

电力系统继电保护

中 册

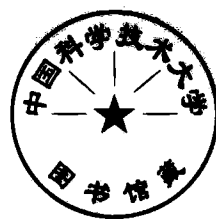
許敬賢 張道民

中国工业出版社

电力系统继电保护

中 册

許敬賢 張道民



中国工业出版社

全书共分上、中、下三册。本册详细介绍了电网中的距离保护装置、差动保护装置和高频保护装置的基本原理、整定计算方法和接线图的拟制原则。书中对各种成套保护装置也作了系统扼要的阐述。此外，还介绍了电网保护的选择原则。近年来继电保护新技术和运行经验等方面的资料，也适当地纳入了书中有关章节内。

本书可供从事继电保护装置的运行、调试、设计和施工工作的工程技术人员学习参考用，也可作为电工院校的教学参考书。

电力系统继电保护

中 册

許敬賢 張道民

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张25⁷/₈·字数581,000

1964年10月北京第一版·1964年10月北京第一次印刷

印数0001—8,190·定价(科六)3.40元

*

统一书号: 15165·3171(水电-432)

目 录

<p>第七章 电网的距离保护361</p> <p>7-1. 保护装置的动作原理.....361</p> <p>7-2. 保护装置的主要元件和它們的相互作用.....362</p> <p>7-3. 保护装置的时限特性.....363</p> <p>7-4. 阻抗继电器端子上的阻抗.....363</p> <p>7-5. 阻抗继电器的类型.....364</p> <p>7-6. 在全阻抗复数平面上, 阻抗继电器的特性.....365</p> <p>7-7. 阻抗继电器的主要参数.....369</p> <p>7-8. 实现整流式阻抗继电器的条件.....370</p> <p>7-9. 整流式和感应式阻抗继电器构成的相互关系.....377</p> <p>7-10. 阻抗继电器中的調整变压器和零序补偿变流器.....379</p> <p>7-11. 阻抗继电器中的电抗变压器.....380</p> <p>7-12. 利用一个电压和电流实现的感应式阻抗继电器.....385</p> <p>7-13. 全阻抗继电器.....388</p> <p>7-14. 方向阻抗继电器.....395</p> <p>7-15. 綜合式阻抗继电器.....398</p> <p>7-16. 三相距离继电器.....399</p> <p>7-17. 反应所有类型多相短路的阻抗继电器.....408</p> <p>7-18. 阻抗元件的接綫方式.....413</p> <p>7-19. 30°接綫的KPC-112型全阻抗继电器.....417</p> <p>7-20. (-30°)接綫的方向阻抗继电器.....419</p> <p>7-21. 綫路-变压器组工作时, 阻抗元件的接綫方式.....422</p> <p>7-22. 阻抗元件由变压器低压侧电压互感器替代高压侧电压互感器供电的方式.....423</p> <p>7-23. 暂态过程对阻抗元件工作的影响.....424</p> <p>7-24. 阻抗继电器的記憶回路和方向阻抗继电器接入第三相电压</p>	<p>的功用.....427</p> <p>7-25. 阻抗继电器电流与电压回路的相互干扰.....431</p> <p>7-26. 影响阻抗元件工作的因素.....434</p> <p>7-27. Y/Δ-11变压器后短路时, 阻抗元件的工作情况.....434</p> <p>7-28. 助增电流和汲出电流对阻抗元件工作的影响.....435</p> <p>7-29. 电流互感器和电压互感器誤差, 对阻抗元件工作的影响.....436</p> <p>7-30. 最大灵敏角与电压、电流間相角不等时, 阻抗元件的工作情况.....438</p> <p>7-31. 过渡电阻对阻抗元件工作的影响.....440</p> <p>7-32. 瞬时测定和特性圓的移动.....443</p> <p>7-33. 系統振蕩时, 阻抗元件的工作情况.....445</p> <p>7-34. 兩側电源电动势相角分开情况下短路和断相时, 第一类阻抗继电器的工作情况.....447</p> <p>7-35. 全相状态下, 兩側电源电动势相角分开而发生短路或断相时, 第二类阻抗继电器的工作情况.....453</p> <p>7-36. 带纵联电容补偿的綫路上, 阻抗继电器的工作情况.....461</p> <p>7-37. 平行綫路上, 距离保护装置的特点.....464</p> <p>7-38. 长距离重負載綫路上, 距离保护装置的特点.....466</p> <p>7-39. 保护装置各段整定值的选择.....468</p> <p>7-40. 保护装置的灵敏度和精确工作电流倍率的校驗.....476</p> <p>7-41. 保护装置的計算示例.....483</p> <p>7-42. Π3-152型距离保护装置.....486</p> <p>7-43. Π3-153型距离保护装置.....490</p> <p>7-44. Π3-157型距离保护装置.....495</p>
--	---

