

三峡电站1号发电机内部故障主保护配置方案的研究

桂林¹, 王祥珩¹, 王维俭¹, 张学深²

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000)

摘要: 在对三峡电站1号发电机所有可能发生的同槽和端部交叉故障进行仿真计算的基础上, 计算了常用的四种主保护方案对各种内部故障的灵敏度值, 并对四种保护方案及其组合不能动作的故障数进行了统计, 然后进一步分析了不能动作故障的性质, 在此基础上提出了该发电机内部故障主保护的总体配置方案。

关键词: 发电机; 内部故障; 主保护方案及其组合; 优势互补

中图分类号: TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)02-0004-09

1 前言

三峡电站分为左岸电站、右岸电站及右岸地下电站3个独立电站, 左岸电站装机14台, 右岸电站装机12台, 右岸地下电站装机6台。三峡左岸电站1号发电机的单机额定容量为700MW, 冷却方式为定子水冷, 定子每相为5分支结构, 定子槽数为540槽, 每分支36槽, 采用自并励励磁方式。

发电机额定参数为:

$$U_N = 20\text{kV}, \quad I_N = 22453\text{A}, \quad \cos \varphi_N = 0.9,$$

$$I_{f0} = 2100\text{A}, \quad I_{fN} = 3734\text{A}$$

升压变压器和系统等值电抗(折合到发电机电压级)约为0.2p.u。

由于三峡发电机组造价昂贵、结构复杂, 一旦出现故障, 不仅检修期长, 而且将造成巨大的直接和间接经济损失, 因此三峡机组内部故障主保护装置的拒动或误动, 都将产生严重后果, 决不能掉以轻心。各种保护方案的选择及优化配置都必须建立在对该发电机内部故障的全面计算及保护灵敏度的认真分析的基础上^[1,2]。由于各种保护方案都存在各自的保护死区, 因此如何通过保护方案的优化配置来实现互补、以达到对发电机内部故障的保护范围最大就显得十分重要。本文将在此基础上讨论三峡电站1号发电机内部故障主保护的总体配置方案。

2 发电机内部故障类型

由于各种保护方案对于不同的内部故障的动作情况是不同的, 因此有必要先对三峡电站1号发电机可能发生的内部故障类型作简要介绍(主要讨论匝间短路和相间短路)。在对1号发电机可能发生的内部故障类型进行分析的基础上, 根据各种类型的内部故障所占比率及出现几率, 来客观评价对于

该台发电机各种主保护方案的优劣。

根据对三峡电站1号发电机绕组展开图的分析, 发现^[4]:

- 如果定子槽内上、下层线棒间发生短路, 则同槽故障数为540种(等于定子槽数)。通过对同槽故障性质的分析, 发现其中同相同分支匝间短路数为420种, 占77.8%; 同相不同分支匝间短路数60种, 占11.1%; 相间短路数为60种, 占11.1%。同相同分支匝间短路匝数有1、3、5、7匝四种, 其中最小短路匝数为1匝, 匝比为2.8%(小于5%), 其对各种保护方案灵敏度的要求极高; 同相不同分支短路匝数只有37匝一种, 且两个分支的短路点相差很远; 相间短路匝数有22、40、58匝三种。同槽故障导致的相间短路中属于不同相同编号分支(例如 a_1 对 b_1)发生短路这一类性质的相间短路所占比率为58.3%。

- 如果定子绕组端部交叉处发生短路, 则端部交叉故障(文中简称为端部故障)数为10950种。通过对端部故障性质进行分析, 发现同相同分支匝间短路数为930种, 占8.5%, 其中最小短路匝数为2匝, 匝比为5.6%, 其对各种保护方案灵敏度的要求也很高; 同相不同分支匝间短路数为660种, 占6.0%; 相间短路数为9360种, 占85.5%。端部故障绝大多数表现为相间短路, 而相间短路中属于不同相同编号分支发生短路这一类性质的相间短路所占比率为73.6%。

3 发电机主保护的几个名词定义

I_{OP}^* ——以发电机额定电流为基值的保护动作电流标么值;

S ——差动保护比率制动特性的斜率;

灵敏动作 ——灵敏系数 $K_{sen} = 1.5$;

可能动作 —— $1.5 > K_{sen} > 1.0$;

不能动作 —— $K_{sen} < 1.0$ 。

在文中统计各种主保护方案及其组合不能动作的故障数时,将可能动作和不能动作都归为不能动作,即以 $K_{sen} < 1.5$ 为界。

接入主保护的发电机中性点侧分支数 $b = 1, 2, 3, 4, 5$, 当 $b = 2, 3$ 时有相邻连接(1,2 分支, 1,2,3 分支, ……)和相间连接(1,3 分支, 1,3,5 分支, ……)之分。

4 发电机内部故障主保护灵敏度校验

在运用“多回路分析法”^[2]对三峡电站 1 号发电机所有可能发生的同槽和端部故障进行计算和分析的基础上,计算了各种主保护方案的灵敏度值,并对各种主保护方案的灵敏动作数、可能动作数和不能动作数进行了统计。由于篇幅有限,这里仅列出了并网额定负载这一种运行方式下的结果(如表 1、2 所示)。

