

主设备保护技术发展新动向

王维俭,王祥珩,桂林,孙宇光

(清华大学电机系,北京 100084)

摘要:国内外大型发电机和高压变压器的主保护设计整定工作一般都不是基于科学的、充分的绕组内部故障分析计算,很多情况下设计工作变成设计人员的主观判断或经验应用,有些技术文件也显得陈旧过时。在发电机内部短路分析计算软件已经国家鉴定之后,完全有条件使发电机(变压器)主保护设计工作量化、科学化。阻抗保护不能作为大型发变组的绕组近后备保护。我国特有的很少采用零序差动保护的情况应该改正。

关键词:主设备保护;技术发展;新动向;发电机;变压器

中图分类号:TM77 文献标识码:A 文章编号:1003-4897(2004)01-0001-05

0 引言

由于继电保护工作者不熟悉发电机定子绕组或变压器各侧绕组发生短路时差动保护各侧电流的大小和相位,使发电机或变压器差动保护的设计、整定和调试工作具有很大的盲目性和不科学性,主设备保护技术相对于高压输电线路保护存在很大差距,对此主设备保护工作者虽知情却束手无策,或者久处落后而习以为常,使不合理的规定和不科学的做法仍指导着主设备保护的设计和整定计算工作,相应的技术水平停滞不前,这种局面亟待改变^[1,5]。下面以主设备保护设计工作为纲,讨论技术发展新动向。

1 发电机主保护设计之前应充分了解定子绕组在铁芯槽中和端部的实际分布

一般来说,不同发电机有不同的定子绕组构成方式——叠绕组或波绕组、整数槽或分数槽、双层或单层、定子槽数 Z_1 、每相并联分支数 a 、每分支匝数……两台容量相同的发电机,它们的定子绕组构成特点可以大相径庭,以三峡电站为例,两种发电机容量相同、额定电压相同, a 均为 5,但它们定子绕组的结构特点不同,一台 $Z_1 = 540$,另一台 $Z_1 = 510$,如表 1 所示。

再看两台容量均为 135 MW 的发电机,它们定子绕组的结构特点相差更大(见表 1)。

2 详细调查发电机定子绕组实际可能发生的短路故障数

了解各台发电机定子绕组的实际分布,目的为摸清定子绕组实际可能发生的短路故障数,究竟有

表 1 定子绕组的结构特点和内部短路故障数统计

Tab. 1 Design feature of stator winding and numerical statement of internal faults

发电机	定子槽数 Z_1 和同槽故障数	每相并联 分支数 a	同相同分支匝间短路故障数			同相不同 分支匝间短路 故障数	相间短路 故障数
			短路匝比 < 5 %	短路匝比 5 % ~ 10 %	短路匝比 > 10 %		
			三峡 ABB	540	5		
三峡 VGS	510	5	0	45	225	90	150
平班	420	2	243	81	0	12	84
百色	432	3	0	0	0	216	216

发电机	端部交叉 故障数	每相并联 分支数 a	同相同分支匝间短路故障数			同相不同 分支匝间短路 故障数	相间短路 故障数
			短路匝比 < 5 %	短路匝比 5 % ~ 10 %	短路匝比 > 10 %		
			三峡 ABB	10950	5		
三峡 VGS	10530	5	45	45	600	1560	8280
平班	2263	2	246	0	0	3	2014
百色	9504	3	18	18	837	1935	6696

多少相间短路和匝间短路?经常有人不作任何调研就矢口否认大型汽轮发电机定子绕组存在匝间短路的可能性,这是以讹传讹的结果。

这里所谓“实际可能发生的短路故障”是指定子绕组的任两导线相邻就应考虑它们之间可能发生短路,所有这些短路都不是任意设定的。经过充分调研,不仅掌握了这台发电机相间短路和匝间短路的故障总数,而且清楚地知道每种短路的短路匝数(短路匝比)及其空间位置,真正做到设计者对保护对象的确切认识、心中有数。内部短路故障数统计实例见表1。

3 发电机主保护不能总是“一纵一横”,千篇一律

目前发电机主保护的配置,国内外普遍的做法是:相间短路配纵差保护,匝间短路(包括分支开焊)配横差保护,完全不问各台发电机的实际差别,形成千篇一律的局面。保护设计人员从来不考虑纵差(或横差)保护在这台发电机上究竟对哪些相间(或匝间)短路起保护作用?保护动作死区有多大?有没有可能进一步减小动作死区?由于大家对这些问题都不清楚,也就不去深究解决。

更有甚者,某些专业人员有意或无意散布大型汽轮发电机没有或很少有定子绕组的匝间短路,因此不装横差保护^[1],这是发电机安全运行的一大隐患,必须重视。国内发电机定子绕组曾首先发生匝间短路,因无横差保护,故障继续扩展为相间短路,最后由纵差保护动作切机,在此过程中定子铁芯严重烧坏,损失惨重,应以为戒。

4 选用完全纵差保护还是不完全纵差保护?

