

大型水轮发电机微机型主保护设计方法再商榷

王维俭, 桂林, 王祥珩, 孙宇光

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 大型水轮发电机内部短路微机型主保护的设计方法一般仍沿用模拟式保护的做法,即装设1或2套纵差保护和1或2套横差保护,前者以机端两相短路校验其灵敏度,后者因不清楚定子绕组内部短路的计算方法,只能放弃灵敏度校验。这种设计方法不可能真正做到定子绕组各种短路具有双重主保护的要求。对于容量相同的两台水轮发电机,不管定子绕组结构的不同,互相照搬主保护配置方案,为发电机运行带来不安全因素。

关键词: 大型水轮发电机; 微机型主保护; 设计方法

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2002)09-0001-06

1 引言

由于发电机内部短路计算方法不普及,只能用机端两相金属性短路校验纵差保护的灵敏度,这种校验工作形同虚设,因为灵敏系数 K_{sen} 总是大于2.0,实际上对于定子绕组的各种短路并不能保证灵敏动作。

理论上当机端两相短路时零序横差保护中没有电流,不熟悉发电机定子绕组内部短路的分析计算,根本无法校验其灵敏度。裂相横差保护的情况与零序横差保护大致相似。因此,发电机主保护(包括纵差和横差)对于定子绕组短路的灵敏系数,设计和运行人员心中无数,这是主设备保护在理论上落后于超高压线路保护的一大原因。

现在对发电机定子绕组内部短路的分析计算方法已经国家鉴定,完全有条件对发电机各种主保护的灵敏度作科学的分析计算,不仅在定性上而且在定量上确定每一短路故障是否满足双重主保护的技术要求。以下例说明。

2 发电机主保护设计实例故障统计分析

以一台700MW,20kV,每相并联分支数 $a=5$,定子槽数 $Z=540$ 的水轮发电机为例。该发电机定子绕组实际可能发生的内部短路见表1和表2。

表1 540种540槽水轮发电机同槽故障

Tab. 1 540 kinds of slot faults

同相同分支短路420种					同相不同分支短路	相间短路
短路匝数	1匝	3匝	5匝	7匝		
故障数	105	105	105	105	60	60

表2 10950种540槽水轮发电机端部交叉故障

Tab. 2 10950 kinds of end faults

短路匝数	同相同分支短路930种				同相不同分支短路	相间短路
	2匝	4匝	6匝	7匝以上		
故障数	105	105	240	480	660	9360

从表1和表2可知,该机同槽故障以匝间短路为主,相间短路只占故障总数的11.11%;端部故障以相间短路为主,匝间短路只占故障总数的14.52%。

由此可见,只装设传统(完全)纵差保护,不仅不能反应匝间短路,更做不到每一短路具有双重主保护。

3 定子绕组短路计算和主保护灵敏度分析

对发电机定子绕组的11490处相间短路、同相同分支和同相不同分支间的匝间短路作计算,求出每一支路电流的大小和相位(包括两中性点间的零序电流),由此可得到各种短路状态下进入各种主保护的動作电流和制动电流,在已整定的動作特性条件下,最终获得相应主保护的灵敏系数 K_{sen} 。当 $K_{sen} \geq 1.5$ 时定义为保护灵敏动作, $1.0 < K_{sen} < 1.5$ 为可能动作, $K_{sen} < 1.0$ 为不能动作。

分析计算结果见表3和表4。

按照继电器保护惯例,将不满足灵敏系数要求的(即 $K_{sen} < 1.5$)统称为不能动作。

为了评价保护方案的优劣,十分关心该保护不能动作的故障数,见表5和表6。

表 3 540 槽水轮发电机并网额定负载时对同槽故障各种主保护方案的灵敏性

Tab. 3 The protective sensitivities of different main protection schemes for slot faults of hydro generator with rated load