表 1 三峡电站 1 号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

主保护方案			总故障数	灵敏动作数			可能动作数			不能动作数		
				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		相同分支	不同分支		相同分支	不同分支	
零序电流型横差	一套保护(2-3 组合) $I_{OP}^* = 0.05$	相邻连接	540	194	60	47	57	0	5	169	0	8
		相间连接	540	197	60	40	56	0	9	167	0	11
	两套保护(2-1-2 组合) $I_{OP}^* = 0.05$	相邻-相邻	540	233	60	52	55	0	4	132	0	4
		相邻-相间	540	235	60	49	51	0	6	134	0	5
裂相横差	传统 2-3 组合 $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻连接	540	307	60	60	47	0	0	66	0	0
		相间连接	540	310	60	60	54	0	0	56	0	0
	舍弃一分支(2-2 组合) $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻-相邻	540	256	48	60	83	5	0	81	7	0
		相邻-相间	540	272	53	60	69	4	0	79	3	0
不完全纵差	中性点侧接入 2 个分支 $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻连接	540	239	60	60	61	0	0	120	0	0
		相间连接	540	237	60	60	55	0	0	128	0	0
完全纵差($I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$)			540	0	0	60	0	0	0	420	60	0

表 2 三峡电站 1 号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

主保护方案			总故障数	灵敏动作数			可能动作数			不能动作数		
				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		相同分支	不同分支		相同分支	不同分支	
零序电流型横差	一套保护(2-3 组合) $I_{OP}^* = 0.05$	相邻连接	10950	735	660	7648	83	0	566	112	0	1146
		相间连接	10950	720	660	8116	79	0	476	131	0	768
	两套保护(2-1-2 组合) $I_{OP}^* = 0.05$	相邻-相邻	10950	784	660	8128	54	0	584	92	0	648
		相邻-相间	10950	787	660	8384	55	0	474	88	0	502
裂相横差	传统 2-3 组合 $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻连接	10950	858	660	9300	60	0	44	12	0	16
		相间连接	10950	868	660	9304	41	0	44	21	0	12
	舍弃一分支(2-2 组合) $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻-相邻	10950	757	610	9202	58	36	112	115	14	46
		相邻-相间	10950	770	632	9220	76	22	102	84	6	38
不完全纵差	中性点侧接入 2 个分支 $I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$	相邻连接	10950	788	660	9210	62	0	64	80	0	86
		相间连接	10950	797	660	9134	49	0	106	84	0	120
完全纵差($I_{OP}^* = 0.1, S = 0.3$)			10950	0	0	9360	0	0	0	930	660	0

5 发电机内部故障主保护方案构成方式的确定及其相应组合

三峡电站 1 号发电机每相 5 并联分支,因此构成零序电流型横差保护有以下两种方式:

5.1 单元件横差保护(即零序电流型横差保护)^[3]

- 装设一套零序电流型横差保护

由三相的两个分支(如1、2分支)和三相的其余三个分支(如3、4、5分支)分别结成两个中性点 O_1 和 O_2 ,在 O_1 和 O_2 之间接一套零序电流型横差保护。也就是将整个定子绕组分成两部分,两部分之间接一套零序电流型横差保护。

· 装设两套零序电流型横差保护

将每相5个并联分支分为2-1-2三部分,例如可以由三相的1、2分支和4、5分支分别结成 O_1 和 O_3 ,再单独由三相的第3分支结成 O_2 ,然后在 O_1 、 O_2 之间和 O_2 、 O_3 之间各接一套零序电流型横差保护。也就是将整个定子绕组分成三部分,共装设两套零序电流型横差保护,各套保护各自独立出口跳闸。

从表1、表2中可以看出,无论采用“相邻连接”还是“相间连接”,装设两套零序电流型横差保护的灵敏性均高于装设一套零序电流型横差保护,因为零序电流型横差保护比较的是内部故障时一台发电机两部分之间的不平衡,而内部故障时将整个定子绕组分成三部分,其各部分之间的不平衡度应大于将整个定子绕组分成两部分时两部分之间的不平衡度,因此零序电流型横差保护采用装设两套零序电流型横差保护这种方式。

5.2 裂相横差保护

构成裂相横差保护也有以下两种方式:

· 传统裂相横差保护(每相分为2个分支与3个分支的方式)

将1号发电机每相5个并联分支中的两个分支(“相邻”或“相间”连接)与该相其余的三个分支之间构成横差,对内部故障时一相两部分之间的不平衡进行比较。

· 舍弃一个分支的裂相横差保护(每相分为2个分支与2个分支的方式)

与5.1中的装设两套零序电流型横差保护(例如12-3-45组合)相对应,将每相的2个分支(例如1、2分支)与该相的另外两个分支(例如4、5分支)组成裂相横差保护(3分支不引入),其优点在于构成每相裂相横差保护的三个电流互感器的型号可以取得一致,但从表1、表2中可以看出,不管采用“相邻连接”还是“相间连接”其灵敏性明显低于传统裂相横差保护。下面对此做一个简要分析。

裂相横差保护反应的是内部故障时每相的不平衡度,但当同相同分支匝间短路的故障分支恰好为被舍弃的分支(例如上面提到的3分支)时,该相其余4个分支之间的不平衡度就很小了,必然导致故

障相保护灵敏度的降低;当发生两个分支的短路点相差很远的同相不同分支匝间短路,如果被舍弃的分支恰好为小匝数短路支路时,该相其余4个分支之间的不平衡度也很小,其灵敏度也将降低;当发生相间短路,如果被舍弃的分支恰好为故障分支时,也将产生同样的结果,故障相保护的灵敏度会降低。

通过计算统计和以上的定性分析,裂相横差保护应选用传统裂相横差保护(每相分为2个分支与3个分支的方式)。

5.3 不完全纵差保护

装设两套零序电流型横差保护之后,不完全纵差保护中性点侧接入分支数也就确定下来了(因为不完全纵差保护中性点侧接入分支数的选择与装设一套还是两套零序电流型横差保护相关),每相左、右两侧可各取两个分支接入不完全纵差保护,一套不完全纵差保护用来保护发电机,另一套不完全纵差保护用来保护发一变组。

