

///

(第三版)

朱声石 编著

高压电网继电保护 原理与技术



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

(第三版)

高压电网继电保护 原理与技术

朱声石 编著

RAx33/06



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是在《高压电网继电保护原理与技术》(第二版)的基础上,根据继电保护的技术发展对部分内容作了调整修改而成的,全书共分为十四章:电力系统继电保护的科学与性工程技巧、电力系统不对称性故障的计算、高压远距离输电线路短路的暂态过程、微机保护、继电器实现的基本方法、电流电压保护、距离继电器、电压相量图法、距离继电器动作行为的解析分析、故障分量继电器、距离保护的振荡闭锁、方向纵联保护与距离纵联保护、输电线路的微机型距离保护系统、纵联差动保护原理及其应用。

本书可供从事电力系统继电保护的科研、设计和运行的技术人员及高等院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压电网继电保护原理与技术/朱声石编著. —3版.
北京:中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-3188-5

I. 高... II. 朱... III. 高压电力系统-继电保护 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 020372 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1981 年 3 月第一版

2005 年 4 月第三版 2005 年 4 月北京第六次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.25 印张 518 千字

印数 32881—35880 册 定价 34.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前

言

本书第二版问世又近十载,在此期间电力系统继电保护技术又有很大进展,微机型保护已普遍获得应用,为此在第三版中删除了机械型和静态模拟式继电器。微处理器有很强的运算和逻辑处理能力,对过去不完善的保护方式可以加以改造达到完善。微机型保护还可以创造出传统保护完全不可能实现的保护新原理。不论是继承、发展还是创新,了解技术发展的过程是重要的,本书在这方面予以足够的关注。某些传统保护的性能不完善,并非原理上的缺陷,而是手段上的限制,应当加以改造使之完善,而不应当淘汰。

微处理器是将连续函数转变为离散的数值序列加以处理,对离散函数进行数值计算时要求有一定宽度的数据窗,如果有一个数据因干扰发生差错,将在一个数据窗宽度的时间内使计算结果产生误差。对必须反应输入电气量连续性的保护原理,微机型保护不具有优势。

在模拟式保护中每个继电器都是由独立的硬件实现的,尤其在机械型保护中,节省继电器的数量是非常重要的,总希望一种原理的测量继电器能适应各种运行工况。机械型保护装置一般都按主要测量继电器的动作原理划分,微机型保护装置中的继电器一般由软件实现。保护装置只要采集到三相电压和电流就可实现反应单侧电气量的任何一种动作原理的继电器。微机型保护装置不应再按测量继电器的动作原理划分,保护装置应具备一切必要的功能。在一套微机型保护装置中可以也应该有不同动作原理的继电器,分别在不同运行工况下对不同类型的故障发挥其最佳性能。于是对微机型保护应当认识两点:

(1) 在同一 CPU 的程序中实现的两种继电器一般是不能相互起后备作用的,不可能只限于一种继电器所专有的程序发生故障,使该继电器失灵,而有关另一种继电器的程序仍能正常运作。只有硬件完全独立的两套保护装置才可以相互起后备作用。

(2) 两套完全独立的保护装置,只要采集的电压和电流完全相同,那么这一套保护装置能实现的功能,另一套装置也能实现。当由这两套装置实现保护的双重化时还有什么功能需要或能够互补呢?每套微机型保护装置的动作原理和功能都应是完美无缺的。保护的双重化只是防止硬件障碍造成保护拒动而采取的措施。

因此高压线路保护装置只应按其输入的电气量及开关量划分,如仅反应本侧电气量的保护和同时利用通道在线路两侧交换信息的纵联保护两大类。而纵联保护则可分为直接比较两侧三相电流的光纤纵联差动保护和间接比较两侧电气量的闭锁式或允许式载波纵联方向或距离保护。间接比较乃是在通信技术不发达时流行的线路纵联保护。随着光纤通信技术的发展,直接比较式线路光纤纵联保护的应用必将日益广泛。为了不增加装置交流量的输入回路和简化 TA 二次回路,即使是双回线路的保护装置也宜按线设置,不引入另一回线的电流。

继电保护是电力系统的重要组成部分,一方面继电保护的正确动作对保障电力系统的安全运行起着十分重要的作用,另一方面继电保护的不正确动作包括误动与拒动也将给电力系

统造成重大的损失。这两方面对继电保护提出的要求常常是矛盾的。提高继电保护的灵敏性与快速性是继电保护的永恒课题，是对继电保护工作者智慧的挑战，继电保护工作者要为之进行不懈的努力。需要指出的是根据电力系统客观实际的要求和实际可能发生的事故，对继电保护的灵敏性和快速性提出合理的严格而不是过分的要求，是保障继电保护动作的安全性和可靠性十分重要的课题，也是对继电保护工作者的理论水平和实践经验的重大考验，甚至是更高的要求。

继电保护是一门实践性很强的技术，继电保护问题的解决既需要科学的理论，也需要处理工程问题的技巧。由于观点不同，解决的方法也相异，对一些问题在同行之间发生争论是屡见不鲜的。只有通过争论、探索和实践最终找到最佳的继电保护方式。对当前尚未有统一认识的问题，作者在书中提出了鲜明的观点，有很多同行对此有相同的观点，当然也有别家持相反的意见，所以乃是一家之言。作者恳切希望对这些问题能进行公开的讨论，通过讨论使问题得到正确的统一的认识。本书若能对此起抛砖引玉的作用，作者将感到莫大的欣慰，在此作者衷心地表示真诚的期待。

