“十四五”职业教育国家规划教材

DIANLI XITONG JIDIAN BAOHU
YU ZIDONG ZHUANGZHI

电力系统继电保护与自动装置

（第二版）

全国电力职业教育教材编审委员会　组编
王　艳　杨利水　主编

新形态教材
配套数字资源

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是“十三五”“十四五”职业教育国家规划教材，采用“项目导向、任务驱动、理实一体”的教学模式，注重对学生职业能力的培养，实现了“教、学、做”的一体化，充分体现了高等职业教育的特色。

本书包括继电保护的基本知识和技能、输电线路的保护及自动重合闸、电力系统的元件保护、电力系统安全自动装置四个项目共十八个任务，涵盖了线路、母线、变压器、发电机、断路器、电抗器、电容器保护及备用电源自动投入、按频率自动减负荷、故障录波、发电机自动调节励磁、准同期自动并列装置等的原理及性能检验与运行维护。本书配套了数字教学资源和课程思政资源，以方便教学。

本书可作为高职院校电力类专业的教材，也可作为现场从事电力系统继电保护与自动装置技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

电力系统继电保护与自动装置/王艳，杨利水主编；全国电力职业教育教材编审委员会组编. —2版. —北京：中国电力出版社，2019.11（2024.3重印）

全国电力高职高专“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5198-3952-9

Ⅰ.①电… Ⅱ.①王…②杨…③全… Ⅲ.①电力系统-继电保护-高等职业教育-教材②电力系统-继电保护装置-高等职业教育-教材 Ⅳ.①TM77

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第239352号

出版发行：中国电力出版社
地　　址：北京市东城区北京站西街19号（邮政编码100005）
网　　址：http://www.cepp.sgcc.com.cn
责任编辑：雷　锦
责任校对：朱丽芳
装帧设计：赵姗姗
责任印制：吴　迪

印　　刷：北京雁林吉兆印刷有限公司
版　　次：2014年9月第一版　2019年11月第二版
印　　次：2024年3月北京第十五次印刷
开　　本：787毫米×1092毫米　16开本
印　　张：21
字　　数：517千字
定　　价：55.00元

版权专有　侵权必究
本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

目 录

扫一扫，获得本书资源

前言

项目一　继电保护的基本知识和技能 …… 1

任务一　继电保护的基本知识 …… 1

任务二　互感器的工作原理及性能检验与运行维护 …… 7

任务三　常用继电器的工作原理及性能检验 …… 19

复习思考 …… 28

项目总结 …… 29

项目二　输电线路的保护及自动重合闸 …… 30

任务一　35kV（10kV）线路保护装置的原理、性能检验与运行维护 …… 31

任务二　110kV 线路保护装置的原理、性能检验与运行维护 …… 53

任务三　220～500kV 线路保护装置的原理、性能检验与运行维护 …… 73

任务四　自动重合闸（装置）的原理及性能检验 …… 95

复习思考 …… 112

项目总结 …… 112

项目三　电力系统的元件保护 …… 113

任务一　电力变压器保护装置的原理、性能检验与运行维护 …… 113

任务二　发电机保护装置的原理、性能检验与运行维护 …… 137

任务三　母线保护装置的原理、性能检验与运行维护 …… 170

任务四　断路器保护装置的原理、性能检验与运行维护 …… 184

任务五　并联电抗器保护装置的原理、性能检验与运行维护 …… 203

任务六　并联电容器组保护装置的原理、性能检验与运行维护 …… 224

复习思考 …… 240

项目总结 …… 240

项目四　电力系统安全自动装置 …… 241

任务一　备用电源自动投入装置的原理、性能分析与运行维护 …… 241

任务二　自动按频率减负荷装置的原理、性能检验与运行维护 …… 252

任务三　自动录波装置的原理、性能检验与运行维护 …… 269

任务四　发电机自动调节励磁装置的原理、性能检验与运行维护…… 286
任务五　准同期自动并列装置的原理及性能检验…… 300
复习思考…… 324
项目总结…… 324
附录 A　线路保护现场运行与维护导则…… 325
参考文献…… 328