5.4 完全纵差保护

众所周知,传统的完全纵差保护对相间短路的灵敏度高于其它保护方案,但它完全不反应匝间短路和分支开焊。这从表1、表2的统计结果中也可以看出,完全纵差保护对所有由同槽和端部故障导致的相间短路都能灵敏动作(灵敏动作故障数分别为60种和9360种),对同槽和端部故障导致的匝间短路则都不能动作(不能动作故障数分别为480种和1590种)。

从表1、表2的统计结果可以清楚地看出通常采用的四种主保护方案都存在各自的保护死区,任何一套主保护方案均不可能对1号发电机所有可能发生的同槽和端部故障都灵敏动作,而三峡发电机发生的相间短路、匝间短路,均要求有双重快速主保护(实际情况是对发电机内部故障有三重或更高冗余度的保护)。因此有必要对各种保护方案的优化配置进行研究,通过两种或三种保护方案的优化组合,来达到对发电机内部故障的保护范围最大的目的,即通过保护方案的优化组合来实现互补,使其不能动作的故障数为最少。

对以上四种主保护方案的组合有以下几种方式:

· 一套横差保护和一套纵差保护

可以选择零序电流型横差保护(装设两套零序电流型横差保护,以下同)与不完全纵差保护(装设两套不完全纵差保护,以下同)进行组合,也可以选择传统裂相横差保护和不完全纵差保护进行组合。

由于完全纵差保护对匝间短路完全不反应,其与一套横差保护进行组合的互补性太差,因此不予选择。

· 两套横差保护和一套纵差保护

可以选择零序电流型横差保护、传统裂相横差保护和不完全纵差保护进行组合,也可以选择零序电流型横差保护、传统裂相横差保护和完全纵差保护进行组合。

· 一套横差保护和两套纵差保护

可以选择零序电流型横差保护、不完全纵差保护和完全纵差保护进行组合,也可以选择传统裂相横差保护、不完全纵差保护和完全纵差保护进行组合。

· 两套横差保护和两套纵差保护

选择以上四种主保护方案进行组合。

6 各种主保护方案及其组合不能动作故障数的统计和分析

在运用“多回路分析法”^[21]对三峡电站 1 号发电机所有可能发生的同槽和端部故障进行仿真计算的基础上,计算了上述四种主保护方案对各种内部故障的灵敏度值,并对各种主保护方案及其组合不能动作故障数进行了统计,然后进一步分析了各种主保护方案及其组合不能动作故障的性质,为后面主保护方案的优化配置打下基础。由于篇幅有限,这里仅列出了并网额定负载这一种运行方式下的结果,各种主保护方案也只选取了其中几种典型的连接形式作为代表,如表 6 所示。

表 3 对于同槽故障各种主保护方案不能动作故障数及其性质

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	一套保护 (2-3 组合)	相邻连接 (12-345)	239	105	87	28	6	0	13
		相间连接 (13-245)	243	105	77	29	12	0	20
	两套保护 (2-1-2 组合)	相邻-相邻 (12-3-45)	195	105	72	9	1	0	8
		相邻-相间 (15-3-24)	196	105	65	13	2	0	11
		相间-相间 (14-3-25)	198	105	60	15	5	0	13
裂相横差	传统 2-3 组合	相邻连接 (12-345)	113	102	9	2	0	0	0
		相间连接 (13-245)	110	91	15	4	0	0	0
不完全纵差	一套保护	相邻连接 (12)	181	105	67	6	3	0	0
		相间连接 (13)	183	105	61	13	4	0	0
	两套保护 (2-2 组合)	相邻-相邻 (12-45)	140	105	32	3	0	0	0
		相邻-相间 (15-24)	140	105	29	6	0	0	0
		相间-相间 (14-25)	152	105	38	9	0	0	0
完全纵差			480	105	105	105	105	60	0

表 4 对于端部故障各种主保护方案不能动作故障数及其性质

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	一套保护 (2-3 组合)	相邻连接 (12-345)	1907	105	69	17	4	0	0	1712
		相间连接 (13-245)	1454	103	60	32	9	6	0	1244
	两套保护 (2-1-2 组合)	相邻-相邻 (12-3-45)	1378	105	40	1	0	0	0	1232
		相邻-相间 (15-3-24)	1119	103	38	2	0	0	0	976
		相间-相间 (14-3-25)	912	101	40	7	0	0	0	764
裂相横差	传统 2-3 组合	相邻连接 (12-345)	132	65	5	2	0	0	0	60
		相间连接 (13-245)	118	54	6	2	0	0	0	56
不完全纵差	一套保护	相邻连接 (12)	292	105	34	3	0	0	0	150
		相间连接 (13)	359	103	24	6	0	0	0	226
	两套保护 (2-2 组合)	相邻-相邻 (12-45)	131	105	10	0	0	0	0	16
		相邻-相间 (15-24)	137	103	16	0	0	0	0	18
		相间-相间 (14-25)	129	101	14	0	0	0	0	14
完全纵差			1590	105	105	240	90	390	660	0

6.1 各种主保护方案不能动作故障数及其性质

从表3中可以看出:

- 对于由同槽故障导致的1匝同相同分支匝间短路,除了传统裂相横差保护(横差保护中的“两个分支”恰好包含故障分支)能对小部分故障动作外,其余三种主保护方案对其都不能动作,因此对这一类型的故障,各种主保护方案的互补性将很差。这就要求我们需对小匝数同相间分支匝间短路的保护继续做工作。

