

发电机内部短路主保护的设计研究

刘俊宏 王祥珩 王维俭 清华大学电机系 (100084)
葛荣尚 张学深 许昌继电器研究所 (461000)
李振华 电力部西北勘测设计院 (710001)

摘要 本文采用多回路法, 计算出了宝珠寺发电机内部短路的数据。根据这些数据, 提出了宝珠寺发电机主保护方案。第一主保护是高灵敏度单元件横差。第二主保护是故障分量的负序方向保护或不完全纵差保护。

为了探讨宝珠寺发电机内部短路主保护方案, 首先计算该机内部故障时的各种电气量, 然后根据这些电气量, 评估各种保护方案的优劣, 最后确定两种方案作为主保护。

关键词 发电机保护 内部故障

1 发电机内部短路的计算

1. 1 发电机额定数据:

额定电压 $U_N=13800V$	额定电流 $I_N=8367.4A$
额定容量 $P_S=200MVA$	额定功率因数 $\cos\varphi_N=0.875$
定子槽数 $Z_1=480$	定子每相并联支路数 $a_1=4$
定子绕组跨距 $y=1\sim 10\sim 23$	定子每支路线圈数 $W_a=40$
定子绕组极对数 $p=44$	极距 $\tau=681.87mm$
最小气隙 $\delta_{min}=22mm$	最大气隙 $\delta_{max}=33mm$
极弧系数 $\alpha=0.733$	励磁绕组匝数 $W_{fd}=25$
励磁绕组并联支路数 $a_{fd}=1$	每极阻尼条数 $n_c=8$
空载额定电压时的励磁电流 $i_{f0}=789A$	额定负载情况下的励磁电流 $i_{fN}=1398A$

电机其它结构尺寸见制造厂资料

1. 2 升压变压器

联接形式 Y_N, D_{11}
额定容量 200MVA
短路电压 12.5%

1. 3 系统等效电抗

$X_1=X_2=0.05844$

由于任何相的同一支路的上下层线棒没有同槽的, 所以同一支路上的匝间短路不可能发生。选择下面 5 种典型故障形式进行了计算。

I) 同相两分支小匝数匝间短路

C_1 分支的 22.5% 处与 C_3 分支的 52.5% 处匝间短路。

II) 同相两分支大匝数匝间短路

C_1 分支的头 (也就是 C 相的头) 与 C_3 分支的 72.9% 处匝间短路。

III) 不同相的小匝数相间短路

本文 1994 年 4 月 21 日收稿

《继电器》1994 年第 3 期

3

b₂ 分支的 22.5% 处与 C₁ 分支的 50% 处相间短路。

IV) 不同相的大匝数相间短路

b₂ 分支的头 (也就是 B 相的头) 与 C₁ 分支的 27.5% 处相间短路。

上述四种故障, 分别就发电机孤立空载运行和发电机联网空载运行两种工况进行了计算, 计算时, $i_f = i_{i0} = 789A$

V) 一分支断路

设 a₃ 分支断路。在这种故障形式下, 分别就联网带 50% 负载和带 100% 负载进行了计算。

计算时 $i_f = i_{iN} = 1398A$

计算结果见表 1。

表 1 中: I_A 、 I_B 、 I_C 、 U_A 、 U_B 、 U_C 分别为机端三相电流和三相电压。

$3I_0(I)$ 是指按图 1 接线时, 中性点连线电流。

$3I_0(II)$ 是指按图 2 接线时, 中性点连线电流。

$3I_0(III)$ 是指按图 3 接线时, 中性点连线电流。

从表 1 可知:

