

巨型水轮发电机主保护配置的优化

李振华 西北勘测设计研究院 西安 (710001)

【摘要】 概述了巨型水轮发电机的结构特征及其内部短路电流的分布特征,据此提出了几种适宜巨型水轮发电机应用的主保护判据和三种保护方案。

【关键词】 多分支绕组 分布中性点 不平衡电流 并联接线多分支差动 不完全差动 功率角

1 巨型水轮发电机的结构特征

现代巨型水轮发电机很多采用多分支分布中性点结构型式。由于发电机中性点侧没有常规的分相引出线排,因而无法装设常规的发电机纵联差动保护和发变组大差动保护。

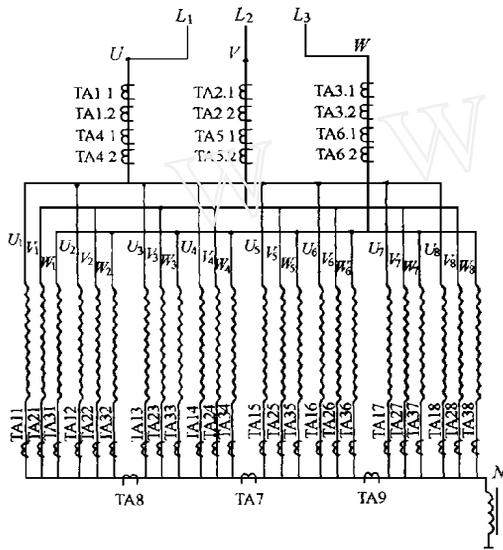


图1 多分支中性点小电流引出结构发电机电流互感器配置

2 几种新型主保护接线原理及基本特性

2.1 电流互感器二次回路并联接线的多分支差动保护

所谓“多分支差动保护”,是在多分支发电机每个分支绕组中性点侧引出线上均装设一组变比适当的电流互感器,(如图1中的TA11……TA38),每相TA的二次绕组按奇、偶数对称分为两组且并联连接,然后采用两只差动继电器,与发电机出口侧的同名相电流互感器(如图1中的TA1.1或TA2.1、

TA3.1)构成分相差动保护。

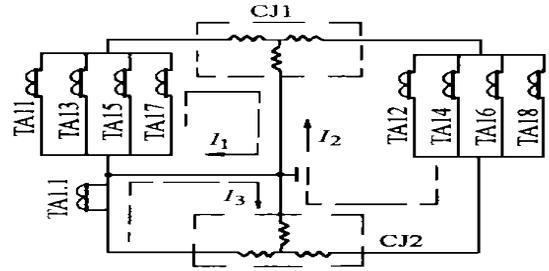


图2 八分支绕组巨型水轮发电机的U相差动保护原理接线

需要说明的一个问题是,在此接线中,虽然保护系统引入了各个分支绕组的二次电流和发电机出口侧同名相总电流,但保护装置需要进行采样计算的只要三个电流量,即 i_1 、 i_2 、 i_3 。当发电机内部发生短路事故时,流经故障分支绕组的部分匝绕组的故障电流,不仅使其本支路相关匝绕组的匝电势的大小和相位发生改变,而且由于相邻各分支绕组之间存在自感和互感,短路电流产生的强烈的局部性的电枢反应,会使与故障绕组相邻的一些无故障分支绕组的部分匝电势的相位和大小也发生改变,这种改变的结果使发电机三相中各相关分支绕组电流的数值和相位发生改变,所以,发电机内部无论发生何种短路(包括三相短路)都是不对称短路。

鉴于多分支水轮发电机内部短路电流的上述分布特征,当故障电流经TA引入并联接线的新型差动保护后,由于各分支电流互感器二次电流的相位和大小有很大差别,因而保护装置 CJ_1 和 CJ_2 均能动作。需要强调说明的是:不仅不同相别的分支绕组间短路(即相间短路)差动保护能可靠动作,而且同相不同分支绕组之间短路及匝间短路时保护也能可靠动作,而这种功能是常规发电机差动保护所不具备的。另外,理论计算和真机试验都证明:在相同定值下,对于上述短路故障,多分支新型差动保护装置

的灵敏度高于常规差动保护。^[1]

运行证明,只要采用合理的设计方案和安装方法,机内装设分支电流互感器是安全可靠的。例如,安装在龙羊峡电站4台320MW水轮发电机上的分支绕组电流互感器(每台机18只),从1986年投运至今,共运行40多年/台,保护系统并未发现任何异常。