书中第四章本系隋凤海高级工程师所撰写，第三版仍请他稍作修改。本书第三版的出版仍然得到不少教授和专家的鼓励和支持，在内容上也获得他们许多宝贵的意见，作者在此表示衷心的感谢。

本书可供从事电力系统继电保护的科研、设计和运行的技术人员及高等院校相关专业的师生阅读参考。

目 录

前言

第一章 电力系统继电保护的科学与工程技巧	1
第二章 电力系统不对称故障的计算	15
2-1 对称分量(0、1、2分量)法	15
2-2 用对称分量法计算简单不对称故障	17
2-3 简单不对称短路和断线故障的计算	22
2-4 应用叠加原理计算故障	28
2-5 线路故障的几个重要特征	33
2-6 架空输电线间具有零序互感时的零序等效回路	33
2-7 用对称分量法计算复杂故障的基本问题	37
2-8 用解析法计算复杂不对称故障	39
2-9 用同、反相分量计算平行双回线上的简单故障	49
2-10 用六序分量计算同杆双回线的跨线故障	51
2-11 在A、B、C坐标系统中计算不对称短路	55
第三章 高压远距离输电线路短路的暂态过程	59
3-1 短路暂态过程中各种暂态分量的基本分析	59
3-2 用拉氏变换计算线性电路的暂态过程(暂态计算的运算法)	65
3-3 高压远距离输电线路短路暂态过程的实用算法——用分布参数计算	69
3-4 高压远距离输电线路短路暂态过程的简化算法——用集中参数计算	75
3-5 不对称短路暂态分量的特点	81
第四章 微机保护	83
4-1 微机保护的基本结构	83
4-2 数字滤波器	87
4-3 微机保护的算法	93
第五章 继电器实现的基本方法	104
5-1 反应单一电气量的继电器	105
5-2 幅值比较继电器和相位比较继电器的动作特性	106
5-3 积分比相器	111
5-4 相序比相器	112
5-5 电压余弦分量的测量	114

第六章 电流电压保护	115
6-1 相间过电流保护	116
6-2 相间电流速断保护	120
6-3 大接地电流系统的零序电流保护	121
6-4 小接地电流系统单相接地故障的选线	125
第七章 距离继电器	128
7-1 距离保护的问题	128
7-2 距离继电器的接线	131
7-3 单相式阻抗继电器	135
7-4 补偿电压	141
7-5 实用的姆欧继电器	143
7-6 实用的电抗继电器	147
7-7 四边形特性距离继电器	152
7-8 多相补偿距离继电器	154
7-9 测距式距离继电器和故障测距	163
7-10 序分量距离继电器	165
7-11 线路阻抗的模拟	167
第八章 电压相量图法	169
8-1 导言	169
8-2 单侧电源空载线短路时的电压相量图	169
8-3 双侧电源线路短路时的电压相量图	174
8-4 复杂网络中线路短路时的电压相量图	178
8-5 距离继电器几个重要特性的分析	179
第九章 距离继电器动作行为的解析分析	183
9-1 距离继电器动作行为分析的一般方法	183
9-2 复数平面上圆和直线的反演	184
9-3 复数分式 $P = \frac{1}{1-M}$ 的轨迹	185
9-4 双侧电源线路上阻抗继电器动作分析的方法	186
9-5 系统振荡时阻抗继电器的动作行为	189
9-6 过渡电阻对继电器测量阻抗影响的解析分析	190
9-7 双侧电源线路上振荡与短路同时发生时阻抗继电器的动作行为	196
9-8 线路两相运行并振荡时阻抗继电器的动作行为	198
9-9 相间多相补偿距离继电器对过渡电阻的反应能力	199
第十章 故障分量继电器	203
10-1 故障分量保护的基本性能	203
10-2 突变量方向继电器	206

10-3	故障分量距离继电器	209
10-4	故障分量电抗继电器	215
10-5	准故障分量电抗继电器	217
第十一章 距离保护的振荡闭锁		220
11-1	振荡闭锁的问题	220
11-2	电力系统的振荡	221
11-3	振荡对距离保护的影响	224
11-4	区分振荡与短路保证距离保护正确动作的方法	228
第十二章 方向纵联保护与距离纵联保护		235
12-1	引言	235
12-2	闭锁式方向纵联保护	236
12-3	方向纵联保护中的方向元件	239
12-4	方向纵联保护中的选相元件	243
12-5	距离纵联保护	245
12-6	弱馈线保护	247
12-7	分支线路的继电保护	248
12-8	串联电容补偿线路的继电保护	250
第十三章 输电线路微机型距离保护系统		256
13-1	距离保护的选相	257
13-2	距离保护装置中的纵联保护	266
13-3	距离继电器的选择	266
13-4	距离保护的阶段特性	267
13-5	高阻接地故障的保护	269
13-6	平行线上的距离保护	270
13-7	同杆并架双回线的距离保护	275
13-8	对侧变压器低压母线故障的远后备	277
13-9	装置中的辅助功能	279
第十四章 纵联差动保护的原理及其应用		283
14-1	差动保护的基本原理	283
14-2	保护用电流互感器	288
14-3	比率差动继电器	295
14-4	差动保护的暂态可靠性	303
14-5	输电线路的差动纵联保护	306
14-6	母线差动保护	309
14-7	变压器差动保护	317
14-8	发电机差动保护	324
14-9	电动机差动保护	329
参考文献		330