(1) 故障支路电流远大于非故障支路电流。

(2) 由于各支路间互感的作用, 非故障相和非故障支路均有不同程度的电流增大; 与支路在空间位置相近的非故障支路有较大电流。

(3) 由于互感不同, 非故障相的各支路电流并不相同。

(4) 发电机内部相间短路或匝间短路时, 两个中性点间的联线电流出现很大的增量。

(5) 中性点的联接方式不同, 同样故障中性点联线电流增量不同。

(6) 一支路断线, 各电气量变化并大。

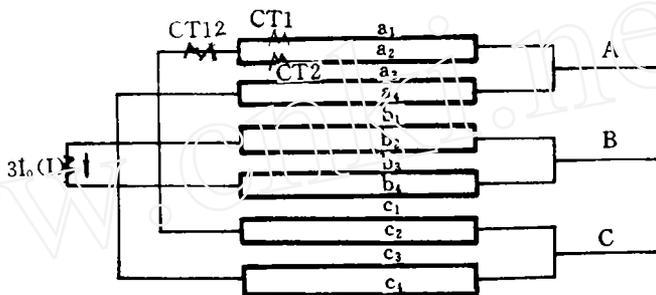


图 1

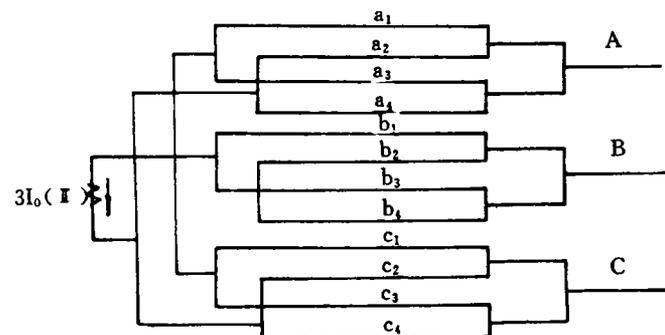


图 2

2 发电机内部短路主保护的讨论

本文采用比率制动特性的差动保护方案, 动作特性均取为:

