

高等学校教材

电力系统继电保护原理与运行分析

下 册

山东工业大学 王广延
华中理工大学 吕继绍 合编



前 言

本书是根据能源部“1991~1995年高等学校水利电力类专业教材编审出版规划”编写的，作为“继电保护与自动远动技术”和“电力系统及其自动化”等专业的教材。本书的编写大纲经全国电力工程类专业教学指导委员会继电保护组讨论通过，着重阐述电力系统继电保护的基本原理与运行特性，对保护装置的基本构成和继电保护技术领域内的新发展也作了必要的介绍。

本书分上、下两册。上册内容包括：第一章绪论，第二章互感器和对称分量滤过器，第三章保护继电器的基本工作原理，第四章电网的电流、电压保护，第五章电网的距离保护。下册内容包括：第六章线路差动保护，第七章高频保护基本概念及高频通道，第八章相差高频保护，第九章方向高频保护，第十章高频闭锁距离保护，第十一章方向行波保护，第十二章自动重合闸，第十三章电力变压器保护，第十四章发电机保护，第十五章母线保护。

本书上册由上海交通大学张志竟和东北电力学院黄玉铮合编，张志竟统稿，第一、三、四章由张志竟编写，第二、五章由黄玉铮编写。下册由山东工业大学王广延和华中理工大学吕继绍合编，王广延统稿，第六、七、九、十一章由王广延编写，第八、十章由张尔桦编写，第十二、十三、十五章由吕继绍编写，第十四章由吴希再编写。

本书上、下册分别由华北电力学院高中德教授和清华大学王维俭教授主审，在审阅过程中提出了许多宝贵的意见，编者在此对他们表示深切感谢。

本书在编写过程中得到许多高等学校和电力部门以及继电保护装置制造部门的积极支持，提供了有关的文献和技术资料，在此向他们也深表谢意。

限于编者水平，书中难免存在一些缺点和错误，希望广大读者给予指正。

编 者

1994年12月

目 录

前 言	
第六章 线路差动保护	1
第一节 差动保护的作用	1
第二节 导引线纵联差动保护	1
第三节 线路纵联差动保护的动作特性及其分析方法	8
第四节 高内阻导引线纵联差动保护及导引线监视	13
第五节 平行双回线路的横联保护	17
第七章 高频保护基本概念及高频通道	28
第一节 高频保护概述	28
第二节 高频保护通道的工作方式及高频信号的应用	29
第三节 高频保护的类型	31
第四节 高压输电线载波通道的构成	32
第五节 高频电流沿输电线的传播特性	40
第六节 高频保护的收、发信机	54
第七节 微波通道简介	60
第八章 相差高频保护	62
第一节 相差高频保护的工作原理	62
第二节 起动元件	65
第三节 操作电流	67
第四节 闭锁角的确定及比相元件	77
第五节 线路分布电容对相差高频保护的影响	83
第六节 非全相运行对相差高频保护的影响	87
第七节 调幅式相差高频保护装置及评价	94
第九章 方向高频保护	97
第一节 方向高频保护的工作原理	97
第二节 相敏接线负序方向元件	101
第三节 三相滤序器式负序方向继电器	104
第四节 非全相运行时负序方向继电器动作性能分析	109
第五节 串联补偿电容器对负序（零序）继电器及方向高频保护的影响	126
第六节 分布电容对高频闭锁负序方向保护的影响	140
第七节 对高频闭锁负序方向保护的评价	142
本章附录 负序方向继电器在正方向不对称短路，反方向串补电容 不对称短路时计算机计算结果	142
第十章 高频闭锁距离保护	144

第一节	高频闭锁距离保护的工作原理	144
第二节	高频闭锁距离保护的基本元件	146
第三节	高频闭锁距离保护的基本回路	149
第四节	高频闭锁距离保护的运行性能分析	155
第十一章	方向行波保护	160
第一节	行波的基本理论	160
第二节	暂态行波量的获取方法	163
第三节	方向行波保护的基本原理	164
第十二章	自动重合闸	172
第一节	自动重合闸的作用及其基本要求	172
第二节	三相自动重合闸	173
第三节	单相自动重合闸	185
第四节	综合重合闸	194
第十三章	电力变压器保护	200
第一节	概述	200
第二节	变压器励磁涌流分析	200
第三节	变压器差动保护	205
第四节	变压器瓦斯保护	223
第五节	变压器后备保护及过负荷保护	224
第六节	变压器过励磁保护	231
第七节	三绕组变压器保护的特点	233
第八节	自耦变压器保护	235
第十四章	发电机保护	239
第一节	概述	239
第二节	发电机纵联差动保护	240
第三节	发电机定子匝间短路保护	245
第四节	发电机定子单相接地保护	253
第五节	发电机失磁保护	262
第六节	发电机负序电流保护、后备保护及过负荷保护	278
第七节	发电机失步保护和逆功率保护	283
第八节	同步发电机的转子接地保护	287
第九节	同步调相机保护的特点	292
第十节	发电机保护装置接线全图举例	292
第十五章	母线保护	295
第一节	概述	295
第二节	母线的完全电流差动保护	295
第三节	综合制动且差动回路串有低值强制电阻的母线电流差动保护	300
第四节	双母线固定连接的母线差动保护	302
第五节	断路器失灵保护	304
参考文献		309

第六章 线路差动保护

第一节 差动保护的作用

本书上册所讨论的电流、电压保护和距离保护,都是只反应被保护线路一侧的电量,为了获得选择性,其瞬时切除的故障范围只能是被保护线路的一部分,即使性能较好的距离保护,在单侧电源线路上也只能保护线路全长的80%左右,在双侧电源线路上瞬时切除故障的范围大约只有线路全长的60%左右。在被保护线路其余部分发生故障时,都只能由延时保护来切除。在电力系统中,全线同时快速切除故障有许多优点,即:可使输电线路在故障中所受的各种损害减至最小的程度;改善了电力系统暂态的稳定性;使快速重合闸的重合容易获得成功,这不仅改善了暂态的稳定性,而且减少了断电的时间。带辅助导线的纵联差动保护,仅比较被保护线路两侧电流的大小和相位,不反映相邻线路上发生的短路故障,因此,不需要在时间上与相邻线路的保护相配合,所以在整个被保护线路上发生故障时,可以实现瞬时切除故障。