继电保护装置是电力系统的重要组成部分，它对保证系统安全运行起着非常重要的作用。它在系统发生故障时切除故障设备、对系统安全运行作出贡献，但若不正确动作（包括拒动和误动）给系统造成的危害也是巨大的。在系统无故障时继电保护的误动作是绝对不应该的。但若系统一次设备有冗余度，能满足 $n-1$ 的安全性，这种误动可以容忍。在系统故障时保护的拒动或非故障设备保护的不应跳闸（Sympathy trip）将切除 2 条甚至 2 条以上的线路，造成大面积停电，甚至导致系统瓦解，后果极其严重。

继电保护装置除了在故障和不正常运行的很短时间内动作外，长期是不动作的，因而被喻为电力系统的无声警卫。继电保护装置投入运行后一般没有任何反应。因此装置的某些缺陷可能不被觉察，从而成为故障时不正确动作的隐患。机械型保护装置在投入运行后设法利用工作电流进行校验。微机保护装置的各项性能由程序决定，只需检查装置采集的电流和电压（实际由装置自动显示）正确无误，此外微机还有自检功能，因此微机继电保护装置的正确动作率大为提高。

根据继电保护在系统中的重要作用和技术特点，对继电保护提出了 4 项要求——可靠性、选择性、快速性和灵敏性。这 4 项要求既有相辅相成、相互统一的一面；也有相互制约、相互矛盾的一方面。对 4 项中的每一项要求都应当有度，不应片面强调某一项而忽视另一项。对 4 项的要求应以满足电力系统的安全运行为准则。由于要求保护装置既不误动，又不拒动，这两项相互对立的方面必须警惕，任何提高灵敏度的措施都有造成误动的可能，而任何加闭锁防止误动的措施都有造成拒动的可能。当然只是一种可能性。要强调的是每当提出新措施时必须经过周密考虑，要想一想会不会产生负作用，不要草率从事。继电保护的绝大多数不正确动作情况并不难分析，而是“始料不及”酿成大错，不是分析不了，而是不知道该分析什么。随着经验的积累，现在对应该考虑的问题清楚多了。必须考虑的应是实际可能发生的故障。对于个别稀有情况，只要全系统继电保护动作的总评价是正确的，个别保护装置的动作不恰当，只要未扩大事故就不必要修改，以免顾此失彼反而降低了在常见事故中的性能。凡是应由一次系统解决的问题就不应由继电保护来解决。继电保护工作者就不要包揽这类事情。例如在一个由系统单侧供电的地区，可能有小电站并网运行。一旦系统供电中断，地区频率急剧下降（可能只有 30 余赫兹），使得比相式继电器的工作混乱，很可能发生误动作，但并未扩大事故，在如此低的频率下要求继电器正常工作是没有道理的。

有鉴于 4 项要求关系密切，不应也不可能孤立地讨论某一项要求，所以只能针对具体问题进行讨论。讨论时自然会涉及有关要求。为此选择了以下 17 个问题讨论。

- 1) 超高压线路保护的快速性；
- 2) 差动保护的快速性；
- 3) 变压器保护的灵敏性；

- 4) 发电机保护的灵敏性;
- 5) 继电保护的选择性问题;
- 6) 复故障问题;
- 7) 线路主保护的双重化;
- 8) 变压器保护的双重化;
- 9) 发电机保护的双重化;
- 10) 单相高阻接地故障的保护问题;
- 11) 距离保护的振荡闭锁;
- 12) 两相运行线路的保护;
- 13) 串联电容补偿线路距离保护的问题;
- 14) 同杆并架双回线的保护问题;
- 15) 线路保护的纵续动作;
- 16) 短路电流中直流分量对保护影响的问题;
- 17) 负序电流继电器的应用;
- 18) 线路保护中瞬时测量技术的应用;
- 19) 关于动模试验的问题。

除了以上 17 个问题外,再介绍线路保护中的一项技巧——瞬时测量技术。最后再谈一点关于动模试验的问题。

一、超高压线路保护的快速性

快速切除线路故障是保护电力系统暂态稳定最经济、最有效的手段。在由大电源送出的长线(电源阻抗小于线路阻抗的 $1/5$)上,突变量距离继电器(详见 10-3 节)能以特高速($<5\text{ms}$)切除对系统稳定威胁最大的出口三相短路故障,对保证系统暂态稳定作出重大贡献。当应用于短线时动作时间稍长,也不大于 15ms 。它仅仅反应本侧的电气量,其工作不依赖于通道,因而比较简单,可靠性高,其不跳之处是不能保护全线故障。为了快速切除全线故障,还需采用纵联保护。纵联保护为了在线路两侧之间交换信息,动作速度较慢,一般动作时间为 25ms ,因而按线路长度 80% 整定的突变量距离继电器总是应当采用的。当微机线路保护在同一 CPU 程序中完成突变量距离继电器的测量和实现纵联保护时不可能前者失效由后者实现后备作用。反之,后者可能因通道障碍而未能发挥作用。所以采用了突变量距离继电器后,纵联保护的重要性下降了。

