

从产生火烧连营事故谈电网继电保护原理的问题

王强

(广东顺德中专, 广东 佛山 528300)

摘要: 针对母线短路保护拒动和动作时间太长引起电站火烧连营事故, 从高压电网的短路保护方式/保护整定时间/电流/灵敏度/选择性等方面, 定量分析了目前继电保护原理以变压器后备过流保护作为短路主保护所存在的问题和症结。理出了应以瞬时速断为短路主保护, 以短延时速断为短路后备保护, 依据额定电流来整定消除保护死区, 并举例说明。比目前国内外采用的三种母线短路保护方式都要简单经济和实用。

关键词: 火烧连营事故; 短路保护; 过载保护; 短延时保护; 短路后备保护; 保护的选择性; 保护灵敏度

Discussion on the protection principle from a burnt down incident

WANG Qiang

(Shunde Middle Vocational School, Guangzhou 528300, China)

Abstract: Aiming at the incident of burnt down caused by bus short-circuit protection miss trip and movements of too long time, from the short-circuit protection mode / protection setting time / current / sensitivity / selective areas of high voltage power grid, this paper analyses the existing problems and the crux in using the transformer backup overcurrent protection as the main short-circuit protection in protection principle at present quantitatively. The new method is proposed with a specific illustration that using the instantaneous velocity off as the main short-circuit protection, using the short delay quick break as the reserve short-circuit protection, also setting and removing the dead zone of protection based on the rated current. Simulation results show that the method used is more simple, economic and practical than the three methods of bus short-circuit protection currently used at home and abroad.

Key words: accident of wide-area burnt down; short-circuit protection; overload protection; short delay protection; reserve short-circuit protection; selective protection; sensitivity protection

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2008)08-0098-07

1 电站火烧连营事故的起因和严重性

电站火烧连营事故多发生在高压电站 10 kV 和 6 kV 母线, 是由故障引起短路, 因保护拒动和动作时间太长导致烧毁连排开关柜和设备的重大恶性事故, 损失惨重。

保护拒动的原因除断路器/继电器故障外, 主要是保护整定出了问题, 即按最大短路电流来整定瞬时速断保护, 致使速断保护存在死区都不起作用。动作时间太长的原因主要是误将长延时的过流保护用于短路主保护和后备保护, 起不到速断作用, 即目前采用的变压器后备过流保护方式。长延时按理是用于过载保护的, 其保护时间很长。长延时的 GL 型过流继电器速断保护时间最小 10 倍时都有 0.5 s, 一般都在 1 s 以上, 不能在 0.1 s 内速断切除故障。即使有低电压闭锁保护, 要求 $<0.57 \sim 0.63U_n$ 才动作。在无

限大容量系统中短路时, 电压降低不大, 它也动作不了。

本来应该有三级短路保护覆盖交互配合, 即主保护短路速断 0.1 s+近后备保护短延时速断 0.3 或 0.5 s+远后备保护短延时速断 0.5 或 0.7 s。但目前不少电网保护的现状并非如此却形同虚设。开关柜的内部短路引弧试验标准, 最长耐受时间一般是 0.8 s。而火烧连营事故失保时间竟长达几分钟~十几分钟, 哪怕有一种保护起作用也不至于发生。

例如广东高州某 220 kV 变电站 10 kV 母线短路失保达 2 min 电弧才被熄灭, 烧坏 19 面开关柜直接损失 60 万。他们指出: 此类故障屡见不鲜; 现有的中压母线短路能在第一时间内切除故障的保护(即瞬时速断)在我国目前还是个空白^[1]。还有徐州电厂与威墅堰电厂 6 kV 母线短路失保都在 2 min 以上, 其低电压闭锁拒动, 烧坏 20 和 31 面开关柜直接损

失 60 与 100 万;江苏某电厂和浙江台州发电厂还发生烧毁整个 10 V 和 6 kV 系列开关柜损失更惨重。据 gzd1px.cn 资料统计 1992 年全国电网仅火烧连营事故就烧毁百余面开关柜,直接损失达 400 万,间接损失按 100 倍计就是 4 个亿。据中国电科院和国家电网公司统计全国每年电力系统中压开关柜就有 200 多面被烧毁。2004 年火烧连营事故又有上升趋势,主因还是没有母线保护,直至烧坏变压器。可见是具有普遍性的。

如果把保护装置比作“武器”,保护装置的整定好比武器的“瞄准系统”。武器再好再先进,整定“瞄准”不好也无济于事。而常规保护装置只要适用整定的好,照样能发挥应有的作用,也不至于发生火烧连营这样的恶性事故。