主保护方案			总故障数	灵敏动作数 $K_{sen} \geq 1.5$				可能动作数 $1.5 > K_{sen} \geq 1.0$			不能动作数 $K_{sen} < 1.0$		
				匝间短路		相间短路	总计	匝间短路		相间短路	匝间短路		相间短路
				相同分支	不同分支			相同分支	不同分支		相同分支	不同分支	
零序 电流型 横差 保护	K1 保护 (2-3 组合) $I_{OP}^* = 0.05$	相邻连接	540	194	60	47	301	57	0	5	169	0	8
		相间连接	540	197	60	40	297	56	0	9	167	0	11
	K11 + K12 保护 (2-1-2 组合) $I_{OP}^* = 0.05$	相邻-相邻	540	233	60	52	345	55	0	4	132	0	4
		相邻-相间	540	235	60	49	344	51	0	6	134	0	5
		相间-相间	540	235	60	47	342	51	0	10	134	0	3
	裂相 横差 保护	K2 传统裂相横差 $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻连接	540	307	60	60	427	47	0	0	66	0
相间连接			540	310	60	60	430	54	0	0	56	0	0
K3 不完全裂相横差 $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$		相邻-相邻	540	256	48	60	364	83	5	0	81	7	0
		相邻-相间	540	272	53	60	385	69	4	0	79	3	0
		相间-相间	540	282	51	60	393	53	6	0	85	3	0
不完全 纵差保护 (N=2)	K5 保护 $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻连接	540	239	60	60	359	61	0	0	120	0	0
		相间连接	540	237	60	60	357	55	0	0	128	0	0
K4 完全纵差保护 ($I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$)			540	0	0	60	60	0	0	0	420	60	0

注：“相邻连接”指分支编号相邻的连接在一起(如 1,2;3,4,5;……);“相间连接”指分支 1,3 或 1,3,5 等的连接方式(以下同)。

表 4 540 槽水轮发电机并网额定负载时对端部故障各种主保护方案的灵敏性

Tab. 4 The protective sensitivities of different main protection schemes for end faults of hydro-generator with rated load

主保护方案			总故障数	灵敏动作数 $K_{sen} \geq 1.5$				可能动作数 $1.5 > K_{sen} \geq 1.0$			不能动作数 $K_{sen} < 1.0$		
				匝间短路		相间短路	总计	匝间短路		相间短路	匝间短路		相间短路
				相同分支	不同分支			相同分支	不同分支		相同分支	不同分支	
零序 电流型 横差 保护	K1 保护 (2-3 组合) $I_{OP}^* = 0.05$	相邻连接	10950	735	660	7648	9043	83	0	566	112	0	1146
		相间连接	10950	720	660	8116	9496	79	0	476	131	0	768
	K11 + K12 保护 (2-1-2 组合) $I_{OP}^* = 0.05$	相邻-相邻	10950	784	660	8128	9572	54	0	584	92	0	648
		相间-相间	10950	782	660	8596	10038	60	0	404	88	0	360
裂相 横差 保护	K2 传统裂相横差 $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻连接	10950	858	660	9300	10818	60	0	44	12	0	16
		相间连接	10950	868	660	9304	10832	41	0	44	21	0	12
	K3 不完全裂相横差 $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻-相邻	10950	757	610	9202	10569	58	36	112	115	14	46
		相邻-相间	10950	770	632	9220	10622	76	22	102	84	6	38
		相间-相间	10950	765	632	9258	10655	50	20	72	115	8	30
不完全 纵差 (N=2)	K5 保护 $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻连接	10950	788	660	9210	10658	62	0	64	80	0	86
		相间连接	10950	797	660	9134	10591	49	0	106	84	0	120
K4 完全纵差保护 ($I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$)			10950	0	0	9360	9360	0	0	0	930	660	0

表 5 540 槽水轮发电机并网额定负载时对同槽故障各种主保护方案不能动作故障数及其性质

Tab. 5 The non-operation numbers and fault types of different main protection schemes for slot faults of hydro generator with rated load