对线路保护快速性的要求也并非越快越好。我国对系统暂态稳定的计算规定,对 500kV 线路近故障侧继电器保护的动作为 30ms ,远故障侧为 50ms 。文献 [1] 中一再指出适当延长一点动作时间可显著地提高纵联保护的安全性。闭锁式纵联保护在外部故障时远故障侧保护的测量元件完成了一切跳闸准备工作,只是由于收到对侧发来的闭锁信号才未跳闸。此时闭锁信号只要短时(20ms 甚至更短)中断,远故障侧保护就要失去选择性。这种误动作已多次发生过。如果暂态稳定计算证明在线路出口发生两相短路接地和三相短路时能保持稳定,那么在远处(突变量距离继电器未动作就一定是远处故障)发生单相接地故障时暂态稳定一定有较大的裕度。在确认为单相故障时微机纵联保护就可延时 20ms 跳闸。能够方便地实现短延时(20ms)也是微机保护的优势。在超高压线路上单相故障的几率最大,所以仅在单相故障时延时动作对提高纵联保护的安全性就很有实际意义。此外适当限制闭锁式纵联保

护中测量元件的超范围,对提高外部故障时的安全性也是很有意义的。尤其是当被保护线路较短时经受外部故障的几率远大于本线故障。

由此可见,不应孤立地片面地考虑快速性,而应根据电力系统客观的实际需求和保护的安全性综合考虑。还应指出,制造厂当然应当使其产品在安全基础上提高快速性,而运行部门则应根据系统的实际要求确定保护的動作延时。为此制造厂应提供動作延时可整定的产品。

二、差动保护的快速性

差动保护在原理上有绝对的选择性。实际上需避开外部短路时的不平衡电流。这个问题历来都是从提高 TA 精度和使继电器对不平衡电流不敏感两个方面解决。P 类 TA 就是专供保护使用的。其技术规格规定了标准准确级及准确限值系统和二次额定负担。但是当一次短路电流中含有衰减很慢的非周期分量时 TA 的误差大为增加。于是主张采用 TP 类瞬态保护用 TA。实际微机差动保护有能力在采用 P 类保护用 TA 的条件下保证差动保护正确动作。

按稳态误差选用的 P 类 TA 在短路开始的最初一段时间(约 5ms)内能够毫无误差地变换一次电流。差动保护原理不仅对稳态电流的相量成立,对电流的瞬时值也成立,因而在极短的时间($<5\text{ms}$)内判断出是区内还是区外故障是可能的。微机差动保护可以做到只要在第一个采样间隔内 P 类 TA 能精确变换,就可正确动作。此方法已成功地应用于母线保护,当然也可应用于发电机和变压器差动保护。不应当规定差动保护必须采用 TP 类瞬态保护用 TA。

我国对系统暂态稳定的计算规定 500kV 母线保护的動作时间为 30ms。这就是说在很多情况,如 220kV 及以下的母线差动保护,可以适当延长保护的動作时间以提高安全性。作者曾见到一条 110kV 母线差动保护在外部故障时的录波图。录波图显示差动电流在故障后的首半波就有完好的正弦波,而以后便降为零。对此可能作出的唯一解释是有一条线路 TA 二次回路开路,于是出现差动电流。随后 TA 二次开路产生的高电压又将断点击穿使回路导通。如果保护测量的时间长一点就不会误动,而 110kV 母线保护稍带延时是完全合理的,所以制造厂提供動作时间可以整定的保护由运行单位整定为好。

三、变压器保护的灵敏性

唯有接于超高压系统的变压器在其高压引线上的故障才可能对系统的暂态稳定构成威胁。对这种故障变压器的差动速断保护一定能快速灵敏地动作。

长期以来变压器差动保护以低压引线上的故障作为校验灵敏度的依据,这是十分错误的。变压器内部故障主要是匝间短路。当短路匝数较少时,引线上的电流远小于低压引线上故障时的电流。令最小短路匝数占绕组总匝数的比例为 α ($1 > \alpha > 0$)。变压器差动保护能够动作的 α 值越小,灵敏度越高,或者说保护的死区越小。变压器差动保护的一个特殊问题是避开变压器的励磁涌流。我国在机械型保护时代广泛利用经速饱和变流器供电的差动继电器。这种方法对避开差动保护的暂态不平衡电流是有效的,用来避开变压器的励磁涌流效果不好,还要求将差动保护的最小启动电流提高到 $1.5I_n$ (I_n 为变压器的额定电流)才能避开涌流,因而对匝间短路的灵敏度很低。长期运行的经验证明,在匝间短路时气体继电器比差动继电器更灵敏。现在差动保护利用差动电流中的“二次谐波”或间断角避开励磁涌流,差动继电器的最小启动电流的整定与涌流无关。当最小启动电流整定为 $0.5I_n$ 时对轻微匝间短路的死区约为 $\alpha = 0.01 \sim 0.02$ 。如此整定的差动继电器已有先于气体继电器动作的记录。由于变压器匝间短路的计算方法尚未解决,不免对上述故障记录的数据是否有普遍意义产生怀疑。作者认为保护的最小启动电流决定了在死区故障时变压器引线上电流的故障分量的值。

既然此值只有 $0.5I_n$ ，即使在系统最小运行方式下也能提供这样大的短路电流。换言之，死区约为 $\alpha = 0.01 \sim 0.02$ 有普遍意义。如果短路匝数更小，则故障更轻，等待故障发展短路绕组匝数增加到 $\alpha = 0.02$ 保护再动作，只要不损坏铁心，损失并未增加。而且当 $\alpha < 0.02$ 时短路电流很小，系统电压基本不变，对用户供电也不受影响，稍后跳闸也是允许的，所以为减小死区进一步提高灵敏度与动作速度并无实际意义。