- 7-45. II3-158 型距离保护装置.....503
- 7-46. 简化距离保护装置.....506
- 7-47. ДЗ-400M型距离保护装置.....507
- 7-48. 半导体距离保护装置.....512
- 7-49. 保护装置的评价.....514
- 第八章 电网的差动保护.....515**
- 8-1. 差动保护的用途和类型.....515
- 8-2. 纵联差动电流保护装置的
动作原理.....515
- 8-3. 差动保护中的不平衡电流.....517
- 8-4. 差动继电器的动作电流.....519
- 8-5. 提高差动保护装置可靠性和灵敏度的方法.....520
- 8-6. 經中間飽和变流器接入继电器.....520
- 8-7. 利用具有制动特性的差动继电器.....522
- 8-8. 利用复数平面分析綫路纵联差动保护装置的图解方法.....529
- 8-9. 綫路纵联差动保护装置的輔助导綫和动作电流.....535
- 8-10. 特朗斯雷型差动保护装置的工作原理.....538
- 8-11. РДЛ型差动保护装置.....542
- 8-12. РДЛ型差动保护装置用于小接地电流系統中的特点.....557
- 8-13. 带分支綫的綫路上, 纵联差动保护装置的特点.....565
- 8-14. РДЛ型差动保护装置的計算示例.....567
- 8-15. 綫路橫联差动保护概述.....568
- 8-16. 綫路橫联差动电流保护装置的
动作原理.....569
- 8-17. 綫路橫联差动电流保护装置的
动作电流.....570
- 8-18. 綫路橫联差动电流保护装置死区的計算.....571
- 8-19. 綫路橫联差动电流方向保护装置的
动作原理.....573
- 8-20. 綫路橫联差动电流方向保护装置的
动作电流.....575
- 8-21. 綫路橫联差动电流方向保护装置的
灵敏度.....578
- 8-22. 綫路橫联差动电流方向保护装置的
纵續动作区.....580
- 8-23. 綫路橫联差动电流方向保护装置的
死区.....581
- 8-24. 带分支綫的平行綫路橫联差动
电流方向保护装置的特点.....584
- 8-25. 綫路橫联差动电流方向保护装置的
接綫图.....586
- 8-26. ДДЗ-400型差动距离保护装置.....594
- 8-27. 綫路橫联差动电流方向保护装置的
計算示例.....595
- 8-28. 綫路电流平衡保护装置的
动作原理.....599
- 8-29. ИТБ-201A/1型电流平衡继电器.....600
- 8-30. 綫路电流平衡保护装置的
动作电流.....606
- 8-31. 綫路电流平衡保护装置的
纵續动作区.....607
- 8-32. 带分支綫的平行綫路电流平衡
保护装置的特点.....608
- 8-33. 綫路电流平衡保护装置的
接綫图.....611
- 8-34. 綫路电流平衡保护装置的
計算示例.....614
- 8-35. 一回綫断相并在另一側短路时,
橫联差动保护装置的动作
情况.....615
- 8-36. 不同地点两点接地时, 橫联差
动保护装置的动作情况.....619
- 8-37. 带纵联电容补偿的平行綫路上,
橫联差动保护装置的特点.....620
- 8-38. 三回綫組成平行綫路的
电流平衡保护装置.....620
- 8-39. ИТБ-3型电流平衡继电器.....625
- 8-40. 保护装置的评价.....628
- 第九章 电网的高頻保护.....631**
- 9-1. 高頻保护的用途、种类和
对它的基本要求.....631
- 9-2. 高頻通道的接綫和其特点.....632
- 9-3. 高頻通道中高頻电流衰耗的
計算.....635
- 9-4. 輸电綫路上干扰的类型和其
特性.....639

- 9-5. 高频保护通道的运行特性.....641
- 9-6. 带分支线的线路上, 高频通道的工作特点.....646
- 9-7. 高频加工设备与连接设备.....646
- 9-8. 高频收发讯机.....652
- 9-9. 高频闭锁方向保护装置的动作原理.....661
- 9-10. 系统振荡时, 高频闭锁方向保护装置的工作.....664
- 9-11. ПЗ-164A型滤过式高频闭锁方向保护装置.....665
- 9-12. ПЗ-164A型滤过式高频闭锁方向保护装置的整定计算.....670
- 9-13. 高频闭锁方向保护与距离保护的配合应用.....672
- 9-14. 带分支线的线路上, ПЗ-164A型高频闭锁方向保护装置的工作.....675
- 9-15. 非全相状态下, 高频闭锁方向保护装置工作的特点.....678
- 9-16. 线路分布电容对高频闭锁方向保护装置工作的影响.....688
- 9-17. 带串联电容补偿装置的线路上, 高频闭锁方向保护装置的工作特点.....690
- 9-18. НФЗ-400型相灵敏接绕实现的 高频闭锁方向保护装置.....691
- 9-19. 半导体高频闭锁方向保护装置.....694
- 9-20. 相差动高频保护装置的动作原理.....696
- 9-21. 高频电流和工频电流传输时间对相差动高频保护装置的影响.....699
- 9-22. 高频电流反射信号对相差动高频保护装置的影响.....700
- 9-23. ДФЗ-2型相差动高频保护装置.....702
- 9-24. ДФЗ-2型相差动高频保护装置 的整定计算.....710
- 9-25. 小接地电流电网中, ДФЗ-2型 相差动高频保护装置的工作.....718
- 9-26. 线路-变压器组运行时, ДФЗ-2 型相差动高频保护装置的工作.....720
- 9-27. 带分支线的线路上, ДФЗ-2型 相差动高频保护装置的工作.....722
- 9-28. 非全相状态下, 相差动高频保 护装置工作的特点.....727
- 9-29. 线路分布电容对相差动高频保 护装置工作的影响.....730
- 9-30. 消除线路分布电容对高频保护 影响的补偿装置.....732
- 9-31. 带串联电容补偿装置的线路上, 相差动高频保护装置的工作 特点.....737
- 9-32. ДФЗ-400M型相差动高频保护 装置.....739
- 9-33. 半导体相差动高频保护装置.....742
- 9-34. 保护装置的评价.....743
- 第十章 电网保护的設計原则.....745
- 10-1. 电网保护的設計任务和內容.....745
- 10-2. 电力系统的中性点接地方式.....747
- 10-3. 选择变压器中性点直接接地的 分布.....747
- 10-4. 计算运行方式的选择.....748
- 10-5. 对电网保护的設計的要求和应遵 循的总原则.....750
- 10-6. 保护装置相互配合的准则.....753
- 10-7. 实现后备作用的不同方法.....754
- 10-8. 电网结构与继电保护的关系.....758
- 10-9. 电网保护与自动装置的配合工 作.....758
- 10-10. 故障录波器.....761
- 10-11. 不同电压级电网的保护方式.....764
- 10-12. 对继电保护原理图設計的要 求.....766

第七章 电网的距离保护

7-1. 保护装置的動作原理

简单结构的电网中，在系统运行方式变化不大的情况下，应用带或不带电力方向元件的阶梯式电流、电压保护，一般都能满足速动性、选择性和灵敏性的要求。在系统运行方式变化很大的电网中，由于短路电流水平变化较大，在实际可能出现的最不利方式下，电流、电压保护动作范围可能缩得很短。某些方式下，个别保护段甚至没有保护区。为了可靠地迅速切除短路故障，从二十年代起就开始使用距离保护。

利用阻抗元件来反应短路故障的保护装置称为距离保护。阻抗元件反应接入该元件的电压与电流之比。它的动作时限取决于加至阻抗元件上的电压 \dot{U}_p 与电流 \dot{I}_p 的比值和两者间的相角 φ_p ，即 $t = f_1\left(\frac{U_p}{I_p}, \varphi_p\right)$ ，随着故障点至保护装置安装处的距离增加而自动增大。在保护装置安装处出口附近短路时，距离保护动作很快。因此在任何结构形式的复杂电网中，原则上距离保护都能以不大的时限有选择地切除故障。