- 对于由同槽故障导致的相间短路,传统裂相横差保护、不完全纵差保护和完全纵差保护均能灵敏动作,但零序电流型横差保护对部分相间短路不能动作,通过对故障性质进行分析,发现均为不同相同编号分支发生的相间短路。因为这种故障情况下的短路回路电流不流过两中性点连线,从而导致保护灵敏度下降。

从表4中可以看出:

- 对于由端部故障导致的2匝同相同分支匝间短路,由于短路匝比大于5%,传统裂相横差保护的灵敏性有了很大提高,零序电流型横差保护和不完全纵差保护还是几乎都不能动作,各种主保护方案之间的互补性依旧很差。

- 由于端部故障导致的相间短路类型与同槽故障导致的相间短路类型不一样,使得零序电流型横差保护、传统裂相横差保护和不完全纵差保护都存在各自的不能动作的相间短路类型,下面对此做一个简要分析:

(1) 零序电流型横差保护不能动作的相间短路类型同前,依然为不同相同编号分支发生的相间短路,由于端部故障导致的相间短路数很多(9360种),而相间短路中属于这种不同相同编号分支发生的相间短路的比率也较大(73.6%),使得零序电流型横差保护不能动作的相间短路数较多。

(2) 传统裂相横差保护不能动作的相间短路类型为机端侧大匝数相间短路(两个分支的短路点均靠近机端侧),此时由于故障相各分支的匝数近于相等,从而使得故障相中性点侧各分支电流的大小和相位近于相同,差动电流太小从而使得故障相保护的灵敏度不高,有时由于互感影响的不同,非故障相的保护倒能可靠动作。

(3) 不完全纵差保护不能动作的相间短路类型为中性点侧小匝数相间短路(两个分支的短路点均靠近中性点侧),下面以图1中实线箭头所示故障为

例来进行分析(由于篇幅限制,前面仅定性分析了各种主保护方案为何对某种类型的内部故障不能动作):三峡电站1号发电机在并网额定负载运行方式下,a相第1条支路的第34号线圈的上层边和b相第1条支路的第36号线圈的下层边由于端部交叉处绝缘损坏而发生相间短路,即 a_1 的5.6%对 b_1 的2.8%发生短路,两个分支的短路点均靠近中性点侧,短路匝数为3匝。各支路(包括附加支路)的基波电流如图1所示。

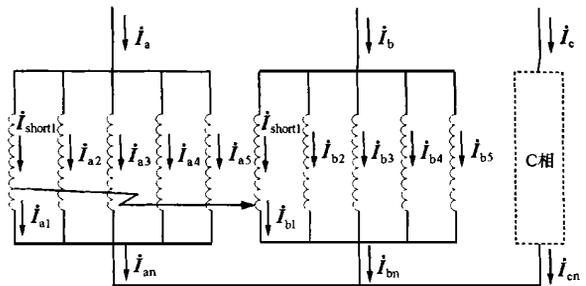


图1 一则中性点侧小匝数相间短路

从图1中可以看出,由于是中性点侧小匝数相间短路,使得 $\dot{I}_{short1} = 3859.6A \quad 128.7^\circ$

与 $\dot{I}_{a2} = 4088.4A \quad 107.9^\circ$ 、 $\dot{I}_{a3} = 4357.8A \quad 104.5^\circ$ 、 $\dot{I}_{a4} = 4357.7A \quad 104.5^\circ$ 、 $\dot{I}_{a5} = 4340.0A \quad 104.0^\circ$

大小相差不大、相位近于相同,从而使得a相机端侧电流 $\dot{I}_a = \dot{I}_{short1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a3} + \dot{I}_{a4} + \dot{I}_{a5} = 20734.3A$

109.4° 与 \dot{I}_{a2} 、 \dot{I}_{a3} 、 \dot{I}_{a4} 、 \dot{I}_{a5} 相位近于相同;而 $\dot{I}_{a1} = 35304.5A \quad 53.0^\circ$ 与 \dot{I}_{a2} 、 \dot{I}_{a3} 、 \dot{I}_{a4} 、 \dot{I}_{a5} 大小、相位相差较大,从而使得a相中性点侧电流

$\dot{I}_{an} = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a3} + \dot{I}_{a4} + \dot{I}_{a5} = 44780.7A \quad 69.5^\circ$ 与 \dot{I}_{a1} 相位近于相同。这样使得非故障分支2、3、4、5分支相互组合的不完全纵差保护不能动作,例如 \dot{I}_a

与 $\frac{5}{2} \dot{I}_{a23}$ 、 \dot{I}_b 与 $\frac{5}{2} \dot{I}_{b23}$ 、 \dot{I}_c 与 $\frac{5}{2} \dot{I}_{c23}$ 构成的三相不完全纵差保护的灵敏度值分别为0.558、0.283和0.268,三相不完全纵差保护均不能动作,这是因为构成a相不完全纵差保护的两侧电流 $\dot{I}_a = 20734.3A \quad 109.4^\circ$

与 $\frac{5}{2} \dot{I}_{a23} = 21105.9A \quad 106.2^\circ$ 大小相差不大、相位近于相同(b、c相情况与a相相同);而故障分支与非故障分支组合构成的不完全纵差保护却能灵敏动作,例如 \dot{I}_a 与 $\frac{5}{2} \dot{I}_{a12}$ 、 \dot{I}_b 与 $\frac{5}{2} \dot{I}_{b12}$ 构成的不完全纵差保护的灵敏度值分别为7.039和13.388,这是因为构成不完全纵差保护的两侧电流