2.2 不完全差动保护

由于人们对多分支水轮发电机在分支绕组上安装较多的电流互感器的种种担心,为了减少风险,继电保护工作者提出另一种折衷方案,选择在发电机三三相的部分绕组中性点侧装设少量的分支电流互感器,并采用适当的变比,使其与发电机出口侧TA按常规差动保护接线方式构成发电机差动保护,即所谓“不完全差动保护”。

虽然这种保护方案也能构成发电机内部短路的主保护,但是,要害的问题是怎样来保证它具有良好的选择性和灵敏性?也就是说,为了保证它能灵敏、可靠地反应发电机内部可能发生的各种各样的短路事故,就必须首先确定应该在那些分支绕组上装设电流互感器,才是最合理的。

要解决这个问题,首先必须搞清楚在发电机内部发生各种类型的短路,以及每种短路类型下在短路点位置不同、短路分支绕组不同、匝数比不同等情况下,各个分支绕组电流及各相总电流的分布和变化情况。应用多回路理论编制的计算程序软件可以计算发电机内部各种短路状态下各分绕组电流及各相电流的数值^[2]。

采用多回路法计算出前述电流后,就可以将这些在各种类型、各种不同短路点位置组合下的大量计算数据进行详细的分析,最后方能确定在哪些分支绕组上装设互感器才能使差动保护具有良好的选择性、灵敏性和可靠性。

不完全差动保护虽然可以减少分支绕组互感器的数量,但如果要使它具备与并联结线的多分支差动保护同样的选择性和灵敏性,也许分支绕组互感器数量的减少也是有限的。另外,即使装设少量的分支绕组互感器,由于安装位置的限制,人们对中心点侧分支绕组互感器因热、振动、端部漏磁等原因可能发生问题的担忧并不能消除,只不过仅仅是故障机率略小一点而已!

2.3 故障分量负序方向保护

如前所述,发生在发电机内部(包括引出母线)上的所有短路故障实际上都是不对称故障。

在发电机内部故障状态下,发电机有负序功率输出;在正常运行下发电机没有负序功率输出;在外部有不对称负荷及不对称短路时,负序功率由外部系统流入发电机。利用发电机负序功率的这种方向特征,可以构成故障分量负序方向保护。

保护的動作判据式为:

$$\operatorname{Re}[\dot{U}_2 \times I_2] > p$$

式中:

$$I_2 = I_2 e^{j \operatorname{sen} 2}$$

sen 2 ——负序方向继电器灵敏角

\dot{U}_2 ——发电机机端负序电压故障分量

I_2 ——发电机机端负序电流故障分量的共轭相量

p ——阈值。

在保护的基本算法中,采用了频率跟踪技术,适当缩短采样数据窗,先行滤波,后作滤序,能有效地克服可能出现的误动。

本保护可以装设在发电机机端,(即取机端电流、电压采样),也可以装设在发—变组的主变高压侧,(取主变高压侧电流和高压母线电压)。在前一种运用方式时,保护范围不宜包括厂用变或励磁变的低压绕组故障(这些小容量变压器有自身的主保护)。对于后一种运用方式,当发电机并列于一个容量很大的电力系统运行时,系统等值电抗 $X_s \rightarrow 0$,为保证保护有足够的灵敏度,在整定中采用负序补偿电抗 X_s 的方法以克服负序方向元件的电压死区,但负序补偿电抗 X_s 增加的不适当时将使保护方向判别错误而失去选择性,考虑到巨型变压器一般均装有差动、瓦斯、零序、大差动等多重主保护,为了保证故障分量负序方向保护的灵敏性和可靠性,建议本保护在工程应用设计时应尽量装设在发电机机端。

本保护能正确反应发电机内部各种短路和定子绕组开焊故障,但在发电机未并列运行之前不起作用。

2.4 单元件发电机内部短路保护

由于中性环形引线位于上挡风板外定子机座上,且在第1个小中性点和第n个小中性点之间开环(断开),这种布局为装设单元件发电机内部短路保护电流互感器提供了条件。如图1中的TA7、TA8和TA9,这些互感器处于发电机冷却空气循环通道的始端,又受到上挡风钢板的屏蔽,其工作环境远比分支互感器优越。

单元件发电机内部短路保护的二次系统结线和常规的横差保护相似,但保护系统设备、装置及其工作原理整定方法并不等同,它的主要区别有:

常规横差保护用电流互感器变流比按 $0.25 I_n / 5A$ 选择,而单元件发电机内部短路保护 TA 按 $(0.04 \sim 0.05) I_n / 5A$ 选择。

常规横差保护动作定值按 $(0.2 \sim 0.3) I_n$ 整定,而单元件发电机内部短路保护动作定值按 $(0.01 \sim 0.05) I_n$ 整定。

