

规范大中型发电机主保护设计的方法

王维俭¹, 孙宇光¹, 王祥珩¹, 桂林¹, 谢敏²

(1. 清华大学, 北京 100084; 2. 广西电力勘察设计院, 广西南宁 530023)

摘要: 针对现有发电机主保护设计方法的不科学性, 提出新的设计思路、步骤和方法, 彻底改变了以往完全凭概念、经验和传统习惯的做法, 逐步做到主设备继电保护设计工作的定量化, 即以正确的发电机内部短路分析计算为基础, 校核各种主保护方案的灵敏系数, 由此择优确定发电机定子绕组中性点侧的分支引出方式, 结合电机的实际情况和各种保护方案的优缺点, 按照“优势互补、综合利用”的原则, 最终确定该发电机主保护的配置方案。

关键词: 发电机; 主保护; 内部短路; 设计方法

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)01-0001-11

1 引言

清华大学电机系和广西电力勘察设计院一致认识到原有发电机主保护配置方案设计的主观随意性、缺乏严格科学的定量分析, 造成不同型号的发电机配置了相同的主保护, 不清楚这些保护究竟对发电机的哪些短路故障有多大灵敏度, 更不知道还有哪些实际可能发生的短路和开焊故障发电机主保护将拒动。在这种技术基础上, 对大型发电机主保护的双重化又何从谈起? 例如一台 700 MW 发电机, 定子槽内短路绝大部分 (88.9%) 为同相的匝间短路, 仅 11.1% 为相间短路, 即使装设两套传统 (完全) 纵差保护, 对 88.9% 的短路仍没起到双重化主保护的作用, 远远没有尽到继电保护的责任。

有鉴于此, 两单位的继电保护技术人员, 计划以广西平班电厂和恶滩电厂的发电机主保护设计任务为例, 共同探讨主设备主保护设计的新思路和新方法, 与国内同行共商。

2 恶滩电站扩建工程发电机基本情况

恶滩发电机单机额定功率为 150 MW, 96 极, 定子槽数为 792, 每相 3 分支, 每分支 88 槽。发电机额定参数为: $U_N = 15.75 \text{ kV}$, $I_N = 6284.1 \text{ A}$, $\cos \phi_N = 0.875$, $I_{f0} = 951.41 \text{ A}$, $I_{fN} = 1744.1 \text{ A}$ 。有机端断路器, 升压变及系统等值电抗 (折合到发电机电压级) 约为 0.2 p.u.。

要特别指出, 恶滩发电机的定子绕组在空间布置上比较特殊, 每相的 3 个分支的对应线圈的空间位置不是完全对称的, 致使与各支路有关的内部故障的短路点位置也不完全对称。所以, 我们必须对每相每分

支可能发生的内部短路都进行详细的计算, 而不能只从一相或一个分支的故障结果推广到所有的定子内部故障。这使得计算的工作量大大增加。

3 恶滩发电机定子绕组内部短路的设计和主保护规划

根据对恶滩发电机绕组展开图的分析, 该发电机定子绕组实际可能发生的内部短路如表 1 和表 2 所示:

- 定子槽内上、下层线棒间短路共 792 种 (等于定子槽数)。通过对同槽故障性质的分析, 发现同相同分支匝间短路 378 种 (占 47.73%), 其中短路匝数为 2、4 匝的故障数分别为 57、57, 短路匝比分别只有 2.27%、4.55%。可见, 同相同分支的小匝数匝间短路共有 114 种, 占同槽故障数的 14.39%。同相不同分支匝间短路 54 种 (占 6.82%), 短路匝数均在 9~100 匝之间。相间短路 360 种 (占 45.45%), 其中属于不同相而分支编号相同的分支 (例如 a_1 对 b_1) 间发生短路的有 285 种, 所占比率为 79.17%。

- 定子绕组端部交叉处短路共 11088 种。通过对端部交叉故障 (简称为端部故障) 性质的分析, 发现同相同分支匝间短路 2520 种 (占 22.73%), 短路匝数为 1、2、3、4 匝的故障数分别为 135、78、135、78, 短路匝比分别只有 1.14%、2.27%、3.41%、4.55%。可见, 同相同分支的小匝数匝间短路共有 426 种, 占端部故障数的 3.84%。同相不同分支匝间短路 360 种 (占 3.25%), 其中两个分支的短路点均靠近机端的故障有 18 种, 短路匝数为 170~173 匝。相间短路 8208 种 (占 74%), 其中属于不同相而分支编号相同的分支间发生短路的有 5889 种, 所占比例为 71.75%。

表 1 792 种同槽故障

Tab. 1 792 kinds of slot fault

短路匝数	同相同分支短路 378 种						同相不同分支短路	相间短路
	2 匝	4 匝	5 匝	6 匝	7 匝	13 匝		
故障数	57	57	6	57	6	195	54	360

表 2 11088 种端部故障

Tab. 2 11088 kinds of end fault

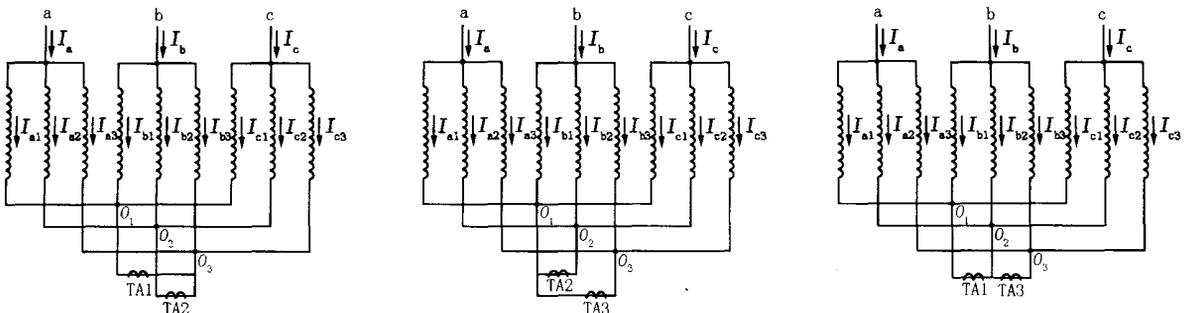
短路匝数	同相同分支短路 2520 种					同相不同分支短路 360 种					相间短路
	1 匝	2 匝	3 匝	4 匝	5 匝	3~111 匝	170 匝	171 匝	172 匝	173 匝	
故障数	135	78	135	78	2094	342	3	9	3	3	8208