图 7-1, a 示出两侧电源辐射状线路上，线路两侧同时装设距离保护装置。假设阻抗元件接在线路相电流之差和同名相的相间电压上。当被保护线路上离保护装置安装处距离为 l 点发生相间短路时，流入阻抗继电器的电流为 $\dot{I}_p = \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_B}{\Pi_r}$ ，其中 Π_r —— 电流互感器的变流比，加至继电器电压回路上的残余电压 $\dot{U}_p = \frac{\dot{U}_{AB}}{\Pi_u}$ ，其中 Π_u —— 电压互感器的变压比。在金属性短路情况下，电压 $\dot{U}_{AB} = (\dot{I}_A - \dot{I}_B) z_1 l$ ，其中 z_1 —— 被保护线路的正序比阻抗。因此对动作时限与电压和电流间相角 φ_p 无关的简单阻抗继电器来说，它的动作时限可写为：

$$t = f_2(z_1 l) \tag{7-1}$$

上式表明，阻抗继电器动作时限只与故障点之前的距离 l 有关，而与流入继电器的电流和作用的电压无关，亦即它的工作不受系统运行方式变化的影响。实际上，距离保护的工作还与其他许多因素有关。例如故障点的过渡电阻、故障点与保护装置安装处之间的负载和其他连接电源等。

距离保护可按不同时限特性的形式来实现。目前与电流、电压保护时限特性相同的阶

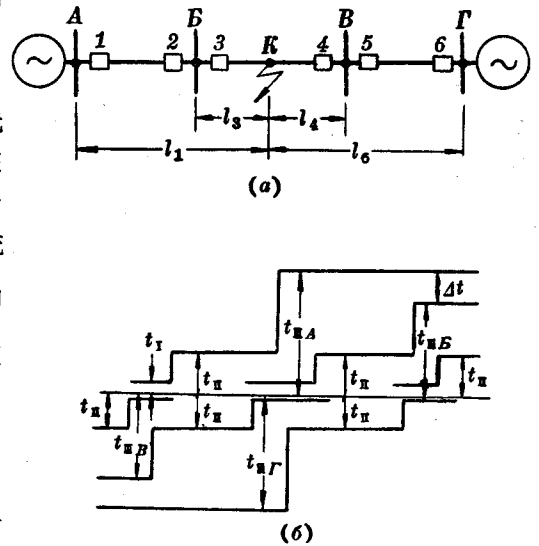


图 7-1 两侧电源辐射状线路上，
距离保护装置的動作
(a) 电网接线图；(b) 动作时限特性

梯式时限特性得到广泛应用。图7-1,6示出常用的距离保护动作时限特性。在K点短路时,邻近故障点的故障线路两侧保护装置3和4(距离为 l_3 和 l_4)以最小动作时限 t_1 (第一保护段的时限)动作。此时,保护装置1和6,因远离故障点($l_1 > l_3$ 、 $l_6 > l_4$),只当故障线路BB因某种原因而未断开时,才起后备作用,动作并切除故障线路和非故障线路。为了防止保护装置2和5可能误动作(它们离短路点的距离分别与保护装置3和4的距离相同),距离保护装置应具有方向性。只当短路功率自母线指向被保护线路时,距离保护才容许动作于跳闸。在个别情况下,例如单侧电源供电的辐射状线路上,保护装置可以不具有方向性。

如上所述,距离保护的工作受系统运行方式变化的影响较小。一般第一保护段能保护被保护线路全长的(80~85)%。在大接地电流系统中,由于简单的多段零序电流保护对反应线路接地故障效果很好,因此距离保护普通只用作反应相间短路。必须指出,个别情况下,例如零序电流保护不能满足选择性和灵敏度要求时,亦可考虑装设反应接地短路的接地距离保护装置。我国某电力系统已应用这种保护方式。应该看到,当线路实现接相自动重合闸(或单相和综合式自动重合闸)时,重合闸装置的阻抗选相元件也起到防止接地故障的后备保护作用。

7-2. 保护装置的主要元件和它们的相互动作

一般情况下,保护装置具有下列主要元件:

一、起动元件:通常应用过电流继电器或低阻抗继电器来实现。它有两个主要作用,1.电网上发生故障时,起动保护装置,2.与保护装置其他保护段的元件相配合。某些情况下还起别的作用,例如保护装置实现瞬时测定等。

二、距离元件(测量元件):应用阻抗继电器来实现。它用作测量故障点距保护装置安装处的距离。

三、时限元件:保护装置按阶梯时限特性实现时,通常应用时间继电器作为时限元件。它是保护装置逻辑操作中的一个元件。它的动作时限与相应保护段的时限相配合。

四、电力方向元件:它是控制保护装置只在被保护方向故障时才能动作的一个元件。当功率自母线流入被保护线路时,电力方向元件动作。反之,则不动作。如阻抗元件本身具有方向性,例如方向阻抗继电器,则可不再装设独立的电力方向元件。

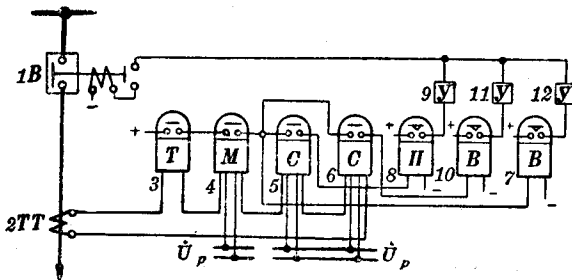


图 7-2 距离保护装置单线连接示意图

图7-2示出三段距离保护装置的单线连接示意图。在保护范围内短路时,电流继电器3T和电力方向继电器4M无时限动作。直流正电源经它们的串接常开接点加至阻抗继电器5C和6C的接点上。继电器5C和6C分别用作第一和第二保护段的距离元件。时间继电器10B和7B分别用来建立保护装置的第二和第三保护段动作时限。

在第一段动作范围内短路时,继电器5C动作。直流正电源经过它的常开接点加至中间继

电器 8Π 的线圈上。继电器 8Π 动作后，通过串接信号继电器 $9Y$ 给出断路器跳闸脉冲。如故障点较远而位在第二段动作范围内时，继电器 $5C$ 不动作而继电器 $6C$ 能动作。通过建立第二段动作时限 t_{II} 的时间继电器 $10B$ 和串接信号继电器 $11Y$ 给出跳闸脉冲。如故障点很远而处在第三段动作范围内时，继电器 $5C$ 和 $6C$ 不动作。在继电器 $3T$ 和 $4M$ 动作后，经建立第三段动作时限 t_{III} 的时间继电器 $7B$ 和串接信号继电器 $12Y$ 给出跳闸脉冲。在所讨论的接线图中，保护装置第三段不经距离元件控制。实质上，这种情况下，第三保护段与方向过电流保护相同。