四、发电机保护的灵敏性

发电机故障一般不会破坏系统的稳定运行。如果系统旋转备用不足，大容量电机的跳闸会导致系统频率下降，低频减载装置动作切除部分负荷。发电机故障时断路器跳闸只能切断由系统供给的故障电流，灭磁开头的跳闸并不能立即使转子电流降为零，所以保护快速动作的效果受到限制。现在发电机差动保护的動作时间约为 30ms ，进一步提高动作速度意义不大。

发电机定子发生相间故障时中性点侧的电流就是短路绕组中的电流。若为金属性短路，即使短路点靠近中性点，发电机差动保护也一定能灵敏地动作。横联差动保护反应一相两分支电流之差。不论是一相同分支或不同分支之间的匝间短路，若故障前短路点间电位差很小，任何一种横联差动保护都会有死区。发电机定子的每一根导线的绝缘都是很强的。死区处故障点间的电位差很小，一般不会发生短路。发电机长期运行，绝缘老化，一定在电位差较高的地方发生故障，在死区附近发生故障的可能性仍然是很小的。发电机差动保护的暂态不平衡电流较小，差动保护的最小启动电流兼顾安全性与灵敏性可取为 $0.3I_n$ 。

发电机是系统中最重要、最昂贵的设备。定子导线嵌于铁心槽内。同槽导线之间发生短路必损坏铁心，损失重大。提高差动保护的灵敏度，减小死区，应是追求的目标。首先应降低差动不平衡电流。横联差动保护两侧 TA 的二次电缆长度相等，是非常有利的客观条件。两侧 TA 的一次额定电流之比应与支路满负荷电流之比相等。发电机外部短路电流最大不超过 5 倍 TA 一次额定电流又是一个有利条件。TA 的准确限值系数取 10 就可适当限制暂态差动不平衡电流。这样在外部短路时 TA 的误差虽然增大但不可能饱和，暂态不平衡电流的特征一定是偏于时间轴的一边。对此采用直流闭锁就可保证安全性。发电机带负荷后应检查差动不平衡电流，并通过软件予以消除。此外还可令保护适当延时出口，即用时间换取灵敏度。故障轻、延时长 的反时限特性是天然合理的。总之，提高横联差动灵敏度以缩小死区的工作尚应进一步研究。

五、继电保护的选择性问题

故障时保护的動作失去选择性必然扩大停电范围，所以保护的选择性是必须满足的。只有在手动和自动向线路合闸充电时允许保护超范围动作，以达到灵敏快速地切除全线故障。实际证明这种超范围动作并未发生无选择性动作。20 世纪 70 年代起我国广泛应用单相自动重合闸。由于当时没有适用于两相运行的快速保护，采取在单相自动重合闸周期中，线路两相运行时允许保护超范围动作，快速切除全线故障。这虽是权宜之计，其性质与重合闸后加速相似，是简单易行的良策，应当永远采用。

选择性动作的关键技术是区分。有了区分就有了选择性，也就可提高灵敏度和动作速度，但还要通过正确地整定才能最终达到目的。对保护的整定可以分为两类：一类的整定任务是区分内部与外部短路。为此必须计算短路电流。反应单侧电气量的保护必须与相邻线路的保护在灵敏度与动作时间两方面相配合，才能保证选择性。在故障时故障线路的保护必须

比上一级相邻线保护更灵敏，动作更快，两者缺一不可。若要提高灵敏度就要延长动作时间；若要提高动作速度就要限制其灵敏度，这实际是在遵循反时限的原则。在复杂的电网中若仅采用反应单侧电气量的阶段式保护，可能出现难以配合的情况。为了不牺牲选择性和灵敏性，最好的对策是在无法配合的线路上采用有绝对选择性、能全线速动的纵联保护。

另一类的整定任务是区分正常运行与故障。这类保护灵敏度高，动作延时长。按避负荷状态整定，不需作短路计算。需要注意的是所谓负荷状态应是事故性的过负荷，并应保证继电器可靠返回（微机保护返回系数接近于1，这一点影响不大），否则故障时保护启动，故障线或设备跳闸后出现事故性过负荷时，若保护不返回就会失去选择性，甚至引起一连串的跳闸，酿成大面积停电。

差动保护有绝对的选择性，但为了避开外部短路时的不平衡电流和保证内部短路时的灵敏度也需要整定。比率差动继电器的动作电流随制动电流而变化就要考虑外部短路时和短路切除后的事故性过负荷两种状态。对前一状态下的选择性问题的普遍受到重视。对后一种状态常常只强调灵敏度，如将它等同于外部短路前的正常负荷状态，认为差动不平衡电流很小，而降低了最小启动电流，不免降低了安全性。此外对以上两种状态之间的过渡特性也应充分注意。

差动保护依靠提高整定值避开暂态不平衡电流将使保护的灵敏度不足，而且涉及非线性电路的计算也很难合理地整定。所以都采取根据暂态不平衡电流的特征闭锁保护。具体方法将在14章中介绍。母线差动保护中TA可能严重饱和，应采用快速测量的方法。其他情况TA不致严重饱和，只是误差增大，采用直流闭锁非常有效。直流闭锁在我国机械型保护中曾广泛使用，遗憾的是微机差动保护未继承下来。

六、复故障的保护问题

要不要考虑复故障？复故障的计算固然复杂，计算方法已经解决。问题是第二个故障点发生在何处是无法考虑的。

在机械型保护时代距离保护第Ⅰ、Ⅱ段共用一个继电器，在故障发生后若距离Ⅰ段不动作就将整定值切换为Ⅱ段定值。距离Ⅰ段仅短时投入工作，并未出现过区外故障紧接着在保护范围内又发生故障的情况。后来因为距离Ⅱ段要作为纵联保护的超范围测量元件，又要保留保护Ⅰ段独立工作，Ⅰ、Ⅱ段才用不同的继电器实现。但为了在极化电压记忆作用消失后不失去方向性，距离Ⅰ段也曾采取短时投入工作的方式，都未发生因Ⅰ段退出未能切除故障的情况。