有了这台发电机定子绕组短路(还有分支开焊)的全貌,初步建立主保护的大致轮廓为:

· 因为匝间短路比例较大(同槽故障 54.6%, 端部故障 26%), 所以必须装设横差保护, 究竟采用何种横差保护, 应由内部短路分析计算决定。

· 考虑端部三相引线短路时, 各种横差保护均

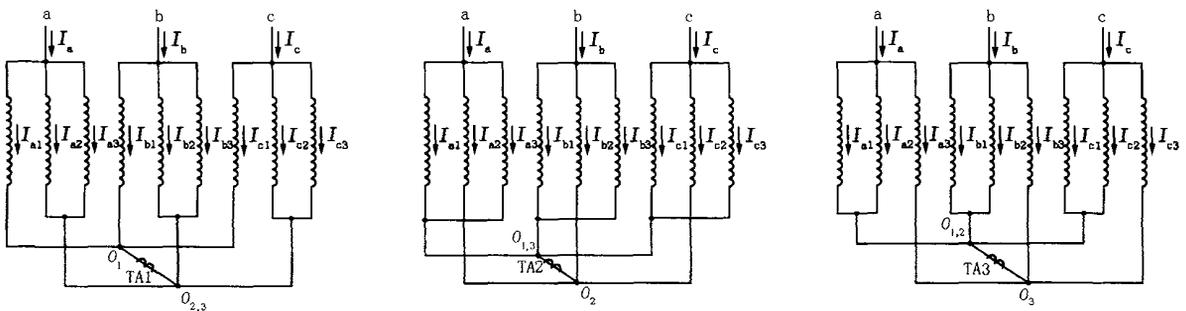
不反应, 而且内部短路时横差保护尚有动作死区, 所以必须装设纵差保护。首先不考虑采用传统(完全)纵差保护, 因为它对所有匝间短路均不反应, 可供选择的一定只能是不完全纵差保护, 至于不完全纵差保护装设几套? 每一套不完全纵差保护选取哪几个中性点侧分支电流? 这些深层次问题, 也必须经内部短路分析计算才能确定。



(a) 在 O_1 与 O_3 之间接零序电流型横差保护 I (TA1), 在 O_2 与 O_3 之间接零序电流型横差保护 II (TA2) (b) 在 O_1 与 O_2 之间接零序电流型横差保护 II (TA2), 在 O_1 与 O_3 之间接零序电流型横差保护 III (TA3) (c) 在 O_1 与 O_3 之间接零序电流型横差保护 I (TA1), 在 O_2 与 O_3 之间接零序电流型横差保护 III (TA3)

图 1 引出 3 个中性点的零序电流型横差保护配置

Fig. 1 The zero - sequence current transverse differential protection configuration scheme for generator with three neutral points



(a) 在 O_1 与 $O_{2,3}$ 之间接零序电流型横差保护 IV (TA1) (b) 在 $O_{1,3}$ 与 O_2 之间接零序电流型横差保护 V (TA2) (c) 在 $O_{1,2}$ 与 O_3 之间接零序电流型横差保护 VI (TA3)

图 2 引出 2 个中性点的零序电流型横差保护配置

Fig. 2 The zero - sequence current transverse differential protection configuration scheme for generator with two neutral points

4 发电机中性点引出方式和零序电流型横差保护的选型

发电机中性点侧分支的引出方式直接影响装设一套或两套零序横差保护的问题,间接影响不完全纵差保护究竟选取哪个中性点侧分支电流,还与裂相横差保护的选型有关(完全或不完全裂相横差)。

由于各种主保护方案中零序电流型横差保护功能好、设备(电流互感器)少,所以在决定采用一套或两套零序电流型横差保护的选型过程中,同时确定中性点侧分支的引出方式。

4.1 零序电流型横差保护的灵敏性分析及有关互感器的选型

恶滩发电机每相3分支,如果引出3个中性点(将每相的第*i*分支接在一起,形成中性点 $o_i(i=1, 2, 3)$),可以构成两套零序电流型横差保护(如图

1);如果只引出2个中性点(例如将每相的第1分支接在一起,形成中性点 o_1 ;再将每相的第2、3分支都接在一起,形成中性点 o_{23}),就只能构成一套零序电流型横差保护(如图2)。

4.1.1 零序电流型横差保护的灵敏性统计

应用“多回路分析软件”全面计算11880种内部短路,获得发电机各分支的短路电流大小和相位,然后根据发电机中性点引出方式,计算各种零序电流型横差保护的動作电流大小。设定零序横差保护的整定值为0.05 p.u.,就可求出它们各自的灵敏系数 K_{sen} 。

·恶滩发电机单机或联网空载运行状态下零序横差保护对槽内故障的灵敏性,见表3和表4。

从表3和表4可清楚地知道,恶滩电站发电机装设两套零序横差保护比一套的灵敏度高,前者仅多用一台电流互感器,保护性能明显提高。

表3 恶滩发电机单机空载运行状态下各种零序电流型横差保护方案对同槽故障的灵敏性统计

Tab.3 The protective sensitivities of different zero - sequence current transverse differential protection schemes for slot faults of Ean generator under no load