3. 装置投运步骤

(1) 投入直流电源。

(2) 检查装置“运行”指示灯亮，其余指示灯灭，装置无“告警”等异常信号。

(3) 按运行要求投入装置压板。

4. 运行注意事项

(1) 装置投运后的检修必须遵照有关规程规定执行。

(2) 装置投运后的检修必须由专业人员进行。

(3) 运行中禁止随意开出传动、切换定值区、更改定值、投切软压板、更改装置地址。

5. 保护投退规定

正常情况下根据调度下发的继电保护定值通知单投入相应保护。

(三) 异常处理及事故分析

装置出现异常时，向调度申请退出保护出口压板，通知检修人员进行处理。

【复习思考】

2-1-1　第Ⅱ段电流保护的动作时限、动作电流及灵敏系数如何计算？为什么？

2-1-2　第Ⅲ段电流保护是如何保证选择性的？在整定计算中为什么要考虑返回系数及自启动系数？

2-1-3　三段式电流保护是怎样构成的？画出三段式电流保护各段的保护范围和时限配合图。

2-1-4　在图 2-26 所示电网中，线路 L1、L2 均装有三段式电流保护，当在线路 L2 的首端 k 点短路时，有哪些保护启动？由哪个保护动作跳开哪个断路器？

2-1-5　在图 2-27 所示的 35kV 单侧电源辐射形电网中，已知线路 L1 正常最大工作电流为 112A，电流互感器的变比为 300/5；最大运行方式下，k1 点三相短路电流为 1200A，k2 点三相短路电流为 500A；最小运行方式下，k1 点三相短路电流为 1050A，k2 点三相短路电流为 485A。线路 L2 过电流保护的动作时限为 2s。试计算 L1 线路三段式电流保护各段的继电器动作电流及动作时限，校验Ⅱ、Ⅲ段保护的灵敏度。

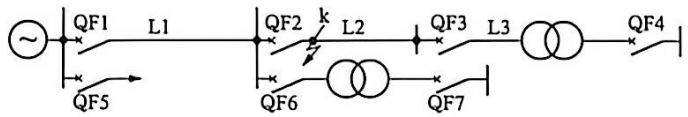


图 2-26　题 2-1-4 图

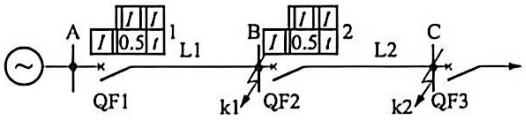


图 2-27　题 2-1-5 图

2-1-6　为什么在 Yd 接线的变压器线路上电流保护一般要采用两相三继电器接线方式？

2-1-7　中性点不接地系统单相接地时的电流和电压有什么特点？

2-1-8　画出绝缘监视装置的原理图并简述其工作原理。

任务二　110kV 线路保护装置的原理、性能检验与运行维护

【教学目标】

知识目标：掌握 110kV 线路保护的配置；掌握距离保护的构成、各段的作用、动作的逻辑关系、整定原则、特点、接线方式及应用范围，动作性能的检验和运行维护；掌握大电

流接地系统零序保护的构成、各段的作用、动作的逻辑关系、整定原则、特点、接线方式及应用范围，动作性能的检验。

能力目标：能看懂110kV线路保护标准化作业指导书、定值单、装置设备说明书；能对110kV线路保护配置图和原理图进行正确识读与分析；能正确使用继电保护测试仪；能进行110kV线路保护装置的动作性能检验和运行维护；能对110kV输电线路保护的动作过程进行分析和处理；能自我调节，正确面对学习和生活中的成绩和挫折，及时总结和反思，不断提高。

素质目标：能严格按照企业的行为规范开展工作，具备勤奋、进取的敬业精神，认真严谨的工作态度和互相配合的团队协作精神。

【任务描述】

依据110kV线路保护标准化作业指导书，布置检验测试安全措施，依据保护装置说明书进行装置界面操作，依据110kV线路保护二次图纸对线路保护装置距离保护、零序保护回路外观进行检查，连接好测试接线，操作测试仪器，对线路距离保护、零序保护的交流回路、直流回路、定值和逻辑进行检验测试，对照定值单等对检验测试结果进行判断。

【任务准备】

（1）教师下发项目任务书，明确项目学习目标和任务。

（2）讲解线路距离保护、零序电流保护的基本原理及检验测试流程和注意事项。

（3）学生熟悉变电站（发电厂）电气主接线，查阅典型电力系统网络中线路的运行方式及线路距离保护和零序电流保护的接线特点，并对线路距离保护和零序电流保护检验测试规程和技术规范、标准等相关资料进行查阅；熟悉线路保护标准化作业指导书、定值单、装置设备说明书；进行继电保护测试仪的学习使用。