单元件发电机内部短路保护装置对高次谐波应有较高的滤过比,一般要求三次谐波滤过比应大于 $50 \sim 80$,对于其它 12 次以内的高次谐波滤过比应大于 30。

由于上述特点,使单元件发电机内部短路保护具有下述功能:

能有效反应发电机内部的相间短路、同相不同分支绕组匝间短路、同分支匝间短路、定子绕组开焊和气隙异常偏移(扫膛)等事故状态。

保护有很高的灵敏度。以匝间短路为例,其灵敏度远远高于常规横差保护,基本消除了保护死区。

保护上述功能的实现,是基于对多分支水轮发电机在正常空载、负荷运行、外部各种短路、及内部各种类型短路、定子绕组断开等工况和故障状态下中性环形连线上产生的不平衡电流、故障电流的生成机理和变化规律进行了大量试验研究和理论分析后取得的成果。^[3]

由于多分支发电机中性环形连线上不平衡电流与发电机的设计、制造、安装、振动幅度和运行工况等诸多因素有关,有很大的随机性,因而保护的整定计算应按以下步骤进行:

(1) 测试保护装置的高次谐波滤过比;

(2) 实测发电机空载、负载、甩负荷及机端三相短路 ($I_p^{(3)} = I_{n\epsilon}$) 时电流互感器二次回路不平衡电流的数值和波形;

(3) 对 $I_d^{(3)} = I_{n\epsilon}$ 三相短路时的不平衡电流 I_{bp} 进行谐波分析;

(4) 依据保护装置的各次谐波滤过比,计算 $I_d^{(3)} = I_{n\epsilon}$ 时进入保护装置启动环节的不平衡基波电流 $I_{bp.1}$ 数值,然后运用线性外推法计算出进入保护装置启动环节的最大不平衡电流 $I_{bp.1.max}$ 的数值。

(5) 在保护装置对三次谐波有大于 50 的滤过比,对其它高次谐波有大于 30 的滤过比时可以认为高次谐波已被滤清。保护装置的整定计算式为:

$$I_{dz.j} = K_k \cdot K_f \cdot I_{bp.1.max}$$

式中:

K_k ——可靠系数,取 1.2;

K_f ——非周分量系数,取 2。

灵敏度校验式:

$$K_{lm} = \frac{I_{d.1.min}}{n_a I_{dz.j}}$$

$I_{d.1.min}$ ——发电机内部短路时流经中性连接上互感器安装处的最小故障电流值。

n_a ——电流互感器变比。

单元件发电机内部短路保护以简练的二次系统结线和优越的保护功能,使其在大、中型和巨型水轮发电机上有广泛的推广应用价值。这种看法已在国内大、中型水轮发电机组上十多年来的大量运行实践中得到充分证明。

3 失励磁保护系统

由于水轮发电机不允许异步运行,所以失磁保护应以检测其是否失去静态稳定作为动作依据。从七十年代以来,国内常用的基本判据是机端测量阻抗。通过严格的作图描述,在阻抗平面上的静稳边界是一个对称于纵轴的“滴”状曲线(见图 3 中实线圆),而且这个边界的大小是随系统联系电抗 X_s 的不同而不一样的。

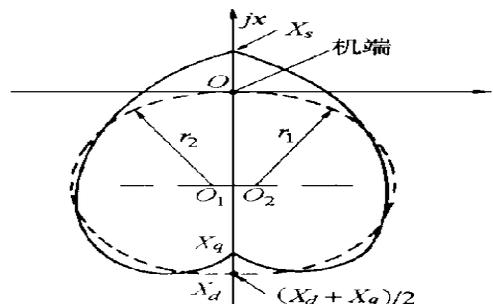


图 3 水轮发电机按静稳边界整定的阻抗特性

我国长期以来用以构成水轮发电机失磁保护的阻抗继电器存在以下两个问题:

其一,继电器的整定边界无法准确的模拟发电机的“滴”状静稳边界,只能以对称于纵轴的两个半圆(即所谓“苹果圆”,见图 3 中虚线圆)来替代,由于“苹果圆”与“滴”状曲线的边界只能在部分线段上重合,因而保护动作的合理性受到置疑,尤其在发电机处于重负荷和较轻负荷(指有功输出)工况下失磁后,保护动作的可靠性很成问题。

其二,由于系统联系电抗 X_s 影响着静稳阻抗圆的位置形状和大小,且 X_s 是随电力系统运行方式随时变化的参量,而阻抗继电器整定的动作圆不可能随系统运行方式的变化作频繁的重新整定,所以,严格地讲,用某一个苹果形的阻抗圆作为启动值的阻抗继电器,去适应并列在运行方式随时可能变化的电力系统中的水轮发电机失磁保护的的需要,几乎是不可能的。

