

阻抗继电器 动作行为分析

高中德 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

阻抗继电器 动作行为分析

高中德 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了分析阻抗继电器动作行为的两种方法。全书共分四章，内容包括：阻抗继电器的动作方程及其在阻抗复数平面上的动作特性、发生短路故障时在阻抗复数平面上分析阻抗继电器的动作行为、用电压相量图法分析在短路和短路同时伴随振荡运行状态下阻抗继电器的动作行为、用电压相量图法分析输电线路两相运行和两相运行同时伴随振荡运行状态下阻抗继电器的动作行为。书中对阻抗继电器动作行为的分析方法作了详细的、系统性的论述，并配以大量的分析实例以供读者学习。

本书可作为从事电力系统继电保护运行、管理、试验、研发、设计的工作人员和科研、教学人员的专业参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

阻抗继电器动作行为分析 / 高中德编著. —北京：中国电力出版社，2013.7

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4066 - 4

I. ①阻… II. ①高… III. ①阻抗继电器 - 行为分析 IV. ①TM588.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 029510 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.25 印张 575 千字

印数 0001—3000 册 定价 98.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

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

阻抗继电器是电力系统继电保护中的一个重要元件，它在距离保护、纵联距离保护、选相元件中都占有重要位置。而阻抗继电器的动作行为分析又比较复杂，是继电保护工作者不太容易掌握的一项技术。电力系统不同类型的短路故障、不同的过渡电阻情况对各个相别上阻抗继电器的动作行为都会产生不同的影响。此外电力系统振荡、短路故障伴随振荡和非全相运行伴随振荡等情况也都会对继电器的动作行为产生影响。

在电力系统日常运行中，特别是当系统发生故障之后，对继电保护动作行为的分析是一项十分重要的工作。通过对继电保护动作行为的认真分析，可深入了解事故的发生、发展过程，并制定相应的事故应对措施，因此从事电力系统继电保护试验、运行管理工作的人员掌握阻抗继电器动作行为分析方法是十分必要的。而从事电力系统继电保护科研、设计工作的人员掌握了阻抗继电器动作行为分析方法以后对继电保护装置的研发、设计和新型阻抗继电器的研究也是很有帮助的。所以，能有这么一本对阻抗继电器动作行为进行详细、全面分析方法介绍的书，相信对继电保护工作者是很有帮助的。

阻抗继电器动作行为的分析主要有两种方法，作者在本书中都作了详细的论述：① 在阻抗复数平面上分析各类阻抗继电器的动作行为。包括阻抗继电器在阻抗复数平面上的动作特性；在各种故障类型下阻抗继电器测量阻抗在阻抗复数平面上的位置；在阻抗复数平面上分析各类阻抗继电器在各种故障类型下的动作行为三方面的内容。② 用电压相量图法分析各类阻抗继电器的动作行为。包括电压相量图法的作图方法；用电压相量图法分析在短路和短路伴随振荡的运行状态下各类阻抗继电器的动作行为；用电压相量图法分析线路两相运行和两相运行伴随振荡时各类阻抗继电器的动作行为三方面的内容。

与同类型的书籍相比本书有如下一些不同的特点：① 同类的书籍往往只分析传统的方向阻抗继电器（姆欧继电器）的动作行为，本书还分析了目前在电力系统中广泛采用的几种阻抗继电器：以正序电压为极化电压的阻抗继电器、工频变化量阻抗继电器和电抗继电器的动作行为。② 同类的书籍往往只分析故障相（或故障相间）的阻抗继电器的动作行为，本书还分析了非故障相（或非故障相间）的阻抗继电器的动作行为。③ 本书详细介绍了用电压相量图分析阻抗继电器动作行为的方法。电压相量图的分析方法是已故的王梅义老先生提出的，本书的这部分内容是在学习了王老先生分析方法的基础上写成的。与王梅义先生编著的《电网继电保护应用》中相关的内容相比，本书除了对电压相量图的方法作

了很多诠释可以更好地帮助读者应用理解以外，还用电压相量图对以正序电压为极化电压的阻抗继电器、工频变化量阻抗继电器、电抗继电器的动作行为作了更加全面、详细的分析。

为了便于读者学习，书中论述的分析方法都比较详细并配以大量的分析实例。叙述中也注意到了前后连贯呼应。尽量考虑到使读者通过自学能够掌握这些分析方法。

本书是作者在总结了多年来电力系统继电保护领域的科研和教学成果经验的基础上写作而成的。作者此前编著并出版了《超高压电网继电保护专题分析》（1990年）和《电力系统基础——电气二次人员入门必读》（2012年）两本著作，并作为主编之一负责《国家电网公司继电保护培训教材》（2009年）的全书统稿工作同时撰写第三章“输电线路保护及重合闸”。包括本书在内的四本著作可以说倾注了作者毕生的心血，凝聚了作者对电力系统继电保护的认知和理解，以及对继电保护事业的热爱和执着。

作者在华北电力大学工作了37年，在学校工作期间培养了大量的学生。退休后又在南瑞继保电气有限公司工作了10年，给电力系统中从事继电保护的同行们做了很多培训作，又有了大量学生。谨以上述四本著作献给从事电力系统继电保护工作的同行和我的学生们。我非常地想念你们，也深切地感谢你们！

