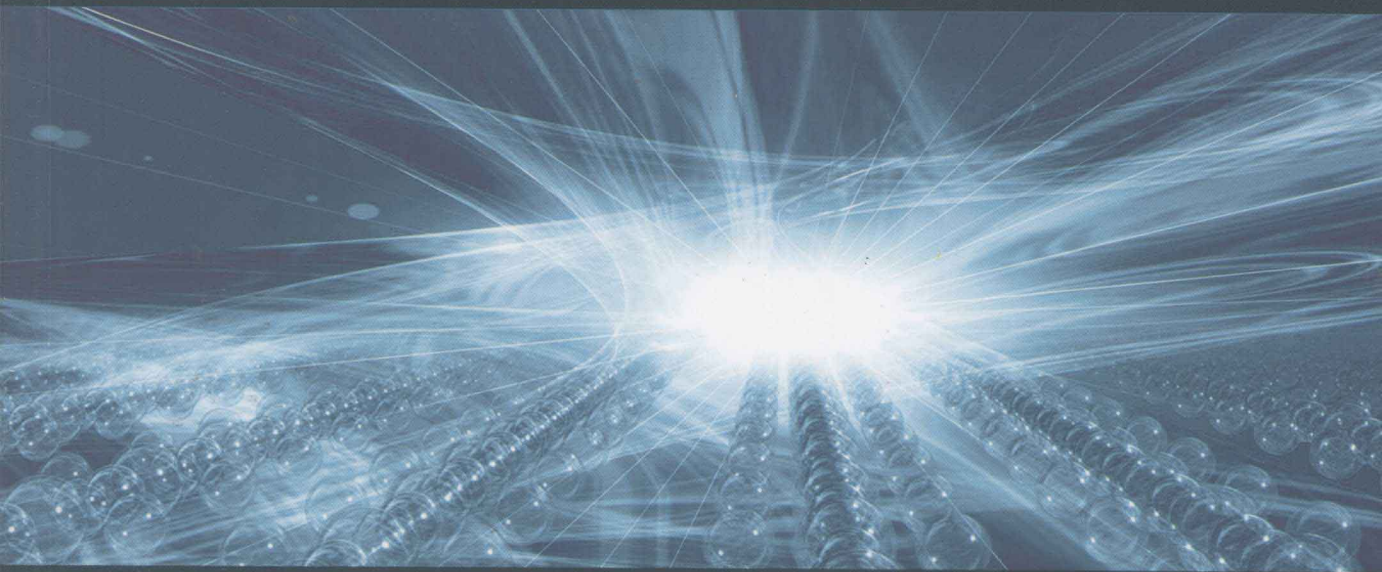




普通高等教育“十二五”规划教材



继电保护原理学习指导

(第二版)

刘学军 主 编

王洪希 段慧达 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

继电保护原理学习指导

(第二版)

主 编 刘学军
副主编 王洪希 段慧达
编 写 王宇鸿 姚 欣 刘大勇
主 审 王振和



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是为了帮助读者学习继电保护原理课程而编写的,与刘学军主编的《普通高等教育“十一五”规划教材 继电保护原理(第二版)》配套使用。本书内容包括两篇,共二十一章。第一篇对主教材中各章提出了学习要点,并对每章的思考题与习题作了详细解答。第二篇讲述了电气设备、输电线路继电保护的设计原理和方法;给出了继电保护课程设计题目和要求。附录中给出自测题和模拟试卷,供读者自查;此外还给出了继电保护基本元件实验指导。

本书主要作为普通高等院校电气工程及其自动化专业继电保护原理课程的教材,还可作为进行课程设计及毕业设计的参考书,也可作为函授教材及继电保护专业的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

继电保护原理学习指导/刘学军主编. —2版. —北京:中国电力出版社, 2011.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-1635-5

I. ①继… II. ①刘… III. ①继电保护—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM77

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第080034号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006年1月第一版

2011年9月第二版 2011年9月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 18.5印张 453千字

定价 32.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书在第一版基础上做了部分修改和补充，为了和《普通高等教育“十一五”规划教材继电保护原理（第二版）》配套一致，对第一篇第一章至第十三章增加部分习题和解答，增加了第十四章的习题解答。

本书是刘学军主编的《普通高等教育“十一五”规划教材 继电保护原理（第二版）》的配套用书，是为了帮助读者学习继电保护而编写的，包括对各章的学习要点及学习指导、教材全部习题的解答，主要继电器元件的实验和继电保护原理课程设计指导。帮助读者提高继电保护的理论水平和实践动手能力。

第一篇的实验部分改动较大，只保留了继电器基本元件五个实验，另外增加了微机线路三段式电流保护实验和微机变压器纵差动保护实验。将实验内容放到附录 E 中。

第二篇继电保护原理课程设计，对第十五章至第二十章做了文字修订；将与课程设计联系不紧密的原第二十章第二节删去；重新编写了第二十一章，内容是继电保护原理课程设计题目和要求。

在附录中还增加了继电保护原理测试题和模拟试卷，读者可以检查自己学习掌握课程的水平。

本书第一章至第三章由北华大学刘学军改写，第四章至第七章由段慧达改写，第八章至第十四章及附录 B 由王洪希改写，第十七章及第十六章第二节、第三节及附录 C、D 由王宇鸿改写，第十八章至第二十一章及附录 E 由姚欣改写，第十五章及第十六章第一节及附录 A 由吉林大学电子科学与工程学院刘大勇改写。

本书由刘学军担任主编并统稿，由王洪希、段慧达担任副主编。

本书在修订过程中得到了北华大学电气信息工程学院院长白晶教授的关心和大力支持。马凤军女士在文字录入和制图中做了大量工作。在此，向她们表示真诚的感谢。另外，对于书末所附参考文献的作者也表示衷心感谢。由于编者水平和实践经验有限，书中难免有缺点和错误，敬请读者批评指正。

编者

2011 年 3 月

第一版前言

继电保护原理课程是电力系统及其自动化和电气工程及其自动化专业的主要课程，这门课程涉及理论多，而学生和教师对常规保护元件了解较少，缺少实践，因此学习时会有一定困难，为帮助学生学好这门课程，特编写了《继电保护原理学习指导》这本书。