主保护方案	构成方式	具体连接形式	不能动作故障数	匝间短路					相间短路
				相同分支				不同分支	
				1 匝	3 匝	5 匝	7 匝		
零序电流型横差保护	K1 保护 (2-3 组合)	相邻连接	239	105	87	28	6	0	13
		相间连接	243	105	77	29	12	0	20
	K11 + K12 保护 (2-1-2 组合)	相邻-相邻	195	105	72	9	1	0	8
		相邻-相间	196	105	65	13	2	0	11
		相间-相间	198	105	60	15	5	0	13
裂相横差保护	K2 传统裂相横差保护	相邻连接	113	102	9	2	0	0	0
		相间连接	110	91	15	4	0	0	0
	K3 不完全裂相横差保护	相邻-相邻	176	101	24	21	18	12	0
		相邻-相间	155	88	27	20	13	7	0
		相间-相间	147	75	28	20	15	9	0
不完全纵差保护 (N=2)	K5 保护	相邻连接	181	105	67	6	3	0	0
		相间连接	183	105	61	13	4	0	0
K4 完全纵差保护			480	105	105	105	105	60	0

表 6 540 槽水轮发电机并网额定负载时对端部故障各种主保护方案不能动作故障数及其性质

Tab. 6 The non-operation numbers and fault types of different main protection schemes for end faults of hydro generator with rated load

主保护方案	构成方式	具体连接形式	不能动作故障数	匝间短路					相间短路	
				相同分支						不同分支
				2 匝	4 匝	6 匝	7 匝	其它		
零序电流型横差保护	K1 保护 (2-3 组合)	相邻连接	1907	105	69	17	4	0	0	1712
		相间连接	1454	103	60	32	9	6	0	1244
	K11 + K12 保护 (2-1-2 组合)	相邻-相邻	1378	105	40	1	0	0	0	1232
		相邻-相间	1119	103	38	2	0	0	0	976
		相间-相间	912	101	40	7	0	0	0	764
裂相横差保护	K2 传统裂相横差保护	相邻连接	132	65	5	2	0	0	0	60
		相间连接	118	54	6	2	0	0	0	56
	K3 不完全裂相横差保护	相邻-相邻	381	32	23	46	18	54	50	158
		相邻-相间	328	38	23	42	13	44	28	140
		相间-相间	295	39	26	44	17	39	28	102
不完全纵差保护 (N=2)	K5 保护	相邻连接	292	105	34	3	0	0	0	150
		相间连接	359	103	24	6	0	0	0	226
K4 完全纵差保护			1590	105	105	240	90	390	660	0

保护代号 K1、K11、K12、K2、K3、K4、K5 见图 1 和图 2。

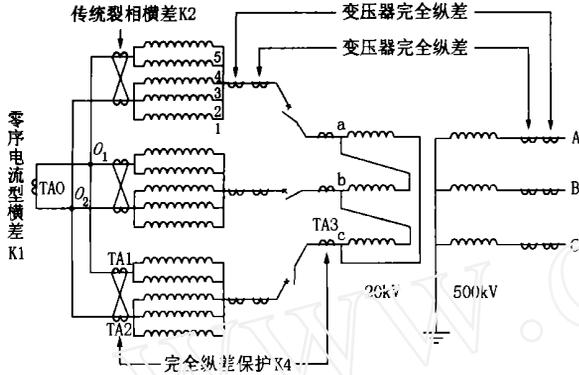


图 1 2 个中性点的大型水轮发电机内部故障主保护及 TA 配置方案

Fig. 1 The main protection and current transformer configuration scheme for internal fault of large hydro-generator with two neutral points

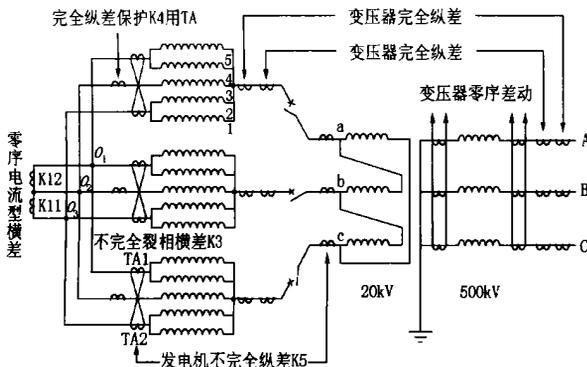


图 2 3 个中性点的大型水轮发电机内部故障主保护及 TA 配置方案

Fig. 2 The main protection and current transformer configuration scheme for internal fault of large hydro-generator with three neutral points