同时，在此特别向本书中所引用到的工频变化量阻抗继电器的原创者沈国荣院士和提出用电压相量图分析阻抗继电器动作行为的王梅义先生致以最诚挚的敬意和感谢！

由于作者水平有限，书中定有许多错误和不当之处，敬请读者指正、赐教。

高中德

2013年6月

目 录

前言

第一章 阻抗继电器的动作方程及其在阻抗复数平面上的动作特性	1
第一节 以正序电压为极化电压的阻抗继电器的动作方程及其动作特性	1
一、以正序电压为极化电压的相间阻抗继电器的动作特性分析和性能评述	3
二、以正序电压为极化电压的接地阻抗继电器的动作特性分析和性能评述	6
三、极化电压带记忆以后，阻抗继电器的暂态动作特性	10
第二节 工频变化量阻抗继电器的动作方程及其动作特性	13
一、重叠原理的应用	13
二、工作原理与动作方程	15
三、正方向短路的动作特性分析及性能评述	18
四、反方向短路的动作特性分析及性能评述	21
第三节 电抗型继电器的动作方程及其动作特性	23
一、零序电抗继电器的动作特性分析及其性能评述	24
二、相间电抗继电器的动作特性分析及其性能评述	27
第二章 发生短路故障时在阻抗复数平面上分析阻抗继电器的动作行为	29
第一节 相间阻抗继电器和接地阻抗继电器的测量阻抗在阻抗复数平面上的位置	30
一、阻抗继电器测量阻抗的基本概念	30
二、相间阻抗继电器和接地阻抗继电器在短路故障时测量阻抗的表达式及其 在阻抗复数平面上的位置	34
第二节 以正序电压为极化电压的阻抗继电器在短路故障时的动作行为分析	60
一、以正序电压为极化电压的相间阻抗继电器的动作行为分析	60
二、以正序电压为极化电压的接地阻抗继电器的动作行为分析	79
第三节 工频变化量阻抗继电器在短路故障时的动作行为分析	98
一、六种接线方式的工频变化量阻抗继电器的动作特性	98
二、发生各种短路故障时，工频变化量相间阻抗继电器的动作行为分析	103
三、发生各种短路故障时，工频变化量接地阻抗继电器的动作行为分析	109
第四节 电抗型继电器在短路故障时的动作行为分析	114
一、发生单相接地短路故障时，零序电抗继电器的动作行为分析	115
二、发生相间短路故障时，相间电抗继电器的动作行为分析	120

第三章 用电压相量图法分析在短路和短路同时伴随振荡运行状态下阻抗继电器的动作行为	124
第一节 电压相量图法介绍及其作图方法	125
一、根据给定的系统运行方式,画出故障前三相电压的电压全图	125
二、根据给定的短路点和故障类型求出短路点在故障后的各相电压和各相间电压相量的终端位置	126
三、由电源电压和短路点在短路后电压相对的相量关系,求得继电器安装处的各相电压和各相间电压相量的终端位置	129
四、求出保护安装处短路后正序电压相量的终端位置,并画出阻抗继电器工作电压的动作区	131
五、求出阻抗继电器短路后的各相或各相间的工作电压相量的终端位置	134
六、根据阻抗继电器工作电压相量的终端位置和工作电压的动作区,分析继电器的动作行为	135
第二节 以正序电压为极化电压的阻抗继电器在短路和短路伴随振荡运行状态下的动作行为分析	135
一、三相短路以及三相短路同时伴随振荡情况下,以正序电压为极化电压的阻抗继电器动作行为分析	135
二、单相接地短路以及单相接地短路同时伴随振荡情况下,以正序电压为极化电压的阻抗继电器动作行为分析	148
三、两相短路以及两相短路同时伴随振荡情况下,以正序电压为极化电压的阻抗继电器动作行为分析	176
第三节 工频变化量阻抗继电器在短路和振荡过程中发生短路时的动作行为分析	210
一、三相短路及振荡过程中发生三相短路时,工频变化量阻抗继电器的动作行为分析	212
二、单相接地短路及振荡过程中发生单相接地短路时,工频变化量阻抗继电器的动作行为分析	223
三、两相短路及振荡过程中发生两相短路时,工频变化量阻抗继电器的动作行为分析	236
第四节 电抗型继电器在短路和短路伴随振荡运行状态下的动作行为分析	252
一、单相接地短路以及单相接地短路同时伴随振荡情况下,零序电抗继电器的动作行为分析	252
二、三相短路、两相短路以及同时伴随振荡情况下,相间电抗继电器的动作行为分析	263
第四章 用电压相量图法分析输电线路两相运行和两相运行同时伴随振荡运行状态下阻抗继电器的动作行为	285
第一节 以正序电压为极化电压的阻抗继电器在输电线路两相运行和两相运行同时伴随振荡时的动作行为分析	285
一、两相运行和两相运行同时伴随振荡情况下,用电压相量图法分析以	

正序电压为极化电压的阻抗继电器动作行为的基本方法	285
二、两相运行和两相运行同时伴随振荡情况下, 以正序电压为极化电压的 接地阻抗继电器的动作行为分析	295
三、两相运行和两相运行同时伴随振荡情况下, 以正序电压为极化电压的 相间阻抗继电器的动作行为分析	299
第二节 工频变化量阻抗继电器在输电线路两相运行和在振荡状态下发生 两相运行时的动作行为分析	310
一、输电线路两相运行以及在振荡状态下发生两相运行时, 工频变化量接地 阻抗继电器的动作行为分析	311
二、输电线路两相运行以及在振荡状态下发生两相运行时, 工频变化量相间 阻抗继电器的动作行为分析	316
第三节 电抗型继电器在输电线路两相运行和两相运行同时伴随振荡时的 动作行为分析	321
一、输电线路两相运行和两相运行同时伴随振荡时, 零序电抗继电器的 动作行为分析	321
二、输电线路两相运行和两相运行同时伴随振荡时, 相间电抗继电器的 动作行为分析	326
参考文献	332

第一章

阻抗继电器的动作方程及其在阻抗复数平面上的动作特性

第一节 以正序电压为极化电压的阻抗继电器的动作方程及其动作特性

阻抗复数平面上的动作特性经过坐标原点的继电器并不是一个理想的继电器，问题出在出口短路上。以方向阻抗继电器为例，其动作特性如图 1-1 所示，其阻抗形式的动作方程和电压形式的动作方程分别如式 (1-1)、式 (1-2) 所示。

$$90^\circ \leq \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m} \leq 270^\circ \quad (1-1)$$

$$90^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_m - \dot{I}_m Z_{set}}{\dot{U}_m} \leq 270^\circ \quad (1-2)$$