本书可与《继电保护原理》配套使用。全书分两篇，第一篇第一章至第十三章对《继电保护原理》的习题作了详细解答，为加强实践教学，第十四章为常规元件的继电保护实验及其指导；第二篇第十五章至第二十一章为继电保护设计，可作为学生继电保护课程设计和毕业设计的指导书。

全书由北华大学电气信息工程学院刘学军任主编，王学明、段慧达任副主编，王振和教授主审。参加本书编写工作的还有王福林、王建南、刘畅、张鑫、张辉、于利。

由于编者水平和实践经验有限，书中难免有缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

于北华大学电气信息工程学院

目 录

前言

第一版前言

第一篇 继电保护原理学习要点与习题解答

第一章 绪论	1
第二章 互感器和变换器	5
第三章 电网相间短路的电流电压保护	15
第四章 电网相间短路的方向电流保护	29
第五章 电网的接地保护	34
第六章 电网的距离保护	44
第七章 电网的差动保护	59
第八章 电网高频保护	63
第九章 输电线路的自动重合闸	72
第十章 变压器保护	79
第十一章 同步发电机的继电保护	88
第十二章 母线保护	103
第十三章 电动机保护和电力电容器保护	111
第十四章 微机继电保护原理	117

第二篇 继电保护课程设计

第十五章 继电保护设计的基本知识	126
第一节 继电保护设计的目的及要求	126
第二节 继电保护课程设计及毕业设计内容和设计步骤	126
第三节 主保护、后备保护和辅助保护	134
第四节 对继电保护设计的基本要求	135
第五节 电力系统中性点接地的选择和对系统运行方式的考虑	137
第六节 电力系统振荡及分支线对保护的影响	140
第七节 保护装置的相互配合	142
第十六章 电网继电保护设计	144
第一节 35~110kV 中性点非直接接地电网线路保护的配置及整定计算	144
第二节 110~220kV 中性点直接接地电网线路保护的配置及整定计算	159

第三节	330~500kV 中性点直接接地电网线路保护的配置及整定计算	172
第四节	电网线路保护设计举例	173
第十七章	变压器继电保护的设计	187
第一节	电力变压器继电保护的配置及其整定计算	187
第二节	电力变压器继电保护设计举例	198
第十八章	发电机继电保护的设计	206
第一节	发电机继电保护的配置及整定计算	206
第二节	大型发电机—变压器组的继电保护设计举例	222
第十九章	母线保护及断路器失灵保护的整定计算	230
第一节	母线保护	230
第二节	断路器失灵保护	233
第二十章	电网自动装置的配置原则	234
第二十一章	继电保护原理课程设计题目及要求	237
附录 A	继电保护原理测试题	242
附录 B	继电保护原理模拟试卷及答案	249
附录 C	常用继电器技术数据	258
附录 D	短路保护的最小灵敏系数 $K_{s.min}$	263
附录 E	继电保护原理实验	264
参考文献		289

第一篇 继电保护原理学习要点与习题解答

第一章 绪 论

一、基本内容和学习要点

本章主要介绍了继电保护的任务和作用、继电保护的基本要求、继电保护装置的构成及分类。

要了解与继电保护关系密切的几个基本概念，如故障、不正常运行状态和事故的各自特点与区别。

电力系统故障的后果是十分严重的，数值较大的短路电流通过故障设备，可能直接将设备烧毁，造成人身伤亡，破坏电力系统运行的稳定性，甚至使事故扩大、整个电力系统瓦解，造成大面积长时间停电。

保障电力设备安全和防止及限制电力系统长时间大面积停电的最基本、最重要、最有效的技术手段就是采用继电保护技术或安全自动装置。

电力系统继电保护的基本作用是在系统内，按指定分区段实时检测各种故障和不正常运行状态，快速及时地采取故障隔离和告警等措施以求最大限度的维持电力系统的稳定运行，保持供电的连续性，保障人身、设备的安全，防止或减轻设备的损坏。

当系统发生不正常运行状态和故障时，如不及时正确处理，将发展成系统事故。事故是指系统或其一部分的正常工作遭到破坏，并造成对用户少供电或电能质量变坏至不能允许程度，甚至造成人身伤亡和电气设备的损坏。故障和不正常运行状态是不可避免的，但是事故却是可以防止的。

继电保护装置的基本任务如下：

(1) 自动、迅速、有选择性的将故障元件从电力系统中切除，使故障元件免受破坏，并保障其他无故障元件迅速恢复供电。

(2) 实时监视电力系统运行状态，发生不正常运行状态及时告警，以便运行人员采取正确措施。

(3) 继电保护装置与电力系统其他自动装置相配合，缩短事故停电时间，尽快恢复供电，提高电力系统运行的可靠性。

对继电保护装置的基本要求是所谓的“四性”，即选择性、速动性、灵敏性和可靠性。其中可靠性最为重要，选择性是关键，灵敏性则必须足够高，速动性达到必要的程度即可。

这“四性”之间，既有矛盾的一面，又有在一定条件下统一的一面。“四性”是设计、分析与评价继电保护装置是否先进、实用和完善的出发点及依据，要不断加深对“四性”的认识。

要了解继电保护的工作原理，继电保护装置的分类及构成。重点掌握模拟型继电保护装置的工作原理，对于数字型微机保护装置只要求有基本认识即可，在第十四章中再进行学习研究。

二、思考题与习题解答

1-1 什么是故障、异常运行方式和事故？它们之间有何不同？又有何联系？

答：电力系统运行中，电气元件发生短路、断线时的状态均视为故障状态；电气元件超出正常允许工作范围，但没有发生故障运行，属于异常运行方式，即不正常工作状态；当电力系统发生故障和不正常运行方式时，若不及时处理或处理不当，则将引发系统事故，事故是指系统整体或部分的工作遭到破坏，并造成对用户少供电或电能质量不符合用电标准，甚至造成人身伤亡和电气设备损坏等严重后果。故障和异常运行方式不可避免，而事故则可以避免发生。