我国从 80 年代中期以来采用了转子低电压的定值随发电机有功功率变化的发电机失磁保护判据,简称变励磁电压判据。

对于水轮发电机而言,在静稳极限状态下有功功率与转子电压的一般关系表达式为:

$$U_{fd.op} = f(P)$$

保护动作判据表达式为:

$$0 < P < P_{fM} \text{ 时, } U_{fd.op} = 0 \quad U_{fd}$$

$$P > P_{fM} \text{ 时, } U_{fd.op} = (P - P_{fM}) \operatorname{tg} \alpha \quad U_{fd}$$

式中:

P_{fM} ——凸极功率;

$$P_{fM} = \frac{U_s^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_a};$$

$U_{fd.op}$ ——对应于某一有功功率时保证发电机处于静态稳定工况的最低临界励磁电压;

U_{fd} ——励磁电压。

保护在 $U_{fd}-P$ 平面上的动作边界如图 4。

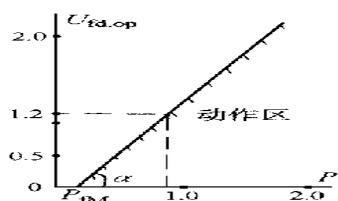


图 4 变励磁判据在 $U_{fd}-P$ 平面上的动作边界
变励磁电压失磁保护应用在水轮发电机组上时,有两个突出优点:

(1) 可以很“逼近”的按静稳边界进行整定。

(2) 对于大型水轮发电机而言,由于机组转动惯量大,转子时间常数较长,本保护在判断出机组因失磁将导致失去静稳而发出信号,至机组真正失去静稳之间,有一个相对较长的时段,在龙羊峡电站 320MW 水轮发电机全失磁试验中测得的这段时间达 11 秒之久。保护的这种提前检出失磁故障的能力,为通过机组自动调控装置将发电机所带有功负

荷减载至凸极功率以下提供了条件。从而减少了因机组的失磁故障给机组及电力系统带来重大危害的可能性,也为不停机检查故障或采用正常手段停机检查故障创造了条件。

对于大、巨型水轮发电机,如果失磁保护仅仅采用变励磁判据与其它辅助判据构成失磁保护,显得比较单薄,近年来,通过研究和试运,又提出了一种随机组所带有功功率实时自动改变定值的功角判据构成的失磁保护,简称变功角失磁保护。

变功角失磁保护的工作原理基于下述理论基础和条件:

(1) 发电机功率角大小是表征和判断机组是否失去静态稳定的最直接的判据量。

(2) 水轮发电机的临界失稳功角不是一个定值,而是随失磁当时发电机所带有功功率的不同而不同,一般大型水轮发电机在 $P_{fM} \sim P_N$ 范围对应的临界失稳功角在 $45^\circ \sim 85^\circ$ 范围内(小于 90°)。

(3) 根据以下两式:

$$P_f = \frac{E_d U_f}{X_d} \sin \delta_f + \frac{U_f^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \right) \sin 2 \delta_f$$

$$P_{st} = \frac{E_d U_{st}}{X_d + X_{st}} \sin \delta_{st} +$$

$$\frac{U_{st}^2 (X_d - X_q)}{2 (X_d + X_{st}) (X_d + X_{st})} \sin 2 \delta_{st}$$

所描述的水轮发电机功角特性曲线,在 $45^\circ \sim 85^\circ$ 范围内近似直线。

(4) 水轮发电机在发生失磁故障至失去静稳阶段,是一个等有功过程,有别于其它故障状况下(如外部短路、系统振荡等)的变化状态。

(5) 由于技术手段的发展,现在已可以依据永磁机电压、发电机机端电压或系统中心某点电压,测量或计算出水轮发电机的实时功率角。

保护原理所依据的发电机有功与功角关系一般表达式为: $U_{fd.op} = f(P)$

保护动作判据表达式为:

$$P > P_{fM} \text{ 时,}$$

$$\delta_f \text{ 或 } \delta_{st} \quad U_{fd.op} = (P - P_{fM}) \operatorname{tg} \alpha$$

