ethernet network for GOOSE tripping'. *37th Annual Western Protective Relaying Conference*; Spokane, Washington, 2010
- ALSTOM: *Network Protection & Automation Guide*. 3rd edn. (Barcelona, Spain, Cayfosa, March 1995)
- ALTUVE, H., SCHWEITZER, E.: *Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems* (Pullman WA, USA, Schweitzer Engineering Laboratories, 2010)
- ANDERSON, P. M., MIRHEYDAR, M.: 'An adaptive method of setting under-frequency load shedding relays'. *IEEE Trans.* 1992, vol. PWR-7, no. 2, pp. 647–55
- ANDERSON, P. M.: *Analysis of Faulted Power Systems* (Ames, Iowa, The Iowa State University Press, 1995)
- ANSI/IEEE Standard C57.13: *Standard Requirements for Instrument Transformers* (1978)
- ANSI/IEEE Standard 141: *Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants* (1990)
- ANSI/IEEE Standard 242: *Recommended Practice for Protection and Co-ordination of Industrial and Commercial Power Systems* (1986)
- ANSI/IEEE Standard 399: *Recommended Practice for Power System Analysis* (1990)
- BASLER ELECTRIC: *Protection and Control Devices Standards, Dimensions and Accessories, Product Bulletin SDA-5 8-01* (Highland Illinois, August 2001)
- BASLER ELECTRIC: *Instruction Manual for Generator Protection System BE1-GPS100, Publication 9 3187 00 990, Revision C* (Highland Illinois, November 2001)
- BASLER ELECTRIC: *Instruction Manual for Overcurrent BE1-951, Publication 9 3289 00 990, Revision F* (Highland Illinois, August 2002)
- BECKWITH ELECTRIC CO.: *Instruction Book M-3425 Generator Protection Relay, Publication 800-3425-IB-02MC2* (Largo Florida, January 2003)
- BECKWITH ELECTRIC CO.: *Instruction Book M-3311 Transformer Protection Relay, Publication 800-3311-IB-01MC1* (Largo Florida, February 2003)

- BLACKBURN, J. I.: *Protective Relaying Principles and Applications*. 3rd edn. (CRC Press, Boca Raton FL USA, 2008)
- BLACKBURN, J. L.: *Protective Relaying*. 2nd edn. (New York, Marcel Dekker, 1998)
- BROWN, R. E.: *Electric Power Distribution Reliability*. 2nd edn. (CRC Press, Boca Raton FL USA, 2009)
- BURNETT, J.: 'IDMT relay tripping of main incoming circuit breakers'. *Power Eng. J.* 1990, vol. 4, pp. 51–6
- CLOSSON, J., YOUNG, M.: 'Commissioning numerical relays'. *XIV IEEE Summer Meeting*; Acapulco, Mexico, July 2001
- COOK, V.: *Analysis of Distance Protection* (New York, John Wiley & Sons, 1985)
- COOPER POWER SYSTEMS: *Electrical Distribution System Protection Manual*. 3rd edn. (Pittsburgh USA, 1990)
- DAVIES, T.: *Protection of Industrial Power Systems* (Cleveland, Pergamon Press, 1983)
- ELMORE, W. A.: *Protective Relaying Theory and Applications* (New York, ABB, 1994)
- FEENAN, J.: 'The versatility of high-voltage fuses in the protection of distribution systems'. *Power Eng. J.* 1987, vol. 1, pp. 109–15
- GEC ALSTHOM: *Protective Relays Application Guide*. 3rd edn. (London & Wisbech, Balding & Mansell PLC, September 1990)
- GEC MEASUREMENTS: *Quadramho Static Distance Protection Relay, Publication R-5580B* (London)
- GERRS, J. M.: *Aplicación de Protecciones Eléctricas a Sistemas de Potencia (Application of Electrical Protection to Power Systems)* (Cali, Universidad de Valle, 1993)
- GERRS, J. M.: 'Enhancing numerical relaying performance with logic customization'. *XV IEEE Summer Meeting*; Acapulco, México, July 2002
- GONEN, T.: *Electric Power Distribution System Engineering*. 2nd edn. (CRC Press, Boca Raton FL USA, 2008)
- GORAJ, M., HERRMANN, J.: *Experiences in IEC 61850 and Possible Improvements of SCL Languages* (Praxis Profile, April 2007), p. 60
- GROSS, C. A.: *Power System Analysis*. 2nd edn. (New York, John Wiley & Sons, 1986)
- HARKER, K.: *Power System Commissioning and Maintenance Practice* (Peter Peregrinus), IEE, London UK, 1998
- HEADLEY, A., BURDIS, E. P., KELSEY, T.: 'Application of protective devices to radial overhead line networks'. *IEE Proc. C Gen. Transm. Distrib.* 1986, vol. 133, pp. 437–40
- HOLBACH, J., DUFAURE, T.: 'Comparison of IEC61850 GOOSE messages and control wiring between protection relays'. *62nd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*; Atlanta, USA 2008
- HORAK, J.: *Pitfalls and Benefits of Commissioning Numerical Relays* (Neta World, Colorado USA, 2003)
- HRABLIUK, J.: 'Optical current sensors eliminate CT saturation'. *IEEE PES*