7-3. 保护装置的时限特性

如前所述，具有阶梯时限特性的保护装置得到广泛应用。为了简化保护装置接线，通常将保护装置作成三段时限特性，如图 7-3 所示。我国某些电力系统中，虽装有超过三段的距离保护设备，例如 RD_7 型距离保护装置具有五个保护段，但实际运行中大都已改为三段式运行。在没有特殊要求的情况下，第一保护段通常以保护装置各元件的固有动作时限动作，一般约 $0.1 \sim 0.2$ 秒。第二和第三保护段的动作时限可借调整时间继电器的动作时限予以改变。保护装置的第二段一般应能反应被保护线路全长上的故障。因此当对侧变电所母线或连接在该母线上的其他相邻元件出口附近故障时，保护装置第二段亦将动作。为了保证选择性，第二段的动作时限 t_{II} 应比相邻元件主保护的时限 t_I (相邻线路上距离保护的第一段或对侧变电所变压器的速动保护) 高出一个时限阶段 Δt 。时限阶段一般选为 $0.5 \sim 0.6$ 秒。某些情况下，例如对侧变电所固定连接的双母线上装有母线后备接线时，第二段的动作时限还应增长，使之与母线后备接线的动作时限相配合。一般约整定在 $0.8 \sim 0.9$ 秒。为了保证第三段能起相邻元件的后备作用，第三段动作范围必须伸过被保护线路末端。它的动作时限 t_{III} 原则上应按相迎阶梯原则整定。正如上册所述，在环状电网中，按这种原则实现的后备保护只能在单电源供电的环状电网中才能保证选择性。因此对多电源环状电网，可以认为容许第三段无选择性切除故障。必须指出，由于保护装置的工作受其他许多因素的影响，例如故障点存在过渡电阻，因此实际运行中，可能出现以较高时限（第二段或第三段）切除较近的线路故障的情况。

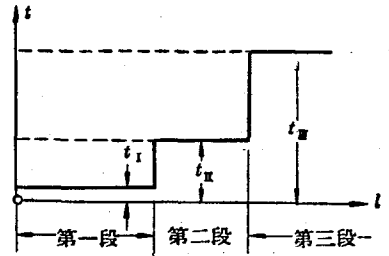


图 7-3 距离保护装置的阶梯时限特性

7-4. 阻抗继电器端子上的阻抗

为便于计算和分析阻抗继电器的工作，二十年代就提出阻抗继电器端子上假想阻抗的概念。一般情况下，这种假想阻抗没有物理意义。它只相当于加至继电器的电压 \dot{U}_p 与流入的电流 \dot{I}_p 之比。实用上广泛应用这种概念的目的是为了正确选择 \dot{U}_p 与 \dot{I}_p 的接线方式，使阻抗继电器感受的假想阻抗与被保护线路上故障点至保护装置安装处间距离成正比。

与实际阻抗相似，假想阻抗 z_p 亦可分解为有效假想电阻 R_p 与无效假想电抗 X_p 两部分，即 $R_p = z_p \cos \varphi_p$ ， $X_p = z_p \sin \varphi_p$ ，其中 φ_p 为假想阻抗的阻抗角。应用那一种假想阻抗的形式主要取决于所用阻抗元件的类型。作为起动元件或距离元件的阻抗继电器都是间接

动作式继电器。电压和电流經仪用互感器引入。一次与二次假想阻抗間具有一定的关系，例如全阻抗继电器，它的二次假想阻抗

$$z_{p.s} = \frac{U_{p.s}}{I_{p.s}} = \frac{U_{p.n}\Pi_r}{\Pi_n I_{p.n}} = \frac{\Pi_r}{\Pi_n} z_{p.n} \quad (7-2)$$

式中 $U_{p.n}$ 和 $U_{p.s}$ ——一次和二次电压；

$I_{p.n}$ 和 $I_{p.s}$ ——一次和二次电流；

$z_{p.n}$ ——一次假想阻抗；

Π_r 和 Π_n ——电流互感器和电压互感器的变比。

当变比 $\Pi_r = \Pi_n$ 时，阻抗 $z_{p.s} = z_{p.n}$ 。为論述方便起见，以后除特殊情况专门說明外，都将一次阻抗与二次阻抗视为相等，即变比 Π_r 和 Π_n 相等（一般视为等于 1）。

必須指出，目前还常用由几个电压和电流作用下实现的阻抗继电器，例如勃莱斯列尔继电器等。对这些继电器来说，关于继电器端子上假想阻抗的概念已不能应用。但对这些保护装置仍可应用式(7-2)，作为按保护范围一次阻抗的数据来确定它的整定值。

7-5. 阻抗继电器的类型

所有的阻抗继电器可分为两大类。

一、第一类阻抗继电器：它的动作特性可直接在阻抗(或导納)复数平面上画出，且动作特性与可能发生的各种故障类型无关。选择这类阻抗继电器的型式、特性以及在各种不正常状态下分析它的工作情况，都可借助在复数平面上比較所討論方式下，继电器端子上假想阻抗(假想导納)的特性与继电器动作特性的方法进行。此时，假設继电器感受的假想阻抗(假想导納)与继电器参数无关。

二、第二类阻抗继电器：它的动作特性不能直接在阻抗(或导納)复数平面上画出不随故障类型而变的固定曲线。这类继电器不能滿足上述对第一类阻抗继电器所提出的要求。第二类阻抗继电器主要应根据它的原始动作方程进行分析。

第一类阻抗继电器按它們在阻抗复数平面上动作特性的特点可分如下几种类型：

一、綜合式阻抗继电器。在复数平面上，它的特性圆移动在某个位置；

二、方向阻抗继电器。特性圆通过复数坐标轴原点；

三、全阻抗继电器。特性圆圆心与复数坐标轴原点相合；

四、閉鎖式阻抗继电器。特性曲线是一条处在某个位置的直线或是双曲线；

五、电抗继电器。特性曲线是一条与复数坐标实轴平行的直线；

六、电阻继电器。特性曲线是一条与复数坐标虚轴平行的直线；

七、椭圆特性阻抗继电器。特性曲线是一个椭圆。

目前，由于电抗继电器、电阻继电器、閉鎖式阻抗继电器和椭圆特性阻抗继电器很少应用，因此本章只在第7-6和第7-8节中简单提及外，不作詳細討論。

第二类阻抗继电器按它們反应短路类型的不同可分如下几种类型：

一、反应三相短路并具有方向性的全阻抗继电器；

二、反应两相短路的方向距离继电器。这种类型阻抗继电器的代表就是勃莱斯列尔继电器(又称三相距离继电器或多相补偿阻抗继电器)。目前在实践中得到了广泛应用；

三、反应接地短路具有或沒有方向性的阻抗继电器；

四、反应所有类型多相短路的阻抗继电器。1956年苏联提出这种新原理的阻抗继电器。在美国电力系统中，同样也有使用这种类型的阻抗继电器。

第二类阻抗继电器的特点是：继电器电流回路中不必进行切换即可反应 A 、 B 、 C 三相上的故障，因此反应各相上某种类型的故障只需一个继电器。这样便有条件实现单系统的距离保护装置。