$\dot{I}_a = 20734.3A \quad 109.4^\circ$ 与 $\frac{5}{2} \dot{I}_{a12} = 94510.1A \quad 58.1^\circ$ 的大小、相位相差很大 (b 相情况与 a 相相同)。同理由于 $\dot{I}_a = 20734.3A \quad 109.4^\circ$ 与 $\dot{I}_{an} = 44780.7A \quad 69.5^\circ$ 、 \dot{I}_b 与 \dot{I}_{bn} 的大小和相位相差较大,使得完全纵差保护能灵敏动作,a、b 相完全纵差保护的灵敏度值分别为 6.559 和 15.387。由于该故障同时也属于不同相同编号分支发生的相间短路,且两故障分支短路净匝数很小,所以零序电流型横差保护的灵敏度值也很低,其各种连接形式的保护的灵敏度值均小于 0.5。

由于完全纵差保护对所有端部故障导致的相间

短路均能灵敏动作,所以对于端部故障导致的相间短路,完全纵差保护对其余三种主保护方案能起到很好的补充作用;而对于端部故障导致的不同相同编号分支发生的中性点侧小匝数相间短路,零序电流型横差保护和不完全纵差保护都无能为力。

从表 3、表 4 中还可以看出,每相左、右两侧各取两个分支构成的两套不完全纵差保护之间具有一定的互补性;随着同相同分支匝间短路数的增加,完全纵差保护除外,其余三种主保护方案不能动作故障数呈递减趋势;对所有的同相不同分支匝间短路,完全纵差保护除外,其余三种主保护方案都能灵敏动作。

表 5 对于同槽故障各种主保护方案的组合不能动作故障数及其性质

主保护方案的组合	代号	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		
一横一纵	A + C	A:12-3-45 与 C:12-45	136	105	30	1	0	0	0
		A:15-3-24 与 C:15-24	133	105	26	2	0	0	0
		A:14-3-25 与 C:14-25	142	105	34	3	0	0	0
	B + C	B:12-3-45 与 C:12-45	113	102	9	2	0	0	0
		B:45-123 与 C:12-45	111	102	9	0	0	0	0
		B:15-234 与 C:15-24	112	102	8	2	0	0	0
		B:24-135 与 C:15-24	108	91	15	2	0	0	0
		B:14-235 与 C:14-25	108	91	15	2	0	0	0
B:25-134 与 C:14-25	109	91	14	4	0	0	0		
两横一纵	A + B + C	A:12-3-45 与 C:12-45 与 B:12-3-45	112	102	9	1	0	0	0
		A:12-3-45 与 C:12-45 与 B:45-123	111	102	9	0	0	0	0
		A:15-3-24 与 C:15-24 与 B:15-234	111	102	8	1	0	0	0
		A:15-3-24 与 C:15-24 与 B:24-135	106	91	14	1	0	0	0
		A:14-3-25 与 C:14-25 与 B:14-235	105	91	13	1	0	0	0
		A:14-3-25 与 C:14-25 与 B:25-134	105	91	12	2	0	0	0
	A + B + D	A:12-3-45 与 D 与 B:12-3-45	112	102	9	1	0	0	0
		A:12-3-45 与 D 与 B:45-123	113	102	9	2	0	0	0
		A:15-3-24 与 D 与 B:15-234	112	102	9	1	0	0	0
		A:15-3-24 与 D 与 B:24-135	108	91	14	3	0	0	0
		A:14-3-25 与 D 与 B:14-235	106	91	13	2	0	0	0
		A:14-3-25 与 D 与 B:25-134	106	91	13	2	0	0	0

注:表 5 中“代号”栏的“A”代表零序电流型横差保护,“B”代表传统裂相横差保护,“C”代表不完全纵差保护,“D”代表完全纵差保护,“A + C”代表零序电流型横差保护与不完全纵差保护的组合,依次类推。

6.2 各种主保护方案的组合不能动作故障数及其性质

· 一套横差保护与一套纵差保护进行组合

(1) 零序电流型横差保护与不完全纵差保护进行组合

从表 5 中可以看出,对于同槽故障导致的 1 匝同相同分支匝间短路,两种保护方案之间无法形成互补(两者都不能动作);对于 3、5 匝同相同分支匝间短路,两种保护方案之间能够形成一定的互补;对

于零序电流型横差保护不能动作的 7 匝同相同分支匝间短路,不完全纵差保护能起到很好的补充作用;对于相间短路,因为同槽故障导致的相间短路中,不存在中性点侧小匝数相间短路这种类型的故障,所以对于零序电流型横差保护不能动作的不同相同编号分支发生的相间短路故障,不完全纵差保护都能灵敏动作,起到了很好的补充作用。

从表 6 中可以看出,对于端部故障导致的 2 匝同相同分支匝间短路,两种保护方案之间无法形成

互补(两者都不能动作);对于4匝同相同分支匝间短路,两种保护方案之间能够形成一定的互补;对于零序电流型横差保护不能动作的6匝同相同分支匝间短路,不完全纵差保护能起到很好的补充作用;对于零序电流型横差保护不能动作的不同相同编号分支发生的相间短路故障,只要其不同时为中性点侧小匝数相间短路,不完全纵差保护基本上都能动作,但对于不完全纵差保护不能动作的中性点侧小匝数相间短路,由于其同时为不同相同编号分支发生的相间短路,且两故障分支短路净匝数很小,所以零序电流型横差保护也不能动作。因此对于端部故障导致的相间短路,不完全纵差保护对零序电流型横差保护有很好的补充作用,但两者无法形成互补。

