

数字式比率制动发电机纵差保护的制动特性分析

李德佳¹, 袁宇波²

(1. 核电秦山联营有限公司, 浙江 海盐 314300; 2. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 分析了比率制动式发电机纵差保护的制动特性, 计算了不同比率制动特性的定值曲线对应的等效闭锁角。通过实例探讨了纵差保护在几种工况下, 不平衡电流在制动特性曲线上的工作区域, 最后提出了作者建议的纵差保护整定的方法。

关键词: 发电机; 差动保护; 误动作

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)11-0040-05

0 前言

比率制动式纵差保护是发电机内部相间短路故障的主保护, 它的正确动作与否关系到发电机及电网的安全、电厂的经济效益, 应设法杜绝其不正确动作。比率制动式发电机纵差保护在国内已误动作过多次。误动作的情况大致分三种: 一是在空充负荷变压器时, 提供穿越性励磁涌流的发电机纵差保护误动作; 二是发电机同期合闸后的暂态过程中发电机纵差保护误动作; 三是区外故障及切除后。误动的原因包括两个方面: CT的暂态饱和问题和保护装置的问题。只有从 CT的选择和保护原理及定值等多方面来共同解决, 才能达到事半功倍的效果。首先, 应在 CT的选择上保证一定的容量裕度, 以便于更好地躲过暂态饱和; 其次, 对于保护装置要有一定的抗 CT暂态饱和的能力, 这可以在保护装置中增加 CT饱和判据, 并且在整定值方面也应适当地考虑增强抗饱和能力。本文通过对比率制动式发电机纵差保护的制动特性的分析, 探讨保护在整定值方面应考虑的闭锁角问题。通过实例探讨了以下几种情况下纵差保护的不平衡电流在制动特性曲线上的区域, 推荐了制动曲线宜采用的方式。

1 微型发电机纵差保护简介

微型比率制动式纵差保护是发电机内部相间短路故障的主保护, 其重要程度是可想而知的。国外保护的情况是: ABB公司采用了标积制动方式; GE公司采用了 CT饱和判据和相位比较的方法。而我国一些保护只采用了简单的比率制动特性, 未采用任何其它措施。其特点如下:

1.1 差动作方程

$$I_{op} > I_{op.0} \quad \text{当} \quad I_{res} > I_{res.0} \quad (1)$$

$$I_{op} > I_{op.0} + S(I_{res} - I_{res.0}) \quad \text{当} \quad I_{res} > I_{res.0} \quad (2)$$

满足上述两个方程差动元件动作, 式中: I_{op} 为差动电流, $I_{op.0}$ 为差动最小动作电流整定值, I_{res} 为制动电流, $I_{res.0}$ 为最小制动电流整定值, S 为比率制动特性的斜率。各侧电流的方向都以指向发电机为正方向, 见图 1。

差动电流:

$$I_{op} = |I_T + I_N| \quad (3)$$

制动电流:

$$I_{res} = \left| \frac{I_T - I_N}{2} \right| \quad (4)$$

式中: I_T, I_N 分别为机端、中性点电流互感器 (CT) 二次侧的电流, CT的极性及保护逻辑框图见图 1, 制动特性见图 2。

1.2 CT断线判别

当任一相差动电流大于 0.15 倍的额定电流时启动 CT断线判别程序, 满足下列条件认为 CT断线:

- a 本侧三相电流中至少一相电流不变;
- b 最大相电流小于 1.2 倍的额定电流。

2 发电机纵差保护定值整定

众所周知, 外部短路时一定伴随暂态非周期分量电流, 后者将使 CT易于饱和, 两侧 CT虽然同型, 但绝非在暂态特性上保持一致。因此定值整定为:

- a 最小动作电流一般取发电机额定电流 (I_n) 的 0.1 ~ 0.3 倍;
- b 比例制动特性斜率一般可取 0.3 ~ 0.5;
- c 最小制动电流 (拐点电流) 一般取发电机额定电流 (I_n) 的 0.8 ~ 1.0 倍。

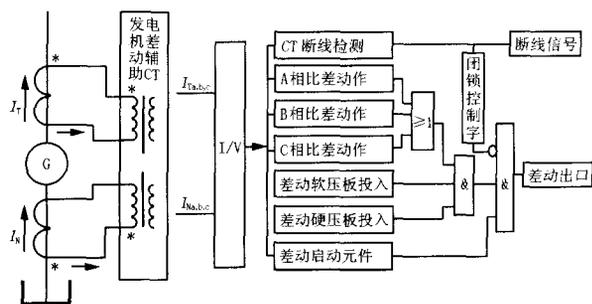


图 1 电流极性接线示意图及发电机纵差保护逻辑框图

Fig 1 CT polar connection and generator differential protection logic configuration