*Winter Power Meeting*; Vancouver, 2002

- IEC 61850 Edn 1: *Communication Networks and Systems in Substations*, 14 Parts, Geneva, Switzerland, (2003–2005)
- IEC 61850 Edn 2: *Communication Networks and Systems for Power Utility Automation Scheduled for 2010*. Geneva, Switzerland
- IEEE: *Std C37.110-1996 – Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes*. New York, USA
- IEEE: *Std 242-1986: IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, Piscataway, USA
- KASZTENNY, B., WHATHEY, J., UDREN, E., BURGER, J., FINNEY, D.: ‘IEC 61850: A practical application primer for protection engineer’. *60th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*; Atlanta, Georgia 2006
- LAKERVI, E., HOLMES, E. J.: *Electricity Distribution Network Design*. 2nd edn. (Peter Peregrinus, Herts, UK, 1995); revised 2003
- LAYCOCK, W. J.: ‘Management of protection’. *Power Eng. J.* 1991, vol. 5, pp. 201–7
- LO, K. L., MCDONALD, J. R., YOUNG, D. J.: ‘Expert systems applied to alarm processing in distribution control centres’. *Conference Proceedings, UPEC 89*; Belfast, 1989
- LO, K. L., NASHID, L.: ‘Expert systems and their applications to power systems. Part 3: Examples of application’. *Power Eng. J.* 1993, vol. 7, no. 5, pp. 209–213
- LONG, W., COTCHER, D., RUIU, D., ADAM, P., LEE, S., ADAPA, R.: ‘EMTP – A powerful tool for analysing power system transients’. *Comput. Appl Power*. July 1990, vol 3, no 3, pp. 36–41
- MEGGER.: *Relay Testing Unit Sverker 750*, User’s Manual, (Programma Electric AB, Printed Matter ZP-CD01E R05B, 2007)
- MOORE, P. J., JOHNS, A. T.: ‘Adaptive digital distance protection’. *IEE Conference Publication*; 1989, vol. 302, pp. 187–91
- PHADKE, A. G., HOROWITZ, S. H.: ‘Adaptive relaying’. *IEEE Comput. Appl Power*. July 1990, vol 3, no 3, pp 47–51
- PHADKE, A. G., THORP, J. S.: *Computer Relaying for Power Systems* (New York, John Wiley & Sons, 1988)
- POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE WORKING GROUP H6: *Application Consideration of IEC 61850/UCA2 for Substation Ethernet Local Area Network Communication for Protection and Control* (2005). IEEE PCRC USA
- SHORT, T. A.: *Electric Power Distribution Handbook* (CRC Press, Boca Raton FL USA, 2004)
- SIDHU, T. S., SACHDEV, M. S., WOOD, H. C.: ‘Microprocessor-based relay for protecting power transformers’. *IEE Proc. C Gen. Transm. Distrib.* 1990, vol. 137, pp. 436–44
- SIEMENS: *Switching, Protection and Distribution in Low Voltage Networks*. 2nd edn. (Publicis MCD Verlag, 1994)
- STEVENSON, W. D.: *Elements of Power System Analysis*. 4th edn. (New York, McGraw-Hill, 1982)