（4）学生进行小组人员分工及职责分配。

（5）讨论110kV线路保护如何配置；讨论距离保护的构成、各段的作用、动作的逻辑关系、整定原则、特点、接线方式及应用范围分别有哪些；讨论110kV线路距离保护动作性能的检验测试流程有哪些；讨论检验过程中注意事项有哪些；讨论大电流接地系统零序保护的构成、各段的作用、动作的逻辑关系、整定原则、特点、接线方式及应用范围分别有哪些；讨论110kV线路零序保护动作性能的检验测试流程有哪些。

（6）制订工作计划及实施方案。教师审核工作计划及实施方案，引导学生确定最终实施方案。

【相关知识】

一、距离保护

（一）距离保护的基本概念

电流保护的主要优点是简单、经济及工作可靠。但是由于这种保护整定值的选择、保护范围以及灵敏系数等方面都直接受电网接线方式及系统运行方式的影响，所以，在35kV以上电压的复杂网络中，它们都很难满足选择性、灵敏性及快速切除故障的要求。为此，就必须采用性能更加完善的保护装置。距离保护就是适应这种要求的一种保护原理。

距离保护是反应故障点至保护安装地点之间的距离（或阻抗），并根据距离的远近而确定动作时间的一种保护装置。该装置的主要元件为距离（阻抗）继电器，它可根据其端子上所加的电压和电流测知保护安装处至短路点间的阻抗值，此阻抗称为继电器的测量阻抗。当

（3）中性点直接接地电网中的两相接地短路保护能够正确动作。

2. 接地阻抗继电器的相电压和具有 $K3I_0$ 补偿的相电流接线方式

在中性点直接接地的电网中，当零序电流保护不能满足要求时，一般考虑采用接地距离保护，主要是用来正确反应这个电网中的接地短路。

反应接地故障阻抗继电器的测量阻抗为

$$Z_m=\frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m}=\frac{Z_1 l[\dot{I}_A^{(1)}+K3\dot{I}_0]}{\dot{I}_A^{(1)}+K3\dot{I}_0}=Z_1 l\left(\text{其中},K=\frac{Z_0-Z_1}{3Z_1},\text{为零序电流补偿系数}\right) \tag{2-28}$$

（五）影响距离保护正确动作的因素

阻抗继电器在测量阻抗时受很多因素影响，主要有：

（1）短路点的过渡电阻。

（2）电力系统振荡。

（3）保护安装处与故障点之间有分支电路。

（4）TA、TV 的误差。

（5）TV 二次回路断线。

（6）串联补偿电容。

距离保护的评价：距离保护灵敏度比电流保护高，距离Ⅰ段不受运行方式的影响，Ⅱ、Ⅲ段受运行方式影响小；在多电源的复杂网络中能保证选择性；距离Ⅰ段虽然是瞬时动作的，但是它只能保护线路全长的 80%～85%，因此两端合起来就使得在 30%～40%的线路长度内的故障，不能从两端瞬时切除，在一端须经过 0.35～0.5s 的延时才能切除，在 220kV 及以上的电网中，有时候这不能满足电力系统稳定运行的要求，因而不能作为主保护来应用。距离保护一般用于 110kV 电网线路上作为主保护。

二、大电流接地系统零序保护

110kV 及以上电压等级的电网均为中性点直接接地电网。该电网中发生一点接地故障即构成单相接地短路，将产生很大的故障相电流。从对称分量角度分析，则出现很大的零序电流，反映零序电流增大而动作的保护叫零序电流保护。

（一）中性点直接接地系统发生接地故障时的零序分量

1. 零序分量分析

设在图 2-33（a）所示网络中 k 点发生 A 相接地故障，零序电流的参考方向仍取从母线流向线路，零序电压的参考方向则取指向大地。从图中可看出：

（1）故障点零序电压最高，离故障点越远零序电压越低，变压器接地中性点处零序电压为零。

（2）零序电流是由故障点零序电压产生的，经变压器接地的中性点构成回路。零序电流的分布主要取决于输电线路的零序阻抗和中性点接地变压器的零序阻抗，与电源的数目和位置无关。