故障几率较大的架空线路平均百公里每年只有一次故障，而且在不足100ms内就被切除，显然两处同时发生复故障的几率几乎为零。手动和自动重合闸时采取加速保护的動作和单相自动重合闸期间允许保护范围动作都是基于在这些特定的很短时间内在相邻线发生故障的几率为零。顺便指出，线路两相运行期间的保护也不能对相邻线故障起完全的后备作用，既然此时相邻线故障的几率很小，两相运行期间的线路可以仅保留本线的主保护，等恢复全相运行后再恢复后备保护。

但是万一发生复故障怎么办？对此只需有简单的反应各种故障的延时动作的保护，能最终切除故障。因此发电机和变压器应有按额定电流整定的过电流保护，输电线路应有按避开负荷状态整定的相间和接地距离保护及零序过电流保护。这样在发生复故障等一切稀有故障时都能够最终切除故障保证系统安全。而上述发电机和变压器的过电流保护也是各设备自身对内部及外部故障的最后一道防线。

最后指出, 差动保护是有绝对选择性的保护, 不论在何种复杂的情况下包括在复故障时, 对内部故障都能灵敏地反应, 因此只要有条件就应当多采用差动保护。

七、线路主保护的双重化

任何带电设备在任何时候都必须处于被保护状态。输电线路不仅要有主保护。还应有后备保护。主保护和后备保护应分别控制完全独立的断路器, 在主保护控制的断路器拒动时后备保护仍能切除故障。

在 110kV 及以下电压的线路上一一般采用阶段式距离及零序电流保护, 其第 I、II 段作为本线故障的主保护, 第 III 段作为相邻线路故障的后备保护。这种后备称为远后备, 不论是保护或断路器拒动远后备都能起后备保护的作用。保护第 III 段也可以对本线主保护起后作用, 但属于近后备。近后备在断路器失灵时不能起后备作用。第 III 段作为近后备的缺点是动作延时长。尤其现在微机保护第 III 段都与主保护在同一 CPU 程序中实现, 若主保护拒动, 第 III 段也不会动作, 所以第 III 段的近后备作用不被看好。

在 220kV 及以上电压的复杂电网中远后备常常灵敏不足, 不能对相邻线故障起完全的后备作用, 为此必须采取近后备。近后备有两种: 一是当主保护发出跳闸命令经一定时间后, 若其出口断路器不返回就判断为开关拒动, 跳开与拒动开关毗邻的断路器。这种近后备在主保护拒动时不起作用, 所以称为断路器失灵保护, 其动作延时长远小于本线阶段式保护的 III 段。另一种是主保护的双重化。这里主保护是指纵联保护。当初广泛应用载波纵联保护作为主保护。载波纵联保护常因通信方面的问题而未投入运行, 也是提出主保护双重化的一个重要原因。当时的载波纵联保护都不十分完善, 在原理上有缺陷。例如有的不适用于两相运行, 有的在故障后经短延时就被其振荡闭锁装置闭锁等, 所以就提出两套主保护应采用不同原理。现在仍有人主张这种观点。试想如果两套主保护在原理上各有缺陷需要互补, 那么在相应的情况下就只有一套保护能发挥作用, 也就谈不上保护的双重化。保护在原理上的缺陷都是显而易见的, 任何此类缺陷只要被发现, 微机保护都可消除。如果并不知道有何缺陷而坚持必须有在原理上不同的两套保护互补, 那么任何一种原理都是不可信赖的了。微机保护软件的程序不便逐项检查, 现在微机的运算速度极大提高, 为编程创造了宽松的环境, 程序是不会出错的。装置的开发要经过各种试验, 包括出厂试验和动模试验, 用户还可通过考察装置的业绩, 选用成熟的保护装置。由信赖性高、原理上相同的两套保护装置实现主保护的双重化应该是可以接受的。双重化的两套保护装置按或门输出是防拒动, 但增大了误动的可能性。所以每套装置应提高安全性以防止误动, 如在装置中设总启动元件, 由独立的 CPU 实现等。

现在高压线路上广泛流行有方向纵联保护和距离纵联保护两种原理的主保护。需要指出这是按机械型和静态模拟式保护的划分, 这两种保护反应的交流量相同。微机保护中的功能是由软件实现的。当用微机实现时在一套保护中就可以实现上述两种保护中的任何一项功能。因此微机保护不应再有方向纵联保护与距离纵联保护之分, 双重化的两套主保护是按“或”门输出的。如果说其中有一种原理的功能安全性差, 就应当抛弃, 因为再补充另一种原理的功能也不能提高安全性。如果两种原理中有一种原理的功能灵敏度高, 微机保护就可以采用, 如在距离纵联保护中补充零序电流方向判别元件。所以微机保护应将这两种保护合并为一种称为方向距离纵联保护。它兼有方向纵联保护和距离纵联保护的优点, 而没有任何一种保护的缺点。用两套方向距离纵联保护实现保护的双重化, 岂不比采用一套方向纵联保护和一套距离纵联保护更好吗?