7-6. 在全阻抗复数平面上，阻抗继电器的特性

应用两个电气量 A 和 B 实现的阻抗继电器(例如接在电压 $\dot{U}_P = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_{AB}$ 和电流 $\dot{I}_P = \dot{I}_A - \dot{I}_B$ 的继电器)在阻抗或导纳复数平面上具有圆形或直线的动作特性。当应用三个电气量 A 、 B 和 C 实现阻抗继电器时，在复数平面上则可取得比较复杂的动作特性，例如椭圆和双曲线特性等。在阻抗复数平面上，由加入继电器的电压与电流比值确定的阻抗向量末端处在继电器阻抗动作特性所规定的范围内，则继电器动作。反之，阻抗向量末端处在规定范围外，继电器不动作。当阻抗向量末端落在动作特性曲线上时，继电器处于动作与不动作的边际条件下。同理，在导纳复数平面上，比较导纳动作特性与继电器感受的假想导纳向量，亦可获得相同的结论。本章以后都采用在阻抗复数平面上分析继电器特征的方法。

一、综合式阻抗继电器：

图7-4示出在阻抗复数平面上，综合式阻抗继电器动作特性的两种类型。图7-4, a上，复数坐标原点位在动作特性圆内。在图7-4, b上，坐标原点位在动作特性圆外。图中画斜线部分表示继电器的动作区。由图7-4不难看出，阻抗圆的圆心坐标为 $\frac{Z' + Z''}{2}$ ，圆半径为 $\left| \frac{Z' - Z''}{2} \right|$ 。当继电器感受的假想阻抗 (Z) 向量末端落在阻抗特性圆上时，向量 $\left(Z - \frac{Z' + Z''}{2} \right)$ 的模数与圆半径相等。即

$$\left| Z - \frac{Z' + Z''}{2} \right| = \left| \frac{Z' - Z''}{2} \right| \quad (7-3)$$

上式即是综合式阻抗继电器以阻抗绝对值形式表示的动作方程。

如取 $Y' = \frac{1}{Z'}$ 、 $Y'' = \frac{1}{Z''}$ ，则图7-4中的阻抗特性圆便变为导纳动作特性圆。图7-4, a上，相应于阻抗圆内的点应位在导纳圆外，但在图7-4, b上，相应于阻抗圆内的点则在导纳圆内。图中导纳圆边沿画斜线部分表示继电器动作区。与推求式(7-3)相似，可直接写出以导纳绝对值形式表示的继电器动作方程。即

$$\left| Y - \frac{Y' + Y''}{2} \right| = \left| \frac{Y' - Y''}{2} \right| \quad (7-4)$$

式中 $Y = \frac{1}{Z}$ 。导纳复数平面上的导纳圆圆心应与向量 $\frac{Y' + Y''}{2}$ 的末端相合，而圆半径为 $\left| \frac{Y' - Y''}{2} \right|$ 。

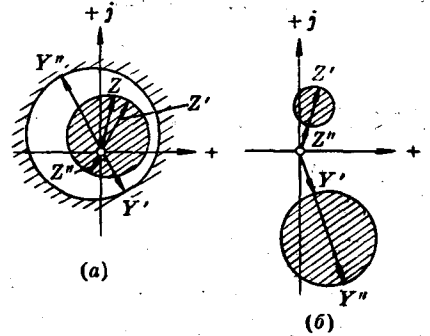


图7-4 综合式阻抗继电器的动作特性

将 $Y = \frac{1}{Z}$ 、 $Y' = \frac{1}{Z'}$ 和 $Y'' = \frac{1}{Z''}$ 代入式(7-4)，整理即得

$$\left| \frac{Z'Z''}{Z} - \frac{Z'+Z''}{2} \right| = \left| \frac{Z'-Z''}{2} \right| \quad (7-5)$$

上式系综合式阻抗继电器以阻抗绝对值表示其动作特性的另一种形式。某些情况下，例如 Z'' 变为无限大时，应用式(7-5)分析比较方便。

式(7-3)的绝对值形式可转用极坐标的圆方程式形式表示。对图 7-4, a 而言，绝对值 $|Z'+Z''| = z' - z''$ 、 $|Z'-Z''| = z' + z''$ 。因此

$$\left| Z - \frac{Z'+Z''}{2} \right| = \sqrt{z^2 + \left(\frac{z'-z''}{2} \right)^2 - 2z \left(\frac{z'-z''}{2} \right) \cos(\varphi - \alpha)}$$

式中 φ ——阻抗 Z 的幅角；

α ——阻抗 $Z'+Z''$ 的幅角。

将上列关系代入式(7-3)可得

$$z^2 + \left(\frac{z'-z''}{2} \right)^2 - (z'-z'')z \cos(\varphi - \alpha) = \left(\frac{z'+z''}{2} \right)^2$$

即
$$z^2 - z(z'-z'') \cos(\varphi - \alpha) - z'z'' = 0 \quad (7-6)$$

上式表示圆心离极坐标原点的距离为 $\frac{z'-z''}{2}$ 、极角为 α 、圆半径为 $\sqrt{\left(\frac{z'-z''}{2} \right)^2 + z'z''} = \frac{z'+z''}{2}$ 。对图 7-4, b 情况，采取类似方法可导出式(7-3)的极坐标圆方程式，即

$$z^2 - z(z'+z'') \cos(\varphi - \alpha) + z'z'' = 0 \quad (7-7)$$

上式表示圆心离极坐标原点的距离为 $\frac{z'+z''}{2}$ 、极角为 α 、圆半径为 $\sqrt{\left(\frac{z'+z''}{2} \right)^2 - z'z''} = \frac{z'-z''}{2}$ 。