通过以上分析,对各种主保护反应 11490 处故障的能力(能灵敏反应哪些故障,不能灵敏反应的又是哪些故障)已了如指掌,为主保护总配置方案的选择奠定了科学基础。

4 零序横差保护的选型、发电机中性点侧引出方式的确定和电流互感器的配置

零序横差(以往称单元件横差)保护以其灵敏、功能全面、特别简单的特点,在各种主保护方案中优点突出,而且零序横差保护采用一套(K1)或两套(K11 + K12)直接影响发电机中性点侧的引出方式,所以首先讨论零序横差保护的选型。

从表 3~表 6 可清楚地看到,采用两套零序横差保护(K11 + K12)比一套(K1)的灵敏度高,装置也不复杂,所以该发电机中性点侧引出方式不用图 1(2 个中性点),应用图 2(3 个中性点),每相 5 并联分支以 2-1-2 方式引出。图 2 中以 1、2 分支合并和 4、5 分支合并(相邻方式),3 分支单独引出。也可能是 1、3 或 1、4 分支合并和 2、4 或 2、5 分支合并(相间方式),这主要决定于电机结构和制造工艺是否方便,不能由继电保护决定。

表 3~表 6 同时告诉我们,单靠两套零序横差保护不可能对所有 11490 处故障实现完全保护,更谈不上每一故障有两套主保护动作,为此必须配置其他主保护方案。

图 1 和图 2 中同时画出了发-变组微机保护一块屏所配置的电流互感器,同一分支的电流互感器二次电流可同时供各种主保护和后备保护使用(资源共享),但大型发-变组往往还配置完全相同的另一块保护屏,后者的电流互感器(以及直流电源和跳闸回路)必须另设。

图 2 中发电机中性点侧共装设 11 台电流互感器,除两中性点之间的互感器专供零序横差保护使用外,其它互感器(见图 2 中的 TA1 和 TA2)可供不完全裂相横差保护、不完全纵差保护和完全纵差保护用(因采用完全纵差保护,需在三相第 3 分支装设 3 个互感器)。

至于各个互感器的设计选型问题,限于篇幅,不在本文讨论。

5 实现主保护的双重化

首先,在图 2 既定的发电机中性点侧引出方式和电流互感器配置的条件下,考虑到微型保护装置均已采用 32 位机,其运算速度完全能满足已有主保护的要求。在不增加硬件的前提下图 2 发电机主保护可以采用两套零序电流型横差保护(K11 + K12)、一套不完全裂相横差保护(K3)、一套不完全纵差保护(K5)和一套完全纵差保护(K4),总共 5 套主保护。

下面对 5 套主保护(K11、K12、K3、K5、K4)和 4 套主保护(K11、K12、K3、K5)的动作情况作对比分析,见表 7、表 8。

表 7 540 槽水轮发电机同槽和端部交叉故障时 4 套主保护的动作情况

Tab. 7 The performances of four kinds of protections for slot and end faults of hydro generator with 540 slots

能同时灵敏反应的保护区数	0	1	2	3	4
同槽故障数	100	60	68	100	212
端部交叉故障数	63	205	746	1203	8733

表 8 540 槽水轮发电机同槽和端部交叉故障时 5 套主保护的動作情况

Tab. 8 The performances of five kinds of protections for slot and end faults of hydro generator with 540 slots

能同时灵敏反应的保护区数	0	1	2	3	4	5
同槽故障数	100	60	55	99	193	33
端部交叉故障数	49	95	174	903	2199	7530