零序电流型横差保护的组合选择	灵敏动作数($K_{sen} > 1.5$)					可能动作数($1.5 > K_{sen} > 1.0$)					不能动作数($K_{sen} < 1.0$)					
	匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路			
	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	
引出2个中性点	零序电流型横差保护	201	54	200	73	528	44	0	28	2	74	133	0	57	0	190
	零序电流型横差保护	209	42	201	71	523	52	2	35	2	91	117	10	49	2	178
	零序电流型横差保护	206	54	210	73	543	51	0	18	2	71	121	0	57	0	178
引出3个中性点	零序电流型横差保护与	241	54	240	75	610	57	0	24	0	81	80	0	21	0	101
	零序电流型横差保护与	242	54	243	75	614	61	0	18	0	79	75	0	24	0	99
	零序电流型横差保护与	241	54	244	75	614	58	0	18	0	76	79	0	23	0	102

表4 恶滩发电机联网空载运行状态下各种零序电流型横差保护方案对同槽故障的灵敏性统计

Tab.4 The protective sensitivities of different zero - sequence current transverse differential protection schemes for slot faults of Ean generator paralleled to the power system under no load

零序电流型横差保护的组合选择	灵敏动作数($K_{sen} > 1.5$)					可能动作数($1.5 > K_{sen} > 1.0$)					不能动作数($K_{sen} < 1.0$)					
	匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路			
	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	
引出2个中性点	零序电流型横差保护	203	54	243	75	575	44	0	12	0	56	131	0	30	0	161
	零序电流型横差保护	211	42	242	73	568	52	2	18	0	72	115	10	25	2	152
	零序电流型横差保护	208	54	244	73	579	50	0	11	2	63	120	0	30	0	150
引出3个中性点	零序电流型横差保护与	241	54	266	75	636	59	0	9	0	68	78	0	10	0	88
	零序电流型横差保护与	242	54	267	75	638	63	0	9	0	72	73	0	9	0	82
	零序电流型横差保护与	241	54	266	75	636	60	0	10	0	70	77	0	9	0	86

·恶滩发电机单机或联网空载运行状态下零序

横差保护对端部故障的灵敏性,见表5和表6。

表 5 恶滩发电机单机空载运行状态下各种零序电流型横差保护方案对端部故障的灵敏性统计

Tab. 5 The protective sensitivities of different zero - sequence current transverse differential protection schemes for end faults of Etan generator under no load

零序电流型横差保护的组合选择		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			匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路		
		相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计
引出 2 个中性点	零序电流型横差保护	1505	348	5236	2304	9393	284	3	265	7	559	731	9	388	8	1136
	零序电流型横差保护	1575	288	5307	2090	9260	292	5	247	75	619	653	67	335	154	1209
	零序电流型横差保护	1547	336	5282	2222	9387	277	13	214	37	541	696	11	393	60	1160
引出 3 个中性点	零序电流型横差保护 与	1822	348	5727	2307	10204	266	3	85	4	358	432	9	77	8	526
	零序电流型横差保护 与	1825	345	5766	2302	10238	256	5	64	10	335	439	10	59	7	515
	零序电流型横差保护 与	1822	348	5770	2308	10248	245	5	58	4	312	453	7	61	7	528

表 6 恶滩发电机联网空载运行状态下各种零序电流型横差保护方案对端部故障的灵敏性统计

Tab. 6 The protective sensitivities of different zero - sequence current transverse differential protection schemes for end faults of Etan generator paralleled to the power system under no load

零序电流型横差保护的组合选择		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			匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路		
		相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计
引出 2 个中性点	零序电流型横差保护	1537	348	5608	2314	9807	284	5	129	4	422	699	7	152	1	859
	零序电流型横差保护	1604	289	5568	2130	9591	286	4	136	70	496	630	67	185	119	1001
	零序电流型横差保护	1578	336	5575	2253	9742	269	13	123	35	440	673	11	191	31	906
引出 3 个中性点	零序电流型横差保护 与	1855	348	5834	2315	10352	241	5	25	3	274	424	7	30	1	462
	零序电流型横差保护 与	1857	345	5845	2317	10364	233	5	15	1	254	430	10	29	1	470
	零序电流型横差保护 与	1853	348	5841	2317	10359	223	7	17	1	248	444	5	31	1	481

表 3、表 4、表 5 和表 6 同样表明,恶滩发电机应装设两套零序电流型横差保护。

4.1.2 零序电流型横差保护用互感器 TAO 的选型

零序电流型横差保护完全不同于纵差保护,它只用一台互感器,因此不像纵差保护那样对互感器有严格的误差要求。但是零序横差保护在发电机各种内部短路条件下,流过的短路电流大小悬殊,给互感器一次额定电流和变比选择带来困难。

为正确选择 TAO 的变比,除了一次额定电流应大于发电机最大负荷条件下两中性点连线的最大不平衡电流(此电流必须实测,为此应预设 2~3 个一次额定电流)外,还必须计算发电机内部短路时中性点连线的最大和最小电流。按内部故障的最大横差电流校验互感器的短路电流倍数,勿使互感器过度饱和;按内部故障的最小横差电流校验保护的灵敏系数 K_{sen} 是否大于 1.5~2.0。

通过内部故障仿真计算,已知恶滩发电机内部短路时流过中性点连线的最大/最小短路电流分别为:

·通过对恶滩发电机单机空载及并网空载两种运行状态下所有可能发生的 792 种同槽故障的仿真计算,同槽故障时流过中性点连线 O_1O_2 的短路电流最大,为 $I_{00,max} = 29\ 620.11\ A$,对应的运行状态为并网空载,对应的故障类型为机端侧附近的大匝数的同相同分支匝间短路 c1(88)c1(2),即恶滩发电机在 c 相第 1 分支发生同槽的第 2 号线圈的下层边与第 88 号线圈的上层边之间的短路,短路匝数为 86 匝;同槽故障时流过中性点连线 O_2O_3 的短路电流最小,为 $I_{00,min} = 4.854\ A$,对应的运行状态为单机空载,对应的故障类型为小匝数的同相同分支匝间短路 a1(34)a1(40),即恶滩发电机在 a 相第 1 分支发生同槽的第 34 号线圈的上层边与第 40 号线圈的下层边之间的短路,短路匝数为 6 匝。