2 事故的根结和继电保护原理的问题

为什么高压电网会累累发生火烧连营事故,长期得不到控制和解决,而低压系统却很少发生,这不是偶然的,根由何在?是常规保护的落伍,还是整定不好的原因?短路保护方式的选择/主次/搭配/计算公式即继电保护原理是否存在问题?值得深思和细究!即使保护是用微机控制,还是要由保护原理的指导来整定参数的大小。如果原理发生了偏差,用微机控制也会出问题。如今火烧连营事故上升的趋势正说明这一点。高压电站采用的短路保护方式和整定方法涉及到继电保护原理,现在就来看看目前的《工厂供电》《继电保护》教科书和《电力设计》手册,它们所采用的保护方式和整定原理是否存在问题。

2.1 短路保护方式

教科书中高压系统常用保护按顺序有:过流保护,又分反时限过流(其实就是长延时)和定时限过流(其实就是短延时);有速断保护,又分无时限速断/无选择速断/延时速断(其实就是短延时);有三段式保护:无时限速断+延时速断+过流保护(一般指长延时,本该用于过载保护);有低电压闭锁保护;还有距离保护。

反时限过流保护:教科书中没有说清哪个保护是主保护和后备保护,也没有讲明过流保护是用于过载还是短路(要由整定电流的具体值和时间的长短来判断)。过流两字用的含糊不清,令人误解成过载保护,又好象过载与短路保护混合在一起。也许它的保护特性设计就是这样含糊,这个原由只有原创者知道。把过流保护放在前面并说过流保护时间 >1 s 时才用速断保护,还说在速断保护的死区内,过流保护为基本保护。可见其本意是用于主保护。

按线路尖峰涌流来整定说明是用于短路保护。而且是用阶梯原则的多级过流保护来后备配合,即目前采用的变压器后备过流保护方式作短路的主保护。其保护时间最少都 >0.5 s,一般都在 1 s 以上,按理不适合短路保护尤其是主保护要求的 <0.1 s 速断,只适合过载保护。GL 型过流继电器的反时限特性用于过载保护时间太短,用于短路保护又太长。过流/速断两段保护特性都不理想,作用不大,没有使用的意义。

书中承认过流保护的缺点:动作时间的整定配合较麻烦,误差较大。当短路电流较小时,GL 继电器的瞬动部分难以进行配合;其动作时间可能很长,延长了故障持续时间;失去后备保护作用。造成了越靠近电源处短路电流越大,反而保护动作时限越长的怪现象。如果现代微机控制中的过流保护转盘仿真仍按此原理设计还是会出火烧连营事故。反时限过流保护只是因为一个阶梯原则而被原创者看中,敬尊为短路保护的主角。而定时限保护的短延时也具有阶梯原则,整定比它还简单,末级动作时间才 $0.2\sim 0.5$ s。

定时限过流保护:书中没有细述它的主次和特性适途,说它的缺点也是靠近电源处保护时间较长。将其作为候选主保护,有时与过流保护混合使用,并非专门直接用于后备保护。其实它与延时速断保护都属于短延时保护,只是整定电流值不同。延时的作用就决定了它只能用于后备保护。它的后备保护动作时间其实比反时限过流保护还短,却没有被看好而让位于反时限过流保护。教科书原理没有认识到时间就是生命的重要性!

无时限速断和无选择速断保护:它们的名词区分没有实质差别,其实二者都没有时限和选择性。无时限就是继电器的固有动作时间约 $0.02\sim 0.03$ s,加上断路器固有动作时间约 $0.05\sim 0.06$ s,等于瞬时速断保护时间 $0.07\sim 0.09$ s 即 <0.1 s。无选择是指上下级保护不能依次动作和返回,与整定电流值的大小有关,并非两种保护。它们都属于瞬时速断保护。教科书把它作为辅助与后备保护,认为当过流保护 >1 s 和短延时保护 $>5\sim 7$ s 时才用速断保护,是小看了它的作用。它才应该是短路保护的主角。教科书承认速断保护存在死区,只能保护到线路的一部分 $\leq 15\sim 20\%$,许多情况下灵敏度达不到要求。造成死区的原因是人为的按末端最大短路电流来整定,怕带来无选择性速断。理由是:只有这样才能避免下级速断保护区线路首端发生三相短路时可能的误跳闸。其实这是误解,完全可以消除死区并将上下级的整定按选择性的电流要求来错开,

依次跳闸,再加重合闸功能。总比速断保护有死区等于末端没保护要好。速断保护宝贵的瞬时性没有被教科书所珍惜和意识到,却因为一个选择性的理由而被轻易丢弃在配角的位置冷落至今。