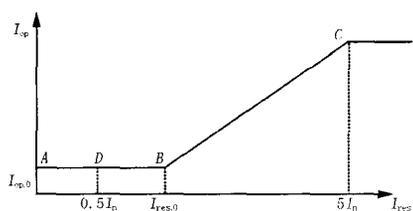


图 2 发电机纵差保护制动特性图

Fig 2 Restrained characteristic of generator differential protection

3 闭锁角分析

闭锁角的定义:当 $I_T = I_N$ 时,使保护动作时的 I_T 与 $-I_N$ 之间的角度为闭锁角称为 ϕ_b 。

在实际发生非保护区内故障的 CT 暂态饱和和情况分析可知,发电机机端和中性点 CT 的暂态特性不一致,将导致两侧 CT 的二次电流相角差的增加,而幅值之间的差别不大。因此,闭锁角分析及适当地选取,有利于提高发电机纵差保护的正确动作率。

表 1 发电机纵差保护定值表

Tab 1 Setting values of generator differential protection

定值	I_{op0}/pu	I_{res0}/pu	S	制动曲线方式
第一组	0.1	1.0	0.3	单拐点
第二组	0.1	0.8	0.3	单拐点
第三组	0.3	1.0	0.5	单拐点
第四组	0.3	0.8	0.5	单拐点
第五组	0.3	0.6	0.5	无拐点

表 2 闭锁角的计算值 ϕ_b

Tab 2 Calculation values of block angle (9)

计算点	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组
D点 ($I_{res} = 0.5I_n$)	11.47	11.47	33.40	33.40	33.40
B点 ($I_{res} = I_{res0}$)	5.72	7.15	17.06	21.23	28.07
C点 ($I_{res} = 5I_n$)	14.81	15.49	25.90	27.00	28.07

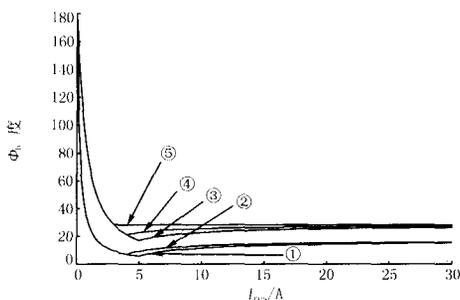


图 3 不同情况下的闭锁角曲线

Fig 3 Block angle curves of different protection setting values

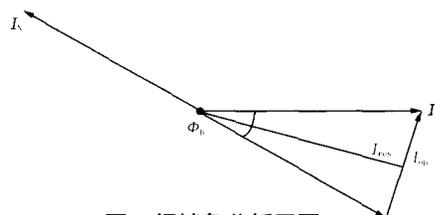


图 4 闭锁角分析用图

Fig 4 Vector analysis of block angle

闭锁角计算公式的推导:

$$\phi_b = 2 \arctan(I_{op} / 2I_{res}) \quad (5)$$

CT 的正确设计选用,可保证在最大外部短路条件下,稳态相角误差不超过 $\pm 7^\circ$;在考虑暂态影响,可以认为闭锁角 ϕ_b 选用 $\pm 20^\circ$ 能保证外部短路不误动的需要,这时内部短路差动保护范围为 $\pm 160^\circ$;应该被认为相当宽广了^[1]。从表 2 和图 3 的闭锁角计算结果可见,满足上述要求的定值只有第四和第五组。现场实际整定采用前三组的情况较多,也曾经发生过两侧 CT 的相角差达到 13° 的情况下导致误动的事故。

三峡工程 2 号发电机在中性点附近发生 AC 相间短路,短路匝数只有 4 匝的分析计算结果为^[2]:

中性点及机端侧电流如下:

$$I_{NA} = 1.42 I_n \quad -112.77^\circ; \quad I_{TA} = 0.359 I_n \quad 74.14^\circ;$$

$$I_{NB} = 0.205 I_n \quad -133.29^\circ; \quad I_{TB} = 0.205 I_n \quad 46.71^\circ;$$

$$I_{NC} = 1.6 I_n \quad 64.68^\circ; \quad I_{TC} = 0.549 I_n \quad 244.23^\circ;$$