$$\text{当 } I_{res} \leq 1.0 \text{ 时, } I_{pu} = 0.15$$

$$\text{当 } I_{res} > 1.0 \text{ 时, } I_{pu} = 0.15 + 0.5 (I_{res} - 1.0)$$

$$= -0.35 + 0.5 I_{res}$$

$$K_{sen} = \frac{I_d}{I_{pu}}$$

表 1 宝珠寺发电机内部短路计算结果

故障	I			II			N			V	
	孤立空载	并网空载	孤立空载	并网空载	孤立空载	并网空载	孤立空载	并网空载	带 50% 负载	带 100% 负载	
	$i_{f=i_{f0}}=789A$	$i_{f=i_{f0}}=1398A$									
计算条件	$i_{f=i_{f0}}=789A$	$i_{f=i_{f0}}=1398A$									
I_A	0	0.972(187.81°)	0	0.121(185.45°)	0	0.593(105.59°)	0.416(101.61°)	0.772(-67.10°)	0.772(-67.10°)	0.973(-81.33°)	
I_B	0	1.110(212.53°)	0	0.226(213.45°)	0	3.273(238.20°)	2.105(240.60°)	0.781(52.66°)	0.781(52.66°)	0.985(38.43°)	
I_C	0	2.030(20.97°)	0	0.338(23.76°)	0	2.904(49.55°)	1.812(51.93°)	0.180(173.40°)	0.180(173.40°)	0.982(159.17°)	
U_A	0.375(-146.32°)	0.523(150.45°)	0.518(-137.20°)	0.570(145.65°)	0.356(220.03°)	0.527(-7.41°)	0.545(-15.10°)	0.663(-6.38°)	0.663(-6.38°)	0.646(-43.61°)	
U_B	0.357(1.34°)	0.515(-30.33°)	0.492(10.91°)	0.562(-36.85°)	0.135(-91.26°)	0.210(230.6°)	0.164(20.51°)	0.667(113.27°)	0.667(113.27°)	0.651(76.13°)	
U_C	0.105(96.13°)	0.242(57.78°)	0.427(102.47°)	0.523(61.54°)	0.210(145.76°)	0.309(84.00°)	0.257(76.79°)	0.667(234.5°)	0.667(234.5°)	0.649(197.77°)	
I_{A1}	0.257(3.00°)	0.367(2.31°)	0.142(178.49°)	0.205(179.01°)	0.130(206.08°)	0.418(189.56°)	0.077(13.87°)	0.227(43.95°)	0.227(43.95°)	0.377(-83.16°)	
I_{A2}	0.117(192.40°)	0.517(190.89°)	0.136(4.74°)	0.138(4.29°)	0.555(31.45°)	0.273(65.55°)	0.139(230.83°)	0.288(217.16°)	0.288(217.16°)	0.298(-79.04°)	
I_{A3}	0.211(179.99°)	0.743(183.56°)	0.144(-1.53°)	0.148(176.68°)	0.157(30.18°)	0.583(47.16°)	0.116(204.32°)	0.281(186.05°)	0.281(186.05°)	0	
I_{A4}	0.069(9.61°)	0.081(182.19°)	0.081(184.61°)	0.202(184.51°)	0.084(216.47°)	0.258(187.32°)	0.181(49.06°)	0.525(60.02°)	0.525(60.02°)	0.298(-81.30°)	
I_{B1}	0.166(170.01°)	0.625(188.73°)	0.099(-21.74°)	0.101(-49.50°)	0.457(41.27°)	0.729(35.46°)	0.339(58.53°)	0.322(61.93°)	0.322(61.93°)	0.302(48.58°)	
I_{B2}	0.175(17.55°)	0.156(-4.57°)	0.197(188.94°)	0.295(193.50°)	0.252(53.13°)	0.041(4.27°)	0.761(52.54°)	1.359(53.33°)	1.359(53.33°)	0.264(44.42°)	
I_{B3}	0.178(-8.85°)	0.269(-47.58°)	0.071(149.48°)	0.123(173.58°)	0.308(59.12°)	0.223(75.85°)	0.337(44.73°)	0.340(27.32°)	0.340(27.32°)	0.204(24.33°)	
I_{B4}	0.187(196.75°)	0.712(203.91°)	0.167(10.67°)	0.155(2.52°)	0.482(48.48°)	0.796(45.15°)	0.365(50.53°)	0.389(42.62°)	0.389(42.62°)	0.229(30.63°)	
I_{C1}	0.423(193.76°)	0.496(189.98°)	0.586(203.13°)	0.637(202.85°)	0.675(231.53°)	1.526(237.57°)	1.277(229.99°)	2.708(232.72°)	2.708(232.72°)	0.279(145.35°)	
I_{C2}	0.486(200.15°)	0.637(202.69°)	0.126(185.91°)	0.079(165.92°)	0.278(226.39°)	0.201(225.65°)	0.119(240.04°)	0.173(32.01°)	0.173(32.01°)	0.243(167.24°)	
I_{C3}	1.383(15.44°)	3.760(17.83°)	0.849(23.37°)	1.129(23.23°)	0.263(227.29°)	0.154(230.96°)	0.100(252.48°)	0.251(27.33°)	0.251(27.33°)	0.230(174.63°)	
I_{C4}	0.475(192.14°)	0.616(188.72°)	0.149(219.01°)	0.104(231.12°)	0.279(233.06°)	0.221(258.31°)	0.313(229.62°)	0.321(232.08°)	0.321(232.08°)	0.250(152.52°)	
$3I_0(I)$	0.748(195.37°)	1.758(197.26°)	0.826(200.90°)	1.018(200.77°)	0.312(229.98°)	1.038(233.71°)	0.372(227.44°)	0.925(229.78°)	0.925(229.78°)	0.049(-61.85°)	
$3I_0(II)$	1.020(16.07°)	2.397(18.00°)	0.294(21.22°)	0.361(21.02°)	0.150(232.12°)	0.450(235.40°)	0.738(231.04°)	1.826(233.74°)	1.826(233.74°)	0.120(103.53°)	
$3I_0(III)$	0.916(192.67°)	2.152(194.84°)	0.758(206.38°)	0.934(206.16°)	0.218(235.72°)	0.727(238.77°)	0.643(229.28°)	1.584(232.04°)	1.584(232.04°)	0.062(-55.57°)	
I_2	0	0.888	0	0.150	0	1.557	0	0.991	0.991	0.006	
U_2	0.234	0.205	0.077	0.035	0.285	0.359	0.245	0.229	0.229	0.0014	