延时速断保护:教科书采用它是填补速断保护死区的辅助保护,并非专门直接用于后备保护。其实它与定时限过流保护都是短延时保护。只不过定时限过流保护的整定电流值是按避开线路尖峰涌流,而延时速断的整定电流值是按末端短路电流(这是个误解)。使到延时速断保护在许多情况下灵敏度不够,即也存在死区,也未必能保护到末端。书中说延时速断与下级速断配合如果灵敏度不够,可与下级延时速断配合。那如果灵敏度还不够,再与谁配合呢?都按末端最大短路电流整定,灵敏度是不可能够的。

延时速断保护最小时间为:延时 0.5 s + 断路器固有动作时间 $0.05\text{ s} = 0.55\text{ s}$, 较 $>0.1\text{ s}$, 但比过流保护时间 $>1\text{ s}$ 要小多了。用它作短路主保护虽然不行,但总比反时限过流保护要好。短延时速断保护只能用于后备保护,这是延时的作用所决定的。它应该对短路后备保护起着很重要的作用。教科书却忽视了它应有的价值。

低电压闭锁保护:包括电压速断和带时限低电压闭锁保护,它是在前面的保护不能满足的情况下才使用。它的电流整定没有死区(按 I_{30}),但要求电压降到一定程度才能动作,即电压的整定又带来死区。也有与速断相同的选择性原由,也不能保护线路全长。对有限容量系统中短路才有作用。如果前面的保护能满足,它则成为多余。它只能是陪衬,因为短路的主要参数反映是电流值增大。

距离保护:书/册中距离速断保护整定同样也存在死区,它也是按线路阻抗即等同于按末端短路电流来整定,只能保护到线路的一部分。如果它仍采用反时限过流保护为主保护和后备保护,也会造成同样的事故。只不过线路的故障率比母线要低,损失不如母线开关柜火烧连营严重。如果能按包括负载阻抗来考虑整定,即相当于按额定电流的倍数来整定,则没有死区。保护的会更长,效果会比现状好。

短路保护综述:由上可见,主要的是三段式保护,它们互相配合。如果三段式保护能满足要求,其它的保护意义都不大。这从低压断路器集三段式保护于一身就能明白其中道理(其长延时段特性主要用于过载保护),这也是低压系统很少出现火烧连营事故的所在。短路保护按顺序应该是:瞬时速断 + 短延时速断后备(二级)。过载长延时可作为顺带

的再后备保护,但已失去速断作用,对短路保护意义不大,只对过载保护有用。它们的保护范围都应该覆盖到下一段或末端故障点。能否覆盖的到,要看电流值的整定如何,覆盖不到就是失保。所以,应该把瞬时 0.1 s 速断作短路主保护,消除死区才是正道。

2.2 保护整定

明确而概括地说,保护整定主要是针对二个参数:时间的长短和电流值的大小,它直接影响到保护的灵敏度和选择性。教科书和手册没有把各种保护的这二个参数讲清楚,其定论令人疑雾重重,结果也不理想。比如长延时/短延时速断/瞬时速断保护整定的电流/时间值各起什么保护作用,如何能保证瞬时切除短路故障又没有死区?如何上下级交互后备配合?尤其是短延时保护主要起什么作用,其电流/时间如何整定?整定电流和时间的依据是什么?整定电流值究竟应该按额定电流 I_N 还是按短路电流 I_k ? 校验最小灵敏度的短路电流是用单相还是二相?首端还是末端?最大还是最小?为什么速断保护要按比末端最大三相短路电流还大 $1.2\sim 2$ 倍来整定,却按首端最小二相短路电流校验灵敏度,末端保护的灵敏度能满足么?那母线上的进线总开关应该如何整定和校验灵敏度呢,它还能否保护到母线短路?既然速断保护有死区连自己的末端都保护不到而末端长延时过流保护的时间又 $>1\text{ s}$,它们的作用还有什么意义?只有等着火烧连营。电流值的整定究竟能不能消除死区保证到末端的最小保护灵敏度?为保证上下级和同线路首尾都有断路器时的选择性,电流/时间的参数值应该如何整定?下面来逐一分析探讨,看能否理出解决的办法。