导引线(辅助导线)纵联差动保护不仅可广泛用于高压电网的短线路上作为线路主保护,而且在发电机、变压器、母线保护中用得更广泛。本章主要讨论输电线路带辅助导线的纵联差动保护,这种保护又称为导引线纵联差动保护。

此外,在平行线路上,比较两回线路电流的方向,可以构成方向横联差动保护;比较两回线路电流的大小,则可以构成电流平衡保护。

第二节 导引线纵联差动保护

一、纵联差动保护的基本原理

导引线纵联差动保护,就是将被保护线路一侧的电流状况与经过导引线传送过来的另一侧的电流状况进行比较,以辨别短路是发生在被保护线路的内部抑或是外部,从而判断保护是否应该动作。导引线所传送的电流状况可分为两大类,其中一类是传送电流的大小(瞬时值),另一类是传送电流的方向。根据传送电流的大小(瞬时值)以辨别是内部短路还是外部短路的保护比较简单,目前获得十分广泛的应用。而根据传送电流的方向以辨别是内部短路还是外部短路的保护则比较复杂,目前应用较少。

传送电流大小的保护接线方式,按照在导引线中电流的流动情况可分为环流式和均压式两种。

导引线纵联差动保护环流式的原理接线图示于图6-1(a)。在正常运行情况或外部短路时,在导引线中循环地流动着电流互感器二次侧的电流,而两侧电流继电器的电流线圈中却没有电流流过,即处在电流平衡状态。由于平衡状态时导引线流过循环电流,所以称为

环流式。

导引线纵联差动保护均压式的原理接线图示于图 6-1 (b)。在正常运行情况或外部短路时，电流互感器的二次电流只能分别在各自的电流继电器的电流线圈中流过，在导引线中没有电流流过。在两侧导引线线芯间的电压大小相等、方向相反，即处在电压平衡状态，所以称为均压式。

环流式接线保护的主要特点是，当导引线发生开路故障时，保护要误动；当导引线发生短路故障时，保护却要拒动。均压式接线保护的主要特点是，当导引线发生开路故障时，保护将拒动；导引线发生短路时，保护将误动。

在导引线发生故障的情况下，导引线纵联差动保护总是不能正确工作。由于保护装置中设有导引线监视和电力系统故障检测元件，所以仅当导引线发生故障时，整套保护是不会误跳闸的。当被保护线路与导引线几乎同时发生故障时，保护装置不正确工作是不可避免的。此时，环流式接线导引线纵联差动保护和均压式接线导引线纵联差动保护所产生的后果是不同的。如果被保护线路先发生故障，由于这两类导引线纵联差动保护的动作时间都很快，一般在导引线故障前能可靠发出跳闸脉冲，保护不会拒动。如果导引线先发生故障，由于这类事故常由外力破坏引起，导引线大多属于开路故障，因此环流式的保护不受影响，能正确跳闸，而均压式的保护将拒绝动作。因此，通常多采用环流式接线的导引线纵联差动保护。此外，环流式接线的保护，由于电流互感器的负担小，因而保护误差也较小。

用环流法构成的导引线纵联差动保护的单相原理接线如图 6-2 所示。在被保护线路两侧装有相同变比的电流互感器，用辅助导线把线路两侧电流互感器二次侧带“*”号的极性端子连接起来，也用辅助导线把线路两侧电流互感器二次侧非“*”号的极性端子连接起来，电流继电器接在差电流回路上。

在正常运行或在外部（指两电流互感器所包围的范围以外）短路时（如图 6-2 (a) 中 D 点），流入电流继电器线圈的电流为

$$\dot{I}_J = \dot{I}_{m2} - \dot{I}_{n2} \quad (6-1)$$

如果忽略被保护线路的电容电流，则流经线路两侧的一次电流相等，在理想的情况下，两侧电流互感器的二次电流 $\dot{I}_{m2}$ 和 $\dot{I}_{n2}$ 也相等，并在辅助导线构成的回路中形成环流，如图