它们的相位差 $\alpha = -186.91^\circ$, $\beta = -180^\circ$, $\gamma = -179.55^\circ$;充分说明这次内部相间短路在相位特性上如同外部短路或负载状态。通过计算 A 相、C 相的差动电流和制动电流为:

$$I_{opA} = 1.17 I_n; \quad I_{resA} = 1.04 I_n; \quad I_{opC} = 1.15 I_n;$$

$$I_{resC} = 1.40 I_n.$$

从计算结果可知,五组定值都有较高的灵敏度。只从闭锁角的分析可得如下结论:发电机的纵

差保护整定值不宜采用高于第四组灵敏度的整定值。

4 不平衡电流曲线的分析

有了发电机纵差保护在非内部故障时的 $I_{unb} - I_{res}$ 关系曲线,就可设计制定理想的纵差保护的制动特性。本文采用了定性分析的方法,探讨了稳态和暂态两种情况下 $I_{unb} - I_{res}$ 的关系曲线。

4.1 稳态下的 $I_{unb} - I_{res}$ 关系曲线

见图 5,过原点的制动边界 ($ADCE$ 以上)认为不管 CT 二次电流大于或小于额定电流,对应的误差都相同,不平衡电流随制动电流的变化基本上是线性的,所以对应的制动曲线是一条过原点的直线。不过原点 ($ABCE$ 以上)的制动曲线是一条不过原点的直线。不过原点的制动曲线考虑到 CT 在它的额定电流以下误差很小,所以对应的不平衡电流就很小,可以认为是一个很小的常量;而在 CT 电流大于二次额定电流时,误差很大,对应的不平衡电流是非线性变化的。因此,稳态下的 $I_{unb} - I_{res}$ 关系具有两种方式,但不过原点的制动曲线更加符合实际情况。

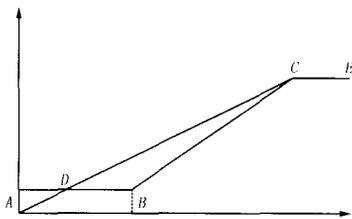


图 5 发电机纵差保护制动特性曲线图

Fig 5 Restrained characteristic curves of generator differential protection

4.2 暂态情况下的 $I_{unb} - I_{res}$ 关系曲线

CT 暂态饱和一般为穿越电流的衰减直流分量引起的,CT 的励磁电抗是非线性的。由于这里关心的是差电流 (励磁电流) 的工频分量。如果将饱和时的励磁电抗处理成平均电抗,可以在一定程度上估计出励磁电流 (即差电流) 的大小和相位。虽然这种处理不甚严格,但能从中发现一定的规律。因此,在对 CT 二次幅值影响不大的暂态过程中,可以认为 CT 的励磁电抗为平均电抗并呈线性状态,这样暂态过程就可以认为是电感电路的过渡过程。在发电机中性点和出线两侧 CT 的励磁特性及二次负载不同的情况下,将产生一定的相角差,导致不平衡电流的增加。

由图 3 可以推导出下列公式:

$$I_{unb} = 2I_T \sin(\alpha/2) \quad (6)$$

$$I_{res} = I_T \cos(\alpha/2) \quad (7)$$

$$\alpha = 2 \arctan(I_{bp}/2I_{res}) \quad (8)$$

式中: α 为两侧 CT 二次电流相对的角度误差。

4.2.1 空充负载变压器产生不平衡电流的特点

在发电机空载的情况下,当空充负载变压器时,前一两个周波 CT 没有发生暂态饱和,不平衡电流很小,其轨迹为 AC 线段。随后 CT 逐渐饱和,CT 二次电流略有减小, α 角增大, I_{unb} 增大, I_{res} 变化不大,这时不平衡电流轨迹为 CD; 当穿越性涌流电流的直流分量衰减到一定程度,CT 开始逐渐退出饱和,此时如不考虑 α 角的变化,只考虑 I_T 减小,由式 (8) 可见,不平衡电流轨迹将为 DA。同时考虑 α 角和 I_T 的变化,其轨迹将在 DA 曲线的下方。因此,DA 曲线是比较保守的结果。