(2) 传统裂相横差保护与不完全纵差保护进行组合

从表5中可以看出,对于不完全纵差保护不能动作的1匝同相同分支匝间短路,传统裂相横差保护能起到一定的补充作用,而对于传统裂相横差保护不能动作的1匝同相同分支匝间短路,不完全纵差保护则无能为力;对于3、5匝同相同分支匝间短路,两种保护方案之间能够形成一定的互补。

从表6中可以看出,对于不完全纵差保护不能动作的2匝同相同分支匝间短路,传统裂相横差保护能起到较好的补充作用,而对于传统裂相横差保护不能动作的2匝同相同分支匝间短路,不完全纵差保护则基本上无能为力;对于端部故障导致的4匝同相同分支匝间短路,两种保护方案之间能形成一定的互补;对于传统裂相横差保护不能动作的6匝同相同分支匝间短路,不完全纵差保护能起到很好的补充作用;对于端部故障导致的相间短路,两种保护方案之间能够形成完全互补,因为传统裂相横差保护不能动作的机端侧大匝数相间短路(两个分支的短路点均靠近机端侧),不完全纵差保护能灵敏动作,而不完全纵差保护不能动作的中性点侧小匝数相间短路(两个分支的短路点均靠近中性点侧),传统裂相横差保护又能灵敏动作。

由于同槽故障中不存在上述两种类型的相间短路,所以两种保护方案对所有同槽故障导致的相间短路都能动作。

· 两套横差保护与一套纵差保护进行组合

(1) 零序电流型横差保护、传统裂相横差保护与不完全纵差保护进行组合

从表5可以看出,对比零序电流型横差保护和不完全纵差保护两套保护方案的组合,由于传统裂相横差保护的加入,对于同槽故障导致的1匝同相同分支匝间短路,三种保护方案的组合不能动作故障数有所减少;对于同槽故障导致的3、5匝同相同分支匝间短路,三种保护方案之间的互补性要优于两种保护方案之间的互补性,不能动作故障数进一步减少。

从表6中可以看出,对比零序电流型横差保护和不完全纵差保护两套保护方案的组合,由于传统裂相横差保护的加入,对于端部故障导致的2匝同相同分支匝间短路,三种保护方案的组合不能动作故障数有了较大程度的减少;对于端部故障导致的4匝同相同分支匝间短路,三种保护方案之间的互补性要优于两种保护方案之间的互补性,不能动作故障数进一步减少;对于端部故障导致的相间短路,三种保护方案的组合相对于两种保护方案的组合形成了完全互补,因为对于零序电流型横差保护和不完全纵差保护都不能动作的不同相同编号分支发生的中性点侧小匝数相间短路,传统裂相横差保护能灵敏动作,而对于传统裂相横差保护不能动作的机端侧大匝数相间短路,上述两种保护方案的组合又能灵敏动作。

(2) 零序电流型横差保护、传统裂相横差保护与完全纵差保护进行组合

从表5中可以看出,传统裂相横差保护对零序电流型横差保护有一定的补充作用,但两者之间的互补性很小;由于完全纵差保护不反应匝间短路故障,所以对于同槽故障,完全纵差保护的加入未起任何作用。

从表6中可以看出,对于端部故障导致的2匝同相同分支匝间短路,传统裂相横差保护对零序电流型横差保护起了较大程度的补充作用,完全纵差保护的加入未起作用;对于端部故障导致的4、6匝同相同分支匝间短路,传统裂相横差保护和零序电流型横差保护之间有一定的互补性,完全纵差保护的加入未起作用;对于端部故障导致的相间短路,传统裂相横差保护对零序电流型横差保护有一定的补充作用,但当故障类型为机端侧大匝数相间短路(两个分支的短路点均靠近机端侧)且两故障分支为不同相同编号分支、短路净匝数很小时,则上述两种保护方案都不能动作,此时完全纵差保护的加入将起

表 6 对于端部故障各种主保护方案的组合不能动作故障数及其性质

主保护方案的组合	代号	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			
一横一纵	A + C	A:12-3-45 与 C:12-45	129	105	8	0	0	0	0	16	
		A:15-3-24 与 C:15-24	133	103	12	0	0	0	0	18	
		A:14-3-25 与 C:14-25	124	101	9	0	0	0	0	14	
	B + C	B:12-3-45 与 C:12-45	70	65	5	0	0	0	0	0	
		B:45-123 与 C:12-45	70	65	5	0	0	0	0	0	
		B:15-234 与 C:15-24	70	65	5	0	0	0	0	0	
		B:24-135 与 C:15-24	60	54	6	0	0	0	0	0	
两横一纵	A + B + C	A:12-3-45 与 C:12-45 与 B:12-3-45	69	65	4	0	0	0	0	0	
		A:12-3-45 与 C:12-45 与 B:45-123	70	65	5	0	0	0	0	0	
		A:15-3-24 与 C:15-24 与 B:15-234	69	65	4	0	0	0	0	0	
		A:15-3-24 与 C:15-24 与 B:24-135	60	54	6	0	0	0	0	0	
		A:14-3-25 与 C:14-25 与 B:14-235	59	54	5	0	0	0	0	0	
		A:14-3-25 与 C:14-25 与 B:25-134	59	53	6	0	0	0	0	0	
	A + B + D	A:12-3-45 与 D 与 B:12-3-45	69	65	4	0	0	0	0	0	
		A:12-3-45 与 D 与 B:45-123	71	65	5	1	0	0	0	0	
		A:15-3-24 与 D 与 B:15-234	70	65	4	1	0	0	0	0	
		A:15-3-24 与 D 与 B:24-135	60	54	6	0	0	0	0	0	
		A:14-3-25 与 D 与 B:14-235	61	54	6	1	0	0	0	0	
		A:14-3-25 与 D 与 B:25-134	60	53	6	1	0	0	0	0	
		A + C + D	A:12-3-45 与 D 与 C:12-45	113	105	8	0	0	0	0	0
			A:15-3-24 与 D 与 C:15-24	115	103	12	0	0	0	0	0
A + C + D	A:14-3-25 与 D 与 C:14-25	110	101	9	0	0	0	0	0		