2.2.1 时间

教科书中长延时的过流保护时间都较长,一般末级都在 1 s 以上,用多级过流保护后备配合的时间按阶梯原则就很长了(这里很奇怪,是按级差 0.7 s 逐级往上整定)。而开关柜的内部短路燃弧最长耐受时间一般是 0.8 s (母线室按 0.1 s),所以不适合短路保护。其 GL 型过流继电器的保护特性从设计上讲是不理想的,是为长延时用于短路保护而设计的,10 倍速断动作时间是 $0.5\sim 4\text{ s}$ (有的规格达 $8\sim 16\text{ s}$) 均 $>>$ 过流继电器速断动作固有时间 $0.02\sim 0.03\text{ s}$ 。其反时限动作时间查最小的 10 倍 0.5 s 曲线,1.2 倍时为 3.2 s , 2 倍时 1.6 s , 3 倍 1 s , 4 倍 0.8 s , 5 倍 0.7 s , 6 倍 0.6 s , 7 倍 0.56 s , 8 倍 0.53 s , 9 倍 0.51 s 。即当速断整定倍数 <10 倍时,其速断动作时间将长于 10 倍的动作时间。整定倍数时间的折算也冗肿,要由其它倍数时间粗略估计出曲线再

折算成 10 倍的时间。照理设计和应用时应该按各级线路负荷电流来过流整定, 短路时速断在 10 倍动作, 这样时间可为最小值 0.5 s。其它过流倍数和后备保护倍数直接查 10 倍 0.5 s 曲线得出, 无须估计折算, 简单直接。可原本很简单的事却被弄成这么繁琐又不准确。本来, GL 感应系统的反时限转盘特性就该用于过载保护, 电磁系统的速断特性应该独立瞬时的用于短路保护, 相当于两段式保护。可见 GL 过流继电器的两段保护特性时间都不理想, 速断太长, 反时限用于过载太短, 用于短路又太长。应该都没有实用价值。现代微机保护采用的过流反时限 ANSI 和 IEC 标准特性及转值仿真与此类似, 因此带来火烧连营事故长期得不到控制和解决。

书中短延时保护的延时按阶梯级差 0.5 s 整定, 现在要求继电器的延时为 0.2/0.4/0.6 s。其实短延时保护也是按阶梯原则整定的, 总时间比长延时要短, 却没有被专门直接的用于短路后备保护。就是用它作主保护也比过流保护的时间短。延时级差 0.2 s 的作用其实就是为了保证后备保护的选择性。

瞬时速断保护的时间由继电器固有动作时间 0.02~0.03 s, 加上断路器固有动作时间 0.05~0.06 s, 等于 0.07~0.09 s 即 < 0.1 s。从时间上是能够满足短路保护要求的。

至此可以明确, 短路故障必须首先在 0.1 s 内瞬时切除, 后备切除的延时时间应该尽量短, 一般为 0.1 s+0.2/0.4/0.6 s。可见长延时是不能胜任的, 只能是瞬时速断为主+短延时速断后备(可以二级)。教科书原理把长延时作为短路主保护和后备保护, 从时间上讲就是造成火烧连营事故的主要症结之一。

2.2.2 电流

教科书中反时限与定时限过流保护动作电流 I_{op} 是按避开尖峰涌流来整定即用来短路保护, 如按额定电流来整定就应该是过载保护。低压断路器长延时段和热继电器就是用于过载保护的, 都是按额定电流整定的。

过流保护还有一个整定条件是可返回电流应 > 尖峰涌流。应该是上级保护才有可返回的功能要求, 末端保护整定时不用。这一点在整定公式中有混淆, 应该注明返回系数的取舍场合。

书中速断保护按比末端最大三相短路电流还大 1.2~2 倍的可靠系数来整定, 使保护存在死区, 不能保护到末端母线。

短延时速断和无选择速断也是按比下级末端最大三相短路电流还大 (1.1~1.15) (1.2~2) 倍来整定。在许多情况下灵敏度不够, 尤其是在最小运行

方式和最小单相短路时, 保护也存在死区, 未必能保护到末端母线。

要想保护到末端, 整定值应该比末端短路电流 I_k 小, 保护才有可能动作, 还要避开线路尖峰涌流 I_{pk} , 只能是介于 I_{pk} 与 I_k 之间。按理应该以避开线路尖峰涌流 I_{pk} 为下限取值, 使取值最小, 保护范围最长, 灵敏度才最高。因此整定只与额定电流有关, 一般按额定电流 3~10 倍整定即可避开线路和单台电机尖峰涌流, 短路电流是额定电流的几十倍以上, 短路时肯定能动作。所以按额定电流的倍数整定是关键。教科书原理按大于末端最大三相短路电流来整定速断保护的整定值, 人为造成保护死区, 从电流整定上讲就是造成火烧连营事故的主要症结之二。