·通过对恶滩发电机单机空载及并网空载两种运行状态下所有可能发生的 11 088 种端部交叉故障的仿真计算,端部故障时流过中性点连线 O_2O_3 的短路电流最大,为 $I_{00,max} = 31\ 008.89\ A$,对应的运行状态为并网空载,对应的故障类型为机端侧附近

的大匝数的同相同分支匝间短路 a3(1)a3(88),即恶滩发电机 a 相第 3 分支第 1 号线圈的上层边和 a 相第 3 分支第 88 号线圈的下层边发生端部交叉短路,短路匝数为 87 匝;端部故障时流过中性点连线 O₂O₃ 的短路电流最小,为 $I_{00.min} = 2.486 \text{ A}$,对应的运行状态为单机空载,对应的故障类型为小匝数的同相同分支匝间短路 a1(37)a1(36),即恶滩发电机 a 相第 1 分支第 36 号线圈的下层边和 a 相第 1 分支第 37 号线圈的上层边发生端部交叉短路,短路匝数仅 1 匝。

从上述数据可知,中性点连线最大电流约 30 000 A,为额定电流的 5 倍左右;最小电流仅 2~5 A,不到额定电流的 0.1%,这些小电流的故障均非零序电流型横差保护所能反应,选择电流互感器一次额定电流和变比时不予考虑。

基于以下理由,最终选择零序横差保护的电流互感器型号为 5P20—1000/5 A:

- 考虑恶滩发电机容量中等(150 MW),不装设灵敏段(低定值、小变比)和不灵敏段(高定值、大变比)零序横差保护,所以只装设一段,只有一个互感

器变比要选择。

流过零序电流型横差保护的一次短路电流在 20 000 A 以下的内部故障有 11 685 种,占 98.36%;流过零序电流型横差保护的一次短路电流在 20 000 A 以下的内部故障有 11 624 种,占 97.85%,5P20—1000/5 A 互感器能保证误差小于 5%。余下约 1%~2%的内部故障,短路电流在 30 000 A 及以下,该互感器的误差可能超过 10%,但这并不影响零序电流型横差保护的灵敏动作。

- 二次负荷不大,二次额定电流可以选较大值 5 A。

- 绝大多数中性点连线电流大于 150 A,1000/5 A 的互感器已能准确工作(一次电流应大于 $1000 \times 15\% = 150 \text{ A}$);而且零序横差保护的整定动作电流为 $6284.1 \times 5\% = 314 \text{ A}$,1000/5 A 互感器正处于良好工作状态。

4.2 零序电流型横差保护配置方案的确定和评估
 综合统计对比各种零序电流型横差保护的灵敏性见表 7。

表 7 各种零序电流型横差保护方案对恶滩发电机所有可能发生故障的灵敏性的综合统计

Tab. 7 The protective sensitivities of different zero - sequence current transverse differential protection schemes for all possible faults of Etan generator

零序电流型横差保护的组合选择	灵敏动作数 ($K_{sen} = 1.5$)		可能动作数 ($1.5 > K_{sen} = 1.0$)		不能动作数 ($K_{sen} < 1.0$)		
	单机空载运行	联网空载运行	单机空载运行	联网空载运行	单机空载运行	联网空载运行	
引出 2 个中性点	零序电流型横差保护	9 921	10 382	633	478	1 326	1 020
	零序电流型横差保护	9 783	10 159	710	568	1 387	1 153
	零序电流型横差保护	9 930	10 321	612	503	1 338	1 056
引出 3 个中性点	零序电流型横差保护 与	10 814	10 988	439	342	627	550
	零序电流型横差保护 与	10 852	11 002	414	326	614	552
	零序电流型横差保护 与	10 862	10 995	388	318	630	567

从表 7 可以清楚地看到,在单机空载运行状态下,引出 2 个中性点装设的 1 套零序电流型横差保护最多可对 9 930 种内部故障起到有效的保护;而如果引出 3 个中性点、装设 2 套零序电流型横差保护,可有效保护的最多故障数能达到 10 862 种,增加了 932 种、占所有故障数的 7.85%。考虑到多引出 1 个中性点、并增加 1 个中性点连线之间的互感器需付出的代价并不大,但对保护性能的改善却是非常明显的,建议引出 3 个中性点,并采用图 1(c)所示的两套零序电流型横差保护(与)。

最终决定采用两套零序电流型横差保护,该保护方案对恶滩发电机内部短路不能灵敏动作的故障数见表 8。为此必须增设其它保护,解决余下的约

1000 种内部故障的保护。

表 8 装设两套零序电流型横差保护与后,恶滩发电机的不能动作故障数 ($K_{sen} < 1.5$) 及其性质

Tab. 8 The non - operation numbers and fault types of two kinds of zero - sequence current transverse differential protection scheme

	单机空载运行					联网空载运行				
	匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路		
	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计
同槽故障	137	0	41	0	178	137	0	19	0	156
端部故障	698	12	119	11	840	667	12	48	2	729
总计	835	12	160	11	1018	804	12	67	2	885

5 恶滩发电机的第 2 种主保护——不完全纵差保护

为兼顾定子绕组短路和机端引线短路,主保护总配置方案中既要包括横差保护,又要包括纵差保护,因为无论零序电流型横差保护或裂相横差保护,均不反应机端引线短路。从表 8 可以看出,两套零序电流型横差保护与的死区中,同相同分支的匝间短路占到了 80% 以上,而完全纵差保护不反应同相的匝间短路,所以应先考虑装设不完全纵差保护。

恶滩发电机每相 3 分支,如果每相只有 1 个分支安装电流互感器,就只能配置 1 套不完全纵差保护;如果每相在 2 个分支上安装电流互感器,则可以配置 2 套不完全纵差保护。