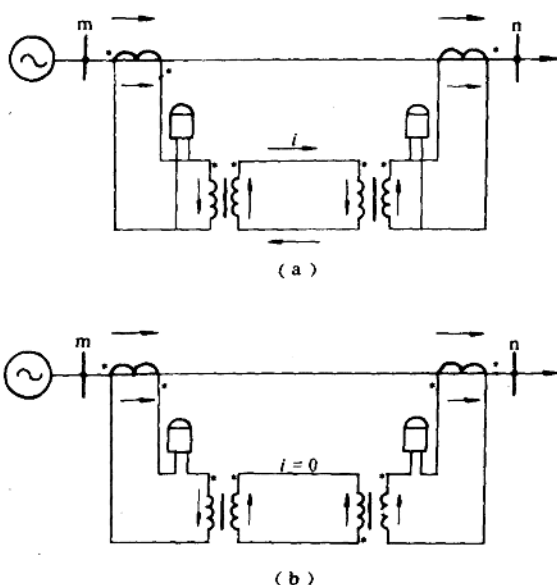


图 6-1 导引线纵联差动保护两种接线方式

(a) 环流式；(b) 均压式

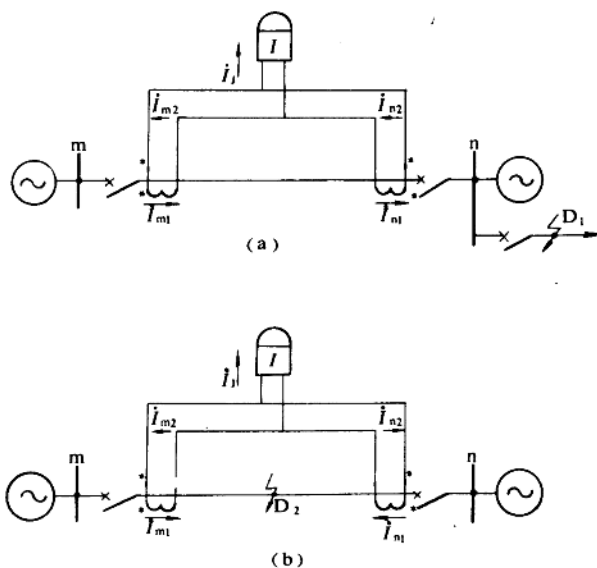


图 6-2 环流法构成的导引线纵联差动保护的单相原理接线图

(a) 外部短路时的电流分布；(b) 内部短路时的电流分布

6-2 (a) 所示。这时，流入继电器的电流为零，继电器不动作。

在内部短路时〔如图 6-2 (b) 中 D_2 点〕，两侧电源分别向短路点供给短路电流，假定两侧电源电动势的相角相等，两侧电源至故障点的阻抗角也相等，此时 m 侧的一次电流 $\dot{I}_{m1}$ 方向不变， n 侧的一次电流 $\dot{I}_{n1}$ 方向与外部短路时的方向正好相反，所以流入继电器的电流为

$$\dot{I}_J = \frac{1}{n_{LH}} (\dot{I}_{m1} + \dot{I}_{n1}) = \frac{1}{n_{LH}} \dot{I}_D \quad (6-2)$$

式中 n_{LH} —— 电流互感器的变比；

$\dot{I}_D$ —— 故障点的短路电流。

当流入继电器的电流 $\dot{I}_J$ 大于继电器的动作电流时，继电器动作，将故障线路自两侧同时切除（图中未示出跳闸回路）。

由此可见，纵联差动保护的**保护范围**，就是两侧电流互感器之间所包括的范围。在保护范围外短路时，保护不会动作，因此不需要与相邻线路（或元件）的保护在整定值和动作时间上进行配合。在保护范围内短路时，保护能瞬时动作。

二、纵联差动保护的不平衡电流

纵联差动保护在外部短路时，虽然两侧的一次电流相等，但由于两侧电流互感器的误差和特性不可能完全一致，在辅助导线的差动回路中将出现不平衡电流。如将电流互感器的电流与阻抗都归算到二次侧，则环流法接线纵联差动保护的等值电路如图 6-3 所示。图中左侧虚线方框内为被保护线路 m 侧电流互感器等值电路，右侧虚线方框内为被保护线路 n 侧电流互感器等值电路，图中 $Z_{m,ax}$ 和 $Z_{n,ax}$ 分别为两侧的辅助导线阻抗， Z_J 为继电器线圈

阻抗。根据图 6-3 的等值电路可写出两侧电流互感器的二次电流为

$$\dot{I}_{m2} = \dot{I}'_{m1} - \dot{I}'_{m \cdot lc}$$

$$\dot{I}_{n2} = \dot{I}'_{n1} - \dot{I}'_{n \cdot lc}$$

式中 $\dot{I}'_{m \cdot lc}$ 、 $\dot{I}'_{n \cdot lc}$ 分别为 m 侧和 n 侧电流互感器的励磁电流（归算到二次侧）。

考虑到被保护线路两侧电流互感器的一次电流相等（ $\dot{I}'_{m1} = \dot{I}'_{n1}$ ），所以在正常运行及外部短路时，继电器中的电流为

$$\dot{I}_J = \dot{I}_{m2} - \dot{I}_{n2} = \dot{I}'_{n \cdot lc} - \dot{I}'_{m \cdot lc} = \dot{I}_{bp} \quad (6-3)$$

式中 $\dot{I}_{bp}$ ——不平衡电流。

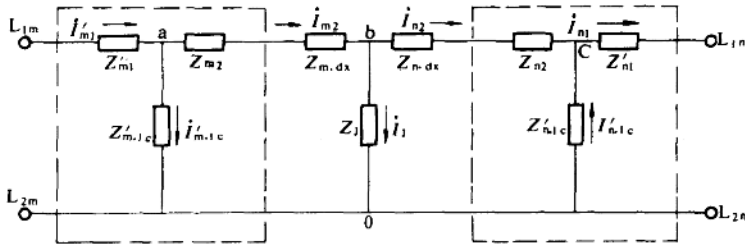


图 6-3 环流法接线纵联差动保护的等值电路图

由式 (6-3) 可见，不平衡电流实际上就是被保护线路两侧电流互感器励磁电流之差。在一般情况下，两侧电流互感器的特性不可能完全相同，尤其是在电力系统发生短路时，一次电流很大，以致铁芯饱和，被保护线路两侧电流互感器的励磁电流（归算到二次侧） $\dot{I}'_{m \cdot lc}$ 、 $\dot{I}'_{n \cdot lc}$ 之间的差异更为明显，不平衡电流 $\dot{I}_{bp}$ 就更大，如图 6-4 所示。

对于只有两组电流互感器的纵联差动保护，其不平衡电流也可以用图 6-3 所示的简化电路图进行分析。考虑到 $\dot{I}'_{m1} = \dot{I}'_{n1} = \dot{I}'$ ，图 6-5 所示的简化电路实际上是一个电桥电路，其中 ab 为一臂，其等值阻抗 $Z_{ab} = Z_{m2} + Z_{m \cdot dx}$ ；bc 为另一臂，其等

值阻抗 $Z_{bc} = Z_{n2} + Z_{n \cdot dx}$ ；a0 与 c0 为电桥的另外两臂，它们的阻抗分别为 $Z'_{m \cdot lc}$ 与 $Z'_{n \cdot lc}$ ，流入继电器线圈阻抗 Z_J 的电流就是电桥的不平衡电流。