速断保护对单台电机可按 10 倍额定电流 I_n 整定(电机启动电流为 4~7 I_n), 对线路可按 5 倍 I_n 整定(一般线路启动尖峰电流为 2~3 倍 I_n , 变压器励磁涌流为 2~4 I_n)。短延时速断保护只对线路, 可按 2~4 倍 I_n 整定(是下级整定值反映到上级 I_n 的倍数)。这样不但可以保护到末端消除死区, 还能满足末端最小单相短路时的灵敏度, 并可延伸到下级作后备保护! 目前所有低压断路器的三段式保护都是按额定电流的倍数来设计整定的, 保护没有死区还可以延伸, 很少出现火烧连营事故, 这就是实证。

例如低压断路器瞬时保护整定的范围是 4~16 倍 I_n , 而高压微机保护过流整定的范围却从 1 至高达 50 倍 I_n 。德国西门子公司的微机过流保护整定的范围也高达 35 倍 I_n 。定这么高是否有必要, 保护还能否起作用? 高压继电保护装置与断路器多数是分体配置的, 其继电保护受继保原理误区的束缚也就比低压断路器要大。

按额定电流的倍数整定还有一个优点, 额定电流的计算误差比短路电流要小, 受系统运行方式变化的影响也小, 保护的可靠性也相对较高。比如系统最小方式运行时, 短路电流将减少。按最大方式短路电流整定的保护, 其可靠性和范围将大受影响, 甚至拒动。而按额定电流整定的保护则影响不大, 因为最小短路电流也远远大于额定电流, 最大额定电流是基本不变的。这一点非常重要, 教科书没能意识到。

短延时速断保护的整定电流范围为 2~10 I_n , 要由下级的整定电流值折算成上级 I_n 的倍数来整定(低压断路器设计为 I_n 的整数倍)。整定倍数定多少, 以哪一级的 I_n 倍数来整定值得研究: 从线路额定电流的级差 5~10 倍来看, 很难实现三级短延后后备

保护,只能是两级,整定倍数只能定在下级而不是末级。因为5~10倍的 $I_{n\text{下级}}$ 已接近和小于 $2I_{n\text{上级}}$,一般不超过2~4倍。即只能每二级交互后备保护。短延时整定倍数大,不利于末级后备保护。整定倍数小才能尽量兼顾到末级短路的后备保护,但又与线路长延时的过载保护交互冲突。因为长延时已涵盖了1.2~10倍 I_n ,只是时间太长。如果避开长延时,又起不到短延时的后备保护作用。在这交混的范围很难区分是下级的短路电流还是上级的过载电流,因此肯定要放弃一部分长延时的过载保护功能。笔者认为线路长延时过载保护不能不要,应控制在一定的范围。可见短延时整定的电流值就需要权衡上下级配合的灵敏度与选择性,整定过程更具有技术性。

变压器的过载保护整定:教科书是用定时限保护,时间整定为10~15s,电流整定为1.2~1.25 I_n 。按理应该用反时限长延时保护,电流按 I_n 整定。而低压断路器和热继电器的过载保护特性是:过载整定值为1倍 I_n ;当过流1.2倍时20min动作;1.5倍时2min动作;3倍时查样本曲线为20s动作(有些书和场合要求此参数);6倍时5s动作。看来二者保护特性有冲突,即当变压器过载1.2 I_n 时,低压侧总断路器需要20min才动作,而高压侧保护10~15s就越级跳闸了。失去了选择性,让人难以理解和接受。线路的过载长延时保护是否还需要?用短延时保护取代行不行?或是把过载长延时保护限定在1.2~2倍 I_n 的范围,时间可参考低压断路器来设计,使保护特性与低压侧相协调。2~4倍范围由短延时保护来动作。值得大家探讨。

2.2.3 灵敏度

保护灵敏度实际就是保护动作的可靠度,是最小短路电流值与整定电流实际值的比值。灵敏度 S_p 与返回系数无直接关系,与电流互感器精度误差3%和继电器精度误差1~1.5%以及短路电流计算误差有关,总精度误差系数一般取10%已足够。即对远后备保护要求能动作,至少应保证远后备保护的 $S_p > 1.1$,能 > 1.2 更好。对应的主保护 S_p 相应更大,不然远后备保护就不能动作。 $S_p < 1$ 则保护拒动。教科书中灵敏度 S_p ,主保护为1.25~1.5和2(速断);后备保护为1.2,笔者认为 > 1.1 也就够了。依据额定电流来整定后,灵敏度 S_p 的要求可以减小。还因为高压系统短路冲击电流有效值在速断动作时间0.08s内的平均值经计算为1.22 I_k ,即使灵敏度为1都有1.22倍的裕度,灵敏度为1.1就有1.344 I_k 的裕度,足够保护动作。低压系统短路冲击电流0.08s内平均有效值计算为1.023 I_k 。