注:表 6 中“代号”一栏的“A”代表零序电流型横差保护,“B”代表传统裂相横差保护,“C”代表不完全纵差保护,“D”代表完全纵差保护,“A + C”代表零序电流型横差保护与不完全纵差保护的组合,依次类推。

到很好的补充作用,三种保护方案的组合对端部故障导致的相间短路都能动作。

· 一套横差保护与两套纵差保护进行组合

(1) 零序电流型横差保护、不完全纵差保护和完全纵差保护

从表 5 中可以看出,对于同槽故障,零序电流型横差保护和不完全纵差保护的组合不能动作的故障类型为匝间短路故障,而完全纵差保护不反应匝间短路故障,完全纵差保护的加入对上述两种保护方案的组合将不起任何补充作用。

从表 6 中可以看出,对于端部故障,零序电流型横差保护和不完全纵差保护的组合不能动作的故障类型不但有匝间短路故障,而且有相间短路故障(不同相同编号分支发生的中性点侧小匝数相间短路),

由于完全纵差保护对所有端部故障导致的相间短路都能灵敏动作,因此对端部故障导致的相间短路,完全纵差保护对上述两种保护方案的组合将有很好的补充作用。

(2) 传统裂相横差保护、不完全纵差保护和完全纵差保护

从表 5、表 6 中可以看出,对于同槽和端部故障,传统裂相横差保护和不完全纵差保护的组合不能动作的故障类型为匝间短路故障,而完全纵差保护不反应匝间短路故障,完全纵差保护的加入对上述两种保护方案的组合将不起任何补充作用。

· 两套横差保护与两套纵差保护进行组合

从表 5、表 6 中可以看出,对于同槽和端部故障,零序电流型横差保护、传统裂相横差保护和不完全纵差保护的组合不能动作的故障类型为匝间短路故障,而完全纵差保护不反应匝间短路故障,完全纵差保护的加入对上述三种保护方案的组合将不起任何补充作用。

7 三峡电站 1 号发电机内部故障主保护配置方案的初步结论

(1) 文中讨论的零序电流型横差保护、裂相横

差保护和不完全纵差保护都存在不同的构成方式,通过对不同构成方式灵敏性的比较,零序电流型横差保护应装设两套(2-1-2组合),裂相横差保护应采用传统裂相横差保护(每相2-3组合),零序电流型横差保护确定下来之后,不完全纵差保护的构成方式也就确定下来了,每相左、右两侧可各取两个分支接入不完全纵差保护,一套不完全纵差保护用来保护发电机,另一套不完全纵差保护用来保护发一变组。

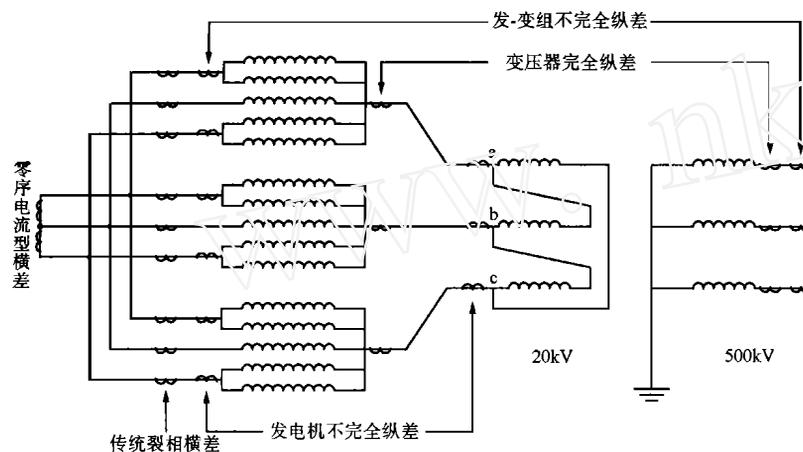


图2 三峡电站1号发电机内部故障主保护及电流互感器总体配置方案

(2) 文中讨论的四种主保护方案都存在各自的保护死区,没有一种保护方案能对所有可能发生的同槽和端部故障都灵敏动作,这就使得我们只有去寻求保护方案的优化组合,才能达到对发电机内部故障的保护范围最大、不能动作的故障数最少的目的。

(3) 为兼顾定子绕组短路和机端引线短路,保护方案的组合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。

(4) 在一套横差保护和一套纵差保护的组合中,传统裂相横差保护与不完全纵差保护的组合要优于零序电流型横差保护与不完全纵差保护的组合。

(5) 在两套横差保护和一套纵差保护的组合中,零序电流型横差保护、传统裂相横差保护和不完全纵差保护的组合要优于零序电流型横差保护、传统裂相横差保护和完全纵差保护的组合(差别很小),且前者还能兼顾变压器内部故障的保护。

(6) 两套横差保护和一套不完全纵差保护的组合与一套横差保护和一套纵差保护的组合(传统裂相横差保护与不完全纵差保护的组合)相比,不能动

作故障数略有减少,但相差不大,说明零序电流型横差保护对传统裂相横差保护与不完全纵差保护的组合的补充作用很小。但对于现在的微机保护来说,关键是采集数据,多计算一组差动判据是不成问题的。