1-2 常见故障有哪些类型？故障后果表现在哪些方面？

答：常见故障是各种类型短路，包括相间短路和接地短路。此外，还有输电线路断线，旋转电机、变压器同一相绕组匝间短路等，以及由上述几种故障组合成复杂的故障。

故障后果会使故障设备损坏或烧毁；短路电流通过非故障设备产生热效应和力效应，使非故障元件损坏或缩短使用寿命；造成系统中部分地区电压值大幅度下降，破坏电能用户正常工作，影响产品质量；破坏电力系统中各发电厂之间并联运行稳定性，使系统发生振荡，从而使事故扩大，甚至是整个电力系统瓦解。

1-3 什么是主保护、后备保护和辅助保护？远后备保护和近后备保护有什么区别？

答：一般把反映被保护元件严重故障、快速动作与跳闸的保护装置称为主保护，而把在主保护系统失效时备用的保护称为后备保护。当本元件主保护拒动，由本元件另一套保护装置作为后备保护，这种后备保护是在同一安装处实现的，故称为近后备保护。远后备保护对相邻元件保护各种原因的拒动均能起到后备保护作用，同时它实现简单、经济，因此要优先采用，只有在远后备保护不能满足要求时才考虑采用近后备保护。

辅助保护是为了补充主保护和后备保护的不足而增设的简单保护，如用电流速断保护来加速切除故障或消除方向元件的死区。

1-4 继电保护装置的任务及其基本要求是什么？

答：继电保护装置的任务是自动、迅速、有选择性的切除故障元件，使其免受破坏，保证其他无故障元件恢复正常运行；监视电力系统各元件，反映其不正常工作状态，并根据运行维护条件规范设备承受能力而动作，发出告警信号，或减负荷、或延时跳闸；继电保护装置与其他自动装置配合，缩短停电时间，尽快恢复供电，提高电力系统运行的可靠性。

继电保护装置的基本要求是满足“四性”，即选择性、速动性、灵敏性和可靠性。

1-5 继电保护的基本原理是什么？

答：继电保护的基本原理是根据电力系统故障时电气量通常发生较大变化，偏离正常运行范围，利用故障电气量变化的特征可以构成各种原理的继电保护。例如，根据短路故障时电流增大，可构成过流保护和电流速断保护；根据短路故障时电压降低可构成低电压保护和电压速断保护等。除反映各种工频电气量保护原理外，还有反映非工频电气量的保护，如超高压输电线的行波保护和反映非电气量的电力变压器的瓦斯保护、过热保护等。

1-6 在图 1-1 中，各断路器处均装有继电保护装置 P1~P7。试回答下列问题：

(1) 当 k1 点短路时，根据选择性要求应由哪个保护动作并跳开哪个断路器？如果 6QF 因失灵而拒动，保护又将如何动作？

(2) 当 k2 点短路时, 根据选择性要求应由哪些保护动作并跳开哪几个断路器? 如果此时保护 3 拒动或 3QF 拒跳, 但保护 P1 动作并跳开 1QF, 问此种动作是否有选择性? 如果拒动的断路器为 2QF, 对保护 P1 的动作又应该如何评价?

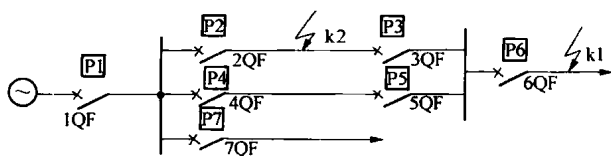


图 1-1 题 1-6 电网示意图

答: (1) 当 k1 点短路时, 根据选择性要求保护 P6 动作应跳开 6QF, 如果 6QF 拒动, 由近后备保护 P3、P5 动作跳开 3QF、5QF, 或由远后备保护 P2、P4 的动作跳开 2QF、4QF。

(2) 当 k2 点短路时, 根据选择性要求应由保护 P2、P3 动作跳开 2QF、3QF, 如 3QF 拒动, 保护 1 动作并跳开 1QF, 则保护 P1 为无选择性动作, 此时应由保护 P5 或保护 P4 动作, 跳开 5QF 或 4QF。如果是 2QF 拒动, 则保护 P1 动作跳开 1QF 具有选择性。

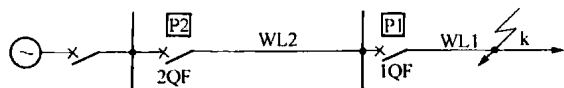


图 1-2 题 1-7 电网示意图

1-7 在图 1-2 所示网络中, 设在 k 点发生短路, 试就以下几种情况评述保护 P1 和保护 P2 对四项基本要求的满足情况:

(1) 保护 P1 按整定时间先动作跳开 1QF, 保护 P2 启动, 并在故障后返回。

- (2) 保护 P1 和 P2 同时按保护 1 整定时间动作, 并跳开断路器 1QF 和 2QF。
- (3) 保护 P1 和保护 P2 同时按保护 P2 整定时间动作, 并跳开断路器 1QF 和断路器 2QF。
- (4) 保护 P1 启动, 但未跳闸, 保护 P2 动作, 跳开断路器 2QF。
- (5) 保护 P1 未启动, 保护 P2 动作, 并跳开断路器 2QF。
- (6) 保护 P1 和保护 P2 均未动作。

答: (1) 保护 1 按整定时间先动作跳开 1QF, 说明保护 1 已满足四项基本要求, 而保护 2 启动在故障切除后返回说明保护 2 满足灵敏性 (能启动) 要求, 满足选择性 (启动后返回), 满足可靠性 (最终没有动作, 说明不该动作能可靠不动作) 等三条基本要求。对于速动性, 由于它最终没有动作所以速动性没有表现。

(2) 保护 P1 和 P2 同时按保护 P1 整定时间动作并跳开 1QF 和 2QF, 表明保护 P1 满足四项基本要求, 保护 P2 为无选择性跳闸, 故选择性和可靠性均不满足要求, 灵敏性满足, 速动性不满足, 因为它不是尽快切除保护范围内故障, 其行为不是遵循“缩小故障范围”, 而是扩大故障范围。