教科书承认许多情况下速断保护与短延时速断保护的灵敏度不够。它们都是按大于末端短路电流来整定的,保护不到末端,末端灵敏度 S_p 肯定 < 1 。却按首端最小二相短路电流校验灵敏度,这就有些牵强,属于偷换概念。科学应该实事求是,不满足就正说明它存在问题,应该如何去解决它才对。如果按额定电流的倍数整定,末端保护灵敏度肯定能满足,甚至末端最小单相短路电流的灵敏度也够了。不但可以保护到末端,而且能延伸到下级作后备!因为短路电流 I_k 比额定电流 I_n 大几十倍以上,如按额定电流的5~10 I_n 整定,以短路电流校验,灵敏度应该是几倍以上,满足1.2~1.5倍应该是轻而易举。就是用最小单相短路电流校验,灵敏度也游刃有余。

保护灵敏度应该在最小单相短路时也能保证可靠动作。最小单相短路电流 $I_{k\text{min}}^{(1)}$ 的计算,书/册中无此参数,都是用二相短路电流 $I_{k\text{min}}^{(2)}$ 来求二相短路的灵敏度,并不是最小的单相短路电流,因为即使有最小单相短路电流值也满足不了其灵敏度。按额定电流的倍数整定以后,这个值的计算就有必要了。低压常用TN-S系统,其最小单相短路电流的计算,笔者推导为: $I_{k\text{min}}^{(1)} \approx 0.7 I_{k\text{min}}^{(3)}$ 。

2.2.4 选择性

断路器与继电保护的选择性是具有电流/时间可调整的保护功能,使上下级保护能依次动作和返回。短延时保护具备选择性功能。瞬时保护要想满足选择性,只能按额定电流的大小分级配置断路器,不能同置和倒置,即上级的额定值整定值应 $>$ 下级。保护的选择性其实有二层要求:

延时要求:下级先动作,如拒动,上级再延时后备动作,短延时一般0.2~0.6s。

电流要求:下级动作后,上级应能返回。即此时下级的动作电流值应在上级继电器的返回值以下才能保证上级返回。

上级电流整定值与继电器返回系数 K_r 和精度误差有关,即上级电流整定值应 $> K_r$ 的倒数值。继电器的 K_r 一般为0.85,其倒数值为1.17647。按额定电流 I_n 的倍数5~10倍整定时,上级一般大2倍 I_n 即可保证能返回,如7/5倍为1.4,8/6倍为1.333,9/7倍为1.286,10/8倍为1.25,11/9倍为1.222,12/10倍为1.2,均 > 1.17647 。在11/9倍时精度误差裕度为 $1.222 - 1.17647 = 0.04575$ 即4.57% $>$ 互感器和继电器精度误差3%。综合考虑1.25足够了。即上下级错开按 I_n 的7/5~11/9倍整定,可满足返回要求。速断保护和短延时后备保护如按一般线路额定电流的级差5~10倍来分别整定,均自然 $>$

1.25 倍可确保返回。

整定计算公式中后备保护和上级保护要考虑返回系数,而末端保护整定则不用,可提高后备保护的灵敏度。这一点教科书中混淆,没有注明。书中无选择速断保护的整定电流值是下级的 1.1~1.15 倍即 <1.176 ,也说明是无选择。速断保护和后备保护整定值按选择性的电流要求,上级应取 1.25 倍下级的整定值。书中高压速断保护也没有注明,低压为 1.2 倍。 $1.2-1.17647=0.02353$ 即 2.35% $<3%$,精度误差裕度不太够,会影响到选择性。按理短延时保护的整定电流值可与下级相等,因为它有级差延时 0.2~0.6 s 保证选择性,但考虑精度误差裕度一般应 ≥ 1.1 倍下级的整定电流值。短延时保护的整定电流值越小,保护到下级的范围就越长,后备灵敏度也越高。

在目前的微机保护中,返回系数取 0.95,倒数值为 1.0526,其微机保护精度误差 5%。为保证选择性,此时上级应 >1.1026 倍下级的整定电流值。虽然它有利于上级保护的选择性电流要求,但对上级保护的返回时间更加不利。