在电桥电路中，如果满足下列关系

$$\frac{Z_{ab}}{Z_{bc}} = \frac{Z'_{m \cdot lc}}{Z'_{n \cdot lc}} \quad (6-4)$$

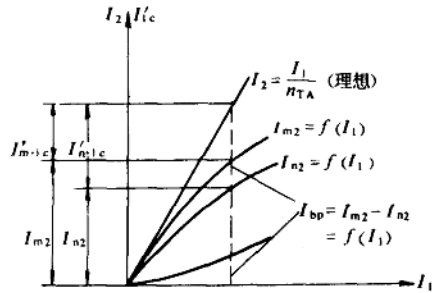


图 6-4 两侧电流互感器的特性曲线和不平衡电流

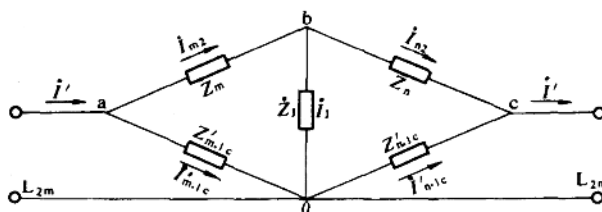


图 6-5 由图 6-3 简化的电桥电路

则 $\dot{I}_1 = \dot{I}_{bp} = 0$ 。式 (6-4) 即为电桥电路的平衡条件。实际上由于电流互感器的磁化曲线是非线性的，其励磁阻抗 Z_k 与很多因素有关，不可能是常数，特别是在外部短路时，当短路电流很大时，电流互感器铁芯严重饱和，其励磁阻抗 Z_k 明显下降，且下降程度不可能相同，式 (6-4) 的关系不可能保持，因此实际上将有较大的不平衡电流出现。

以上所讨论的不平衡电流是稳态不平衡电流。由于纵联差动保护的動作几乎是瞬时的，因此必须考虑在外部短路的暂态过程中，差动回路中出现的暂态不平衡电流。在外部短路的瞬间，电流互感器一次侧短路电流含有按指数函数衰减的非周期分量，它的变化速度远慢于周期分量的变化速度。所以非周期分量很难传变到电流互感器的二次侧，而主要作为电流互感器的励磁电流，从而使铁芯深度饱和，励磁阻抗急剧下降，二次电流的误差更加增大。

外部短路时的短路电流和差动回路中的不平衡电流的暂态过程，如实验录波图 6-6 所示。从图上可以看出，暂态时的不平衡电流可能超过稳态时的不平衡电流许多倍，而且含有很大的非周期性分量，其特性几乎完全偏于时间轴的一侧。此不平衡电流延续的时间约几十个周波，其最大值在短路以后几个周波出现。综上所述，在纵联差动保护中不仅有稳态不平衡电流，而且也出现暂态不平衡电流，因此设法减小这两种不平衡电流对保护的影响，是提高纵联差动保护灵敏度的重要途径。

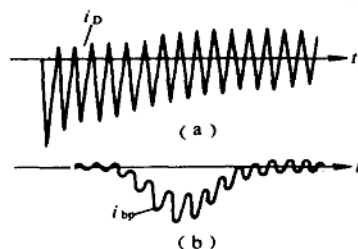


图 6-6 外部短路时的短路电流和差动回路中不平衡电流的暂态录波图
(a) 短路电流；(b) 不平衡电流

三、减小纵联差动保护不平衡电流的主要方法

减小纵联差动保护的不平衡电流，提高其灵敏度，主要有下列四种方法。

(1) 采用为纵联差动保护特制的 C 级电流互感器，并使两侧电流互感器的负载尽可能平衡，以满足式 (6-4) 的条件。

(2) 减小电流互感器的二次侧负载，并按 10% 误差曲线来校验，以减小由于电流互感器的误差而产生的不平衡电流。

(3) 在差动回路中接入速饱和中间变流器 BLH，然后将其输出再接到差动继电器上，

如图 6-7 (a) 所示。接入速饱和中间变流器 BLH 的目的,是为了减小暂态过程中非周期分量造成的影响。

当外部短路时,流入速饱和中间变流器 BLH 一次侧的是不平衡电流,它完全偏于时间轴的一侧,如图 6-7 (b) 所示。这种不平衡电流所产生的磁感应强度将沿局部磁滞回线而变化,通常每一周期内磁感应强度的变化较小,通常 $\Delta B = 2(B_{bh} - B')$, B_{bh} 为饱和磁通密度。

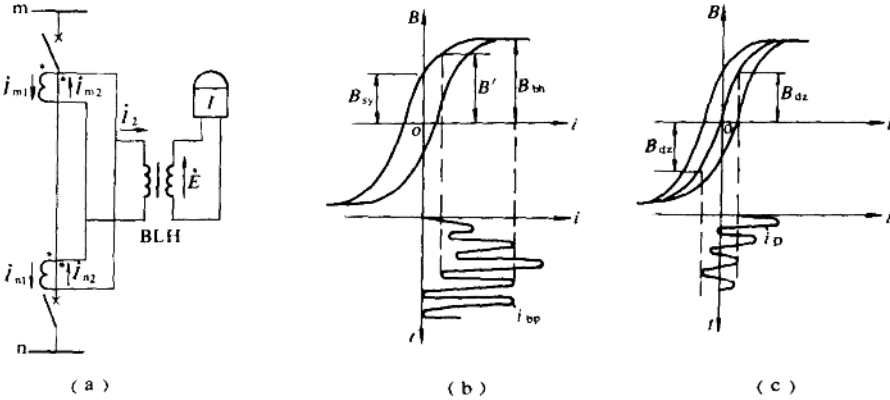


图 6-7 用速饱和中间变流器躲过暂态不平衡电流的原理图

(a) 单相原理接线图; (b) 外部短路时流入偏于时间轴一侧的不平衡电流;

(c) 内部短路时流入周期分量电流

当内部短路时,流过速饱和中间变流器 BLH 一次侧的电流与短路电流 $\dot{I}_D$ 成正比,在暂态过程非周期分量衰减后,就完全成为周期分量,如图 6-7 (c) 所示。这时,速饱和中间变流器每一周期内的磁感应强度 B 的变化很大,其值为 $4B_{dz}$ 。

为了保证在外部短路时差动保护能可靠地躲过暂态不平衡电流的影响,差动继电器的动作磁感应强度变化选择得必须使 $\Delta B_{dz \cdot J} > 2(B_{bh} - B')$ 。为了保证在内部短路时差动保护能可靠地动作,又必须使 $\Delta B_{dz \cdot J} < 4B_{dz}$ 。因此,差动继电器的动作电压 $U_{dz \cdot J}$ 应相应地调整到 $U_{dz \cdot J} \propto \Delta B_{dz \cdot J}$ 。