5.1 不完全纵差保护的灵敏性分析

恶滩发电机可能装设的不完全纵差保护、

表 9 恶滩发电机单机空载运行状态下各种不完全纵差保护方案对两套零序电流型横差保护与不能保护的端部故障(共 178 种)的灵敏性统计

Tab. 9 The protective sensitivities of different incomplete longitudinal differential protections for slot faults not protected by two kinds of zero - sequence current transverse differential protection in the case of Etan generator under no load

不完全纵差保护的组合选择	灵敏动作数 ($K_{sen} > 1.5$)					可能动作数 ($1.5 > K_{sen} > 1.0$)					不能动作数 ($K_{sen} < 1.0$)					
	匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路			
	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	
使用一套不完全纵差保护	不完全纵差保护	33	0	32	0	65	47	0	1	0	48	57	0	8	0	65
不完全纵差保护	不完全纵差保护	35	0	37	0	72	41	0	4	0	45	61	0	0	0	61
不完全纵差保护	不完全纵差保护	34	0	36	0	70	45	0	3	0	48	58	0	2	0	60
使用两套不完全纵差保护	不完全纵差保护与	53	0	39	0	92	54	0	2	0	56	30	0	0	0	30
不完全纵差保护与	不完全纵差保护与	55	0	39	0	94	55	0	2	0	57	27	0	0	0	27
不完全纵差保护与	不完全纵差保护与	55	0	39	0	94	55	0	2	0	57	27	0	0	0	27

表 10 恶滩发电机单机空载运行状态下各种不完全纵差保护方案对两套零序电流型横差保护与不能保护的端部故障(共 840 种)的灵敏性统计

Tab. 10 The protective sensitivities of different incomplete longitudinal differential protections for end faults not protected by two kinds of zero - sequence current transverse differential protection in the case of Etan generator under no load

不完全纵差保护的组合选择	灵敏动作数 ($K_{sen} > 1.5$)					可能动作数 ($1.5 > K_{sen} > 1.0$)					不能动作数 ($K_{sen} < 1.0$)					
	匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路			匝间短路		相间短路			
	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	
使用一套不完全纵差保护	不完全纵差保护	246	9	101	11	367	147	3	2	0	152	305	0	16	0	321
不完全纵差保护	不完全纵差保护	267	0	112	11	390	117	3	6	0	126	314	9	1	0	324
不完全纵差保护	不完全纵差保护	233	1	103	11	348	142	5	6	0	153	323	6	10	0	339
使用两套不完全纵差保护	不完全纵差保护与	364	9	117	11	501	108	3	1	0	112	226	0	1	0	227
不完全纵差保护与	不完全纵差保护与	367	1	114	11	493	107	6	5	0	118	224	5	0	0	229
不完全纵差保护与	不完全纵差保护与	343	9	114	11	477	126	3	5	0	134	229	0	0	0	229

的构成如图 3 所示,其中 取各相第 1 分支电流, 取各相第 2 分支电流, 取各相第 3 分支电流。

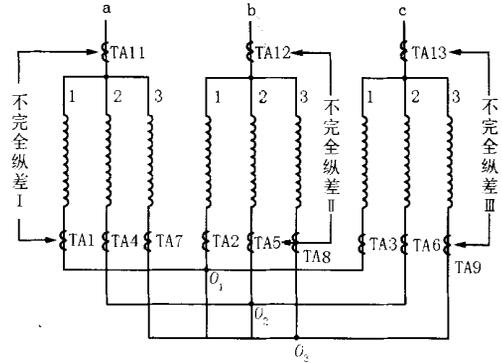


图 3 三种不完全纵差保护的示意图

Fig. 3 Three kinds of incomplete longitudinal differential protection

前已确定装设两套零序电流型横差保护,它们均有一部分不能保护的发电机内部故障,增设不完全纵差保护后改善保护性能的结果见表 9 和表 10。

从表 9 和表 10 可见,增设一套不完全纵差保护,可使单机空载下灵敏动作故障数增加 72 + 390 种,如果再增设一套纵差保护,则灵敏动作故障数

增至 92 + 501 种。
对于联网空载运行状态下的灵敏性统计见表 11 和表 12。

表 11 恶滩发电机联网空载运行状态下各种不完全纵差保护方案对两套零序电流型横差保护与不能保护的槽故障(共 156 种)的灵敏性统计

Tab. 11 The protective sensitivities of different incomplete longitudinal differential protections for slot faults not protected by two kinds of zero - sequence current transverse differential protection in the case of Etan generator paralleled to the power system under no load

不完全纵差保护的组合选择		灵敏动作数 ($K_{sen} > 1.5$)					可能动作数 ($1.5 > K_{sen} > 1.0$)					不能动作数 ($K_{sen} < 1.0$)				
		相间短路		相间短路			相间短路		相间短路			相间短路		相间短路		
		相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计
使用一套不完全纵差保护	不完全纵差保护	35	0	12	0	47	46	0	1	0	47	56	0	6	0	62
不完全纵差保护	不完全纵差保护	35	0	16	0	51	42	0	3	0	45	60	0	0	0	60
不完全纵差保护	不完全纵差保护	36	0	14	0	50	44	0	3	0	47	57	0	2	0	59
使用两套不完全纵差保护	不完全纵差保护与不完全纵差保护	53	0	18	0	71	55	0	1	0	56	29	0	0	0	29
不完全纵差保护	不完全纵差保护与不完全纵差保护	57	0	17	0	74	54	0	2	0	56	26	0	0	0	26
不完全纵差保护	不完全纵差保护与不完全纵差保护	57	0	17	0	74	54	0	2	0	56	26	0	0	0	26

表 12 恶滩发电机联网空载运行状态下各种不完全纵差保护方案对两套零序电流型横差保护与不能保护的端部故障(共 729 种)的灵敏性统计

Tab. 12 The protective sensitivities of different incomplete longitudinal differential protections for end faults not protected by two kinds of zero - sequence current transverse differential protection in the case of Etan generator paralleled to the power system under no load