(3) 保护 P1 和 P2 同时按保护 P2 整定时间动作跳开 1QF 和 2QF, 这表明保护 P1 满足可靠性, 选择性和灵敏性要求, 但未满足速动性要求, 因为没有做到尽快切除故障, 由于它晚动作已造成保护 P2 越级跳闸, 导致故障范围扩大, 违背速动性要求。保护 2 为无选择性越级跳闸, 但在保护 P1 工作失常前提下, 且保护 P2 是符合预先规定的, 故其四条基本要求都满足。

(4) 保护 P1 启动未跳闸, 保护 P2 动作为跳开 2QF, 表明保护 P1 为无选择性, 未跳闸表明不可靠, 灵敏性满足, 快速性不满足; 保护 P2 满足全部四项基本要求。

(5) 保护 1 未启动, 保护 P2 动作并跳开断路器 2QF, 表明保护 P1 不满足四项基本条件, 保护 P2 满足全部四项基本要求

(6) 保护 P1 和保护 P2 均未动作, 这表明保护 P1 和 P2 均未满足四项基本要求。

1-8 何谓继电保护装置、继电器、继电保护系统、继电保护?

答: (1) 继电保护装置是当电力系统发生故障或出现异常状态时能自动、迅速、有选择性的切除故障设备或发出警告信号的一种专门的反事故用自动装置。

(2) 继电器为控制装置与继电保护装置的基本组成元件, 是一种当输入信息满足一定逻辑条件或达到一定数值时即给出输出的单元器件, 其中至少有一个为电气量。

(3) 继电保护系统为多种或多套继电保护装置的集合。

(4) 继电保护用来泛指继电保护技术或继电保护系统, 习惯上也可把继电保护装置简称为继电保护, 有时直接称为“保护”。

1-9 继电器怎样分类, 试分别说明。

答: (1) 按继电器在继电保护中作用, 可分为测量继电器和辅助继电器两大类。

1) 测量继电器能直接反应电气量大小, 按反应电气量不同, 又可分为电流继电器、电压继电器、功率方向继电器、阻抗继电器、频率继电器及差动继电器等。

2) 辅助继电器可用来改进和完善保护功能, 按其作用不同, 可分为中间继电器、时间继电器以及信号继电器等。

(2) 继电器按结构形式分, 目前主要有电磁型、感应型、整流型、微机型。

1-10 如图 1-3 所示, 当线路 CD 的 k3 点发生短路故障时, 哪些保护应动作? 如保护 P6 和 P5 拒动, 根据选择性的要求, 哪些保护应动作? 如线路 AB 的 k1 点发生短路, 根据选择性要求, 哪些保护应动作? 如果保护 P2 或 2QF 拒动, 哪些保护应动作?

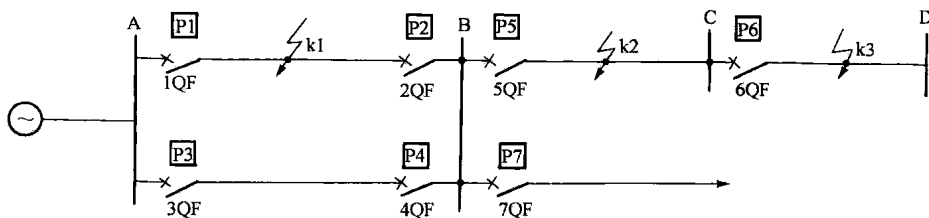


图 1-3 题 1-10 电网示意图

答: (1) 当线路 CD 中 k3 点发生短路故障时, 保护 P6 应动作, 6QF 跳闸。如保护 P6 和 P5 不动作, 或 6QF、5QF 拒动, 按选择性要求, 保护 P2 和 P4 应动作, 2QF 和 4QF 应跳闸。

(2) 如线路 AB 中 k1 点发生短路故障, 保护 P1 和 P2 应动作, 1QF 和 2QF 应跳闸。如保护 P2 不动作或 2QF 拒动, 则保护 P4 应动作, 4QF 跳闸。

第二章 互感器和变换器

一、基本内容及学习要点

本章主要介绍继电保护用的互感器、变压器和对称分量滤过器的结构、工作原理及其使用注意事项。

学习要点如下：

(1) 要重点掌握电流互感器和电磁式电压互感器的工作原理、误差和接线方式。注意互感器采用减极性标注方法可使分析问题简化。对互感器使用注意事项要给予充分重视。

(2) 要重点掌握电抗变换器的工作原理，电抗变换器的转移阻抗 K_I 是一个复数，在铁芯不饱和时可认为是常数，而电压变换器的变比 K_U 是一实数，当铁芯不饱和时为常数。

(3) 对称分量滤过器要重点掌握负序电压滤过器和负序电流滤过器的工作原理、接线。分析时，可认为滤过器中各元件是线性的，输入量中各对称分量之间相互无影响，故可用通过移相和相量加减措施消去要滤去的对称分量，实现滤过作用，这是设计滤过器的基本方法。

二、思考题与习题的解答

2-1 电流互感器的极性是如何确定的？常用的接线方式有哪几种？

答：(1) 电流互感器 TA 采用减极性标示方法，其一次绕组 L1—L2 和二次绕组 K1—K2 引出端子极性标注如图 2-1 (a) 所示，其中 L1 和 K1，L2 和 K2 分别为同极性端。如果 TA 的端子标志不清楚，可用图 2-1 (b) 所示接线测定判断出同极性端，如用图 2-1 (b) 中实线接法 $U = U_1 - U_2$ ，则电压表 U 所接两个端子为同极性端，如虚线接法，则 $U = U_1 + U_2$ ，电压表 U 所接两个端子为异极性端。

(2) 电流互感器 TA 常用的接线方式有完全星形接线、不完全星形（两相 V 形）接线、两相电流差接线和一相式接线。

2-2 电流互感器的 10% 误差曲线有何用途？怎样进行 10% 误差校验？

答：电流互感器额定变比 K_{TA} 为常数，其一次电流 I_1 与二次电流 I_2 ，在铁芯不饱和时有 $I_2 = I_1 / K_{TA}$ 的线性关系，

如图 2-2 (a) 中直线 1 所示。但当铁芯饱和时， I_2 与 I_1 不再保持线性关系，如图 2-2 (a) 中曲线 2 所示。继电保护要求在 TA 一次电流 I_1 等于最大短路电流时，其变比误差要小于或等于 10%，因此可在图 2-2 (a) 中找到一个电流 $I_{1.b}$ (m_{10}) 自 $I_{1.b}$ 点做垂线与直线 1 和曲线 2 分别交于 B、A 点，且 $\overline{BA} = 0.1 I'_1$ ($I'_1 = I_1 / K_{TA}$)。如果 TA 一次电流 $I_1 \leq I_{1.b}$ ，则 TA 变比误差就不会超过 10%。