一般说来,对于相间短路,传统的完全纵差保护有较高灵敏度(不反应匝间短路),但是不完全纵差保护对相间和匝间短路均有一定灵敏度。大型发电机要求主保护双重化(任一内部短路均有两种及以上不同原理的主保护灵敏动作),所以配置纵差保护可能是只装完全纵差或不完全纵差,也可能两者兼有,后者并不增加保护用电流互感器(微机保护资源共享)。

5 纵差保护的灵敏度不应以机端两相最小短路电流作为校验条件

按继电保护技术规程,纵差保护应以机端两相最小短路电流校验灵敏系数 K_{sen} ,当 $K_{sen} \geq 2.0$ 时

认为“合格”。众所周知,现代具有制动特性的纵差保护总能满足这个要求,根本无需校验。重要的是,即使 $K_{sen} \geq 2.0$,也不表示发电机定子绕组内部短路时完全或不完全纵差保护定能灵敏动作。正确的做法应以内部相间最小短路电流校验纵差保护灵敏度。

6 完全纵差保护宜采用标积制动原理

发电机相间短路宜装设完全纵差保护和采用标积制动方式,因为它比比率制动方式有更高的灵敏性和可靠性。但是在采用标积制动方式的不完全纵差保护时,在某些内部故障条件下两侧电流具有外部短路相位特征(图1中的 $\cos \phi > 0$),若制动特性如图1所示,则 B 值整定不当保护可能拒动^[3]。

只有在充分详尽地进行发电机所有内部相间和匝间短路分析计算的基础上,才能正确选择整定值 B ,这样标积制动方式的不完全纵差保护方可避免内部短路拒动的隐患。

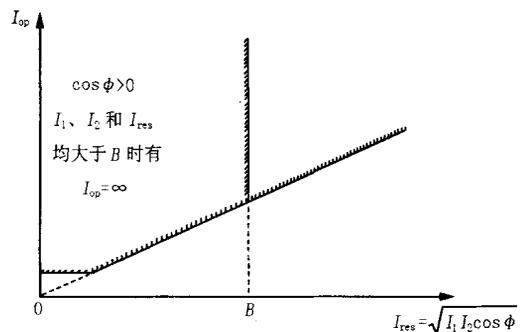


图1 标积制动特性

Fig. 1 Setting of scalar product restraint characteristics

7 不完全纵差保护的中性点侧分支接入数 N 应取多大?

《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》中指出 $1 < N < a/2$, a 为发电机每相并联分支数,究竟取多大?

大量分析计算证明: N 越大,不完全纵差保护的相间短路灵敏性越高($N = a$ 时与完全纵差相同)而匝间短路灵敏性越低,例如 $a = 5$ 的发电机, $N = 1$ 的不完全纵差保护比 $N = 2, 3, 4, 5$ 对匝间短路有更高的灵敏度;但是 $N = 1$ 应选用每相的哪个分支并不清楚,只是说接入不完全纵差的那个分支发生匝间短路时有较高灵敏度,基于这种认识, $a = 5$ 的发电机应装设 $N = 1$ 的5套不完全纵差保护,这又使主保护配置方案过于复杂,最终装设几套应由发电机内部短路灵敏度计算决定。

8 采用零序电流型横差保护还是裂相横差保护?

零序电流型横差保护和裂相横差保护对发电机定子绕组匝间短路均有灵敏的保护作用,前者是将三相定子绕组一分为二或三部分,检测各部分之间的零序环流构成单元件或双元件的零序横差保护;后者是将每相定子绕组一分为二,检测一相两部分之间的环流。

由于零序电流型横差保护装置简单,发电机正常运行时两中性点之间不平衡电流一般较小,其所用互感器的变比可大幅度减小,保护动作整定电流也较低,在很多情况下将优先采用零序电流型横差保护。

9 零序电流横差保护选用单元件式或双元件式?它的互感器一次额定电流如何选择?