I_d 为差动回路的电流。

2.1 传统方式纵差保护

根据表 1 的数据, 按照比率制动特性求出这种保护方案在各种故障下的灵敏度如表 2。其中当 $K_{sen} \geq 1.5$ 时, 认为保护可靠动作, 以 \checkmark 表示; 当 $K_{sen} < 1.0$ 时, 保护不能动作, 以 \times 表示; 当 $1.0 \leq K_{sen} \leq 1.5$ 时, 保护可能动作, 以 Δ 表示。

从表 2 中可以看出, 传统方式纵差保护不反应匝间短路和断线故障, 但对相间故障, 灵敏度普遍较高。

2.2 不完全纵差保护

不完全纵差包括两种类型。一种类型是每相定子绕组的中性点侧只在一分支中装 CT; 另一种类型是每相绕组中性点侧在二个分支中装 CT。在每种类型中, 分支 CT 又可能在不同的分支中装设。这里不讨论每相绕组中性点侧在三个分支中装设 CT 的方式, 因为所讨论的发电机组每相仅有四个分支, 若在四个分支中均装 CT 时即为传统方式纵差保护, 后者对匝间短路和断线不起保护作用。

在参考文献^[2]中, 对于每相并联分支数较多 ($a_1 \geq 5$) 的发电机, 曾指出每相绕组中性点侧仅在一个分支装设 CT 的不完全纵差保护, 有可能不充分反应内部短路的故障电流, 造成某种故障情况下保护拒动。

本文讨论的发电机每相并联分支路较少 ($a_1 = 4$), 即使文献^{[1][2]}介绍的综合差动保护方案, 纵差保护也只在每相二个分支中装设 CT。从表 2 的计算结果可知: 每相二个分支装设 CT 的不完全纵差保护, 其匝间短路和断线故障的灵敏度反而低于每相仅一个分支装 CT 的方案。从物理概念来分析, 如果每相所有并联分支中均装设 CT, 这种传统方式的纵差保护将完全不反应匝间短路和断线故障, 所以不完全纵差保护的中性点侧 CT 不应在太多的并联分支中装设, 利用定子绕组各分支间的互感作用, 也能较充分地反应故障电流的增大。不完全纵差的灵敏度不仅与每相并联分支数有关, 还与三相绕组的结构特点有关。

问题的复杂性就在于恰当地选择装设 CT 的并联分支(哪几个分支装设 CT), 这必须通过详细的发电机内部故障计算。

从表 2 可知, 本发电机不完全纵差保护宜在每相第 1 分支中装设 CT。

2.3 高灵敏度单元件横差保护

表 2 中给出了 $I_{pu} = 0.1$ 和 $I_{pu} = 0.05$ 两种定值的高灵敏横差保护的灵敏度。从这些数据上看, 除了断线以外, 单元件横差对于各种故障都有很高的灵敏度。又加上它有接线简单的特点, 所以应该首推此方案作第一主保护。

表 2 还给出了 I、II、III 种接线方式下的灵敏度。从中可以看出, 各种中性点接线方式对保护的灵敏度均有得有失。

该保护 CT 变比可选 $0.01 \sim 0.05 I_{NG} / 5A$, $I_{NG} = 8367.4A$ 。为防止外部短路时的误动作, 应有性能优良的三次谐波阻波。