$0 < P < P_{fM}$ 时,不动作。

保护在 δ_f 或 $\delta_{st}-P$ 平面上动作边界如图 5。

从简单概念上讲,保护的边界实际上就是水轮发电机功角特性曲线在 $45^\circ \sim 85^\circ$ 间的线段线性化并加一可靠系数。

综上所述,巨型水轮发电机失磁保护可按图 6 所示构成原理接线图

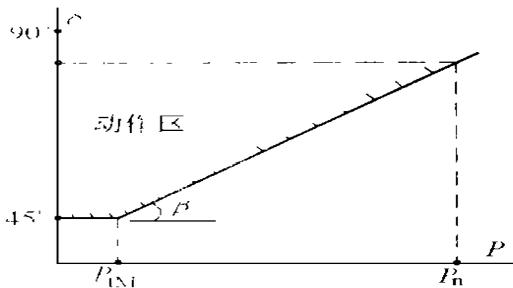
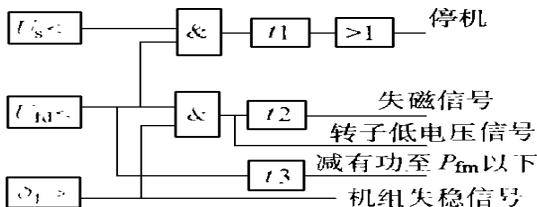
图5 变功角判断在 $-P$ 平面上的动作边界

图6 失磁保护原理图

4 巨型水轮发电机主保护方案的构成

4.1 参照图1中的TA配置,巨型水轮发电机的主保护作者倾向于按下列方式构成。

(1) 由装设在发电机中性环形引线上的TA7、TA8、TA9取出三个电流信号,分别构成三套单元件发电机内部短路保护。

(2) 由发电机机端TA4.2、TA5.2、TA6.2与主变高压侧电流互感器构成主变及发电机引出母线的相间短路保护。

(3) 由TA1.1、TA2.1和TA3.1与机端TV构成故障分量负序方向保护。

本方案的第(1)套保护实际上是三套接线方式和整定值完全一样的内部短路主保护。由于TA7、TA8、TA9在中性联线上布置的位置不同,在发电机内部发生某一个具体的短路故障时,TA7、TA8、TA9所检测到的故障电流并不相同,三套保护对某同一故障反应的灵敏性不同,因此,此方案可以对发生在发电机内部各处的各种短路故障都能以较高的灵敏性进行有效的多重保护,且接线简练。

第(2)套保护实际是主变压器保护,由于TA4.2、TA5.2、TA6.2一般都装设在水轮发电机冷却风道的外侧机墩上,或安装在紧靠发电机出口的封闭母线端部,因而本套保护可以对发电机端相间短路进行保护,保护范围与其它主保护正好衔接,弥补了单元件发电机内部短路保护及并网前故障分量负序保护对发电机母线的相间短路故障难以保护的缺憾。本保护方案不需装设分支绕组电流互感器,接线最为简练,功能完善。

参考文献

- 1 王维俭编者. 电气主设备继电保护原理及应用. 电力出版社.
- 2 王祥衍. 凸极同步电机的多回路理论及其在分析多支路绕组内部故障时的应用. 清华大学工学博士学位论文.
- 3 王维俭、李振华. 单元件发电机内部短路保护的研究. 电力系统自动化.

收稿日期:1998-09-28

李振华 男,高级工程师,长期从事继电保护及水电二次线的设计研究工作。

OPTIMIZATION OF MAIN PROTECTION'S ARRANGEMENT FOR LARGE WATER TURBO- GENERATOR

Li Zhenhua (Northwest Power Design Institute, Xi'an, 710001, China)

Abstract This paper describes the structural feature of large water turbine generator and the distributed feature of its internal short-circuit current, and presents several main protection criteria and three protection schemes which are available for the large water turbine generator.

Key words Non-complete differential Power angle

短 讯

据 IEC 1997 年年度报告,1997 年是 IEC 为其成员和市场提供服务的方式发生重大变化的一年。

- (1) 1997 年年会上选举的新的管理机构自 1998 年投入运转。
- (2) 为适应快速发展的技术工业的需要,新推出两种出版物:IEC—PAS(IEC 公用可利用规范)、ITAs(工业技术协议)。
- (3) 1997 年,利用电子化文件转换尤其是 Internet 网成了标准制定过程的组成部分。IEC 网站成为获取 IEC 技术委员会信息和 IEC 文件的快捷方式。同时,1997 年还推出了 IEC 标准 CD—ROM 版第一系列。
- (4) 100% 按需求印刷方式的运行以及订单直接从电子化文件获取,加速了移交过程并减少 30% 库存。实际上,通过降低库存,IEC 节省了过去五年里所需要的空间的十倍,进而使得 IEC 向更高效率发展。
- (5) 标准综合版是 1997 年提供给 IEC 团体的另一种产品。除作为独立出版物提供修订件外,用户还能获得包含修订件在内的综合版。这样使得修订标准很易查询并有利于节省费用。