如果一定愿意采用不同原理的保护实现双重化,可以采用一套方向距离纵联保护和一套分相电流差动纵联保护实现主保护的双重化。双重化的目的是防止保护拒动。两套纵联保护宜采用不同种类的通道或不同利用通道的方式。例如一套采用电力线载波通道,另一套采用光纤通道。又例如一套为闭锁式纵联保护,另一套为允许式纵联保护。双重化主要是防止硬件故障造成保护拒动。保护中通道属于硬件的范畴,两套保护采用不同的通道对提高保护的可靠性是有益的。

现在光纤通信技术发展很快,传送数字信号的速率已提高到 2MB/s,可以快速准确地传送三相电流的采样值。这实际上已将两侧 TA 的二次连接起来。因此输电线可以和发电机、变压器一样采用差动保护作为主保护,再配备延时动作的距离和零序电流保护作为相邻线路故障和单相高阻接地故障的后备保护。在大电站送出的长距离重负荷线上再配备突变量距离继电器以特高速切除近处故障。如此构成的高压线路微机型保护功能齐全,性能优越,动作原理简单明了,最有发展前途,用这样两套保护实现双重化也应当是合理的选择。

八、变压器保护的双重化

变压器有差动保护与过电流保护。长期以来认为后者是前者的后备。机械型保护时代两者是由不同的硬件实现的,而且那时两者的启动电流基本相等,因此后者是可以对前者起后备保护作用的。微处理器功能强大,一套微机变压器保护装置都具备两者的功能。微机保护装置将采集计算得到的同一电流值赋予过电流保护与差动保护。现在后者的启动电流小于前者,怎么可能在后者不满足时前者却能满足呢?所以在同一 CPU 的程序中过电流保护是不能作为差动保护的后备的。过电流保护的作用是在外部短路时防止长时间流过短路电流烧损变压器。

由于一套微机变压器保护包含了差动保护和过流保护,在装置调试时或装置拒动便没有保护,所以现在也主张变压器保护双重化。变压器差动保护的一个特殊问题是避开变压器的励磁涌流。习惯上常按避开涌流的方法对变压器差动保护分类。但若按此分类实现不同原理的保护双重化就错误了。实际上各种原理的涌流闭锁的元件都不十分完善。两套差动保护各用一种原理的涌流闭锁元件,在变压器空载合闸时反而增加了误动的可能性。反之,涌流闭锁元件是不会造成保护拒动的。所以宁愿采用原理相同的涌流闭锁元件实现变压器保护的双重化。实现保护双重化的原则应当是:为防止拒动的双重化应按“或”门输出其跳闸命令;为防误动的双重化应按“或”门输出其闭锁命令。

需要指出差动保护的可靠性(Dependability)是很高的,1995 年对全国主设备保护的调查就没有一次差动保护拒动的报告。在设备运行时差动继电器不间断地测量差电流。如果任何一侧 TA 二次断线或不正常,保护就要误动,这是天生的自动检测。微机差动保护可以更好地检测出故障。所以运行中没有误动的差动保护在设备故障时一定能正确动作切除故障。如果一次系统的冗余度较大,安排保护装置的试验没有困难,变压器保护是否要双重化值得商榷。为了防止万一整个 CPU 失灵等造成保护拒动,应提高线路保护的后备保护的作用。为了能对变压器绕组的轻微故障(绕组故障都是不对称故障)起远后备作用,可在线路保护中增设灵敏的负序过电流保护。

九、发电机保护的双重化

发电机保护如果拒动,没有任何相邻设备的保护能起后备作用。每套微机发电机保护都包含主保护与后备保护。一旦退出或拒动就丧失全部功能。因此大型发电机的保护宜双重化。双重化的基本原则与变压器的保护相同。大型水力电机有多种原理的差动保护,同时采

用两种不同原理的差动保护不是为了相互起后备作用。一种差动保护只要能反应其他差动保护都不能反应的故障就应当被采用。反之,一种差动保护虽然较其他任何一种差动保护能反应更多的故障,但如果它所能反应的故障已被其他几种保护联合起来的功能所覆盖,就没有必要再被采用。采用了双套保护装置后防止拒动的问题已解决,每套装置应把防止误动的任务放在首位。在上一节中已说明正常运行的差动保护是不会拒动的。装置双重化后更没有必要在软件中追求差动保护的双重化。尤其是在同一 CPU 程序中的功能是不能相互起后备作用的。如果说某一项功能可能单独拒动,那么也可能单独误动。由软件实现的功能也不是越多越好。如果有两项功能(即保护元件)对某一故障都能动作,但灵敏度不等,应当主要依靠灵敏度高的那项功能,灵敏度低的作用不大。

现在故障由后备保护切除的情况是很少的,所以后备保护是不需要双重化的。当每套装置中都同时包含了主保护和后备保护时,后备保护也随着双重化了。

十、单相高阻接地故障的保护问题

相间过渡电阻是电弧电阻。电弧电阻是非线性的,其数值约为系统阻抗(电源阻抗与线路阻抗之和)的 5%,对保护影响不大。两相短路经电阻接地的接地电阻可能较大,但相间距离继电器的动作不受接地电阻的影响。单相接地故障的接地电阻可能很大,影响接地距离继电器的精确测量,备受关注。

首先应对高阻界定。作者认为只有大于最小负荷阻抗的接地电阻才算高阻。对接地电阻大于此数值的单相高阻接地故障,接地距离继电器不能动作可由零序电流保护动作,延时跳闸。由于此时故障电流小于最大负荷电流,故障相电压下降也不多,又是单相故障不会威胁系统稳定,由零序过电流保护延时切除故障应是允许的。零序电流保护无选相能力,若要求单相跳闸怎么办?其实这很容易解决。因为当所有距离继电器都不动作时一定是单相高阻接地故障。此时的选相任务只是从三种单相故障中选出一种,而且也不要求快速选相,这就一定能十分容易准确地选出故障相。