对于每相并联分支数 $a = 3$ 的发电机,选用双元件式(3个中性点)的保护范围大于单元件式(2个中性点)的保护范围,而增加的一、二次设备不多。以 $a = 5$ 为例,每相第 1、2 分支合成一个中性点 O_1 ,第 4、5 分支合成另一中性点 O_3 ,第 3 分支组成第 2 中性点 O_2 ,在两中性点之间接两套零序电流型横差保护,如图 2 所示。

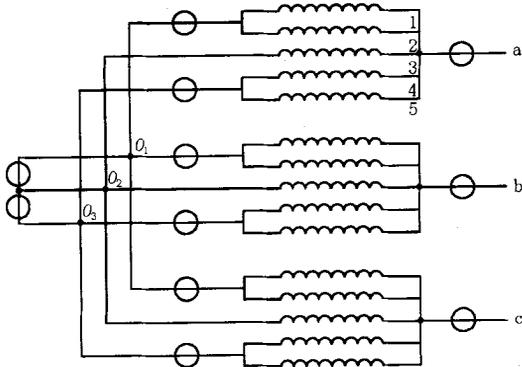


图 2 3 个中性点的水轮发电机的 TA 配置方案

Fig. 2 Disposition of current transformer for hydro-generator with three neutral points

零序电流型横差保护用互感器的一次额定电流 I_{1N} 选用较小值有助于提高灵敏度,但不适当地减小 I_{1N} 将造成负面效果,例如一台 175 MW、 $a = 4$ 的发电机,它的单元件式零序横差保护用互感器的 I_{1N} 选为 200 A,发电机正常运行时两中性点间不平衡电流高达 265 A,被迫停机更换互感器。正确选用 I_{1N} ,应遵循以下原则:

对发电机所有内部相间、匝间短路做详尽计算,求得两中性点间的所有零序电流大小。以互感器型号为 5P20 - 1000/5 为例, $I_{1N} = 1000$ A,观察零序电流小于 $1000 \times 20 = 20000$ A 且在 I_{1N} 的 15% 以上的故障有多少种,对于这些故障互感器能保证 5% 的稳态精度。

至于为数不多的大于 20000 A 的零序电流,虽然不能保证测量精度,但保护是能动作的。

发电机开机带负荷后,实测不平衡电流不超过 I_{1N} ,已经投运的情况是 I_{1N} 选为 500 A 或 600 A,就一定满足大于不平衡电流的要求。

10 完全裂相横差保护与不完全裂相横差保护

每相绕组一分为二构成完全裂相横差已如前述。图 2 中将每相绕组一分为三(不一定为等分),将合并后的 1、2 分支与 4、5 分支构成裂相横差,舍弃第 3 分支,便组成不完全裂相横差保护,它的不平衡电流将小于完全裂相横差(由第 1、2 分支与第 3、4、5 分支组成),不完全裂相横差保护的性有可能高于完全裂相横差保护。利用第 3 分支可构成不完全纵差保护,与不完全裂相横差保护结合有很好的功能互补性,因为故障分支电流能保证进入保护装置。

不久将有 $a = 8$ 的大型发电机,可利用每相的第 4、5 分支构成不完全纵差保护,其余第 1、2、3 分支与第 6、7、8 分支构成不完全裂相横差保护;如果需要,利用诸电流互感器获得的 I_{1+2+3} 、 I_{4+5} 和 I_{6+7+8} ,还可构成完全纵差保护。

11 超高压变压器应增设零序差动保护

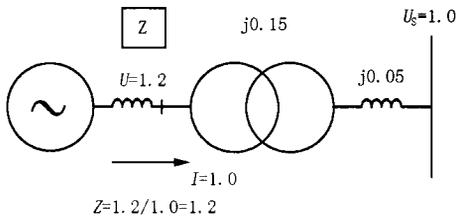
变压器高压绕组 (Y_N) 最常见故障为单相接地短路,应增设零序差动保护,因为零序差动保护的不平衡电流小,动作整定电流小,对单相短路有比相间差动保护(主要反应相间、匝间短路,对单相接地也有一定灵敏度)更高的灵敏度^[6],它是最少受励磁涌流影响的一种变压器差动保护。