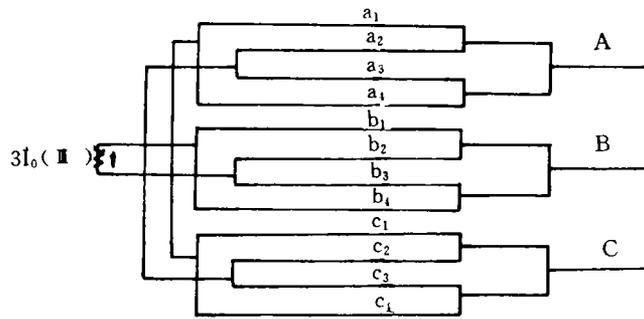


图 3

表 2 各种保护灵敏度计算结果

保护方案	故障	I		II		III		IV		V													
		孤立空载	并网空载	孤立空载	并网空载	孤立空载	并网空载	孤立空载	并网空载	带 50% 负载	带 100% 负载												
传统方式纵差	A	0	×	0	×	0	×	0	×	0	×	0	×	0	×								
	B	0	×	0	×	0	×	9.92	√	33.2	√	12.0	√	29.7	√	0	×	0	×				
	C	0	×	0	×	0	×	9.95	√	33.2	√	12.0	√	29.7	√	0	×	0	×				
不完全纵差	第 1 分支装 CT	A	6.86	√	16.2	√	3.78	√	4.67	√	3.45	√	11.4	√	2.05	√	5.13	√	2.83	√	1.98	√	
		B	4.42	√	2.90	√	2.63	√	3.24	√	12.2	√	40.4	√	9.13	√	22.6	√	1.55	√	1.50	√	
		C	11.3	√	26.6	√	9.94	√	14.3	√	8.31	√	5.90	√	5.51	√	6.64	√	1.52	√	0.83	×	
	第 2 分支装 CT	A	3.11	√	2.68	√	3.64	√	4.49	√	1.47	√	4.95	√	1.85	√	6.05	√	1.19	△	1.18	△	
		B	4.66	√	11.0	√	5.24	√	6.46	√	6.72	√	7.58	√	7.41	√	15.4	√	0.67	×	0.81	×	
		C	13.0	√	30.4	√	3.35	√	4.12	√	7.41	√	21.2	√	3.18	√	4.40	√	0.71	×	0.92	×	
	第 3 分支装 CT	A	5.64	√	3.15	√	3.85	√	4.76	√	4.19	√	6.46	√	3.09	√	7.72	√	5.14	√	6.48	√	
		B	4.75	√	11.1	√	1.90	√	2.06	√	8.22	√	15.9	√	9.0	√	22.2	√	1.45	△	1.85	√	
		C	5.36	√	3.32	√	6.81	√	4.83	√	7.0	√	15.9	√	2.67	√	2.92	√	1.42	△	6.5	√	
	第 4 分支装 CT	A	1.84	√	2.18	√	3.71	√	6.17	√	2.22	√	7.46	√	4.83	√	7.05	√	1.16	△	0.73	×	
		B	5.0	√	2.77	√	4.45	√	5.48	√	12.9	√	42.2	√	9.73	√	24.1	√	0.77	×	0.98	×	
		C	12.7	√	29.8	√	3.97	√	4.83	√	7.44	√	19.3	√	8.34	√	20.6	√	0.62	×	0.78	×	
不完全纵差	第 1.2 分支装 CT	A	1.91	√	4.54	√	0.22	×	0.25	×	0.99	×	3.26	√	1.2	√	2.97	√	1.99	√	1.63	√	
		B	1.09	△	2.43	√	1.63	√	2.02	√	9.43	√	31.4	√	11.0	√	36.4	√	1.10	△	1.19	△	
		C	12.1	√	28.5	√	9.42	√	11.6	√	12.7	√	42.3	√	8.03	√	14.7	√	0.42	×	0.51	×	
	第 1.3 分支装 CT	A	0.64	×	11.4	√	0.03	×	3.91	√	0.38	×	1.28	△	0.57	×	4.32	√	1.2	△	1.47	△	
		B	0.17	×	0.32	×	0.41	×	0.50	×	10.1	√	5.0	√	9.0	√	22.2	√	0.05	×	0.06	×	
		C	12.8	√	2.52	√	3.51	√	4.32	√	12.5	√	41.7	√	5.2	√	15.4	√	0.02	×	0.07	×	
	第 1.4 分支装 CT	A	4.35	√	2.82	√	3.74	√	4.62	√	2.83	√	9.41	√	3.3	√	4.71	√	1.97	√	1.64	√	
		B	4.58	√	2.78	√	3.41	√	4.19	√	12.5	√	4.85	√	9.4	√	23.3	√	0.41	×	0.49	×	
		C	12.0	√	28.2	√	9.73	√	12.0	√	3.72	√	42.3	√	7.15	√	11.1	√	1.06	△	1.3	△	
	单元件横差	I _{pu} = 0.05	I	15.0	√	35.2	√	16.5	√	20.4	√	6.24	√	20.8	√	7.45	√	18.5	√	0.97	×	0.98	×
			II	20.4	√	47.9	√	5.87	√	7.22	√	2.99	√	9.99	√	14.8	√	36.5	√	0.89	×	2.40	√
			III	18.3	√	43.0	√	15.2	√	18.7	√	4.35	√	14.5	√	12.9	√	31.7	√	0.98	×	1.24	△
I _{pu} = 0.10		I	7.48	√	17.6	√	8.25	√	10.4	√	3.12	√	10.4	√	3.73	√	9.25	√	0.40	×	0.49	×	
		II	10.2	√	23.9	√	2.94	√	3.61	√	1.50	√	5.0	√	7.38	√	18.3	√	0.45	×	1.2	△	
		III	9.2	√	21.5	√	7.60	√	9.35	√	2.18	√	7.3	√	6.43	√	15.9	√	0.49	×	0.62	×	