同理分析,发电机带载的情况下,不平衡电流轨迹将为 BCDB。

在空充负载变压器时,不平衡电流将在 ACD 所包围的三角区域,参见图 6。

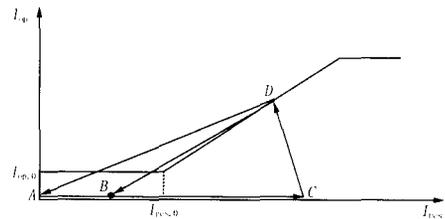


图 6 空充负载变压器产生的不平衡电流示意图

Fig 6 Unbalanced current of energizing transformer

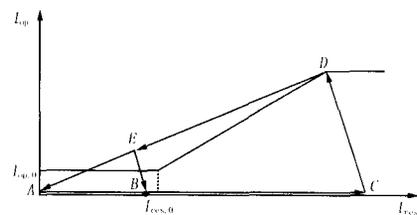


图 7 区外故障产生的不平衡电流示意图

Fig 7 Unbalanced current of external fault removal

4.2.2 区外故障及切除后产生的不平衡电流的特点

在发电机空载的情况下,当发生区外故障时,AC 和 CD 线段的解释同上;当区外故障切除后,不平衡电流轨迹将为 D 点延着 DA 曲线跳到 A 点。

发电机带载的情况下,当区外故障切除后,起初 CT 仍在饱和状态,可以认为 α 角没有发生变化,只考虑 I_T 的减小,由式 (8) 可见,不平衡电流轨迹将为 D 点延着 DA 曲线跳到 E 点。随后 CT 开始逐渐退

出饱和,角减小,不平衡电流轨迹将延着EB线段回到正常的负荷工作点。

区外故障及切除后产生的不平衡电流也将ACD所包围的三角区域,参见图7。

通过上述定性分析可以看出,对于不过原点的制动曲线,可能发生空充负载变压器穿越性励磁涌流衰减和区外故障切除后的两种情况下,CT发生暂态饱和导致发电机中性点和出线侧二次电流衰减特性不一致,产生衰减的差动电流,只要差动电流在动作区内衰减时间超过10ms就会发生保护误动作。实际工程中,这两种情况下的误动作都时有发生。

5 实例分析

5.1 发电机带载的情况下,空充负载变压器时,纵差保护误动的不平衡电流轨迹实例

某热电厂的电气主接线如图8所示。在#12主变做空投试验时,#11发电机差动保护A相发生误动作。

#11和#12机组容量为125MW,配有微机型发变组保护装置。空投#12主变时,#11机组正常运行。#12主变中性点直接接地 #11主变经间隙接地

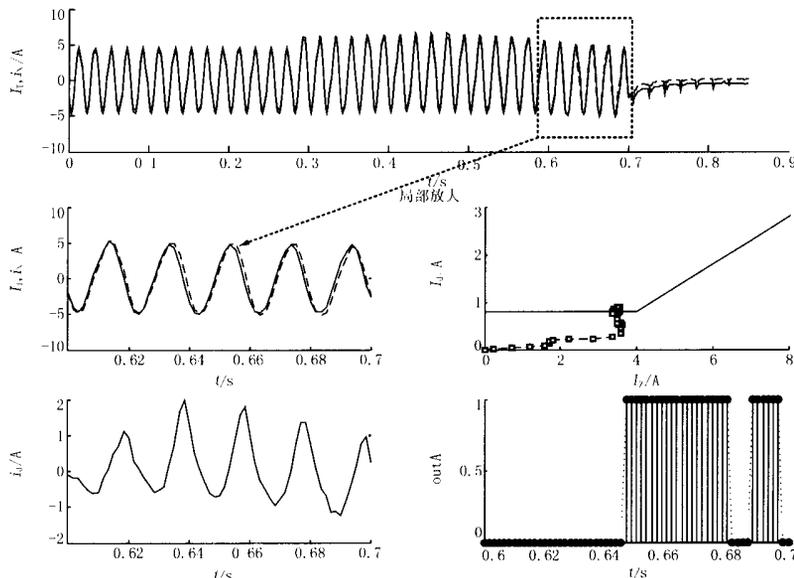


图9 空充负载变压器产生的不平衡电流轨迹图

Fig 9 Unbalanced current trajectory of energizing transformer

从图9与图6、图10与图7比较可见,两者的轨迹基本相似,说明定性分析的正确性。

6 建议的制动特性曲线及整定值选择

从暂态情况下的 $I_{umb} - I_{res}$ 关系曲线的定性分析

在本次保护动作前,#12主变做过5次空投试验,#11机组保护和#12主变保护都正常,没有动作。在第6次空投时,#11机的发电机差动A相发生误动作,造成停机。不平衡电流轨迹见图9。