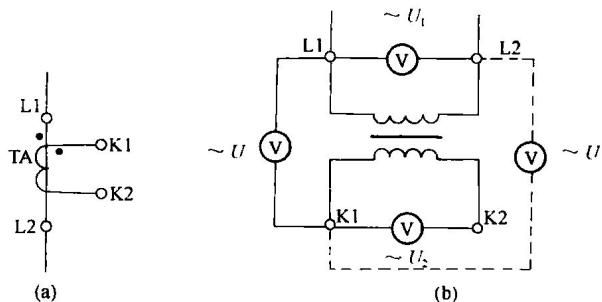


图 2-1 电流互感器接线示意图

由于 TA 变比误差与其二次负荷阻抗有关, 为便于计算, 制造厂对每种 TA 都提供了在 m_{10} 下允许的二次负荷 Z_{al} , 曲线 $m_{10} = f(Z_{al})$ 就称为 TA 的 10% 误差曲线, 用 10% 误差曲线可方便的求出 TA 在满足误差不超过 10% 的最大允许负荷阻抗。如图 2-2 (b) 所示, 已知 m_{10-1} 后, 可以从曲线上查出允许负荷阻抗 $Z_{al,1}$, 如果 $Z_{al,1}$ 大于实际负荷阻抗 Z_L , 则误差满足要求。

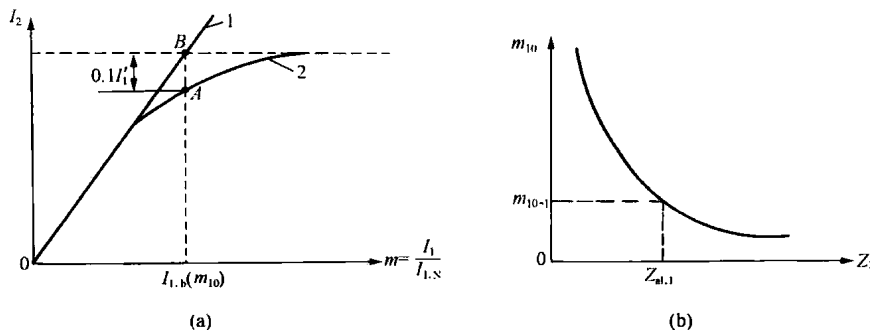


图 2-2 TA10%误差曲线说明

(a) TA 二次电流与一次电流的关系; (b) TA10%误差曲线

2-3 电流互感器的准确度级有几级? 和二次负荷有什么关系?

答: 电流互感器准确度级有 0.2、1.0、3.0、10、B 级, 由于 TA 误差与二次负荷有关, 故同一台 TA 在使用不同准确度级时有不同的额定容量, 或者说带负荷越大, 其准确度级越低。

2-4 电流互感器在运行中为什么要严防二次侧开路? 电压互感器在运行中为什么要严防二次侧短路?

答: (1) TA 正常运行时, 二次电流产生的磁通势起去磁作用, 励磁电流很小, 铁芯中总磁通很小, 二次绕组感应电动势不超过几十伏。如果二次侧开路, 二次电流的去磁作用消失, 其一次电流完全转变为励磁电流, 引起铁芯内磁通剧增, 铁芯处于高度饱和状态, 加之二次绕组匝数很多, 根据电磁感应定律可知二次绕组两端产生很高电压, 可达数千伏, 不但要损坏二次绕组绝缘, 而且将严重危及人身安全。再者由于铁芯中磁通密度剧增, 使铁芯损耗加大, 严重发热, 甚至烧坏绝缘。因此 TA 二次绕组不允许开路, 故在 TA 二次回路中不能装设熔断器, 二次回路一般不进行切换, 若要切换应先将二次绕组短接。

(2) 电压互感器是一个内阻极小的电压源, 正常运行时负荷阻抗很大, 相当于开路状态, 二次侧仅有很小负荷电流; 当二次侧短路时负荷阻抗为零, 将产生很大短路电流, 将电压互感器烧坏, 因此, TV 二次侧不允许短路。

2-5 电流互感器二次绕组的接线有哪几种方式?

答: TA 二次绕组接线方式有: ①完全星形接线; ②不完全星形接线; ③两相电流差接线; ④三角形接线; ⑤一相用两只电流互感器串联或并联接线。

2-6 画出三相五柱电压互感器的 Y0/y0/△接线图, 并说明其特点。

答: 三相五柱式电压互感器有五个铁芯柱, 给零序磁通提供了闭合磁路。增加了一个二次辅助绕组, 接成开口三角形, 获得零序电压, 接线图如图 2-3 所示。

电网正常运行时,三相电压对称,开口三角绕组引出端子电压 $\dot{U}_{mn}$ 为三相二次绕组电压相量和,其值为零。但实际上由于漏磁等因素影响, $\dot{U}_{mn}$ 一般不为零而有几伏数值的不平衡电压 $\dot{U}_{unb}$ 。

当电网发生单相接地故障时,TV 一次侧零序电压要感应到二次侧,因三相零序电压大小相等,相位相同,故三角形绕组输出电压 $U_{mn} = 3U_0 / K_{TV}$ (K_{TV} 为电压互感器额定电压变比)。

(1) 这种接线用于中性点不直接接地电网中,在电网发生单相接地时,开口三角形绕组两端为 3 倍零序电压, $U_{mn} = 3U_0$,为使 $U_{mn} = 100 \text{ V}$,开口三角形绕组每相电压为 $100/3 \text{ V}$,因此,TV 的变比为 $\frac{U_N}{\sqrt{3}}$ 。