二、方向阻抗继电器：

方向阻抗继电器具有方向性。在阻抗复数平面上，它的动作特性圆位于第一象限内。动作特性圆通过座标轴原点，如图 7-5 所示。式(7-3)中，令 $Z''=0$ ，则该方程变为：

$$\left| Z - \frac{Z'}{2} \right| = \left| \frac{Z'}{2} \right| \quad (7-8)$$

上式即为方向阻抗继电器以阻抗绝对值形式表示的动作方程。相应地取 $z''=0$ 代入式(7-6)，则得在极坐标上的动作方程，即

$$z = z' \cos(\varphi - \alpha) \quad (7-9)$$

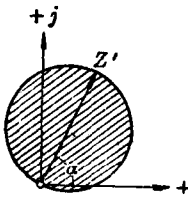


图 7-5 方向阻抗继电器的动作特性

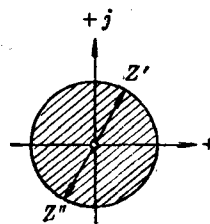


图 7-6 全阻抗继电器的动作特性

三、全阻抗继电器:

全阻抗继电器没有方向性。在阻抗复数平面上, 它的动作特性圆同时对称于实轴和虚轴。特性圆圆心与座标轴原点相合, 如图7-6所示。式(7-3)中, 令 $Z'' = -Z'$, 则该方程变为:

$$|Z| = |Z'| \quad (7-10)$$

上式即为全阻抗继电器以阻抗绝对值形式表示的动作方程。相应地取 $z'' = z'$ 代入式(7-6), 则得在极坐标上的动作方程, 即

$$z = z' \quad (7-11)$$

四、闭锁式阻抗继电器:

阻抗复数平面上, 这种继电器的动作特性规定了阻抗向量末端处在某个范围内, 继电器动作。反之, 阻抗向量末端处在其他范围内, 继电器不动作。因此将这种继电器与其他类型阻抗继电器同时配合使用, 就可获得比较满意的综合的动作特性。实现这种配合的方法只需将两种继电器常开接点串联。

闭锁式阻抗继电器可作成各种不同的动作特性。以下讨论在阻抗复数平面上, 动作特性为一条直线、两条直线或双曲线的三种不同类型闭锁式阻抗继电器。

1. 阻抗复数平面上, 动作特性为一条直线的闭锁式阻抗继电器(又称限相继电器), (图7-7):

式(7-5)等式两边的综合复数阻抗各乘以阻抗 $\frac{2Z}{Z''}$, 则

$$\left| 2Z' - \left(\frac{Z'Z}{Z''} + Z \right) \right| = \left| \frac{Z'Z}{Z''} - Z \right| \quad (7-12)$$

令 $Z'' = \infty$, 上式变为

$$|2Z' - Z| = |Z| \quad (7-13)$$

上式即为这种闭锁式阻抗继电器以阻抗绝对值形式表示的动作方程。将式(7-6)除以 z'' , 并令 $z'' = \infty$, 则得

$$z \cos(\varphi - \alpha) = z' \quad (7-14)$$

式中 z' —— 自座标轴原点至特性直线的垂直距离(复数向量 Z' 指向特性直线)。式(7-14)

即为这种继电器在极坐标上的动作方程。

应该看到, 通过座标轴原点的特性直线的绝对值表示式已如上册所述, 应为 $|Ze^{j\alpha} + K| = |Ze^{j\alpha} - K|$ 。令 $Ke^{-j\alpha} = Z'$, 则等式变为 $|Z + Z'| = |Z - Z'|$ 。这就是电力方向继电器在阻抗复数平面上的动作方程。

2. 阻抗复数平面上, 动作特性为两条直线的闭锁式阻抗继电器(图7-8):

如以 Z' 和 Z'' 表示指向两条特性直线的两个向量, 根据式(7-13)可写出阻抗 Z 处在这两直线动作范围内的绝对值表示式, 即

$$\begin{cases} |2Z' - Z| - |Z| > 0 \\ |2Z'' - Z| - |Z| > 0 \end{cases} \quad (7-15)$$

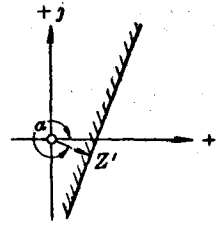


图7-7 阻抗复数平面上, 闭锁式阻抗继电器的动作特性为一条直线

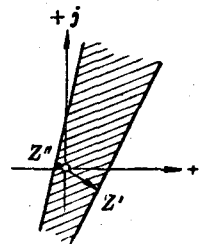


图7-8 阻抗复数平面上, 闭锁式阻抗继电器的动作特性为两条直线

閉鎖式阻抗继电器应在这两特性直線所限定的动作范围内动作，因此阻抗 Z 必須同时滿足式(7-15)列出的两个不等式。如选取阻抗向量 Z' 与 Z'' 反相，則两条特性直線互相平行。

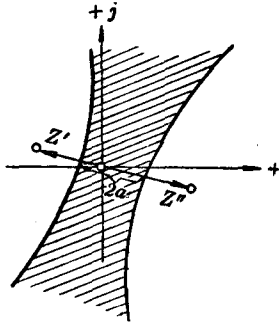


图 7-9 阻抗复数平面上，閉鎖式阻抗继电器的动作特性为具有两支的双曲綫

3. 阻抗复数平面上，动作特性为双曲綫的閉鎖式阻抗继电器(图 7-9):

如所周知，实数平面上，某一点至两固定点的距离之差为一常数($2a$)时，該点的运动軌迹系一双曲綫。两固定点为双曲綫的两个焦点。复数平面上，情况相同。因此图7-9中，对虛軸右边的一支双曲綫可列出下列绝对值表示式，即

$$|Z - Z'| - |Z - Z''| = 2a \quad (7-16)$$

对虛軸左边的一支双曲綫可列出下列绝对值表示式，即

$$|Z - Z''| - |Z - Z'| = 2a \quad (7-17)$$

式中 Z' 和 Z'' ——阻抗复数向量，它的末端与双曲綫焦点相合；

$2a$ ——两支双曲綫頂点間的距离。

閉鎖式阻抗继电器应在这两支双曲綫所限定的动作范围内动作。因此阻抗 Z 必須同时滿足式(7-16)和式(7-17)。

五、电抗继电器:

电抗继电器只反应继电器端子上阻抗向量的虛部。在阻抗复数平面上，它的动作特性是一条与实軸平行的直線，如图7-10所示。不难看出，这种继电器的特性相当于图 7-7 的一个特例，即 $Z' = jx'$ 。令式(7-12)中 $Z'' = -j\infty$ ，則該式变为