式中： Z_m 为阻抗继电器的测量阻抗； Z_{set} 为阻抗继电器的整定阻抗； $\dot{U}_m$ 、 $\dot{I}_m$ 为阻抗继电器的测量电压和测量电流，电压、电流的相别取决于该继电器的接线方式。

以金属性短路为例，无论是正方向出口还是反方向出口的金属性短路，接于故障相（或故障相间）上的阻抗继电器的测量阻抗是零。测量阻抗位于动作特性圆的圆周上，故继电器处在动作边界。究其原因是因为动作方程式 (1-2) 中的极化电压 $\dot{U}_m$ 为零。比较相位的两个电气量，如果有一个电气量为零，相位比较是不准确的。如果极化电压 $\dot{U}_m$ 中有一些杂散电压，其相位还是不确定的，继电器可能不正确动作。也就是说此时继电器有可能能够满足式 (1-2) 而动作，也有可能不能满足式 (1-2) 而不动作，继电器处于动作边界。于是正方向出口短路时，继电器有可能拒动——出口短路有死区；反方向出口短路时，继电器可能会误动。

为解决出口短路的问题，就应该在出口短路时设法让极化电压不为零并且还能够进行正确的比相。在我国曾经使用过的方法主要有：① 对极化电压进行记忆。在模拟型保护时代，利用 R、L、C 振荡电路使出口短路时极化电压不会立即变为零而呈振荡衰减波形，而其相位维持短路前的相位。在微机保护时代，利用电脑的记忆功能，使用 1~3 个周波以前的电压作为极化电压。这样在短路的初始阶段，极化电压就是短路前的电压，电压不会为零。该方法目前是被广泛采用的，它可以保证相位比较动作方程能够正确工作，使正、反方向出口短路时阻抗继电器能够正确动作，此时其对应的动作特性是暂态动作特性。这种方法将在下面再论述。② 用正序

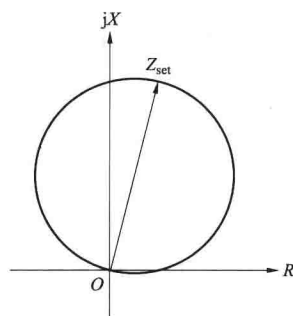


图 1-1 方向阻抗继电器的动作特性

电压 U_{1m} 作为极化电压。该方法在不对称的出口短路情况下可保证阻抗继电器的正确动作。这些下面还要详细分析。③ 利用健全相电压作为极化电压。由于不对称短路时非故障相电压不会为零，所以可以进行正确的比相。这种方法在模拟型保护中曾广泛使用过，目前在微机保护中没有被采用。

目前微机线路保护中使用比较多的方法是采用正序电压作为极化电压。利用这种阻抗继电器来构成三段式的相间和接地距离保护，以及作为纵联距离保护中的阻抗元件。用正序电压作为极化电压是基于这样的考虑：正序电压在系统中的分布是电源处最高，短路点处最低。但只要发生的是不对称短路，即使是短路点，其正序电压也是比较高的。例如发生 A 相金属性短路接地，短路点的 A 相电压为零，但是短路点 A 相的正序电压不为零，而且其值还很大。因此在发生不对称短路时，无论短路点的远近，保护安装处的正序电压都很高，并且还能够正确进行比相。所以用正序电压作为极化电压时在出口（无论是正方向还是反方向）发生不对称短路时继电器的动作行为依然是正确的。但是在出口发生三相金属性短路时，由于保护安装处（也是短路点）的正序电压依然是零，所以在出口发生三相短路时该继电器还是处在动作边界，继电器仍然可能不正确动作。这时可以采用的方法是，如果发现正序电压比较低时（出口三相短路时），再利用 1~3 个周波以前的正序电压作为极化电压，对极化电压进行“记忆”。

下面分析以正序电压为极化电压的相间和接地阻抗继电器的动作特性，和以正序电压的记忆值作为极化电压的阻抗继电器的暂态动作特性。分析时用的正方向和反方向短路的系统图如图 1-2 的 (a) 图和 (b) 图所示。图中加在阻抗继电器上的测量电压 $\dot{U}_m$ 和测量电流 $\dot{I}_m$ 直接理解成阻抗继电器接线方式中所规定的电压、电流。对相间阻抗继电器来说， $\dot{U}_m = \dot{U}_{\phi\phi}$ 、 $\dot{I}_m = \dot{I}_{\phi\phi}$ ， $\phi\phi$ 为 AB、BC、CA。对接地阻抗继电器来说， $\dot{U}_m = \dot{U}_\phi$ 、 $\dot{I}_m = \dot{I}_\phi + K3\dot{I}_0$ ， K 为零序电流补偿系数， $\dot{I}_0$ 为零序电流， ϕ 为 A、B、C。 $\dot{U}_m$ 和 $\dot{I}_m$ 的正方向按传统规定的正方向。电压是母线电位为正，中性点电位为负。图中电压画的是电位降的方向。电流以母线流向被保护线路的方向为正方向。流过过渡电阻里的电流 $\dot{I}_F$ 以与流过保护的电流 $\dot{I}_m$ 的正方向一致来定义它的正方向。所以在正方向短路时， $\dot{I}_F$ 电流以从上向下的方向作为正方向。在反方向短路时 $\dot{I}_F$ 电流以从下向上方向作为正方向。正方向短路时，从保护安装处 M 母线到过渡电阻 R_g 的下面 K 点的阻抗是该阻抗