$\frac{100}{\sqrt{3}} \text{ V} / \frac{100}{3} \text{ V}$ (U_N 为一次绕组的额定线电压, kV)。

(2) 这种接线用于中性点直接接地电网中,在电网发生单相接地故障时,故障相电压为零,非故障相电压大小、相位与故障前相同不改变,开口三角绕组两端的 3 倍零序电压 U_{mn} 为相电压,为使此时 $U_{mn} = 100 \text{ V}$,TV 的变比应为 $\frac{U_N}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} \text{ V} / 100 \text{ V}$ 。

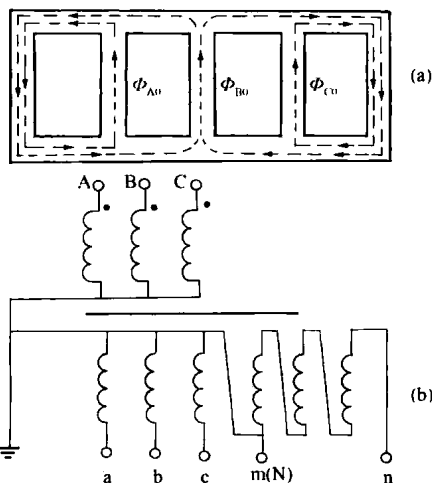


图 2-3 三相五柱式 TV 的磁路及接线
(a) 磁路; (b) 接线

2-7 某一电流互感器的变比为 600/5。其一次侧通过三相短路电流 5160A,如测得该电流互感器某一点的伏安特性为 $U_2 = 150 \text{ V}$, $I_N = 3 \text{ A}$,试问二次侧接入 3Ω 负荷阻抗(包括电流互感器二次漏抗及电缆电阻)时,变比误差能否超过 10%?

答:TA 等值电路如图 2-4 所示,已知 TA 励磁电流 $I_N = 3 \text{ A}$, $U_2 = 150 \text{ V}$,故障电流折

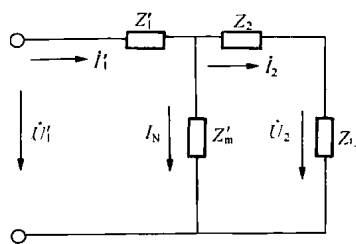


图 2-4 TV 等值电路图

算到 TA 二次侧为 $I'_1 = \frac{I_1}{K_{TA}} = \frac{5160}{120} = 43 \text{ (A)}$,又有 $Z_L = 3\Omega$, $U'_2 = (I'_1 - I_N)Z_L = (43 - 3) \times 3 = 120 \text{ (V)}$,而实际伏安特性 $U_2 = 150 \text{ V}$, $I_N = 3 \text{ A}$,现在 $U'_2 = 120 \text{ V} < U_2 = 150 \text{ V}$, $I'_N < 3 \text{ A}$ 。 I'_N 按 3A 计算则 $I_2 = I'_1 - I'_N = 43 - 3 = 40 \text{ (A)}$ 。此时变比误差 $\Delta I\% = \frac{43 - 40}{43} \times 100\% = 6.98\% < 10\%$,合格。

2-8 何谓电流互感器零序电流接线?

答:用三只同型号相同变比的 TA 二次绕组同极性端子连接后再接入零序电流继电器 KAZ,如图 2-5 所示,则流入继电器中电流为 $\dot{I}_r = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = [(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) - (\dot{I}_{mA} + \dot{I}_{mB} + \dot{I}_{mC})] \frac{1}{K_{TA}} = \frac{3\dot{I}_0}{K_{TA}} - \frac{1}{K_{TA}}(\dot{I}_{mA} + \dot{I}_{mB} + \dot{I}_{mC})$,当三相对称时, $\dot{I}_0 = 0$,即 $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$,则

$$\dot{I}_r = -\frac{1}{K_{TA}}(\dot{I}_{mA} + \dot{I}_{mB} + \dot{I}_{mC}) = -\dot{I}_{unb}$$

式中 $\dot{I}_{unb}$ 为不平衡电流,它是由三个 TA 励磁特性不同引起的。当发生单相接地或两相接地

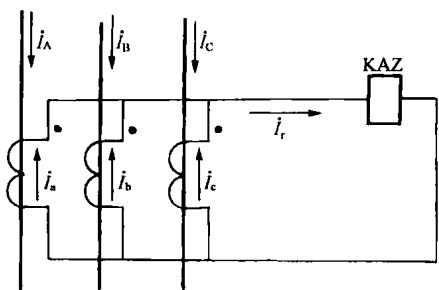


图 2-5 用三只 TA 构成零序电流滤过器

短路故障时,可获得零序电流,因此这种接线也成为零序电流滤过器的接线。

2-9 试述阻容式单相负序电压滤过器的工作原理。

答:常用阻容式负序电压滤过器接线如图 2-6 所示。其参数关系为

$$R_a = \sqrt{3}X_a, X_c = \sqrt{3}R_c$$

而且要求 $\dot{I}_{ab}$ 超前 $\dot{U}_{ab}$ 相位角 30° , $\dot{I}_{bc}$ 超前 $\dot{U}_{bc}$ 相位角 60° 。

(1) 当输入正序电压时相量图如图 2-7 (a) 所示。 $\dot{U}_{mb,1}$ 为 $\dot{I}_{ab,1}$ 在 R_a 上电压降,与 $\dot{I}_{ab,1}$ 同相位, $\dot{U}_{am,1}$ 为 $\dot{I}_{ab,1}$ 在 X_a 上电压降,落后 $\dot{I}_{ab,1}$ 电流 90° 。 $\dot{U}_{nc,1}$ 为 $\dot{I}_{bc,1}$ 在 R_c 上电压降与 $\dot{I}_{bc,1}$ 同相位, $\dot{U}_{bn,1}$ 为 $\dot{I}_{bc,1}$ 在 X_c 上电压降,落后电流 $\dot{I}_{bc,1}$ 90° 。电压三角形 $\triangle abm$ 与 $\triangle bcn$ 皆为含 30° 、 60° 锐角的直角三角形,故 $\overline{am} = \frac{1}{2} \overline{ab} = \frac{1}{2} \overline{ac}$, $\overline{nc} = \frac{1}{2} \overline{bc} = \frac{1}{2} \overline{ac}$, m 、 n 均为 $\overline{ac}$ 之中点。 m 、 n 两点重合,说明 $\dot{U}_{mn,1} = 0$,即通过正序电压,输出电压为零。