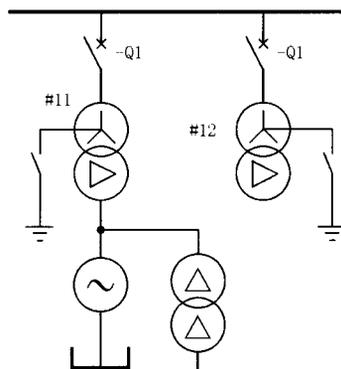


图8 电气主接线

Fig 8 Main electrical circuit

5.2 发电机带载的情况下,区外故障及切除后产生纵差保护误动的不平衡电流轨迹实例

某火电厂在正常运行时,由于发电机差动保护区外A相、C相短路故障,导致发电机差动保护误动作。不平衡电流轨迹见图10。

可知,发电机纵差保护的制动特性曲线,宜选择为过原点的无拐点的方式。整定值宜选择不高于第五组灵敏度的定值。

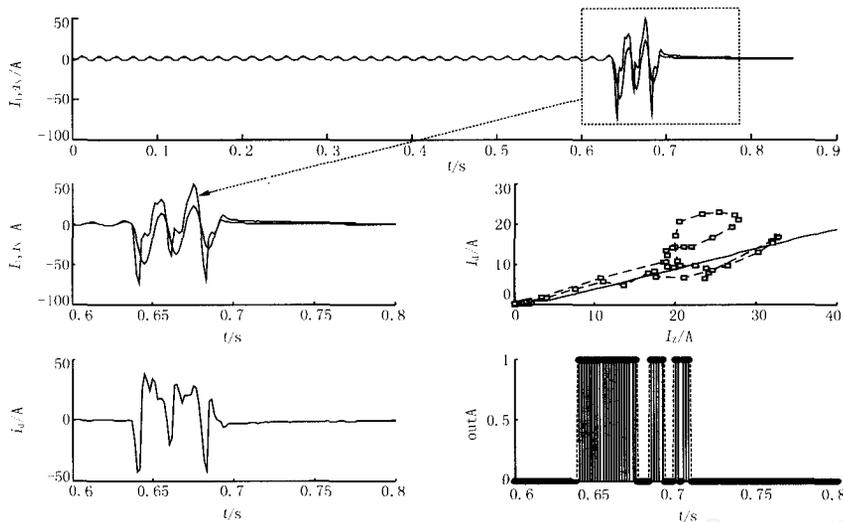


图 10 区外故障产生的不平衡电流轨迹图

Fig 10 Unbalanced current trajectory of external fault removal

7 结束语

发电机纵差保护误动的比例要高于变压器差动保护。这不仅由于变压器差动保护躲励磁涌流的方法有一定的抗 CT 暂态饱和的能力,而且还由于其整定值高,也就是其闭锁角大,其可靠性也相应地得到了提高。建议通过理论分析和大量的统计计算,在整定导则中明确闭锁角的数值和纵差保护的制动特性曲线的方式,增加校验闭锁角是否满足相应要求的条款,同时现场试验规程应增加闭锁角测试项目,这样将有利于发电机纵差保护正确动作率的提高。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
WANG Wei-jian Principle and Application of Electric Power Equipment Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

- [2] 王维俭, 桂林, 毕大强. 大型发电机 变压器组继电保护的探讨 [J]. 中国电力, 2001, 34 (1): 39-43.
WANG Wei-jian, GU I Lin, BI Da-qiang Discussion on Relay Protection for Large Power Generator-transformer Unit [J]. Electric Power, 2001, 34 (1): 39-43.
- [3] 陆于平, 李玉海, 李鹏, 等. 差动保护灵敏度与启动电流、制动系数和原理之间的关系 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (5): 51-55.
LU Yu-ping, LI Yu-hai, LI Peng, et al Discussion on Relationship of Pick-up Current, Restrained Factor and Principles to the Differential Protection Sensitivity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (5): 51-55.

收稿日期: 2004-09-23; 修回日期: 2004-10-22

作者简介:

李德佳 (1964 -), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护的调试和运行; E-mail: jiajiadedelili@sohu.com
袁宇波 (1975 -), 男, 博士研究生, 从事电力系统继电保护的研究与开发。

Analysis of ratio restrained characteristic for generator differential protection

L I De-jia, YUAN Yu-bo

(1. Nuclear Power Qinshan Joint Venture Co., Ltd, Haiyan 314300, China; 2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The restrained characteristic of ratio differential protection is analyzed. The equal block angle for the ratio differential protection is calculated. Through analyzing the trajectory of the field fault record wave in different working conditions, the paper introduces setting method for generator differential protection to improve the performance of the differential protection.

Key words: generator; differential protection; malfunction