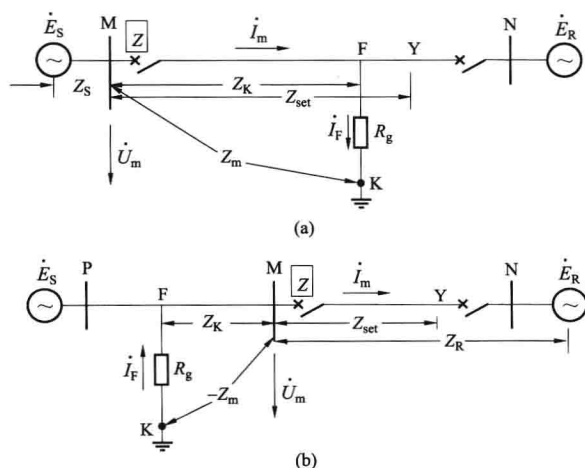


图 1-2 正方向、反方向短路的系统图

(a) 正方向短路系统图；(b) 反方向短路系统图

继电器的测量阻抗 Z_m , $Z_m = Z_K + Z_a = Z_K + \frac{\dot{I}_F}{\dot{I}_m} R_g$, Z_K 为保护安装处 M 母线到短路点 F 的输电线路阻抗, Z_a 为过渡电阻产生的附加阻抗^[1]。反方向短路时, 从保护安装处 M 母线到过渡电阻 R_g 的下面 K 点的阻抗是该阻抗继电器的测量阻抗的负值 $-Z_m$, $Z_m = -Z_K - Z_a = -Z_K - \frac{\dot{I}_F}{\dot{I}_m} R_g$ ^[1]。

一、以正序电压为极化电压的相间阻抗继电器的动作特性分析和性能评述

相间阻抗继电器用来保护各种相间短路, 它的工作电压、极化电压以及动作方程分别为:
工作电压

$$\dot{U}_{OP\phi\phi} = \dot{U}_{\phi\phi} - \dot{I}_{\phi\phi} Z_{set} \quad (1-3)$$

极化电压

$$\dot{U}_{P\phi\phi} = \dot{U}_{1\phi\phi} \quad (1-4)$$

动作方程

$$90^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_{OP\phi\phi}}{\dot{U}_{P\phi\phi}} \leq 270^\circ \quad (1-5)$$

上列各式中, $\phi\phi$ 表示 AB、BC、CA, 下标 1 表示正序。

(一) 正方向短路时的动作特性分析及性能评述

1. 正方向两相短路

以 BC 两相短路为例分析 BC 相间阻抗继电器的动作特性。假设短路前空载, 下面各式中的电流都是故障分量电流。用正方向短路系统图图 1-2 (a) 里的参数来表达工作电压和极化电压分别为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{OPBC} &= \dot{U}_{BC} - (\dot{I}_B - \dot{I}_C) Z_{set} = (\dot{I}_B - \dot{I}_C) Z_m - (\dot{I}_B - \dot{I}_C) Z_{set} = (\dot{I}_B - \dot{I}_C) (Z_m - Z_{set}) \\ &= 2\dot{I}_B (Z_m - Z_{set}) \end{aligned} \quad (1-6)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{PBC} &= \dot{U}_{1BC} = (\dot{E}_{SB} - \dot{E}_{SC}) - (\dot{I}_{1B} - \dot{I}_{1C}) Z_S = (\dot{I}_B - \dot{I}_C) (Z_S + Z_m) - (\dot{I}_{1B} - \dot{I}_{1C}) Z_S \\ &= 2\dot{I}_B (Z_S + Z_m) - \dot{I}_B Z_S = 2\dot{I}_B \left(Z_m + \frac{1}{2} Z_S \right) \end{aligned} \quad (1-7)$$

上面推导中用到了短路前空载情况下发生 BC 两相短路时的一些基本关系式: $\dot{I}_B = -\dot{I}_C$; $\dot{I}_{1B} - \dot{I}_{1C} = \dot{I}_B$ 。将式 (1-6) 和式 (1-7) 两式代入动作方程 (1-5), 并消去分子分母中的 $2\dot{I}_B$ 得:

$$90^\circ \leq \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m + \frac{1}{2} Z_S} \leq 270^\circ \quad (1-8)$$

式中的 Z_S 为保护背后电源的等值正序阻抗。

式 (1-8) 动作方程对应的动作特性是以 $(+Z_{set})$ 和 $(-Z_S/2)$ 两点的连线为直径的圆, 如图 1-3 中的圆①所示。该圆向第Ⅲ象限带有偏移。

从正方向两相短路的动作特性可对该继电器的动作性能作如下评述:

(1) 由于坐标原点位于动作特性之内, 所以正方向

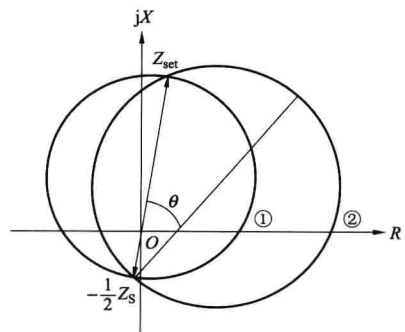


图 1-3 以正序电压为极化电压的两个故障相上的相间阻抗继电器在正方向两相短路时的动作特性

出口两相短路时保护没有死区，不必再采取其他措施。其物理概念也很明确，当正向出口两相金属性短路时，加入继电器的故障相间电压虽为零，但是作为如式（1-7）所示的故障相间电压中的正序极化电压并不为零（式中 $Z_m = 0$ ）。且该极化电压的相位与短路前的故障相间电压同相，也与式（1-6）表达的工作电压相位相反（式中 $Z_m = 0$ ），因此能满足式（1-5）的动作方程使继电器可靠动作。

（2）与传统的以 Z_{set} 为直径，动作特性经过坐标原点的方向阻抗继电器相比，由于在 R 方向有较多的保护范围，所以该继电器保护过渡电阻的能力比传统的方向阻抗继电器强。而且现在的动作特性的下面一点是 $(-Z_s/2)$ ， Z_s 是保护背后电源的等值阻抗。所以随着运行方式的变化，动作特性的下面一点是变化的。当保护背后电源运行方式越小（ Z_s 越大），保护安装侧的电流分配系数 $C = \dot{I}_m / \dot{I}_F$ 越小。因而同样的过渡电阻 R_g ，产生的过渡电阻附加阻抗 Z_a 越大，区内短路时继电器越易拒动，其中 $Z_a = (\dot{I}_F / \dot{I}_m) R_g$ 。但由于动作特性的下面一点随 Z_s 加大而往下移，因而圆也越大，保护过渡电阻的能力又得到增强，所以有一定的自适应能力。