返回时间:速断保护满足了选择性的电流要求后,上级的返回时间未必充足。从短路电流上升的时间来看,短路冲击电流有效值在 0.01 s 达到最大值 $1.5I_k$ 。继电器固有动作时间为 0.02~0.03 s,下级速断切除故障的时间为 0.07~0.09 s,即上级速断应在 0.07~0.09 s 后返回。短路电流越大,线路上下级额定电流和整定电流的级差越小(如上级取 1.25 倍),线路整定电流倍数越小(相当于短路电流增大),上下级保护依次动作的时间间隔 Δt 就越小。上级返回的时间就越不够,选择性就越差,上级难免会不返回的依次空载跳闸。即使这样,再配合重合闸功能恢复供电,总比速断保护有死区不跳闸要好。经计算,当短路电流为 10~20 I_n ,上下级额定电流 I_n 的级差为 5~10 倍,线路速断保护按 10 倍 I_n 整定时, Δt 为 0.02~0.07 s;按 5 倍 I_n 整定时 Δt 为 0.01~0.03 s,一般能满足选择性的返回时间要求。当级差为 1 倍时(同线路),上下级按 7/5 倍 I_n 整定, Δt 为 0.002~0.005 s;上级难返回,虽然能保证选择性配合,但会顺序随后空载跳闸,近似于双断口开断。应配合重合闸。

结论:综上所述,当母线短路,按教科书的目前保护方式和整定,即用过流主保护和按短路电流整定;其结果是造成:速断保护死区,短延时速断保护死区,过流保护时间长或又出故障,后备过流保护时间更长;低电压闭锁保护又不动,那只能带来——火烧连营!分析得出的解决办法是:以瞬时

速断为主保护,按上下各级线路额定电流 I_n 的 5~10 倍整定消除死区;以短延时速断为后备保护,按线路 I_n 的 2~4 倍整定避开尖峰涌流;按选择性的电流要求错开上下级的整定值并配合重合闸功能。

2.3 例题

教科书[2]例 6-5:某厂降压变电所一台 10/0.4 kV, 1000 kVA 变压器, $I_N \approx 60$ A。已知变压器低压母线三相短路电流 $I_k^{(3)} = 13$ kA,折算到高压侧电流为 520 A 和继电器电流为 26 A。高压侧电流互感器变比 100/5=20,采用 GL-25 过流继电器,二相二继接线系数 1。试整定反时限过流保护和速断保护的動作电流/时间/速断倍数。

原计算:过流按 1.3 倍的尖峰涌流(为 2 倍额定电流)整定为 9 A,速断按 1.5 倍短路电流整定为 39 A,10 倍动作时间取 0.5 s。短路时过流保护实际动作时间应该是:过流倍数 $26/9=2.89$ 倍,查曲线得 1.1 s,远大于 0.1 s,也超过 0.8 s。低压母线肯定会烧毁。如果用短延时保护才 0.2~0.5 s 也 <0.8 s。速断整定有死区还保护不到低压母线,只能保护到高压侧一部分。算其末端灵敏度 S_0 只有 $26/39=0.667$,保护不动作。就算到动作点的时间也要:速断倍数 $39/9=4.33$ 倍,查曲线得 0.75 s,也远大于 0.1 s,而且动作点灵敏度只有 1。低压母线即使有进线总开关,它如果还是按母线短路电流整定速断保护,保护仍然不会动作。只有整定值比短路电流小才有可能动作。

新计算:如果采用瞬时 0.1 s 速断保护,不用 GL 继电器,按额定电流的 5 倍速断整定,为 $5 \times 60/20 = 15$ A,末端灵敏度 $S_0 = 26/15 = 1.733 > 1.5$,足够保护到低压母线。就是低压母线发生最小单相短路电流,其保护灵敏度为 $1.733 \times 0.7 = 1.21 > 1.2$,也够了。增加短延时后备保护按额定电流 I_n 的 3 倍整定,为 $3 \times 60/20 = 9$ A,末端灵敏度 $S_0 = 26/9 = 2.89$,足够保护到低压母线并延伸到下级。延时可按级差来取 0.2~0.4 s。短延时时后备保护电流的整定要看尖峰涌流倍数和下级的末端短路电流的大小(例题未给出),即后备保护灵敏度覆盖范围的大小来定。整定过程需要权衡。如果低压母线有进线总开关来速断保护,它可按总负荷电流 I_{30} 来整定,要与变压器额定电流 I_n 错开 1.25 倍,以保证选择性依次跳闸。一般 $I_{30} < I_n$ 。

由此可见,并非常规保护不行,而是高压系统继电保护原理存在问题,即用错了主保护和速断保护整定有误,保护时间太长,使主保护和后备保护均失去速断作用。只好眼睁睁任其火烧圆明园。高压继电保护原理从外国学来以后,应该实事求是