（3）对发生故障的线路，两端零序功率的方向与正序功率的方向相反，零序功率方向实际上都是从线路流向母线。零序功率为

$$P_0=3I_0 3U_0\cos(180^\circ-\varphi_{k0})<0(\text{其中},\varphi_{k0}\text{ 为线路的零序短路阻抗角},<90^\circ)$$

（4）正向故障时，保护安装处母线零序电压与零序电流的相位差取决于母线背后变压器

的零序阻抗，而与保护线路的零序阻抗及故障点的位置无关。

用零序电压滤过器和零序电流滤过器即可实现接地短路的零序电流和方向保护。现分别讨论如下。

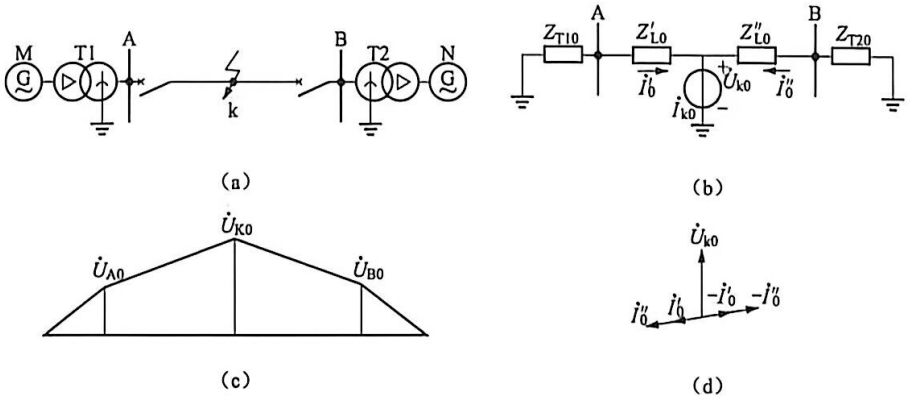


图 2-33　单相接地短路零序分量分析图

(a) 接线图；(b) 零序等效网络图；(c) 零序电压的分布；(d) 零序电流、电压相量图

2. 零序电流滤过器

接地保护装置是通过零序电流滤过器来取得零序电流的。将三相电流互感器极性相同的二次端子分别接在一起，就组成了零序电流滤过器，如图 2-34 所示。流入继电器的电流为

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \tag{2-29}$$

对采用电缆引出的送电线路，采用零序电流互感器获得零序电流。如图 2-35 所示，此电流互感器套在电缆的外面，即这个互感器的一次电流是 $\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C=3\dot{I}_0$，只有当一次侧出现零序电流时，在互感器二次侧才有相应的零序电流输出，故称它为零序电流互感器。