不完全纵差保护的组合选择		灵敏动作数 ($K_{sen} > 1.5$)					可能动作数 ($1.5 > K_{sen} > 1.0$)					不能动作数 ($K_{sen} < 1.0$)				
		相间短路		相间短路			相间短路		相间短路			相间短路		相间短路		
		相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	总计
使用一套不完全纵差保护	不完全纵差保护	240	9	33	2	284	133	3	1	0	137	294	0	14	0	308
不完全纵差保护	不完全纵差保护	256	0	43	2	301	107	4	5	0	116	304	8	0	0	312
不完全纵差保护	不完全纵差保护	225	1	33	2	261	130	6	5	0	141	312	5	10	0	327
使用两套不完全纵差保护	不完全纵差保护与不完全纵差保护	347	9	47	2	405	100	3	1	0	104	220	0	0	0	220
不完全纵差保护	不完全纵差保护与不完全纵差保护	350	1	44	2	397	98	6	4	0	108	219	5	0	0	224
不完全纵差保护	不完全纵差保护与不完全纵差保护	327	9	44	2	382	116	3	4	0	123	224	0	0	0	224

通过以上分析计算,各种不完全纵差保护与两套零序电流型横差保护组合后取得的灵敏性改善情况见表 13。

表 13 恶滩发电机各种不完全纵差保护方案对两套零序电流型横差保护与不能保护的所有故障的灵敏性综合统计

Tab. 13 The protective sensitivities of different incomplete longitudinal differential protections for all possible faults not protected by two kinds of zero - sequence current transverse differential protection

零序电流型横差保护的组合选择		灵敏动作数 ($K_{sen} > 1.5$)		可能动作数 ($1.5 > K_{sen} > 1.0$)		不能动作数 ($K_{sen} < 1.0$)			
		单机空载运行		联网空载运行		单机空载运行		联网空载运行	
		单机空载运行	联网空载运行	单机空载运行	联网空载运行	单机空载运行	联网空载运行	单机空载运行	联网空载运行
使用一套不完全纵差保护	不完全纵差保护	432	331	200	184	386	370		
不完全纵差保护	不完全纵差保护	462	352	171	161	385	372		
不完全纵差保护	不完全纵差保护	418	311	201	188	399	386		
使用两套不完全纵差保护	不完全纵差保护与不完全纵差保护	593	476	168	160	257	249		
不完全纵差保护	不完全纵差保护与不完全纵差保护	587	471	175	164	256	250		
不完全纵差保护	不完全纵差保护与不完全纵差保护	571	456	191	179	256	250		

从表 13 可以看到,在安装两套零序电流型横差保护与后,只要再装一套不完全纵差保护(参见图 7),不能动作的故障数就已经减少到了 5%以内(单机空载运行时:556 种(4.68%);联网空载运行时:533 种(4.49%),基本满足技术要求。

如果条件允许,可以在每相再多装一个分支电流互感器,并再安装一套不完全纵差保护,那么在

单机空载运行时又可多保护 131 种(1.10%)、在联网空载运行时又可多保护 124 种(1.04%)内部故障。

当然对恶滩发电机而言,即使装设两套零序电流型横差保护和两套不完全纵差保护,仍有 400 余种内部短路得不到保护($K_{sen} < 1.5$)。

表 14 恶滩发电机单机空载运行状态下,不完全裂相横差保护对两套零序电流型横差保护与、两套不完全纵差保护与都不能保护的故障(共 425 种)的灵敏性统计

Tab. 14 The protective sensitivities of incomplete split - phase transverse differential protection for all possible faults not protected by two kinds of zero - sequence current transverse differential protection and two kind of incomplete longitudinal differential protection in the case of Etan generator under no load

	灵敏动作数 ($K_{sen} > 1.5$)					可能动作数 ($1.5 > K_{sen} > 1.0$)					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		总计	匝间短路		相间短路		总计
	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同		相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同		相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	
同槽故障	40	0	1	0	41	7	0	1	0	8	37	0	0	0	37
端部故障	75	3	0	0	78	69	0	2	0	71	190	0	0	0	190
总计	115	3	1	0	119	76	0	3	0	79	227	0	0	0	227

表 15 恶滩发电机联网空载运行状态下,不完全裂相横差保护对两套零序电流型横差保护与、两套不完全纵差保护与都不能保护的故障(共 409 种)的灵敏性统计

Tab. 15 The protective sensitivities of incomplete split - phase transverse differential protection for all possible faults not protected by two kinds of zero - sequence current transverse differential protection and two kind of incomplete longitudinal differential protection in the case of Etan generator paralleled to the power system under no load

	灵敏动作数 ($K_{sen} > 1.5$)					可能动作数 ($1.5 > K_{sen} > 1.0$)					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		总计	匝间短路		相间短路		总计
	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同		相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同		相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	
同槽故障	42	0	1	0	43	5	0	0	0	5	37	0	0	0	37
端部故障	70	3	0	0	73	70	0	1	0	71	180	0	0	0	180
总计	112	3	1	0	116	75	0	1	0	76	217	0	0	0	217

表 16 恶滩发电机对两套零序电流型横差保护与、两套不完全纵差保护与、一套不完全裂相横差保护都不能动作的故障数 ($K_{sen} < 1.5$) 及其性质

Tab. 16 The non - operation numbers and fault types of two kinds of zero - sequence current transverse differential protection scheme, two kinds of incomplete longitudinal differential protection and one kind of incomplete split - phase transverse differential protection

	单机空载运行					联网空载运行				
	匝间短路		相间短路		总计	匝间短路		相间短路		总计
	相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同		相同分支	不同分支	分支编号相同	分支编号不同	
同槽故障	44	0	1	0	45	42	0	0	0	42
端部故障	259	0	2	0	261	250	0	1	0	251
总计	303	0	3	0	306	292	0	1	0	293

6 恶滩发电机的第 3 种主保护——不完全裂相横差保护

如果已确定要装两套不完全纵差保护,则每相 3 分支中必有 2 个分支已装设互感器,这时为进一步提高保护灵敏性和保护范围,可在不加互感器的条件下增设不完全裂相横差保护(参见图 6),后者的灵敏性统计分析见表 14 和表 15。