采用了速饱和中间变流器后,差动继电器只需按躲过外部短路时稳态不平衡电流整定,这就提高了纵联差动保护的灵敏度;但是,由于在短路瞬间短路电流含有大量的非周期分量,速饱和中间变流器在短时间内饱和,因此内部短路时纵联差动保护要延缓 30~40ms 动作。

(4) 带制动特性的差动继电器。为了减小纵联差动保护不平衡电流的影响,常采用带制动特性的差动继电器,其原理接线图示于图 6-8 中。在正常运行和外部短路时〔图 6-8 (a)〕,通过两个同极性串联的制动线圈 W_{zh} 的电流为 $\dot{I}_{m2}$ 和 $\dot{I}_{n2}$,它们方向一致,加强了制动作用,通过差动线圈 W_{cd} 的电流为 $\dot{I}_J = \dot{I}_{m2} - \dot{I}_{n2} = \dot{I}_{bp}$ 。当内部短路时〔图 6-8 (b)〕,通过差动线圈 W_{cd} 的电流为总的短路电流,即 $\dot{I}_{m2} + \dot{I}_{n2}$,而通过两个制动线圈 W_{zh} 的电流方向相反,减弱了制动作用。适当选择 W_{zh} 和 W_{cd} 的匝数比,使得在外部短路时, $W_{zh} \dot{I}_{m2} +$

$W_{sh} \dot{I}_{n2}$ 产生的制动力矩大于 $W_{cd} I_{bp}$ 产生的动作力矩；而在内部短路时，按单侧供电最不利的情况考虑， $W_{cd} I_{m2}$ 产生的动作力矩应大于 $W_{sh} \dot{I}_{m2}$ 产生的制动力矩，继电器就动作。采用带制动线圈的差动继电器是减小稳态不平衡电流影响的最有效方法。为了把差动继电器中的稳态不平衡电流和暂态不平衡电流都尽可能地减小，实际上常把制动特性和速饱和性能同时使用。

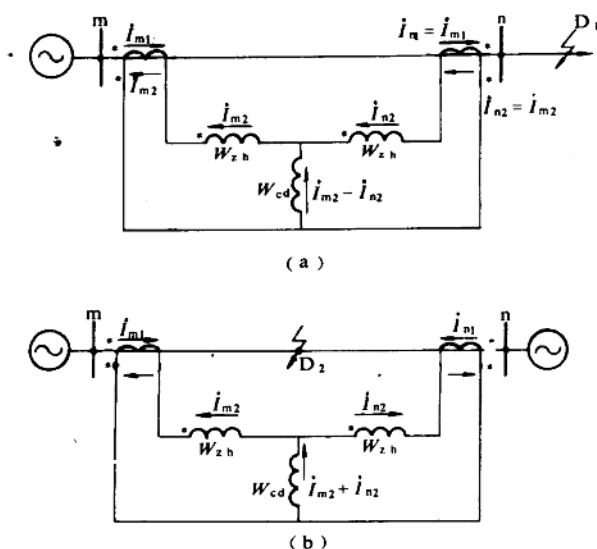


图 6-8 带制动特性的电流差动继电器原理接线图

(a) 在正常运行和外部短路时；(b) 在内部短路时

四、纵联差动保护的整定和灵敏度校验

通常可按以下两个条件来选择差动继电器的动作电流。

1. 躲过外部短路时的最大不平衡电流

$$I_{dx.J} = K_k K_{fzq} K_{tx} \left(0.1 \frac{I_{D \cdot \max \cdot J}}{n_{LH}} \right) \quad (6-5)$$

式中 K_k ——可靠系数，取 1.2~1.3；

K_{fzq} ——非周期分量系数，当采用速饱和中间变流器时， $K_{fzq}=1$ ；

K_{tx} ——同型系数，在两侧电流互感器同型号时 $K_{tx}=0.5$ ，不同型号时 $K_{tx}=1$ ；

0.1——电流互感器按 10% 误差曲线校验后，可能出现的最大误差；

$\frac{I_{D \cdot \max \cdot J}}{n_{LH}}$ ——外部短路时，流过差动继电器的最大短路电流（二次值）。

2. 躲过最大负荷电流

$$I_{dx.J} = K_k I_{fh \cdot \max} \quad (6-6)$$

式中 K_k ——可靠系数，取 1.2~1.3。

这样整定是为了防止由于保护的一侧电流互感器二次回路断线而引起保护误动。

根据以上两个整定值中较大的一个 $I_{dz.J}$ 作为差动继电器的整定值。

保护的灵敏度，可按流过差动继电器的最小短路电流 $I_{D.min.J}$ 来校验，即

$$K_{lm} = \frac{I_{D.min.J}}{I_{dz.J} n_{LH}}$$

规程要求 $K_{lm} \geq 2$ 。

第三节 线路纵联差动保护的動作特性 及其分析方法

线路纵联差动保护的動作特性取决于线路两侧电流的关系。两侧电流的关系可以用幅值关系和相位关系来表示，也可以用复数比来表示，因此動作特性的分析方法大体上可分为两种。

一种分析方法是分别讨论两侧电流幅值关系和相位关系对差动继电器動作的影响。这就是在相位关系一定的情况下，求出差动继电器临界動作时两侧电流幅值关系的曲线，该曲线为比例特性曲线。在外部短路时， $\arg \frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_n} = 180^\circ$ ，人们最感兴趣的是在此条件下的比例特性。再就是在幅值关系一定的情况下，求出差动继电器临界動作时两侧电流的相位关系的曲线，该曲线为相位特性曲线。

另一种分析方法是以前两侧电流的复数比 $\frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_n}$ 为变数来分析差动继电器的動作特性，可以很方便地在复数平面上画出動作特性曲线，该曲线称为复数比特性。本节主要采用这种方法。

一、不带制动线圈电流差动继电器的動作特性

这时继电器的動作表达式为

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| \geq |\dot{I}_z| = I_z \quad (6-7)$$