(7) 一套横差保护和两套纵差保护的组合相对于一套横差保护和一套不完全纵差保护的组合,完全纵差保护的加入几乎不起任何作用(零序电流型横差保护和不完全纵差保护的组合对端部故障导致的相间短路除外)。

(8) 两套横差保护和两套纵差保护的组合相对于前面所讨论的两套横差保护和一套不完全纵差保护的组合,没有任何优势。

(9) 根据以上讨论,提出发电机—变压器内部故障主保护总体配置方案如图2所示,采用两套横差保护(零序电流型横差保护和传统裂相横差保护)和一套纵差保护(不完全纵差保护)进行组合的方案,图2中同时表

明与这些主保护相关的电流互感器的数目和安装位置。这种主保护总体配置方案保证了发电机、变压器及其连线任一点发生短路时总有两套及以上主保护能灵敏动作,迅速跳开发一变组高压断路器。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [2] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [3] 王维俭, 桂林, 王祥珩, 张学深. 三峡电站1号发电机内部故障主保护配置方案综观. 继电器, 2001, (1).
- [4] 桂林, 王祥珩, 王维俭. 三峡电站发电机内部故障计算及保护灵敏度分析. 电力设备, 2000, (3).

收稿日期: 2000-10-19

作者简介: 桂林(1974-),男,博士研究生,研究方向为电机的内部故障及保护; 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; 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; 张学深(1964-),男,硕士,高级工程师,从事电力主设备保护的设计、研究工作。

基于 GPS 同步量测量的模糊神经网络用于暂态稳定预测研究

苏建设¹, 廖培金², 周佃民²

(1. 上海交通大学电力系, 上海 200240; 2. 西安交通大学电力系, 陕西 西安 710049)

摘要: 利用 GPS 同步时钟获得系统各机组的功角或系统内最大摇摆角, 然后通过模糊神经网络进行暂态稳定性预测, 充分利用了模糊系统和神经网络的优点, 一方面考虑了专家的经验, 另一方面又通过样本集进行学习, 能自动提取模糊规则、优化隶属函数等, 因此具有较高的模式分类正确率和函数逼近精度。对 6 机 22 节点的算例表明, 所提方法是有效的。

关键词: 电力系统; GPS; 预测; 暂态稳定; 模糊神经网络

中图分类号: TM712, TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)02-0013-03

1 引言

当前, 随着电力运营模式由传统的发、输、配统一管理 and 运行机制, 逐步向发、输、配分别作为独立实体参与竞争的电力市场运行机制转化, 电力系统运行更加复杂化。运行方式的多变性, 要求更加快速有效的稳定控制手段。因此, 防止系统暂态稳定破坏仍然将是电力系统中极为迫切的任务。

电力系统安全稳定装置可以在系统丧失同步稳定运行之前, 预测失步的出现, 并能及早采取一定的控制措施避免失步事故的发生, 也可以在事故状态下紧急投入控制措施, 防止事故扩大。目前如何在大范围内使用最有效的控制决策已成为电网暂态稳定控制技术进步的关键, 而在实施决策过程中最为重要的是需准确快速地进行暂态稳定预测。预测结果的准确与否, 直接关系到控制决策的实施。

对电力系统暂态稳定进行预测目前已经提出过多种方法, 如: 数值积分方法, Lyapunov 直接法以及人工智能方法等。近年来, 随着计算机技术和通信技术的发展, 智能控制和利用 GPS 同步时钟的新一代动态安全监测系统已经成为现代电力系统运行与控制研究的又一热点, 同时也为电力系统暂态稳定

预测和控制提供了一个新的思路 and 手段。如文献^[1]提出用模糊神经网络基于同步相量测量装置进行电力系统暂态稳定模式分类。文献^{[2][3]}则主要是利用基于 GPS 同步时钟的相量测量单元 (PMU) 来获得暂态过程中各节点电压相位或各发电机的转子角度, 进而预测系统的未来摇摆情况, 并施加相应的控制措施。而且还有文献提出一些其它暂态稳定预测方法, 如文献^{[4][5]}提出用扰后功角观测值是否存在极值点或其多项式特征方程是否存在正实根来预测系统暂态稳定性等。但所有上述方法, 其算法还有待改进, 精度也有待提高。由于 GPS 为同步测量相量提供了可能, 故本文利用 GPS 同步时钟来测量各发电机组的转子角度, 并通过模糊神经网络对电力系统暂态稳定性进行预测。

2 模糊神经网络简介

模糊系统中, “模糊化” “模糊推理” “模糊判决” 是构成模糊系统或模糊控制器的最基本模块。将模糊系统表达成联结主义方式的网络结构, 就可以得到模糊神经网络 (Fuzzy Neural Network)。这种 FNN 在输入输出端口上与模糊系统完全等效, 而内部权值和节点参数可以通过学习加以修正。该 FNN

Research of the main protection scheme of internal faults for No.1 generator in the Three Gorges power station

GUI Lin¹, WANG Xiang-heng¹, WANG Wei-jian¹, ZHANG Xue-shen²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China)

Abstract: Based on the simulation of internal faults of No. 1 generator in the Three Gorges Power Station, the sensitivities and non-operation number of four main protection schemes and their combination are calculated. Then the type of non-operation faults is analyzed. Therefore, the main protection scheme of internal faults for this generator is proposed.

Key words: Generator; internal faults; main protection schemes and their combination; advantages complement