从表 14、15 可以看到,再装一套不完全裂相横差保护,能够在单机空载运行时多保护 119 种内部故障,在联网空载运行时多保护 116 种内部故障,相对于总故障数 11 880 的比例仅约 1%,但绝对数量仍超过 100 种,应该说有一定的提高作用。

装设以上五种主保护后,对恶滩发电机尚不能保护的情况见表 16。

从表 16 可以看出,在安装了两套零序电流型横差保护与、两套不完全纵差保护与、一套不完全裂相横差保护之后,仍然不能灵敏动作的内部短路几乎都是同相同分支匝间短路了,所以再增加完全差动保护也无济于事,徒然增加互感器。

7 恶滩发电机主保护配置的三种方案评估

7.1 装设两套零序电流型横差保护(、)和一套不完全纵差保护(图 4)——方案一

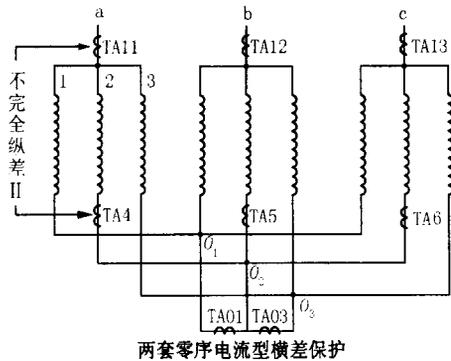


图 4 恶滩发电机内部故障的主保护配置方案一

Fig. 4 The first kind of main protection configuration scheme for internal faults of Etan generator

方案一的动作情况见表 17 和表 18。它需要 8 台电流互感器。

表 17 恶滩发电机单机空载运行状态下,各种内部故障对方案一的 3 套主保护的 动作情况

Tab. 17 The performance of three kinds of protection for slot and end faults of Etan generator under no load

能同时灵敏反应的 保护数		0	1	2	3
同槽故障数	匝间 相同分支	102	53	66	157
	短路 不同分支	0	0	9	45
	相间 分支编号相同	4	38	78	165
	短路 分支编号不同	0	0	4	71
总计		106	91	157	438
端部故障数	匝间 相同分支	431	375	540	1174
	短路 不同分支	12	2	62	284
	交叉 相间 分支编号相同	7	114	1023	4745
	短路 分支编号不同	0	11	112	2196
总计		450	502	1737	8399
总计		556	593	1894	8837

7.2 装设两套零序电流型横差保护(、)和两套不完全纵差保护(、)(图 5)——方案二

方案二的动作情况见表 19 和表 20。它需要 11 台互感器。

表 18 恶滩发电机联网空载运行状态下,各种内部故障对方案一的 3 套主保护的 动作情况

Tab. 18 The performance of three kinds of protection for slot and end faults of Etan generator paralleled to the power system under no load

能同时灵敏反应的 保护数		0	1	2	3
同槽故障数	匝间 相同分支	102	52	61	163
	短路 不同分支	0	0	9	45
	相间 分支编号相同	3	17	45	220
	短路 分支编号不同	0	0	2	73
总计		105	69	117	501
端部故障数	匝间 相同分支	411	358	539	1212
	短路 不同分支	12	2	62	284
	交叉 相间 分支编号相同	5	46	498	5340
	短路 分支编号不同	0	2	88	2229
总计		428	408	1187	9065
总计		533	477	1304	9566

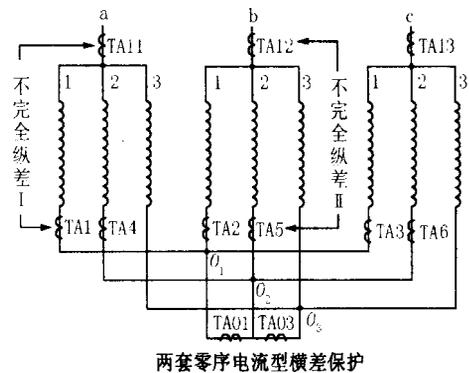


图 5 恶滩发电机内部故障的主保护配置方案二

Fig. 5 The second kind of main protection configuration scheme for internal faults of Etan generator

表 19 恶滩发电机单机空载运行状态下,各种内部故障对 4 套主保护的 动作情况

Tab. 19 The performance of four kinds of protection for slot and end faults of Etan generator under no load

能同时灵敏反应的 保护数		0	1	2	3	4
同槽故障数	匝间 相同分支	84	44	41	52	157
	短路 不同分支	0	0	0	9	45
	相间 分支编号相同	2	10	35	73	165
	短路 分支编号不同	0	0	0	4	71
总计		86	54	76	138	438
端部故障数	匝间 相同分支	334	256	276	483	1171
	短路 不同分支	3	9	2	62	284
	交叉 相间 分支编号相同	2	23	121	1001	4742
	短路 分支编号不同	0	0	11	112	2196
总计		339	288	410	1658	8393
总计		425	342	486	1796	8831

表 20 恶滩发电机联网空载运行状态下,各种内部故障对 4 套主保护的動作情况

Tab. 20 The performance of four kinds of protection for slot and end faults of Etan generator paralleled to the power system under no load

能同时灵敏反应的保護数		0	1	2	3	4
同槽故障数	匝间 相同分支	84	42	40	49	163
	短路 不同分支	0	0	0	9	45
	相间 分支编号相同	1	9	14	41	220
	短路 分支编号不同	0	0	0	2	73
	总计	85	51	54	101	501
端部故障数	匝间 相同分支	320	238	266	488	1208
	短路 不同分支	3	9	2	62	284
	交叉 相间 分支编号相同	1	21	45	487	5335
	短路 分支编号不同	0	0	2	88	2229
	总计	324	268	315	1125	9056
总计	409	319	369	1226	9557	