从表 7、表 8 可见,装设 5 套主保护时,有 $(380 + 10806) / 11490 = 97.35\%$ 的故障至少有 2 套主保护能灵敏动作,似乎主保护套数过多了,但这时仍有 $(100 + 49) / 11490 = 1.30\%$ 的保护死区,同时有 $(60 + 95) / 11490 = 1.35\%$ 的故障只有一套保护能灵敏动作,所以这 5 套主保护不能减少。更何况舍弃第 5 套完全纵差保护(K4)不仅使保护死区增加为 $(100 + 63) / 11490 = 1.42\%$,而且使两套及以上保护灵敏动作故障数减少为 $(380 + 10682) / 11490 = 96.28\%$,所以增设完全纵差保护是必要的,虽然为此需增加 3 台电流互感器。

6 发电机主保护和电流互感器配置方案的对比和抉择

通过上面的设计工作,得到几种主保护配置方案(见图 1、图 2 和图 3)的最终结果,如表 9 所示。

表 9 540 槽水轮发电机各种主保护配置方案的性能对比
Tab. 9 The performance comparison of different main protection schemes for hydro generator with 540 slots

主保护配置方案	总故障数	灵敏动作		中性点侧 TA 数目
		故障数	两套及以上保护灵敏动作故障数	
图 1	540 种同槽故障	427	314	7
	10950 种端部交叉故障	10878	10749	
图 2	540 种同槽故障	440	380	11
	10950 种端部交叉故障	10901	10806	
图 3	540 种同槽故障	440	380	8
	10950 种端部交叉故障	10887	10682	

由表 9 可知,增设第 3 分支互感器和完全纵差保护,不仅使灵敏动作故障总数增加了 14 个,而且使两套及以上保护灵敏动作故障数增加了 124 个,因此最后选定图 2 和 11 台互感器,主保护采用

K11、K12、K3、K4、和 K5 共 5 套。

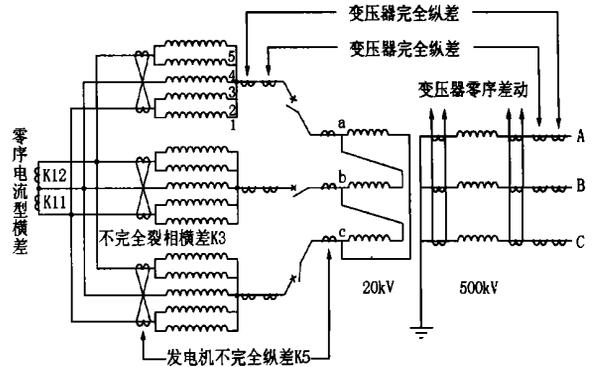


图 3 3 个中性点的大型水轮发电机内部故障主保护及 TA 配置方案(不加安全纵差)

Fig. 3 The main protection and current transformer configuration scheme for internal fault of large hydro generator with three neutral points (without traditional longitudinal differential protection)

7 不同发电机组应有不同的主保护配置方案

一般说来,不同型号的发电机,虽然容量相同,但它们的定子绕组在空间的分布不尽相同,内部短路时各支路电流也不同,各种主保护的灵敏度也就不同。

就所讨论的 540 槽发电机与另一台 510 槽、相同容量的发电机而言,后者有理由不装设完全纵差保护,因为表 10、表 11 告诉我们,对于 510 槽发电机 11040 处内部故障(510 种同槽故障和 10530 种端部交叉故障),图 3 方案与图 2 方案的保护死区相同,这是由于图 3 方案不能反应的故障类型均为匝间短路,完全纵差保护的加入对其不起任何补充作用;舍弃完全纵差保护对两套及以上保护灵敏动作故障数影响不大。所以对于容量相同的两台发电机,正常设计应在内部短路计算的基础上,科学地设计本发电机的主保护方案,实现主保护的双重化,决不是照搬方案。

表 10 510 槽水轮发电机同槽和端部交叉故障时 4 套主保护的動作情况

Tab. 10 The performances of four kinds of protections for slot and end faults of hydro generator with 510 slots