但是以正序电压为极化电压的阻抗继电器保护过渡电阻的能力还比不上工频变化量的阻抗继电器。为了进一步提高其保护过渡电阻的能力，可将正序电压相量向越前方向旋转 θ 角（通常使用中 θ 角度有 0° 、 15° 、 30° 三种）作为极化电压。即极化电压为：

$$\dot{U}_{P\phi\phi} = \dot{U}_{1\phi\phi} e^{j\theta} \quad (1-9)$$

这样动作方程式（1-5）成为：

$$90^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_{OP\phi\phi}}{\dot{U}_{1\phi\phi} e^{j\theta}} \leq 270^\circ \quad (1-10)$$

亦即：

$$90^\circ + \theta \leq \arg \frac{\dot{U}_{OP\phi\phi}}{\dot{U}_{1\phi\phi}} \leq 270^\circ + \theta \quad (1-11)$$

将式（1-6）、式（1-7）两式中的 $\dot{U}_{OPBC}$ 和 $\dot{U}_{1BC}$ 的表达式代入上式并消去分子分母中的电流 $2\dot{I}_B$ ，得到的动作方程是：

$$90^\circ + \theta \leq \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m + \frac{1}{2}Z_s} \leq 270^\circ + \theta \quad (1-12)$$

该动作方程对应的动作特性是以 $(+Z_{set})$ 和 $(-Z_s/2)$ 两点的连线为弦的圆。当 $\theta > 0^\circ$ 时，该圆向 $+R$ 方向偏移，如图 1-3 中的圆②所示。该动作特性由于在 R 方向上有更多的保护范围，所以保护过渡电阻的能力提高了。当将该阻抗继电器运用在短线路上时，由于整定值较小，圆比较小，保护过渡电阻的能力比较弱，为了增强保护过渡电阻的能力， θ 角可取大一些。而当该阻抗继电器运用在长线路上时，由于整定值较大，圆也比较大，已经有较强的保护过渡电阻的能力了，所以 θ 角可取小一些，或取零度。这种提高以正序电压为极化电压的阻抗继电器的保护过渡电阻能力的方法在目前的微机线路保护中得到了广泛的应用。

需要指出，正向两相短路时的动作特性虽然在第Ⅲ象限有保护范围，但并不意味着在反方向两相短路时该继电器要误动。因为式（1-8）和式（1-12）的动作方程是用图 1-2（a）的正方向短路系统图里的参数推导出来的。所以该动作特性只能用来分析正方向两相短路时的动作性能。

2. 正方向三相短路

三相短路由于三相对称，三个相间阻抗继电器的动作行为是一样的。下面用正方向短路系统图图 1-2 (a) 里的参数来表达工作电压和极化电压：

$$\dot{U}_{OP\phi\phi} = \dot{U}_{\phi\phi} - \dot{I}_{\phi\phi} Z_{set} = \dot{I}_{\phi\phi} Z_m - \dot{I}_{\phi\phi} Z_{set} = \dot{I}_{\phi\phi} (Z_m - Z_{set}) \quad (1-13)$$

三相短路时只有正序分量，所以保护安装处的电压就是其正序电压。所以极化电压为：

$$\dot{U}_{P\phi\phi} = \dot{U}_{1\phi\phi} = \dot{U}_{\phi\phi} = \dot{I}_{\phi\phi} Z_m \quad (1-14)$$

将式 (1-13) 和式 (1-14) 两式代入动作方程式 (1-5)，并消去分子分母中的 $\dot{I}_{\phi\phi}$ 得：

$$90^\circ \leq \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m} \leq 270^\circ \quad (1-15)$$

该动作方程对应的动作特性是以 $(+Z_{set})$ 和坐标原点 (O) 两点连线为直径的圆，如图 1-4 所示。由于动作特性经过坐标原点，所以在正向出口三相短路有死区，近处三相短路有可能拒动。其物理概念也很明确，当正向出口三相金属性短路时，加入继电器的正序电压仍然为零，继电器无法正确比相，所以继电器有可能拒动。对于安装在送电端的阻抗继电器，在正方向出口发生经过渡电阻的三相短路时，由于过渡电阻的附加阻抗是阻容性的，使测量阻抗位于第 IV 象限，继电器更有可能拒动，因而应采取措施消除出口短路的死区。

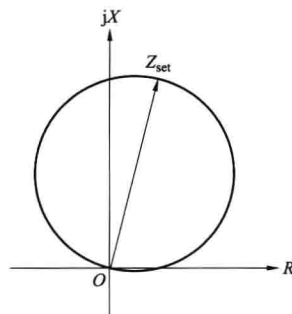


图 1-4 正方向、反方向三相短路时以正序电压为极化电压的相间阻抗继电器和接地阻抗继电器的动作特性

附带指出，由上述推导得到的如图 1-4 所示的正方向三相短路时以正序电压为极化电压的相间阻抗继电器的动作特性并没有特指一定需要短路前是空载状态。也就是无论短路前的送电角是多大，正方向三相短路时的动作特性都是如图 1-4 所示的圆。

(二) 反方向短路动作特性分析及其性能评述

1. 反方向两相短路

以 BC 两相短路为例，分析 BC 相间阻抗继电器的动作特性。假设短路前空载，下面各式中的电流都是故障分量电流。用反方向短路系统图图 1-2 (b) 里的参数来表达工作电压和极化电压分别为：

$$\begin{aligned} \dot{U}_{OPBC} &= \dot{U}_{BC} - (\dot{I}_B - \dot{I}_C) Z_{set} = -(\dot{I}_B - \dot{I}_C)(-Z_m) - (\dot{I}_B - \dot{I}_C) Z_{set} \\ &= (\dot{I}_B - \dot{I}_C)(Z_m - Z_{set}) = 2\dot{I}_B(Z_m - Z_{set}) \end{aligned} \quad (1-16)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{PBC} &= \dot{U}_{1BC} = (\dot{E}_{RB} - \dot{E}_{RC}) + (\dot{I}_{1B} - \dot{I}_{1C}) Z_R = -(\dot{I}_B - \dot{I}_C)(Z_R - Z_m) + (\dot{I}_{1B} - \dot{I}_{1C}) Z_R \\ &= 2\dot{I}_B(Z_m - Z_R) + \dot{I}_B Z_R = 2\dot{I}_B(Z_m - \frac{1}{2}Z_R) \end{aligned} \quad (1-17)$$