运行资料反映的零序差动保护误动,主要是二次极性接反引起的,这种二次接线的错误是可以检测和防止的。

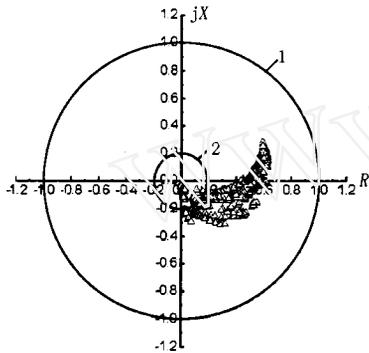
12 后备阻抗保护不能作为发电机定子绕组和变压器各侧绕组内部短路的近后备保护

如图 3(a) 所示,在机端装设 0 接线方式的阻抗继电器。

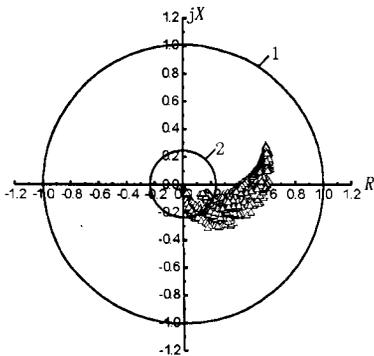
当发电机发生内部相间或匝间短路时,机端阻



(a) 系统图



(b) 三峡 VGS 发电机



(c) 三峡 ABB 发电机

图3 三峡 VGS 和 ABB 发电机机端阻抗保护的测量阻抗在阻抗平面上的分布

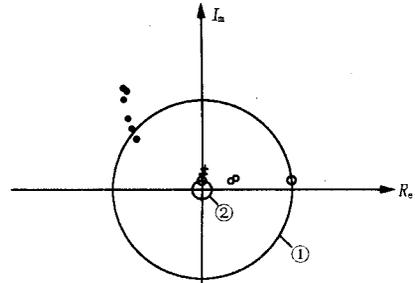
Fig. 3 Distribution of measuring impedance of impedance protection for ABB and VGS generators

抗继电器的测量阻抗(标么值) $\frac{U_a - U_b}{I_a - I_b}$ 、 $\frac{U_b - U_c}{I_b - I_c}$ 、

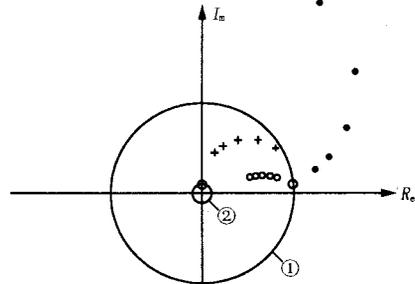
$\frac{U_c - U_a}{I_c - I_a}$ 中的最小值以“+”表示在阻抗平面上。图3

(b)中圆2以 $X_d = 0.20$ 为半径,图3(c)中圆2以 $X_d = 0.245$ 为半径;圆1以正常运行负荷阻抗为半径。图3告诉我们,发电机内部相间或匝间短路,继电器机端测量阻抗绝大部分落在以 X_d 为半径的圆外,即后备阻抗保护将误判为短路在离发电机很远的地方,保护不能正确动作。

同样的三相机端后备阻抗保护,对自耦升压变



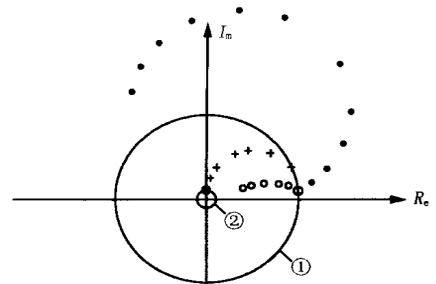
(a) 单相短路



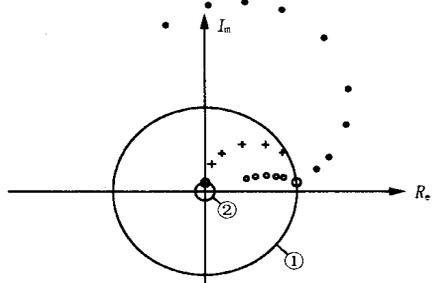
(b) 匝间短路

图4 高压侧发生单相短路和匝间短路时的机端测量阻抗

Fig. 4 Single - phase - to - ground and interturn fault of step - up side of transformer



(a) 单相短路



(b) 匝间短路

图5 中压侧发生单相短路和匝间短路时的机端测量阻抗

Fig. 5 Single - phase - to - ground and interturn fault of medium voltage side of transformer