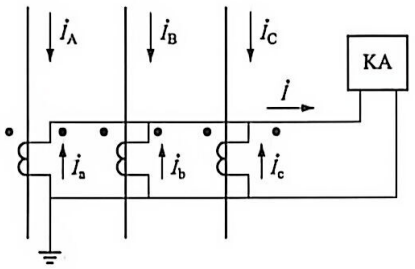


图 2-34　零序电流滤过器

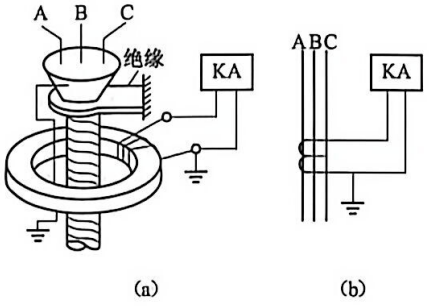


图 2-35　零序电流互感器接线示意图

(a) 结构图；(b) 接线图

3. 零序电压滤过器

零序电压滤过器是指输入端加三相电压而输出端只有零序电压的滤过器，如图 2-36 所示。

开口三角输出电压

$$\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 3\dot{U}_0$$

（二）零序电流保护

一般采用三段式或四段式。三段式零序电流保护由零序电流速断（零序Ⅰ段）、限时零序电流速断（零序Ⅱ段）、零序过电流（零序Ⅰ、Ⅱ段）组成。其中Ⅰ段为速动段保护，Ⅱ

段（Ⅱ、Ⅲ段）应能有选择性切除本线路范围的接地故障，其动作时间应尽量缩短，最末一段则为后备保护。三段式零序电流保护原理与三段式电流保护是相似的。

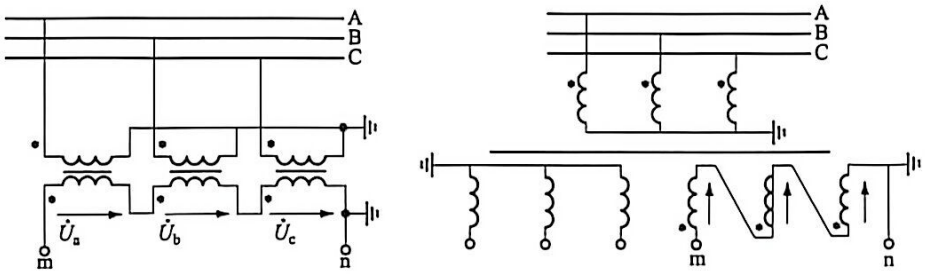


图 2-36 零序电压滤过器取得零序电压的接线图

(a) 用三个单相式电压互感器；(b) 用三相五柱式电压互感器

1. 零序电流速断保护（零序Ⅰ段）

零序电流速断保护的整定原则如下：

(1) 零序Ⅰ段的动作电流应躲过被保护线路末端发生单相或两相接地短路时可能出现的最大零序电流 $3\dot{I}_{0.max}$。

$$I_{act}^{I} = K_{rel}^{I} 3I_{0.max}(\text{其中},K_{rel}^{I} = 1.2 \sim 1.3) \tag{2-30}$$

(2) 躲过由于断路器三相触头不同时合闸所出现的最大零序电流。

$$I_{act}^{I} = K_{rel}^{I} 3I_{0.unb}(\text{其中},K_{rel}^{I} = 1.1 \sim 1.2) \tag{2-31}$$

(3) 在 220kV 及以上电压等级的电网中，当采用单相或综合重合闸时，会出现非全相运行状态，若此时系统又发生振荡，将产生很大的零序电流，按 (1)、(2) 来整定的零序Ⅰ段可能误动作。如果使零序Ⅰ段的动作电流按躲开非全相运行系统振荡的零序电流来整定，则整定值高，正常情况下发生接地故障时，保护范围缩小。

为此，通常设置两个零序Ⅰ段保护。一个是按整定原则 (1)、(2) 整定，由于其定值较小，保护范围较大，称为灵敏Ⅰ段，它用于全相运行状态下出现的接地故障，在单相重合闸时，则将其自动闭锁，并自动投入第二种零序Ⅰ段。第二种零序Ⅰ段称为不灵敏Ⅰ段，按躲开非全相振荡的零序电流整定，其定值较大，灵敏系数较低，用来保护非全相运行状态下的接地故障。

灵敏Ⅰ段的灵敏系数按保护范围的长度来校验，要求最小保护范围不小于线路全长的 15%。

2. 限时零序电流速断保护（零序Ⅱ段）

零序Ⅱ段能保护线路全长，以较短时限切除接地故障。其动作电流与下一线路的零序Ⅰ段配合。零序Ⅱ段的动作时限比下一线路零序Ⅰ段的动作时限大一个时限级差 Δt 为 0.5s。

$$I_{act.1}^{II} = K_{rel}^{II} I_{act.2}^{I}(\text{其中},K_{rel}^{II} = 1.1 \sim 1.2) \tag{2-32}$$

$$t_1^{II} = t_2^{I} + \Delta t = 0.5\text{s} \tag{2-33}$$

零序Ⅱ段的灵敏系数，按本线路末端接地短路时的最小零序电流来校验，要求 $K_{sen} = \dfrac{3I_{0.min}}{I_{act.1}^{II}} \geqslant 1.5$。