式中 $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$ ——电流差动保护两侧电流相量；

$\dot{I}_z$ ——电流差动保护的動作整定值。

为了在复数平面上画出电流差动继电器的動作轨迹，可对式 (6-7) 进行化简

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| = \left| \left(\frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_n} + 1 \right) \dot{I}_n \right|$$

取 $I = I_n$ ，则

$$|1 + \dot{P}| \geq \frac{\dot{I}_z}{I} \quad (6-8)$$

式中 $\dot{P}$ ——被保护线路两侧的电流复数比, 即 $\dot{P} = \frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_n}$ 。

式 (6-8) 中的 $\dot{P}$ 在复数平面上的轨迹是一个圆, 其圆心坐标为 $(-1, 0)$, 半径为 $\frac{I_z}{I}$ 。圆内为不动作区, 圆外为动作区, 此圆称为闭锁圆, 如图 6-9 (a) 所示。在正常运行和外部短路时, $\frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_n} = -1$, 即 $\dot{P}$ 处于 $(-1, 0)$ 的位置, 位于闭锁圆的圆心, 差动继电器可靠地不动作。在内部短路时, $\frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_n}$ 为正值, 差动继电器能可靠动作。

电流差动继电器的动作轨迹也可以描绘在直角坐标平面上, 为使动作轨迹能表示在第一象限上, 将向上纵坐标用 $-\dot{I}_m$ 表示, 横坐标用 $\dot{I}_n$ 表示, 满足式 (6-7) 的动作轨迹为两根平行的虚线, 两根平行的虚线之间为闭锁区, 其余为动作区。通过坐标原点与横坐标成 45° 的直线称为外部故障线, 在此实线上的任何一点都满足 $\dot{I}_m = -\dot{I}_n$, 外部故障线正好处于闭锁区的中部, 当外部故障时, 电流差动继电器不动作。两虚线在坐标轴上的截距均为 I_z , 它就是电流差动继电器 (保护) 的整定值。以上所述, 示于图 6-9 (b) 中。

必须指出, 不带制动线圈的电流差动继电器, 在外部故障穿越性短路电流很大时, 闭锁圆的半径随短路电流的增大而减小 [见图 6-9 (a)], 而电流互感器的误差随短路电流的增大而增大。在外部短路时, 电流差动继电器的动作特性有可能越出闭锁区而误动。为了克服上述缺点, 实际上常采用带制动特性的电流差动继电器。

必须指出, 不带制动线圈的电流差动继电器, 在外部故障穿越性短路电流很大时, 闭锁圆的半径随短路电流的增大而减小 [见图 6-9 (a)], 而电流互感器的误差随短路电流的增大而增大。在外部短路时, 电流差动继电器的动作特性有可能越出闭锁区而误动。为了克服上述缺点, 实际上常采用带制动特性的电流差动继电器。

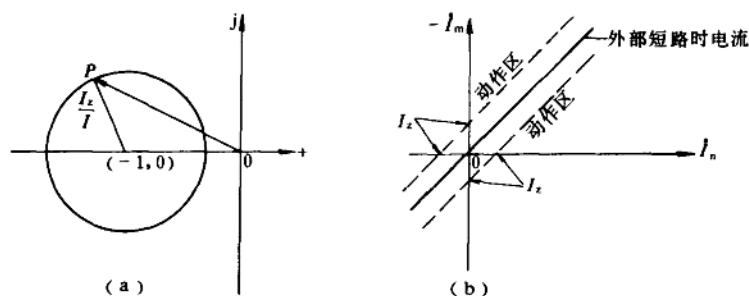


图 6-9 不带制动特性的电流差动继电器的动作特性

(a) 在复数平面上; (b) 在电流直角坐标上

二、带制动线圈电流差动继电器的动作特性

带制动线圈的电流差动继电器的原理接线图, 仍如图 6-8 所示。该原理接线图的特点是制动线圈 W_{bh} 有两个, 它们的相对极性是这样考虑的。当外部故障时, 循环电流流过两制动线圈是同极性串联, 制动作用增强。而当内部故障时, 两侧的故障电流各经一个制动线圈流入差动线圈 W_{cd} (即动作线圈), 两制动线圈中电流方向相反, 制动作用互相减弱。因此,

设置这样的两个制动线圈后,对内部故障的灵敏度影响甚小,而对外部故障则制动作用随穿越性短路电流的增大而增大,从而在被保护线路两侧电流互感器有较大的误差下,电流差动继电器仍能可靠不动作。

设置制动线圈后,电流差动继电器的动作表达式为

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| - K|\dot{I}_m - \dot{I}_n| \geq I_r \quad (6-9)$$

式中 K ——制动系数, $0 < K < 1$ 。

在电流差动继电器整定值足够小,而故障电流足够大的情况下,即 $\frac{I_r}{I_n} \approx 0$ 时,选用两侧电流复数比为参变量,并令

$$\dot{P} = \frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_n} = a + jb \quad (a, b \text{ 为变量})$$

代入式 (6-9), 得

$$|\dot{I}_n(a + jb) + \dot{I}_n| - K|\dot{I}_n(a + jb) - \dot{I}_n| \geq 0$$

化简后, 得

$$(a + 1)^2 + b^2 - K^2[(a - 1)^2 + b^2] \geq 0$$

$$\text{即} \quad a^2 + 2\frac{1+K^2}{1-K^2}a + \left(\frac{1+K^2}{1-K^2}\right)^2 + b^2 - \left(\frac{2K}{1-K^2}\right)^2 \geq 0$$

经整理, 得

$$\left(a + \frac{1+K^2}{1-K^2}\right)^2 + b^2 \geq \left(\frac{2K}{1-K^2}\right)^2 \quad (6-10)$$

式 (6-10) 在复数平面上也是一个圆, 其圆心坐标为 $\left(-\frac{1+K^2}{1-K^2}, 0\right)$, 其半径 r_0 为 $\frac{2K}{1-K^2}$ 。在极坐标上, 圆心的向量 Q_0 为 $\frac{1+K^2}{1-K^2}e^{j180^\circ}$, 如图 6-10 (a) 所示。从图中可见, 在复数平面上电流差动继电器的闭锁圆的半径为 $\frac{2k}{1-k^2}$, 不再随短路电流的增大而缩小。