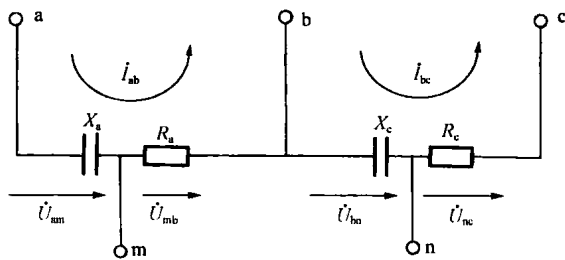


图 2-6 阻容式单相负序电压滤过器

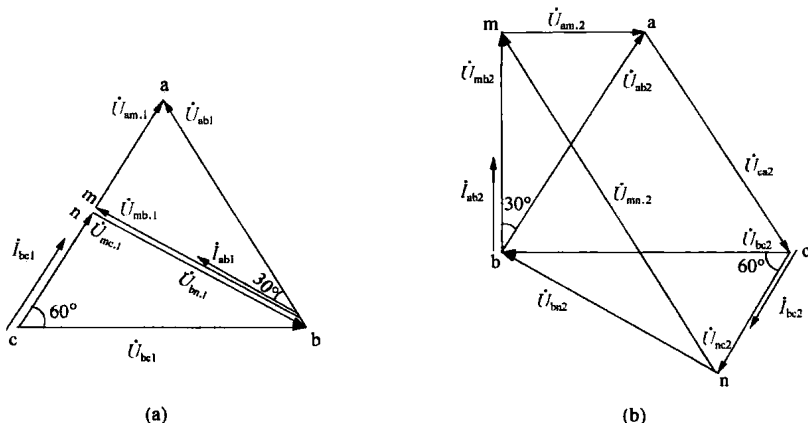


图 2-7 负序电压滤过器相量图

(a) 输入正序电压相量图; (b) 输入负序电压相量图

(2) 输入三相负序电压的相量图如图 2-7 (b) 所示。由于负序三相电压可由正序电压中 B、C 两相交换而得,按与上面相同的三角形 $\triangle abm$ 及 $\triangle bcn$ 的关系,可得到加入负序电压时的 $\dot{U}_{mn,2} = 1.5\sqrt{3}\dot{U}_{a2}e^{j30^\circ}$ 。

2-10 试述感抗移相式、电容移相式单相负序电流滤过器的工作原理。

答:(1) 感抗式负序电流滤过器接线如图 2-8 所示,它主要由电流变换器 UA 和电抗

变换器 UX 组成。UX 有两个一次侧绕组，即 $W_b = W_c$ ，分别通过电流 $\dot{I}_b$ 和 $-\dot{I}_c$ ，UA 一次侧绕组 $W_a = 3W_0$ ，其二次侧输出电压为

$$\dot{U}_R = \frac{1}{K_{UA}}(\dot{I}_a - 3\dot{I}_0)R$$

如图 2-8 所示，负序电流滤过器的输出电压为 $\dot{U}_R$ 与 $\dot{U}_{bc}$ 的相量差，即

$$\begin{aligned}\dot{U}_{mn} &= \dot{U}_R - \dot{U}_{bc} \\ &= \frac{1}{K_{UA}}(\dot{I}_a - \dot{I}_0)R - j(\dot{I}_b - \dot{I}_c)X_1\end{aligned}\quad (2-1)$$

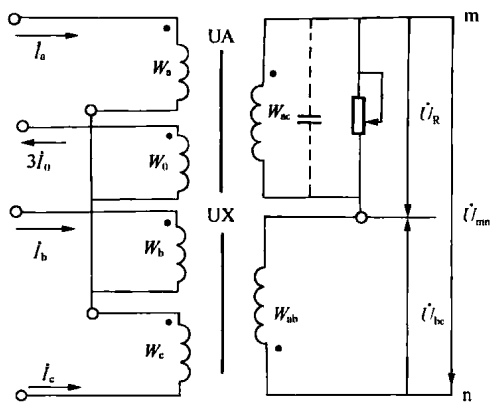


图 2-8 感抗移相式负序电流滤过器

1) 当输入零序电流时， $\dot{I}_a = \dot{I}_b = \dot{I}_c = \dot{I}_0$ ，由于 $W_b = W_c, W_a = 3W_0$ ，所以 UA 与 UX 一次磁通势互相抵消，故不反应零序分量，即 $\dot{U}_{mn.0} = 0$ 。

2) 输入正序分量时，其相量图如图 2-9 (a) 所示， $\dot{U}_{bc.1}$ 超前 $(\dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c1})$ 相量 90° ， $\dot{U}_{R1}$ 与 $\dot{I}_{a1}$ 同相。若 $\dot{U}_{R1} = \dot{U}_{bc.1}$ 时，其输出电压 $\dot{U}_{mn.1} = \dot{U}_{R1} - \dot{U}_{bc.1} = 0$ ，即不反应正序分量。根据式 (2-1)，当输入正序电流时，过滤器输出电压为

$$\dot{U}_{mn.1} = \frac{1}{K_{UA}}\dot{I}_{a1}R - j(\dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c1})X_1 = \dot{I}_{A.1}\left(\frac{R}{K_{UA}} - \sqrt{3}X_1\right) \quad (2-2)$$

取参数 $R = \sqrt{3}K_{UA}X_1$ ，则 $\dot{U}_{mn.1} = 0$ 。

3) 当输入负序电流时，其相量图如图 2-9 (b) 所示。 $\dot{U}_{bc.2}$ 与 $\dot{U}_{R2}$ 相位差为 180° ，其输出电压由式 (2-1) 可得

$$\dot{U}_{mn.2} = \frac{1}{K_{UA}}\dot{I}_{a2} - j(\dot{I}_{b2} - \dot{I}_{c2})X_1 = \dot{I}_{a2}\left(\frac{R}{K_{UA}} + \sqrt{3}X_1\right) = \frac{2R}{K_{UA}}\dot{I}_{a2} \quad (2-3)$$