压器(242/121/13.8 kV, 240 MVA) 高压侧单相短

路和匝间短路(图 4(a)和图 4(b))、中压侧单相短路和匝间短路(图 5(a)和图 5(b))、低压侧匝间短路(图 6),其机端测量阻抗(实心点为 Z_{ab} ,空心点为 Z_{bc} ,+字点为 Z_{ca})几乎全部位于以变压器短路阻抗为半径的圆 ① 以外,有一部分测量阻抗还落到了正常运行的负荷阻抗(圆 ②)之外,同样说明这种阻抗继电器不能作为变压器各侧绕组内部短路的近后备保护。解决办法仍是“加强主保护(双重化),简化后备保护”。

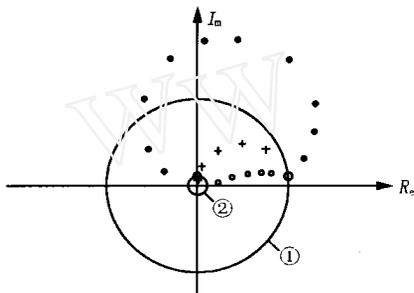


图 6 低压侧发生匝间短路时的机端测量阻抗

Fig. 6 Interturn fault of low voltage side of transformer

13 结论

(1) 大型发电机、变压器主保护的设计和整定工作必须建立在科学的、充分的绕组短路分析计算基础上,以双重化主保护的原则,优化配置方案。

(2) Y_N 绕组的超高压变压器应增设零序差动保护。

(3) 阻抗保护不能作为发-变组的绕组近后备保护。

参考文献:

[1] 王维俭(WANG Wei - jian). 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)(Principle and Application of Protection for Electric Main Equipment, 2nd Edition) [M]. 北京: 中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 2002.

- [2] 高景德,王祥珩,李发海(GAO Jing - de, WANG Xi - ang - heng, LI Fa - hai). 交流电机及其系统的分析(Analysis of AC Electrical Machines and Their Systems) [M]. 北京: 清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1993.
- [3] 桂林,王祥珩,王维俭(GUI Lin, WANG Xiang - heng, WANG Wei - jian). 新型标积制动式差动保护的分析和研究(Research on New Scalar Product Restraint Differential Protection) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(22): 15 - 21.
- [4] 孙宇光,王祥珩,桂林,等(SUN Yu - guang, WANG Xiang - heng, GUI Lin, et al). 三峡发电机定子绕组内部故障暂态仿真计算(Transient Simulation of Internal Faults on the Stator Winding of the Three Gorges Generator) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(16): 56 - 61.
- [5] 王维俭,桂林,王祥珩(WANG Wei - jian, GUI Lin, WANG Xiang - heng). 论大型发电机微机主保护设计的科学性(On the Scientific Design of Microcomputer - Based Main Protection for Large Generator) [J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 2002, 22(2): 1 - 7.
- [6] 王维俭(WANG Wei - jian). 再谈 220 kV 及以上大型变压器装设零序差动保护的必要性(Necessity of Zero Sequence Differential Protection for Large - sized Transformer) [J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 2003, 23(4): 1 - 5.

收稿日期: 2003-11-01

作者简介:

王维俭(1930 -),男,教授,长期从事电气主设备继电保护的教学和科研工作;

王祥珩(1940 -),男,教授,博士生导师,研究领域为电机分析和控制、电机故障及保护、电气传动及其自动化等;

桂林(1974 -),男,博士研究生,研究方向为大型发电机内部故障分析及其保护;

孙宇光(1975 -),女,博士研究生,目前主要研究电机内部故障的仿真与保护。

New development of protection technique for electric main equipment

WANG Wei-jian, WANG Xiang-heng, GUI Lin, SUN Yr-guang,
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The design and setting of main protection for large - sized generator and extra - high voltage transformer aren't sufficiently based on the scientific simulation of stator winding internal faults at home and aboard. In most cases, the designers work on the project only by their own judgment and experience, along with outdated technology materials. The main protection design for generator and transformer should be quantitative and scientific after the internal faults simulation software has passed the State verification. The impedance protection isn't suitable for short - range backup protection for the winding faults of the large - sized generator and transformer. The specific status that the zero - sequence differential protection is seldom adopted at the stator winding of extra - high voltage transformer ought to be modified in China.

Key words: main equipment protection; new development of protection technique; new trends; generator; transformer