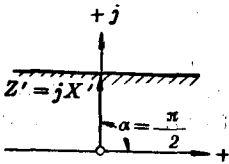


图 7-10 电抗继电器的动作特性

$$\left. \begin{aligned} |2Z' - Z| &= |Z| \\ |2jx' - Z| &= |Z| \end{aligned} \right\} \quad (7-18)$$

上式即为电抗继电器以阻抗绝对值形式表示的动作方程。如以 $\alpha = 90^\circ$ 代入式(7-14)，則得这种继电器在极坐标上的动作方程。即

$$z \sin \varphi = z' = x' \quad (7-19)$$

六、电阻继电器:

电阻继电器只反应继电器端子上阻抗向量的实部。在阻抗复数平面上，它的动作特性是一条与虛軸平行的直線，如图7-11所示。不难看出，这种继电器也是图7-7的一个特例，即 $Z' = R$ 。利用式(7-13)可直接写出这种继电器以阻抗绝对值形式表示的动作方程，即

$$|2R - Z| = |Z| \quad (7-20)$$

如以 $\alpha = 0^\circ$ 代入式(7-14)，則得这种继电器在极坐标上的动作方程，即

$$z \cos \varphi = z' = R \quad (7-21)$$

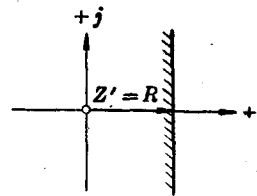


图 7-11 电阻继电器的动作特性

七、椭圆特性阻抗继电器:

如所周知，实数平面上，某一点至两固定点的距离之和为一常数($2a$)时，該点的运动

軌迹系一橢圓。兩固定點為橢圓的兩個焦點。複數平面上，情況相同。圖7-12示出三種橢圓特性，其中a圖代表的繼電器沒有方向性，b和c圖代表的繼電器具有方向性。

對圖7-12,a，不難寫出這種一般特性的橢圓特性阻抗繼電器以絕對值形式表示的動作方程，即

$$|Z - Z'| + |Z - Z''| = 2a \quad (7-22)$$

式中 Z' 和 Z'' ——阻抗複數向量，它的末端與橢圓焦點相合；

$2a$ ——橢圓的長軸長度。

圖7-12,b中，橢圓長軸長度等於自座標軸原點至兩焦點的距離之和，即 $2a = |Z' + Z''|$ 。

因此對這種情況，式(7-22)可改寫為：

$$|Z - Z'| + |Z - Z''| = |Z' + Z''| \quad (7-23)$$

圖7-12,c代表的橢圓特性阻抗繼電器可考慮在具有很大有效電阻分量的電網中。這種情況的繼電器動作方程與式(7-22)同。圖7-12,a和b代表的橢圓特性阻抗繼電器具有一

個共同缺點，即在故障點經較大過渡電阻短路時，繼電器可能拒絕動作。

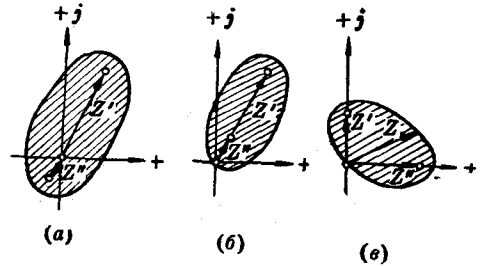


圖7-12 橢圓特性阻抗繼電器的動作特性

7-7. 阻抗繼電器的主要參數

阻抗繼電器的主要參數是：

一、最小動作電流：當加至阻抗繼電器端子上電壓為零時，繼電器動作所需的電流稱為阻抗繼電器的最小動作電流 $I_{c.p.min}$ 。此時，由電壓產生的反作用轉矩為零，而電流產生的工作轉矩用以克服繼電器機械轉矩。對未裝設記憶回路的感應式方向阻抗繼電器而言，由於繼電器的極化電壓為零，電流無法建立工作轉矩。因此這種情況下，繼電器的最小動作電流不存在。

二、精確工作電流：這是保證距離保護裝置正確工作的重要指標之一。由於阻抗繼電器的動作阻抗與整定阻抗有一定的離散，而離散值大小直接影響到相鄰線路阻抗元件間的相互配合，因此必須限定離散值的範圍。一般規定阻抗繼電器的實際動作阻抗 $z_{c.p}$ 對整定阻抗 z_y 的最大離散值不得超過整定阻抗的 10% $\left(\frac{z_y - z_{c.p}}{z_y} = 0.1\right)$ ，即繼電器動作阻抗的最大容許誤差為 10%。為了滿足對離散值的要求，必須保證在最不利方式下通入繼電器的電流值應不低於一定數值，即最小精確工作電流值 $I_{r.min}$ 。當電流大於最小精確工作電流時，繼電器實際動作阻抗處在 $0.9z_y < z_{c.p} \leq z_y$ 範圍內。必須指出，在大電流（一般大於額定電流 20~25 倍以上）通入繼電器的情況下，由於電抗變壓器的磁導體開始飽和，電抗變壓器的互感阻抗下降，因此繼電器的實際動作阻抗對整定阻抗的離散值可能大於 10%。大電流情況下，相當於 $z_{c.p} = 0.9z_y$ 的電流稱為最大精確工作電流 $I_{r.max}$ 。當通入繼電器電流處在最大與最小精確工作電流之間時，繼電器能在容許誤差範圍內正確工作。考慮到實際電力系統中，一般短路電流水平並不很高，因此很少出現大於最大精確工作電流的故障情況。通常將最小精確工作電流簡稱為阻抗繼電器的精確工作電流 I_r 。

圖7-13示出全阻抗繼電器的動作阻抗與電流的關係曲線。當方向阻抗繼電器未裝記憶

回路时,图中关系曲线不与横轴相交;当装有记忆回路时,记忆的作用使继电器消灭死区,特性曲线形状与图7-13同。

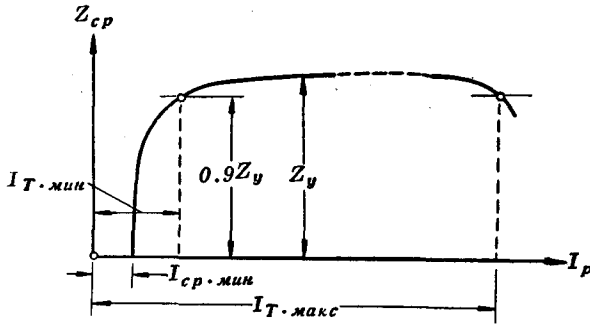


图 7-13 全阻抗继电器的动作阻抗与电流的关系曲线

三、精确工作电压:精确工作电流 I_T 与整定阻抗 z_y 的乘积称为阻抗继电器的精确工作电压 U_T , 即

$$U_T = I_T z_y \quad (7-24)$$

阻抗继电器本身的灵敏度是用精确工作电压衡量的。在给定继电器电压回路的参数后,精确工作电压系一常数,它与整定阻抗和精确工作电流无关,即精确工作电压不随继电器的电抗变压器参数而变。这是因为改变电抗变压器一次线圈抽头匝数以改变继电器整定阻抗时,继电器精确工作电流成比例地变化(参见式7-110、130和144),因此精确工作电压不变。KPC-112型感应式全阻抗继电器的 $U_T \approx 2$ 伏。