上面推导中也用到了短路前空载状态下发生 BC 两相短路时的一些基本关系式 $\dot{I}_B = -\dot{I}_C$ ； $\dot{I}_{1B} - \dot{I}_{1C} = \dot{I}_B$ 。将式 (1-16) 和式 (1-17) 两式代入动作方程式 (1-5)，并消去分子分母中的 $2\dot{I}_B$ 得：

$$90^\circ \leq \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m - \frac{1}{2}Z_R} \leq 270^\circ \quad (1-18)$$

式中 Z_R 是保护正方向的等值正序阻抗。

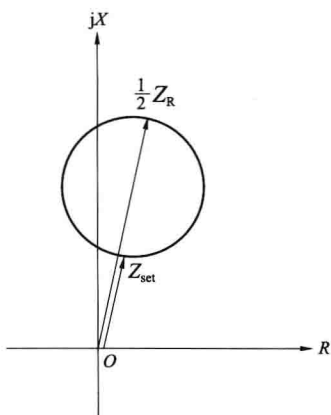


图 1-5 以正序电压为极化电压的两个故障相上的相间阻抗继电器在反方向两相短路时的动作特性

式 (1-18) 的动作方程对应的动作特性是以 $(+Z_{set})$ 和 $+(Z_R/2)$ 两点的连线为直径的圆, 如图 1-5 所示。该圆向第 I 象限上抛, 远离了坐标原点。

当反方向发生两相短路时, 继电器的测量阻抗落在第 III 象限。即使在反方向出口或母线上发生两相短路, 如果过渡电阻的附加阻抗是阻容性的, 则测量阻抗进入第 II 象限也进入不了圆内, 继电器不会误动。所以在反方向两相短路时, 该继电器有良好的方向性。

同样需要指出, 由于式 (1-18) 的动作方程是用图 1-2 (b) 反方向短路系统图里的参数推导出来的, 所以图 1-5 的动作特性只能用于分析反方向两相短路时继电器的动作行为, 不能分析正方向两相短路时继电器的动作行为。

2. 反方向三相短路

三相短路时三相对称的, 三个相间阻抗继电器的动作行为是一样的。下面用反方向短路系统图图 1-2 (b) 里的参数来表达工作电压和极化电压。工作电压为:

$$\dot{U}_{OP\phi\phi} = \dot{U}_{\phi\phi} - \dot{I}_{\phi\phi} Z_{set} = -\dot{I}_{\phi\phi} (-Z_m) - \dot{I}_{\phi\phi} Z_{set} = \dot{I}_{\phi\phi} (Z_m - Z_{set}) \quad (1-19)$$

三相短路时只有正序分量, 所以保护安装处的电压就是正序电压, 因此极化电压为:

$$\dot{U}_{P\phi\phi} = \dot{U}_{1\phi\phi} = \dot{U}_{\phi\phi} = -\dot{I}_{\phi\phi} (-Z_m) = \dot{I}_{\phi\phi} Z_m \quad (1-20)$$

将式 (1-19) 和式 (1-20) 两式代入动作方程式 (1-5), 并消去分子分母中的 $\dot{I}_{\phi\phi}$ 得:

$$90^\circ \leq \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m} \leq 270^\circ \quad (1-21)$$

该动作方程对应的动作特性是以 $(+Z_{set})$ 和坐标原点 (O) 两点连线为直径的圆。该特性与正方向三相短路时的动作特性一样, 如图 1-4 所示。在反方向出口或母线上发生三相短路时, 继电器处于动作边界, 继电器可能会误动。尤其是安装在受端端的阻抗继电器在反向出口或母线上发生三相经比较小的过渡电阻短路时, 由于过渡电阻的附加阻抗是阻容性的, 继电器的测量阻抗位于第 II 象限, 继电器更可能会误动, 所以应采取措施防止这种误动^[1]。

在这里也需要附带指出, 由上述推导得到的如图 1-4 所示的反方向三相短路时以正序电压为极化电压的相间阻抗继电器的动作特性并没有特指一定需要短路前是空载状态。也就是无论短路前的送电角是多大, 反方向三相短路时的动作特性都是如图 1-4 所示的圆。

二、以正序电压为极化电压的接地阻抗继电器的动作特性分析和性能评述

接地阻抗继电器用来保护各种接地短路, 它的工作电压、极化电压以及动作方程分别为:

工作电压

$$\dot{U}_{OP\phi} = \dot{U}_{\phi} - (\dot{I}_{\phi} + K3\dot{I}_0) Z_{set} \quad (1-22)$$

极化电压

$$\dot{U}_{P\phi} = \dot{U}_{1\phi} \quad (1-23)$$

动作方程

$$90^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_{OP\phi}}{\dot{U}_{P\phi}} \leq 270^\circ \quad (1-24)$$

上列各式中 ϕ 表示 A、B、C，下标 1 表示正序。

(一) 正方向短路动作特性分析及性能评述

1. 正方向单相接地短路

以 A 相接地短路为例，分析 A 相接地阻抗继电器的动作特性。假设短路前空载，下面各式中的电流都是故障分量电流。用正方向短路系统图图 1-2 (a) 里的参数来表达工作电压和极化电压分别为：

$$\dot{U}_{OPA} = \dot{U}_A - (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)Z_{set} = (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)Z_m - (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)Z_{set} = (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)(Z_m - Z_{set}) \quad (1-25)$$

$$\dot{U}_{PA} = \dot{U}_{1A} = \dot{E}_{SA} - \dot{I}_{1A}Z_S = (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)(Z_S + Z_m) - \dot{I}_{1A}Z_S = (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)(Z_m + k'Z_S) \quad (1-26)$$