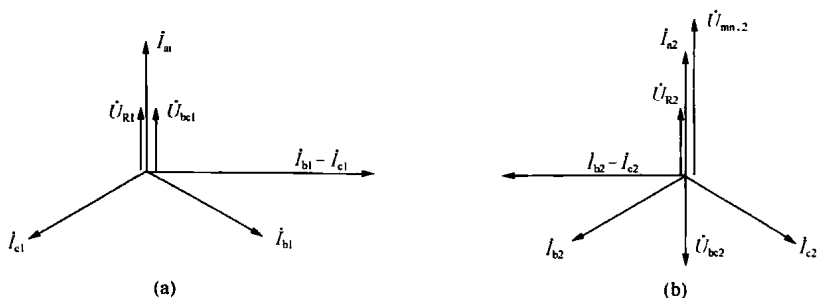


图 2-9 感抗式负序电流滤过器相量图

(a) 输入正序电流时相量图；(b) 输入负序电流时相量图

4) 由式 (2-3) 构成负序电流滤过器。滤过器输出电压与输入的负序电流 $\dot{I}_{a2}$ 同相位。

只有参数 $R = \sqrt{3}K_{UA}X_1$ 时，滤过器输出电压 $\dot{U}_{mn}$ 才与输入的 $\frac{1}{K_{UA}}(\dot{I}_b - \dot{I}_c)$ 电流成正比，

若 $R \neq \sqrt{3}K_{UA}X_1$ ，由式 (2-1) 和式 (2-3) 知，输出电压与正序电流和负序电流都有关，此时的滤过器称为复合电流滤过器。

(2) 电容移相式负序电流滤过器原理接线如图 2-10 所示。它由两个电流变换器 1UA 和 2UA 构成。1UA 有一次绕组 W_A 和 W_0 ，且 $W_A = 3W_0$ ，这两个绕组分别通入电流 $\dot{I}_A$ 和 $-3\dot{I}_0$ 。设两个 UA 的变比都为 K_{UA} ，则 1UA 二次电流为 $-j\frac{1}{K_{UA}}(\dot{I}_A - \dot{I}_0)X_C$ ，在电容上负序压降为 $-j\frac{1}{K_{UA}}(\dot{I}_A - \dot{I}_0)X_C$ 。2UA 中一次绕组 $W_B = W_C$ ， W_B 中通入 B 相同电流 $\dot{I}_B$ ， W_C 中通入 C 相电流 $-\dot{I}_C$ ，则 2UA 二次电流为 $\frac{1}{K_{UA}}(\dot{I}_B - \dot{I}_C)$ ，此电流在电阻上产生压降为 $\frac{1}{K_{UA}}(\dot{I}_B - \dot{I}_C)R$ 。滤过器输出电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}_{mn} &= \dot{U}_C - \dot{U}_R \\ &= -j\frac{1}{K_{UA}}(\dot{I}_A - \dot{I}_0)X_C - \frac{1}{K_{UA}}(\dot{I}_B - \dot{I}_C)R\end{aligned}\quad (2-4)$$

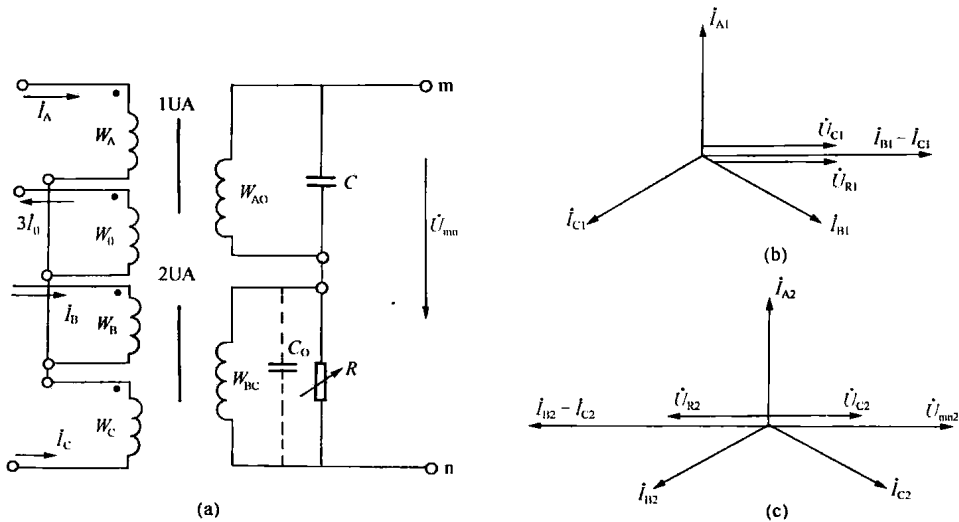


图 2-10 电容移相式负序电流滤过器

(a) 原理接线图；(b) 加入正序电流时相量图；(c) 加入负序电流时相量图

1) 当通入正序电流时，其相量图如图 2-10 (b) 所示。 $\dot{U}_{C1}$ 滞后 $\dot{I}_{A1}$ 90° ； $\dot{U}_{R1}$ 也滞后 $\dot{I}_{A1}$ 90° 。若 $\dot{U}_{C1} = \dot{U}_{R1}$ ，则 $\dot{U}_{mn1} = \dot{U}_{C1} - \dot{U}_{R1} = 0$ ，输出电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}_{mn.1} &= \dot{U}_{C1} - \dot{U}_{R1} \\ &= -j\frac{1}{K_{UA}}\dot{I}_{A1}X_C - \frac{1}{K_{UA}}(\dot{I}_{B1} - \dot{I}_{C1})R \\ &= -j\frac{1}{K_{UA}}\dot{I}_{A1}X_C - \frac{1}{K_{UA}}(-j\sqrt{3}\dot{I}_{A1})R \\ &= j\frac{\dot{I}_{A1}}{K_{UA}}(\sqrt{3}R - X_C)\end{aligned}\quad (2-5)$$

取参数 $X_C = \sqrt{3}R$ ，则 $\dot{U}_{mn.1} = 0$ 。