能同时灵敏反应的保护区数	0	1	2	3	4
同槽故障数	21	19	21	35	414
端部交叉故障数	46	27	195	443	9819

表 11 510 槽水轮发电机同槽和端部交叉故障时
5 套主保护的動作情况

Tab. 11 The performances of five kinds of protections for slot and end faults of hydro generator with 510 slots

能同时灵敏反应的保護数	0	1	2	3	4	5
同槽故障数	21	19	21	35	264	150
端部交叉故障数	46	19	149	291	2013	8012

8 结论

(1) 大型和特大型发电机主保护方案的确定, 必须建立在充分、全面、科学的内部短路计算分析基础上。迄今仍用机端两相短路校验主保护灵敏系数是不科学的。

(2) 大中型发电机仅装设一或二套完全纵差保护的工程设计缺乏科学根据, 有必要推广或创造条件推广完全或不完整裂相横差、零序电流型横差及不完全纵差保护。

(3) 不同型号的发电机应有自己的主保护总配置方案, 不能以容量相等或相近为理由, 互相挪用主

保护总配置方案。

(4) 某种原理主保护方案的取舍, 不要单纯以一种方案灵敏度的高低为准。微机保护允许采用多种原理的主保护, 取各自的优点, 克服或弥补彼此的缺点, 即“优势互补、综合利用”的设计方法, 最终取得最佳主保护总配置方案。

参考文献:

- [1] 王维俭, 桂林, 王祥珩. 论大型发电机微机主保护设计的科学性[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(2): 1-7.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用: 第2版[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002, 1.

收稿日期: 2002-05-15

作者简介:

王维俭(1930-), 男, 教授, 从事大机组保护的教学和研究工作。

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。

王祥珩(1940-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机理论、电气传动与控制, 及电机故障。

Reconsideration of the design method of microcomputer-based main protection for large hydro-generator

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

Abstract: The design method of microcomputer-based main protection for large hydro-generator continues to use the method of the analog type protection. The main protection for S/C in a large hydro-generator is habitually configured with one or two sets of longitudinal differential relay and one or two sets of transverse differential relay. The sensitivity of longitudinal differential protection is checked by the SC current at generator terminal, and the checkout of the sensitivity of transverse differential protection is abandoned without the availability of the calculation method of the internal faults of stator winding. The above design method doesn't really assure all kinds of internal faults of stator winding are tripped by two sets of protection. The popular practice that different types of hydro-generators with similar capacity and different winding construction use the same disposition of main protection may lead to harmful results in operation.

Key words: large hydro-generator; microcomputer-based main protection; design method

电气传动自动化

ELECTRIC DRIVE AUTOMATION

(国际流行大 16 开版本, 国内外公开发行)

双月刊
邮发代号: 54-91
单价: 4.00 元
年价: 24.00 元

中国电工行业技术类核心期刊
中国科学引文数据库来源期刊

甘肃省优秀科技期刊
中国学术期刊(光盘版)入编期刊

重点栏目 电气传动自动化技术综述 交直流传动技术 控制理论与技术 计算机 PLC 技术应用
新技术、新产品研发与应用 功率因数校正技术 无功补偿技术 经验交流

本刊 2003 年度期刊征订及广告征订工作现已开始, 请新老读者及时到当地邮局办理订阅手续(本刊订阅代号: 54-91), 也请新老广告客户尽快与本刊广告部联系广告发布事宜, 切勿错过订期!

本刊是国家科委和国家新闻出版署批准的正式向国内外公开发行的技术性期刊, 1975 年创刊; 本刊稿件质量、版面设置、广告设计等各方面多年来深受国内外广大读者、作者、专家学者及广告客户的赞誉和好评。

欢迎订阅、欢迎投稿、欢迎刊登广告!

地址: 甘肃省天水市长开路 53 号 邮编: 741018 电话: (0938) 8383492 转 2302
传真: (0938) 8384023 Email: tsdcs @public. lz. gs. cn Http: //www. tsedri. com