- TEO, C. Y., CHAN, T. W.: 'Development of computer-aided assessment for distribution protection'. *Power Eng. J.* 1990, vol. 4, pp. 21–7
- URDANETA, A. J., RESTREPO, H., MARQUEZ, J., SANCHEZ, J.: 'Co-ordination of directional overcurrent relay timing using linear programming'. *IEEE PAS Winter Meeting*; New York, February 1995
- WESTINGHOUSE/ABB POWER T&D CO.: *Protective Relaying Theory and Application* (Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1994)
- WHITING, J. P., LIDGATE, D.: 'Computer prediction of IDMT relay settings and performance for interconnected power systems'. *IEE Proc. C Gen. Transm. Distrib.* 1983, vol. 130, no. 3, pp 139–147
- WRIGHT, A.: 'Application of fuses to power networks'. *Power Eng. J.* 1991, vol. 4, pp. 293–96, *ibid.* 1991, 5, pp. 129–34
- WRIGHT, A., NEWBERRY, P. G.: *Electric Fuses*. 2nd edn. (Peter Peregrinus, 1994). IEE London UK
- YOUNG, D. J., LO, K. L., MCDONALD, J. R., HOWARD, R., RYE, J.: 'Development of a practical expert system for alarm processing'. *IEE Proc. C Gen. Transm. Distrib.* 1992, vol. 139, no. 5, pp. 437–47
- ZHANG, Z. Z., CHEN, D.: 'An adaptive approach in digital distance protection'. *IEEE Trans.* 1991, vol. PWRD-6, no. 1, pp. 135–42

## 本书特色

相对于第2版，本书第3版对于继保基本原理方面的内容没有大的改动，但是在新技术应用方面增加了很多内容。为了增加可读性，以及方便与前两版内容作比较，本版在章节安排上没有大的改动，删除了“警报处理”一章，取而代之的是第13章“电力系统自动化的通信网络”，详细介绍了标准IEC 61850。

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

### 电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

### 网络服务

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎王欢

# 国际视野 科技前沿

## 国际电气工程先进技术译丛

- 《配电网保护》(原书第3版)
- 《嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用》
- 《高级测量仪器与计算机I/O设计:精度界定和控制及其工业应用》(原书第2版)
- 《固体氧化物燃料电池的动态建模与预测控制》
- 《氢能源和车辆系统》
- 《纳米技术与能源》
- 《电能效率:技术与应用》
- 《自主移动机器人行为建模与控制》
- 《环境能源发电:太阳能、风能和海洋能》
- 《智能电网——融合可再生、分布式及高效能源》
- 《电动汽车融入现代电网》
- 《太阳能照明》
- 《超级电容器:材料、系统及应用》
- 《太阳能发电系统控制技术》
- 《ESD物理与器件》
- 《锂二次电池原理与应用》
- 《风力发电并网运行的无功管理》
- 《超大规模集成电路物理设计:从图分割到时序收敛》
- 《海上风电成本建模:安装与拆除》
- 《智能电网——设计与分析基础》
- 《功率理论与电能质量治理》
- 《混合动力电动汽车原理及应用前景》
- 《智能电网中的传导电磁干扰》
- 《风能转换技术进展》
- 《电机传动系统控制》
- 《储氢材料:储存性能表征》
- 《风力机技术》
- 《小型风力机:分析、设计与应用》
- 《通信系统高电压保护》
- 《磁性测量手册》
- 《ESD设计与综合》
- 《太阳能利用技术及工程应用》
- 《超级电容器的应用》
- 《小型风力机:分析、设计与应用》
- 《太阳能电池、LED和二极管的原理:PN结的作用》
- 《风力发电系统——技术与趋势》
- 《可持续电力系统的建模与控制:面向更为智能和绿色的电网》
- 《电力系统高级预测技术和发电优化调度》
- 《大规模储能技术》
- 《风电系统电能质量和稳定性对策》
- 《环境能源发电:太阳能、风能和海洋能》
- 《传热学:电力电子器件热管理》
- 《现代电力电子学与交流传动》
- 《功率半导体器件:原理、特性和可靠性》
- 《风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设》
- 《储能技术》
- 《光伏系统工程》(原书第3版)
- 《光伏与风力发电系统并网变换器》
- 《先进电气驱动的分析、建模与控制》



机械工业出版社微信服务号

上架指导 工业技术 / 电力技术 / 配电网

ISBN 978-7-111-49063-0



9 787111 490630 >

定价: 78.80元