7.3 装设两套零序电流型横差(、)、两套不完全纵差(、)和一套不完全裂相横差保护() (图 6)——方案三

方案三也需要 11 台互感器,動作情况如表 21 和表 22。

表 21 恶滩发电机单机空载运行状态下,各种内部故障对 5 套主保护的動作情况

Tab. 21 The performance of five kinds of protection for slot and end faults of Etan generator under no load

能同时灵敏反应的保護数		0	1	2	3	4	5
同槽故障数	匝间 相同分支	44	47	48	38	59	142
	短路 不同分支	0	0	0	0	9	45
	相间 分支编号相同	1	2	16	33	86	147
	短路 分支编号不同	0	0	0	0	8	67
	总计	45	49	64	71	162	401
端部故障数	匝间 相同分支	259	133	238	319	545	1026
	短路 不同分支	0	3	9	2	70	276
	交叉 相间 分支编号相同	2	1	47	144	1194	4501
	短路 分支编号不同	0	0	11	4	187	2117
	总计	261	137	305	469	1996	7920
总计	306	186	369	540	2158	8321	

7.4 恶滩发电机主保护的最终配置方案

已完成恶滩发电机主保护方案的全部分析论证工作,每一步的决定均建立在定量的科学基础上。最终要在三个总配置方案中选定一个,这与发电机本身容量和重要性有关。如强调保护性能的完善,当首推

方案三;如考虑机组容量不大,要求设备(互感器)少、方案简单,则当选方案一,后者的不能動作数已在 5% 以内,对比目前通常设计的方案,性能已大有提高。

表 22 恶滩发电机联网空载运行状态下,各种内部故障对 5 套主保护的動作情况

Tab. 22 The performance of five kinds of protection for slot and end faults of Etan generator paralleled in under no load

能同时灵敏反应的保護数		0	1	2	3	4	5
同槽故障数	匝间 相同分支	42	49	44	39	56	148
	短路 不同分支	0	0	0	0	9	45
	相间 分支编号相同	0	2	9	13	44	217
	短路 分支编号不同	0	0	0	0	2	73
	总计	42	51	53	52	111	483
端部故障数	匝间 相同分支	250	122	222	316	533	1077
	短路 不同分支	0	3	9	2	70	276
	交叉 相间 分支编号相同	1	2	19	47	514	5306
	短路 分支编号不同	0	0	2	1	109	2207
	总计	251	127	252	366	1226	8366
总计	293	178	305	418	1337	9349	

表 23 恶滩发电机联网额定负载运行状态下,发生单分支开焊后对采用的 5 套主保护的動作情况

Tab. 23 The performance of five kinds of protection for branch faults of Etan generator paralleled in under rated load (√:灵敏動作; :可能動作; ×:不能動作)

开焊的分支号	a1	a2	a3	b1	b2	b3	c1	c2	c3
零序电流型横差保护	√	√	√	√	√	√	√	√	√
零序电流型横差保护	√	√	√	√	√	√	√	√	√
不完全纵差保护	√	√	√	√	√	√	√	√	√
不完全纵差保护	√	√	√	√	√	√	√	√	√
不完全裂相横差保护	√	√	√	√	√	√	√	√	√

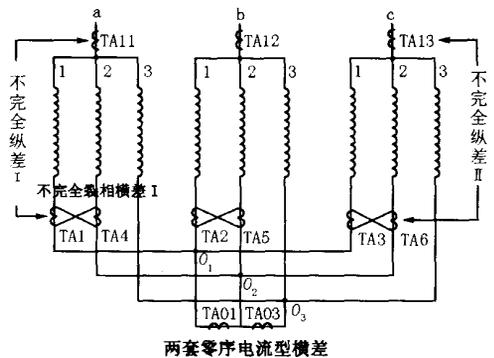


图 6 恶滩发电机内部故障的主保护配置方案三
Fig. 6 The third kind of main protection configuration scheme for internal faults of Etan generator

对于上述的三套主保护配置方案,在发电机满

载联网运行时,发生 1 分支的开焊断线,也有很好的灵敏性,见表 23。

8 结论

本文详细介绍了一台发电机主保护方案设计的全过程,阐述了作者的设计思路、观点和具体方法。由于完全改变过去不重定量、仅凭概念和经验的设计方法,新方法要求设计人员(包括整定计算的运行人员)化费较多的精力和时间,以求取得高质量的设计成果,确保发电机的安全运行。随着设计工作经验的积累,繁重的计算工作量有望简化;即将公开发行的《发电机内部故障分析软件》,为推广新设计方法创造了条件。

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,桂林,王祥珩,等.大型水轮发电机微机型主保护设计方法再商榷[J].继电器,2002,30(9):1-6.
- [3] 王维俭,桂林,王祥珩,等.不同型号的发电机应配置不同的主保护[J].电力自动化设备,2002,22(12):1-5.
- [4] 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.

收稿日期: 2002-11-19

作者简介:

王维俭(1930-),男,教授,长期从事大机组保护的的教学和研究工作;

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;

谢敏(1967-),男,高级工程师,主要从事水电厂继电保护的设计工作。

Normalizing the design method of main protection for large and medium sized generators

WANG Wei - jian¹, SUN Yu - guang¹, WANG Xiang - heng¹, GUI Lin¹, XIE Min²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Guangxi Prospecting and Designing Institute of Electric Power Industry, Nanning, 530023, China)

Abstract: Against the lack of scientific design method of main protection for generator at present, a new design view is presented in this paper. The design view entirely corrects the traditional configuration of main protection depended on the concept of protection, the experience of designer and the habitual configuration of other power stations. According to the view, the design of main protection scheme can be quantified. Firstly, the above method is based on the proper calculation of short circuit currents in stator windings. Secondly, the leading - out mode of branches at the neutral point of generator is determined by checking the sensitive coefficients of all kinds of protection scheme. Finally, considering the practical situation of generator and comparing the advantages and disadvantages of all kinds of protection, the final main protection configuration scheme is determined according to the design principle named advantage complementation and comprehensive utilization.

Key words: generator; main protection; internal fault; design method