对于式 (6-9), 在电流直角平面上可用作图法求出带制动特性的电流差动继电器的动作特性曲线, 如图 6-10 (b) 所示。图中两根平行的虚线和通过坐标原点的实线的含意, 与图 6-9 (b) 是完全一样的, 设置了制动线圈以后, 电流差动继电器的动作特性, 则为两根曲线而不再是两根平行的虚线。由动作特性曲线可知, 本侧动作电流将随着对侧电流的增大而迅速增大, 很明显, 制动线圈的设置, 大大提高了电流差动继电器在外部故障时不动作的可靠性。

三、导引线传输常数对电流差动继电器动作特性的影响

导引线纵联差动保护由于导引线较长, 不仅增加了由于保护两侧电流互感器负载增加而引起的误差, 增加了电流差动继电器的不平衡电流, 而且由于导引线分布电容的存在, 使一侧电流经过长导引线传输到对侧时, 将引起电流幅值的衰减和相角的偏移, 通常用导引线的传输常数 γ 来表示, $\gamma = \alpha e^{j\beta}$ 。其中 α 为幅值衰减常数, 其数值的变化范围是 $0 \leq \alpha \leq 1$; β 为相位移, 其变化范围为 $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 。因此由 n 侧流出的电流 $\dot{I}_n$ 经导引线后流入 m

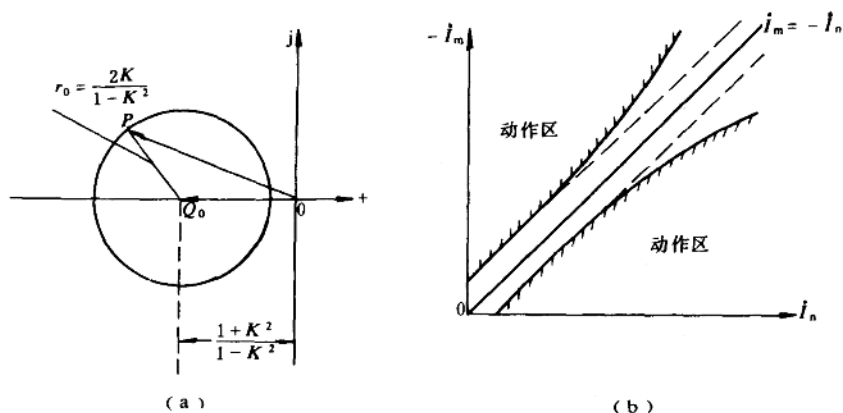


图 6-10 带制动特性的电流差动继电器动作特性曲线

(a) 在极坐标上; (b) 在电流直角坐标上

侧继电器的电流是 $\gamma \dot{I}_n$ 。因此, 装设在 m 侧的导引线纵联差动保护的电流差动继电器的动作表达式为

$$|\dot{I}_m + \gamma \dot{I}_n| - K |\dot{I}_m - \gamma \dot{I}_n| \geq 0 \quad (6-11)$$

令 $\dot{P} = \frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_n} = a + jb$ (a, b 为变量), 并令 $\gamma = c + jd$ (c, d 为常量), 代入式(6-11), 得

$$|(a + jb) + (c + jd)| - K |(a + jb) - (c + jd)| \geq 0$$

化简后, 得

$$a^2 + b^2 + \left(2c \frac{1+K^2}{1-K^2}\right)a + \left(2d \frac{1+K^2}{1-K^2}\right)b + (c^2 + d^2) \geq 0$$

经整理, 得

$$\left(a + c \frac{1+K^2}{1-K^2}\right)^2 + \left(b + d \frac{1+K^2}{1-K^2}\right)^2 = \left(\frac{2K}{1-K^2} |\gamma|\right)^2 \quad (6-12)$$

式(6-12)在复数平面上是一个圆。

在极坐标上圆心的向量为

$$Q_m = -\frac{1+K^2}{1-K^2}(c + jd) = a \frac{1+K^2}{1-K^2} e^{j(180^\circ + \beta)}$$

圆的半径为

$$r_m = \frac{2K}{1-K^2} |\gamma| = a \frac{2K}{1-K^2}$$

下面再讨论 n 侧电流差动继电器的动作特性。装设在 n 侧的导引线纵联差动保护差动继电器的动作表达式为

$$|\dot{I}_n + \gamma \dot{I}_m| - K |\dot{I}_n - \gamma \dot{I}_m| \geq 0 \quad (6-13)$$

用同样的方法, 经简化整理后, 得

$$\left(a + \frac{c}{c^2 + d^2} \times \frac{1 + K^2}{1 - K^2}\right)^2 + \left(b - \frac{d}{c^2 + d^2} \times \frac{1 + K^2}{1 - K^2}\right)^2 = \left(\frac{2K}{1 - K^2} / \frac{1}{\gamma}\right)^2 \quad (6-14)$$

式 (6-14) 在复数平面上也是一个圆。

在极坐标上圆心的向量为

$$\begin{aligned} Q_n &= -\frac{1 + K^2}{1 - K^2} \left(\frac{c - jd}{c^2 + d^2} \right) = -\frac{1}{c + jd} \times \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \\ &= -\frac{1}{\gamma} \times \frac{1 + K^2}{1 - K^2} = \frac{1}{\alpha} \times \frac{1 + K^2}{1 - K^2} e^{j(180^\circ - \beta)} \end{aligned}$$

圆的半径为

$$r_n = \frac{2K}{1 - K^2} / \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\alpha} \times \frac{2K}{1 - K^2}$$

根据以上分析, 考虑了导引线电流幅值的衰减和相角的偏移后, m 侧闭锁圆在极坐标上的圆心向量 Q_m 为 $\alpha \frac{1 + K^2}{1 - K^2} e^{j(180^\circ + \beta)}$, 其半径 $r_m = \alpha \frac{2K}{1 - K^2}$; 而 n 侧闭锁圆在极坐标上的圆心向量 Q_n 为 $\frac{1}{\alpha} \times \frac{1 + K^2}{1 - K^2} e^{j(180^\circ - \beta)}$, 其半径 $r_n = \frac{1}{\alpha} \frac{2K}{1 - K^2}$, 此两圆如图 6-11 所示。