由式(7-24)看出,给定 I_T 和 U_T 后,就可确定这种阻抗继电器容许实现的被保护线路的最小长度。这就限定了这种距离保护装置第一保护段能否应用的问题。

四、最大灵敏角:具有方向性的阻抗继电器才有最大灵敏角 φ_{min} 的物理意义。它与上册介绍电力方向继电器的最大灵敏角的意义相同,即当阻抗继电器感受阻抗的阻抗角与最大灵敏角相等时,继电器最灵敏。此时,动作阻抗值最大。例如阻抗复数平面上,自座标轴原点引出的直径向量(图7-5)与实轴的夹角 α ,即为该继电器的最大灵敏角。

7-8. 实现整流式阻抗继电器的条件

如前所述,第一类阻抗继电器是基于比较继电器端子上的感受阻抗与整定阻抗而工作的。根据第7-6节中四之1项可知,电力方向继电器即是阻抗继电器的一个特例。因此上册介绍实现电力方向继电器的各种不同原则,同样可适用于实现阻抗继电器,例如直接反应被比较电气量 A 和 B 间相位差的感应式机电型继电器、比较两个电气量 A 和 B 的平方值的平衡式机电型继电器、比较两个电气量 A 和 B 绝对值的整流型继电器、比较两个电气量 A 和 B 瞬时值的相位的脉冲型继电器、利用半导体磁电特性(霍尔效应和磁场电阻效应)的继电器、利用饱和变压器的磁性型继电器。当前阻抗继电器主要按比较电气量相位差的感应式机电系统和反应电气量绝对值的整流系统来实现。对全阻抗继电器来说,也有采用磁性型的。因此以后只对按这些原则实现的阻抗继电器详加讨论。

上述电气量 A 和 B 如为引入继电器的电压 \dot{U}_p 和电流 \dot{I}_p 的线性函数,则在阻抗复数平面上,能获得动作特性为任意给定圆或给定直线的阻抗继电器。

就整套保护装置而言,阻抗继电器的精确工作电流有两种:1.相应于不限阻抗继电器动作时间的电流,即阻抗继电器的常开接点以自由速度运动以至能可靠闭合。2.相应于限定阻抗继电器动作时间的电流。很显然,规定动作时间的精确工作电流必然大于不限动作时间的精确工作电流。在校验阻抗继电器精确工作电流倍率时,必须计及此因素。

$$\left. \begin{aligned} A &= \dot{K}_1 \dot{U}_p + \dot{K}_2 \dot{I}_p \\ B &= \dot{K}_3 \dot{U}_p + \dot{K}_4 \dot{I}_p \end{aligned} \right\} \quad (7-25)$$

式中 \dot{K}_1 、 \dot{K}_2 、 \dot{K}_3 、 \dot{K}_4 ——比例系数。

在按整流系统实现阻抗继电器时，电气量 A 和 B 都分别进行整流。因此对继电器工作而言， A 与 B 间的相角差已无实际意义 (\dot{K}_1 和 \dot{K}_3 可视为正实数)，重要的是 $\dot{K}_1 \dot{U}_p$ 与 $\dot{K}_2 \dot{I}_p$ 以及 $\dot{K}_3 \dot{U}_p$ 与 $\dot{K}_4 \dot{I}_p$ 间的相角差。应该看到，这些电气量中，每个电气量本身的相位亦不重要。

比较电气量 A 和 B 绝对值的整流型继电器动作条件为

$$|K_1 \dot{U}_p + \dot{K}_2 \dot{I}_p| > |K_3 \dot{U}_p + \dot{K}_4 \dot{I}_p| \quad (7-26)$$

上式除以正数 $|\dot{I}_p|$ ，并将正实数的系数 K_1 和 K_3 提出，令 $Z_p = \frac{\dot{U}_p}{\dot{I}_p}$ ，则

$$K_1 \left| Z_p + \frac{\dot{K}_2}{K_1} \right| > K_3 \left| Z_p + \frac{\dot{K}_4}{K_3} \right|$$

即

$$\frac{\left| Z_p + \frac{\dot{K}_2}{K_1} \right|}{\left| Z_p + \frac{\dot{K}_4}{K_3} \right|} > \frac{K_3}{K_1} \quad (7-27)$$

设 $\frac{\dot{K}_2}{K_1} = -a$; $\frac{\dot{K}_4}{K_3} = -b$; $\frac{K_3}{K_1} = K$ (7-28)

则式(7-27)变为：

$$\frac{|Z_p - a|}{|Z_p - b|} > K \quad (7-29)$$

将上列不等式改为等式，即得继电器动作边界条件下的通用方程式。在阻抗复数平面上， $|Z_p - a|$ 代表继电器动作边界线上任一点至某一固定点 (a 点) 的距离、 $|Z_p - b|$ 代表边界线上该点至另一固定点 (b 点) 的距离，如图 7-14 所示。式(7-29)表明，动作边界线应是某一点的运动轨迹，该点至两固定点 a 和 b 的距离之比保持不变。如所周知，当 $K \neq 1$ 时，该点的运动轨迹为圆、当 $K = 1$ 时，则为直线。一个圆可用三个参数来确定，例如圆心坐标 (实部和虚部为两个参数) 和圆半径。为使所实现的继电器的这三个参数与给定值相同，则应正确选择 a 、 b 和 K 值。由于 a 和 b 均为复数，因此 a 、 b 和 K 中包括五个参数。任意给出其中两个参数，就可从上列代入已知参数的三个方程中求出。一条直线可用两个参数



图 7-14 阻抗复数平面上，比较两个电气量的继电器动作边界线

(a) $K \neq 1$ 时; (b) $K = 1$ 时