式中 $k' = 1 - \frac{\dot{I}_{1A}}{\dot{I}_A + K3\dot{I}_0}$ 。在短路前空载情况下发生单相接地短路时流过保护的 A 相电流是 $\dot{I}_{FA} =$

$$C_1\dot{I}_{FA1} + C_2\dot{I}_{FA2} + C_0\dot{I}_{FA0} = (C_0 + 2C_1)\dot{I}_{FA1}。因此：$$

$$k' = 1 - \frac{\dot{I}_{1A}}{\dot{I}_A + K3\dot{I}_0} = 1 - \frac{C_1\dot{I}_{FA1}}{C_1\dot{I}_{FA1} + C_2\dot{I}_{FA2} + C_0\dot{I}_{FA0} + K3C_0\dot{I}_{FA0}} = \frac{(1+3K)C_0 + C_1}{(1+3K)C_0 + 2C_1} \quad (1-27)$$

C_1 、 C_2 、 C_0 是正、负、零序电流分配系数。将式 (1-25) 和式 (1-26) 两式代入动作方程式 (1-24)，并消去分子分母中的 $(\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)$ 得：

$$90^\circ \leq \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m + k'Z_S} \leq 270^\circ \quad (1-28)$$

动作方程式 (1-28) 对应的动作特性是以 $(+Z_{set})$ 和 $(-k'Z_S)$ 两点的连线为直径的圆，如图 1-6 中的圆 ① 所示。该圆向第三象限带有偏移。

下面对如式 (1-27) 所表达的系数 k' 值作一些讨论。作为一种近似的考虑，如果流过保护安装侧的正、负、零序电流分配系数都相等时，此时：

$$k' = \frac{2+3K}{3+3K} \quad (1-29)$$

输电线路零序阻抗和正序阻抗的关系取决于输电线路是单回线还是双回线，有无架空地线以及架空地线材料的性质。单回输电线路大约 $Z_0 = (2 \sim 3.5)Z_1$ ，一般 $Z_0 \leq 3Z_1$ 。双回线路由于线间互感的影响， Z_0 比较大，大约 $Z_0 = (3 \sim 5.5)Z_1$ 。总的讲， Z_0 的范围是 $Z_0 = (2 \sim 5.5)Z_1$ 。

这样零序电流补偿系数的变化范围是 $K = \frac{(Z_0 - Z_1)}{3Z_1} = (0.33 \sim 1.5)$ ，因而 k' 的变化范围是 $k' = (0.75 \sim 0.87)$ 。

从正方向单相接地短路时的动作特性可对该继电器的动作性能作如下评述：

(1) 由于坐标原点位于动作特性之内，所以正方向出口单相接地短路没有死区，不必采取其他措施。其物理概念也很明确，当正向出口单相金属性短路时，加入继电器的故障相电压虽为零，但是作为如式 (1-26) 所示的故障相电压中的正序极化电压并不为零（式中 $Z_m = 0$ ）。

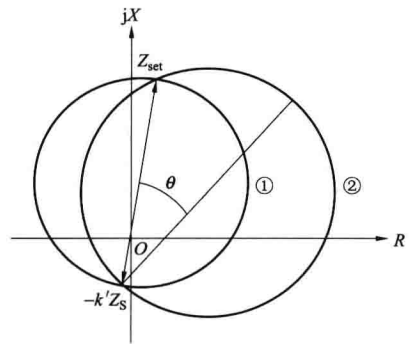


图 1-6 以正序电压为极化电压的故障相接地阻抗继电器在正方向单相接地短路时的动作特性

且该极化电压的相位与短路前的故障相电压同相，也与式（1-25）表达的工作电压相位相反（式中 $Z_m = 0$ ），因此能满足式（1-24）的动作方程使继电器可靠动作。

（2）与传统的以 Z_{set} 为直径，动作特性经过坐标原点的方向阻抗继电器相比，由于在 R 方向有更多的保护范围，所以保护过渡电阻的能力比传统的方向阻抗继电器强。而且现在的动作特性的下面一点是 $(-k'Z_s)$ ， Z_s 是保护背后电源的等值阻抗。所以随着运行方式的变化，动作特性的下面一点是变化的。当保护背后电源运行方式越小（ Z_s 越大）时，保护安装侧的电流分配系数 $C = \dot{I}_m / \dot{I}_F$ 越小。因而相同的过渡电阻，产生的过渡电阻附加阻抗 Z_a 越大，区内短路时继电器越易拒动。但由于动作特性的下面一点随 Z_s 加大而往下移，因而圆也越大，保护过渡电阻的能力又得到增强，所以有一定的自适应能力。

为了进一步提高其保护过渡电阻的能力，可将正序电压相量向越前方向旋转 θ 角（ $\theta > 0^\circ$ ）作为极化电压。即极化电压为：

$$\dot{U}_{P\phi} = \dot{U}_{1\phi} e^{j\theta} \quad (1-30)$$

这样动作方程式（1-24）成为：

$$90^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_{OP\phi}}{\dot{U}_{1\phi} e^{j\theta}} \leq 270^\circ \quad (1-31)$$

亦即：

$$90^\circ + \theta \leq \arg \frac{\dot{U}_{OP\phi}}{\dot{U}_{1\phi}} \leq 270^\circ + \theta \quad (1-32)$$

将式（1-25）中的 $\dot{U}_{OP\phi}$ 的表达式与式（1-26）中的 $\dot{U}_{1\phi}$ 的表达式代入式（1-32）并消去分子分母中的电流（ $\dot{I}_A + K3\dot{I}_0$ ），得到的动作方程为：

$$90^\circ + \theta \leq \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m + k'Z_s} \leq 270^\circ + \theta \quad (1-33)$$