若灵敏度不满足要求，则本线路零序Ⅱ段与下一线路零序Ⅱ配合，即

$$I_{act.1}^{II} = K_{rel}^{II} I_{act.2}^{II}(\text{其中},K_{rel}^{II} = 1.1 \sim 1.2) \tag{2-34}$$

$$t_1^{\mathrm{II}} = t_2^{\mathrm{II}} + \Delta t = 1.0\mathrm{s} \tag{2-35}$$

同时采用0.5s的零序Ⅱ段和1.0s的零序Ⅱ段。

3. 零序过电流保护（零序Ⅲ段）

零序过电流保护在正常运行及外部相间短路时不应动作，而此时零序电流滤过器有不平衡电流输出并流过本保护，所以零序Ⅲ段的动作电流应按躲过最大不平衡电流来整定。

（1）躲过相邻线路首端三相短路时，出现的最大不平衡电流，即

$$I_{\mathrm{act}}^{\mathrm{III}} = K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{III}} I_{\mathrm{unb.max}} \tag{2-36}$$

$$I_{\mathrm{unb.max}} = K_{\mathrm{aper}} \cdot K_{\mathrm{ss}} \cdot K_{\mathrm{met}} \cdot I_{\mathrm{k.max}}^{(3)}$$

式中　K_{aper}——非周期分量系数，t=0s时取1.5～2，t=0.5s时取1；

K_{ss}——同型系数，同型时取0.5，不同型时取1；

K_{met}——电流互感器误差，取0.1；

$I_{\mathrm{k.max}}^{(3)}$——线末变压器另一侧短路时流过保护的最大短路电流。

（2）与相邻零序Ⅲ段进行灵敏度配合

$$I_{\mathrm{act.1}}^{\mathrm{III}} = K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{III}} I_{\mathrm{act.2}}^{\mathrm{III}} \tag{2-37}$$

零序电流Ⅲ段保护动作电流定值取上面较大值。

动作时限的确定按阶梯形原则配合，配合范围比相间短路过电流保护配合范围小，因此同一条线路上零序过电流动作时限比相间短路过电流时限短。

零序电流Ⅲ段保护的灵敏系数，按保护范围末端接地短路时的最小零序电流来校验。作近后备时，校验点取本线路末端，要求 $K_{\mathrm{sen}} = \dfrac{3I_{0.\min}}{I_{\mathrm{act.1}}^{\mathrm{III}}} \geqslant 1.5$；作下一线路的远后备时，校验点取下一线路末端，要求 $K_{\mathrm{sen}} \geqslant 1.25$。

（三）零序方向电流保护

1. 方向性问题的提出

在双侧或多侧电源的电网中，电源处变压器的中性点一般至少有一点接地，如图2-37（a）所示的电网。当在线路上发生接地故障时，零序电流流经各个中性点接地变压器。图2-37（b）、（c）分别画出了k1点与k2点短路时的零序等值网络。当在k1点短路时，应由保护1和2动作切除故障，但零序电流 $\dot{I}_{02}$ 流过保护2与3，保护3有可能动作。同理当在k2点短路时，保护2可能动作。因此，与方向电流保护相同，必须在零序电流保护上增加功率方向元件，判别零序电流的方向，构成零序方向电流保护。

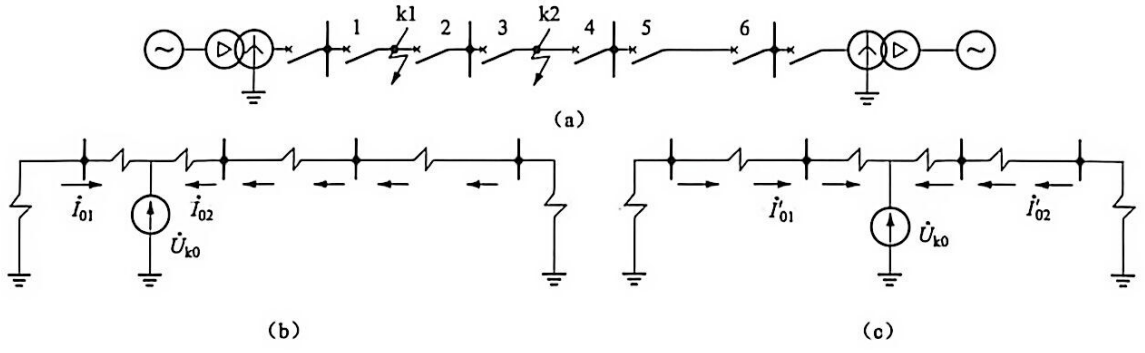


图2-37　零序方向电流保护

（a）网络图；（b）k1点短路的零序等值网络；（c）k2点短路的零序等值网络