如果导引线很短, 无电流衰减和相角偏移 ($\alpha=1, \beta=0$), 此时的电流差动继电器的闭锁圆的参数是: 在极坐标上圆心的向量 Q_0 为 $\frac{1 + K^2}{1 - K^2} e^{j180^\circ}$, 其半径 r_0 为 $\frac{2K}{1 - K^2}$, 已示于图 6-10 (a) 中。以此闭锁圆为标准, 考虑了导引线传输常数后 m 侧的闭锁圆, 圆心向量为 $Q_m = \gamma Q_0$, 半径为 $r_m = \alpha r_0$, 即 m 闭锁圆的圆心向量逆时针旋转了 β 角, 而半径缩小为 αr_0 ($\alpha < 1$)。而 n 侧的闭锁圆, 圆心向量 $Q_n = \frac{1}{\gamma} Q_0$, 半径为 r_n

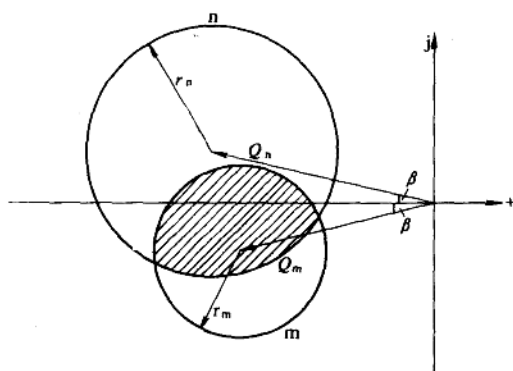


图 6-11 导引线传输常数为 $\gamma = ae^{j\beta}$ 时 m、n 两侧电流差动继电器的闭锁圆及共同闭锁区

$= \frac{1}{\alpha} r_0$, 即 n 闭锁圆的圆心向量顺时针旋转了 β 角, 而半径扩大为 $\frac{1}{\alpha} r_0$ 。

在外部故障情况下, 被保护线路两侧的电流差动继电器同时处在共同闭锁区, 才能保证整套线路纵联差动保护不误动作。所谓共同闭锁区就是闭锁圆 m 与闭锁圆 n 的公共重叠区, 如图 6-11 中所表示的斜线阴影区。很明显, 共同闭锁区的面积小于未考虑导引线传输常数时的闭锁圆的面积 [图 6-10 (a)]。随着导引线长度的增加, 相位移 β 也随着增加, 整个保护的共同闭锁区也就减小。为了使导引线纵联差动保护在外部故障时能可靠地不误动, 导引线纵联差动保护的闭锁圆的半径应该比变压器、发电机的纵联差动保护的闭锁圆大得多。

第四节 高内阻导引线纵联差动保护及导引线监视

高内阻导引线纵联差动保护采用环流法接线。该保护的原理接线图如图 6-12 所示，它主要由综合变流器和高内阻电路两部分组成。

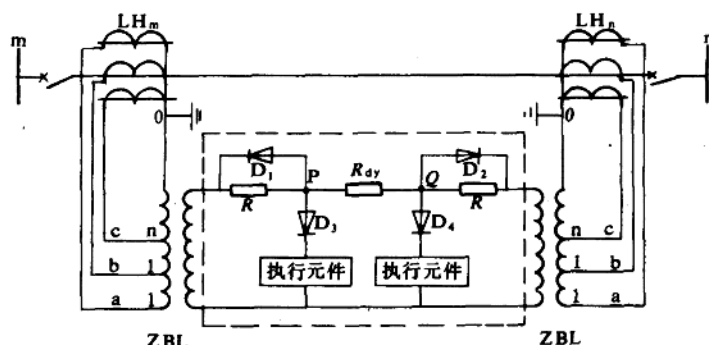


图 6-12 高内阻导引线纵联差动保护的原理接线图

一、综合变流器

线路纵联差动保护装置用导引线将两侧保护装置连接起来，以实现对被保护线路两侧的电流幅值和/或相位进行比较，为了减少辅助导引线的数量，简化保护接线且较容易实现对导引线的监视，常利用综合变流器将三相电流输入变成单相电流输出。此外，利用综合变流器的变比可大大减小导引线在电流互感器二次侧的阻抗值。

综合变流器实质上是一个将三相电流变成单相电流（或电压）的变换装置〔图 6-13 (a)〕，具有结构简单、制造方便、不需要调整、参数选择比较灵活、输出功率较大等一系列优点。

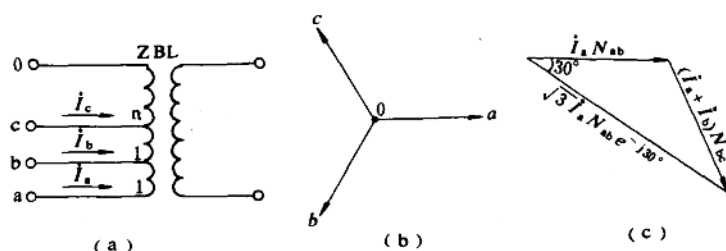


图 6-13 综合变流器

(a) 原理接线图；(b) 三相电流相量图；(c) 三相对称电流在综合变流器中的磁势相量图

电流互感器二次侧的 a、b、c 相和 0 线分别接入综合变流器一次绕组的相应抽头，当一次绕组通入对称三相电流时，流经 a—b 段的电流为 $\dot{I}_a$ ，流经 b—c 段的电流为 $\dot{I}_a + \dot{I}_b$ ，流经 c—0 段的电流为零。因此，三相对称电流在综合变流器铁芯中产生的合成磁势可写成

$$(IN)_x = \dot{I}_a N_{ab} + (\dot{I}_a + \dot{I}_b) N_{bc} = \sqrt{3} \dot{I}_a N_{ab} e^{-j30^\circ} \quad (6-15)$$