该动作方程对应的动作特性是以 $(+Z_{set})$ 和 $(-k'Z_s)$ 两点的连线为弦的圆。当 $\theta > 0^\circ$ 时，该圆向 $+R$ 方向偏移，如图 1-6 中的圆②所示。该动作特性由于在 R 方向上有更多的保护范围，所以保护过渡电阻的能力提高了。当将该阻抗继电器运用在短线路上时，由于整定值较小，圆比较小。为了增强保护过渡电阻的能力， θ 角可取大一些。而当该阻抗继电器运用在长线路上时，由于整定值较大，圆也比较大，已经有了较强的保护过渡电阻的能力，所以 θ 角可取小一些，或取零度。接地短路时的过渡电阻比相间短路时的过渡电阻大得多，相间短路的过渡电阻只是电弧电阻。但如果是输电线路对杆塔放电造成的接地短路，其过渡电阻还包括杆塔与大地的接地电阻，所以过渡电阻对接地阻抗继电器的影响比对相间阻抗继电器的影响大得多。因此，将动作特性向 $+R$ 方向偏移来提高保护过渡电阻能力的方法是行之有效的。这种方法目前在微机线路保护中得到了广泛的应用。

需要指出，正向单相接地短路时的动作特性虽然在第Ⅲ象限有保护范围，但并不意味在反方向单相短路时该继电器要误动。因为前面在推导式（1-28）的动作方程时用的是图 1-2（a）的正方向短路系统图里的参数。所以该动作特性只能用来分析正方向单相接地短路时的动作性能。

2. 正方向三相短路

无论是三相接地短路还是三相不接地的短路，接地阻抗继电器对这些短路故障都有保护功能。三相短路时由于三相对称，三个接地阻抗继电器的动作行为是一样的。下面用正方向短路

系统图图 1-2 (a) 里的参数来表达它的工作电压和极化电压。工作电压为：

$$\dot{U}_{OP\phi} = \dot{U}_{\phi} - (\dot{I}_{\phi} + K3\dot{I}_0)Z_{set} = \dot{I}_{\phi}Z_m - \dot{I}_{\phi}Z_{set} = \dot{I}_{\phi}(Z_m - Z_{set}) \quad (1-34)$$

三相短路时只有正序分量，所以保护安装处的电压就是正序电压。极化电压为：

$$\dot{U}_{P\phi} = \dot{U}_{1\phi} = \dot{U}_{\phi} = \dot{I}_{\phi}Z_m \quad (1-35)$$

将式 (1-34) 和式 (1-35) 两式代入动作方程式 (1-24)，并消去分子分母中的 $\dot{I}_{\phi}$ 得：

$$90^{\circ} \leq \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m} \leq 270^{\circ} \quad (1-36)$$

该动作方程对应的动作特性是以 $(+Z_{set})$ 和坐标原点 (O) 两点连线为直径的圆，如图 1-4 所示。由于动作特性经过坐标原点，所以正方向出口三相短路有死区，近处三相短路有可能拒动。尤其是安装在送电端的阻抗继电器，在正方向出口发生经过渡电阻的三相短路时，由于过渡电阻的附加阻抗是阻容性的，继电器的测量阻抗位于第 IV 象限，继电器更加可能拒动，因而应采取措施消除出口短路的死区。

附带指出，由上述推导得到的如图 1-4 所示的正方向三相短路时以正序电压为极化电压的接地阻抗继电器的动作特性并没有特指一定需要短路前是空载状态。也就是说，无论短路前的送电角是多大，正方向三相短路时的动作特性都是如图 1-4 所示的圆。

(二) 反方向短路动作特性分析及其性能评述

1. 反方向单相接地短路

以 A 相单相接地短路为例，分析 A 相接地阻抗继电器的动作特性。假设短路前空载，下面各式中的电流都是故障分量电流。用反方向短路系统图图 1-2 (b) 里的参数来表达工作电压和极化电压分别为：

$$\begin{aligned} \dot{U}_{OPA} &= \dot{U}_A - (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)Z_{set} = -(\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)(-Z_m) - (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)Z_{set} \\ &= (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)(Z_m - Z_{set}) \end{aligned} \quad (1-37)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{PA} &= \dot{U}_{1A} = \dot{E}_{RA} + \dot{I}_{1A}Z_R = -(\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)(Z_R - Z_m) + \dot{I}_{1A}Z_R \\ &= (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)(Z_m - Z_R) + \dot{I}_{1A}Z_R = (\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)(Z_m - k'Z_R) \end{aligned} \quad (1-38)$$

式中 k' 的表达式仍然如式 (1-27) 所示。作为一种近似的考虑，如果流过保护安装侧的正、负、零序电流分配系数都相等时，其值在 0.75 到 0.87 之间。 Z_R 是保护正方向的等值阻抗。

将式 (1-37) 和式 (1-38) 两式代入动作方程式 (1-24)，并消去分子分母中的 $(\dot{I}_A + K3\dot{I}_0)$ 得：

$$90^{\circ} \leq \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m - k'Z_R} \leq 270^{\circ} \quad (1-39)$$

动作方程式 (1-39) 对应的动作特性是以 $(+Z_{set})$ 和 $(+k'Z_R)$ 两点的连线为直径的圆，如图 1-7 所示。该圆向第 I 象限上抛，远离了坐标原点。当反方向发生单相接地短路时，继电器的测量阻抗落在第 III 象限。即使在反方向出口或母线发生经过渡电阻的短路，如果过渡电阻的附加阻抗是阻容性的话，则测量阻抗进入第 II 象限也进入

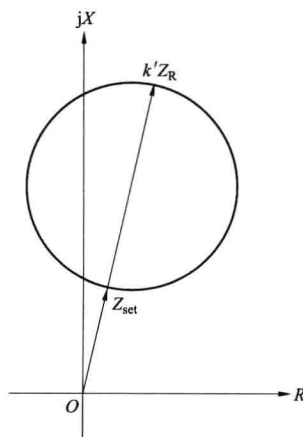


图 1-7 以正序电压为极化电压的故障相接地阻抗继电器在反方向单相接地短路时的动作特性