2.4 故障分量负序方向保护

这种保护方案的判据是：

$$\Delta P_2 = 3R_e [\Delta \hat{U}_2 \Delta \hat{I}_2 e^{-j\varphi_{sen.2}}] > \epsilon_{1,2}$$

式中， $\Delta \hat{U}_2$ 是机端负序电压故障分量

$\Delta \hat{I}_2$ 是机端负序电流故障分量的共轭相量

$\varphi_{sen.2}$ 是负序方向元件的灵敏角，这里取 80°

ϵ_{I_2} 是负序方向元件的动作阈值，它由发电机正常运行的 ΔP_2 不平衡值决定。

表 3 是计算出的宝珠寺发电机的 ΔP_2 。

表 3 宝珠寺发电机的 ΔP_2

故障	I		II		III		IV		V	
	孤立 空载	并网 空载	孤立 空载	并网 空载	孤立 空载	并网 空载	孤立 空载	并网 空载	带 50% 负载	带 100% 负载
ΔP_2	0	0.2045	0	0.0059	0	0.6293	0	0.2551	0.00001	0.000144

从表 3 的数据可以看出，这种保护方案在发电机并网的情况下，可以反映匝间、相间故障。在发电机并网以前，失去保护，为此应有变压器高压侧的负序增量方向保护或发一变组的不完全纵差保护。

这种保护方案在 PT、CT 二次断线不会误动，并且在外部不对称短路、切除外部不对称 ΔP_2 均反向，保护不会误动。

3 结论

通过对各种保护方案用于宝珠寺发电机上的优缺点的分析，最后选定：

①高灵敏单元件横差应作为第 1 主保护，发电机中性点联线方式可任选 I、II、III 接线方式中的任何一种。

②第 2 主保护既可选不完全纵差也可选故障分量的负序方向保护。

如果采用不完全纵差，每相绕组中性点侧只在一个分支中装设 CT。

如果选用故障分量的负序方向保护和高灵敏单元件横差联合使用，只在发电机启动未并网前机端引线短路将失去保护，应由发一变组其它保护补充。

③对于断线故障，这三种保护方案的灵敏度不高。

参考文献

- 1 王维俭、侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础，第 2 版. 北京：水电出版社，1989
- 2 刘俊宏、王维俭、蒙宁海. 大型水轮发电机不完全差动保护的分析和研究. 中国电机工程学会第五届全国继电保护学术会议，1993. 7，北京.
- 3 王维俭、张龙照、王祥珩. 岩滩电站 SF3025—80/17000 发电机内部短路及灵敏度分析. 电力自动化设备，1990. 1
- 4 刘俊宏、王维俭. 三峡电站发一变组内部短路主保护方案的理论分析和试验研究. 电力系统与电网技术综合学术年会，1993，宜昌.
- 5 李振华、王维俭. 单元件发电机内部短路保护的研究. 电力系统与电网技术综合学术年会. 1993，宜昌.