由此可见,以系统的实际要求为准则就可使单相高阻接地故障时的距离和零序电流保护的问题迎刃而解。按照这一思路,差动纵联保护应分设相电流差动和零序电流差动保护。当差动电流大于最大负荷电流时相电流差动保护动作,选相跳闸;当差动电流小于最大负荷电流(即高阻接地)时由零序电流差动保护动作延时(100~200ms)跳闸。这样两种保护都易于避开外部故障时的差动不平衡电流,提高了安全性。单相高阻接地故障时若要求差动纵联保护选相跳闸也很容易实现。此时相差动继电器虽不能启动,通过对三相差动电流幅值的比较,就可选出故障相。增设零序差动保护不是为了快速切除故障,而是为了提高对单相高阻接地故障的灵敏性,是用时间换取灵敏度。

电抗继电器的动作与过渡电阻无关,此特性具有非常的吸引力,但是电抗继电器没有方向性,避不开负荷,尤其需要指出的是要求在高阻接地故障时能明确区分内部与外部故障是极其困难的。为了保证选择性不得不将特性直线下倾,其结果必然降低了对接地电阻的反应能力。电抗继电器一般只宜作为保护动作的辅助判据。

上面提出故障按接地电阻的大小分别对待,符合严重故障时保护动作快,轻故障时保护动作慢的原则,简单地解决了问题。

十一、距离保护的振荡闭锁

距离保护的振荡闭锁是一个较难的问题,但我国长期以来采取的短时开放保护的方法却

是十分简单而有效。这实际是一种很好的技巧,其缺点是稍后就将保护闭锁,在装置整组复归前发生故障也不能动作。微机保护作了改进,但仍保留了传统方法的优点。在故障(可能是区内也可能是区外)开始的最初时间内无条件开放保护,稍后有条件开放保护。对于不对称短路开放保护的条件是三相电流差别很大,对于对称短路说到底只有延时动作。为了减少在对称短路时动作的延时,最大限度地压窄距离继电器的动作特性,使其刚好覆盖电弧电阻。现在识别振荡的方法的共同缺点是不了解实时的振荡频率,因而只能按最长的振荡周期考虑,因而延长了动作时间。最好能实时测量振荡的滑差频率决定动作的延时。

不过振荡中发生故障的可能性是极小的。文献[1]称至少还没有振荡中发生故障的记录。振荡时系统电压也在振荡,大部分时间电压低于正常值,再发生故障的可能性当然减少。现在我国网架结构的加强,使系统振荡的事故大为减少,故障被切除后系统仍然是稳定的。在系统仍然保持稳定时距离保护应能整组快速复归,准备好再次无条件开放保护。简言之,只有在确实振荡时才闭锁保护,没有振荡就开放保护,这才是最好的振荡闭锁。

振荡时系统已失去稳定,保护的快速动作和单相自动重合闸等保障系统稳定的措施都失去其重要性。为了区分在出口和背后母线上的三相短路故障,距离继电器只能采取记忆电压为极化电压。但当振荡使两侧电动势相位差 $\delta = 180^\circ$ 时,记忆电压既可能与本侧也可能与对侧电动势同相位(取决于保护在系统中的位置)。如果是前者,在反方向故障时要误动;如果是后者,在正方向故障时要不正确动作,而且在振荡时系统频率不正常。在振荡中还没有又发生故障的记录。因此对距离保护只要求能有选择性地切除故障,允许稍带延时动作,也不要求实现单相自动重合闸是合理的。

需要指出,在振荡中 $\delta = 180^\circ$ 时在线路出口或背后母线上发生三相短路故障,距离继电器是不能保证正确动作的。同时满足这条件的几率极小,而且在电压为零时是不可能发生短路的,但在动模试验中可以制造出来。

十二、两相运行线路的保护

线路是不允许两相运行的,长期两相运行产生的零序电流会对铁道通信产生干扰,负序电流会引起发电机转子表层发热,引起发电机负序电流保护动作。线路只是在单相自动重合闸的周期出现两相运行。自动重合闸成功或重合于永久性故障而三相跳闸后系统就恢复三相运行。断路器一相偷跳后出现的两相运行也是短时的。偷跳后断路器与操作把手位置不对应也要启动自动重合闸。由于线路上并无故障,重合闸的成功率很高。此外还有断路器三相位置不一致保护,若不能恢复三相运行就跳开三相。

线路进入两相运行后有两种保护:①运行中两相发生的单相和两相故障的保护;②跳开相合闸于故障的保护。运行经验证明在此期间从未发生过相邻线故障,因此这两种保护都是按超范围整定的,从而达到快速切除全线故障。实际上,由于本线缺少一相,也不可能对相邻线的所有故障都起后备保护的作用。为了简化,在两相运行期间可以暂停后备保护,等到恢复全相运行再恢复。后备保护延时长,相邻线路一般都有两套主保护,短时停止不完全的后备保护应当是允许的。

要不要考虑在两相运行时发生振荡是一个有争议的问题。单回线两相运行时的传送功率约为全相运行时的60%~70%。只要在全相运行时两侧电动势的相位差小于 40° ,一相断路器偷跳是不会失去稳定的。此后该相断路器将自动重合,或者由断路器位置三相不一致保护