的消化和扬弃。

3 目前国内外采用的母线保护方式对比

由于上述原因,目前采用的变压器后备过流保护方式不能达到速断要求。国内外还采用了微机控制的利用馈线过流闭锁进线速断保护方式,其动作时间为0.3~0.4s,这与短延时速断后备保护时间0.3或0.5s相当,并无多少优越。还是不能满足<0.1s的要求,还要增加线路设施资金投入。因此国外又推广利用电弧光与过流闭锁母线保护方式,并引进到国内大力推崇。虽然短路保护时间能控制在0.06~0.08s<0.1s,这与常规的电流瞬时速断保护时间不相上下,并没有快多少。还要增加大量弧光传感器检测控制系统装置的费用,说明国外也没有解决好这个问题。还有母线差动保护也是在速断保护有死区不能满足的情况下才使用的,是类同变压器内部故障的差动保护。可母线有很多路出线,要想检测总输出电流,它等于各出线回路电流之和,各电流互感器变比与误差都不同。差动保护的原理/计算/检测/整定/装置/接线/维护都很复杂,也很容易引起误动作,投资也大。整定动作电流也是避开尖峰涌流接近 $5 I_n$,保护动作时间也没多少优越。从设计理念讲,简单就是好。只要把目前的过流主保护改成瞬时速断主保护并按上下各

级线路额定电流 I_n 的5~10倍整定消除死区,以短延时速断为后备保护并按线路 I_n 的2~4倍整定避开尖峰涌流,按选择性的电流要求错开上下级的整定值,配合重合闸功能。问题就解决了,不用增加投资,简宜实用。可以相信,仅此一举简单的改动全国每年就可减少损失上亿元。其经济和社会效益是深远的。

以上浅见为引玉之砖,供电力部门有关院校和大企业专家参考借鉴指正。

参考文献

- [1] 车伟扬,等.中低压开关柜母线快速电弧光保护装置的应用[J].电世界,2006,(8).
- [2] ISBN-7-111-06209-4.刘介才/戴绍基.工厂供电(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [3] 苏文成.工厂供电(第2版)[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [4] 华中工学院.电力系统继电保护原理与运行[M].北京:电力工业出版社,1981.
- [5] 卓乐友.电力工程电气设计手册[M].北京:水力电力出版社,1990.

收稿日期:2007-09-03; 修回日期:2007-10-16

作者简介:

王强(1956-),男,高级工程师,从事中压开关设备开发和工厂供电教学研究。E-mail:wangqiang@sdzz.net

(上接第58页 continued from page 58)

预测与经济发展紧密联系起来,通过寻求负荷变化与这些因素相联系的典型模式对负荷的未来走势进行预测,克服了单纯从数学模型角度进行负荷预测的局限性。由于聚类算法运算速度快,神经网络算法易于并行处理,所以使网络训练能快速达到预测精度的要求,并取得了较为理想的预测结果。并且本文采用的模糊竞争学习算法克服了网络输出结果二值性的缺陷,加快了算法的收敛速度。实例分析表明由该方法得到的负荷预测结果精度更高。

参考文献

- [1] 顾洁.电力系统中长期负荷的可变权综合预测模型[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(6):56-60. GU Jie. Study on the Varied Weight Synthesis Model of Mid-long Term Load Forecasting in Power System[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(6): 56-60.
- [2] 游仕洪,程浩忠,谢宏.应用模糊线性回归模型预测中长期电力负荷[J].电力自动化设备,2006,26(3):51-53. YOU Shi-hong, CHENG Hao-zhong, XIE Hong. Mid-and long-term Load Forecast Based on Fuzzy Linear Regression Model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(3): 51-53.

- [3] 牛东晓,曹树华,赵磊,等.电力负荷预测技术及其应用[M].北京:中国电力出版社,1998.
- [4] 杨争林,唐国庆,宋燕敏,等.改进的基于聚类分析的超短期负荷预测方法[J].电力系统自动化,2005,29(24):83-86. YANG Zheng-lin, TANG Guo-qing, SONG Yan-min, et al. Improved Cluster Analysis Based Ultra-short Term Load Forecasting Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 83-86.
- [5] 高新波.模糊聚类分析及其应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [6] Pal N R, Bezdek J C, Tsao E C K. Generalized Clustering Networks and Kohonen's Self Organization Scheme[J]. IEEE Trans on NN, 1993, 4(4): 549-557.
- [7] Kosko B. Fuzzy Engineering[M]. New York: Prentice-Hall Engle-Wood Cliffs, 1996.

收稿日期:2007-09-18; 修回日期:2007-11-29

作者简介:

岳璐(1982-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统负荷预测;E-mail:yuelu1982@hotmail.com

张尧(1948-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与稳定,电力市场,电网规划。