

自并励汽轮发电机相间短路后备保护配置与整定的探讨

张兵海

(河北省电力研究院,河北 石家庄 050021)

摘要: 与传统三级励磁方式不同,自并励发电机励磁电源通过励磁变取自发电机机端,机组发生相间短路时,随着机端电压的短路降低,励磁电源跟着衰减,尤其在机端发生三相短路时,励磁电源很快衰减至零,致使发电机提供的短路电流很快衰减至零,这就要求发电机后备保护的原理配置、定值整定与三级励磁方式的发电机有所不同。该文并对常见的几种用于自并励发电机相间短路后备保护的保护装置进行了原理分析,并提出相关的整定方法。

关键词: 自并励; 发电机; 后备保护

中图分类号: TM772 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2005)05-0063-04

0 引言

与传统励磁方式不同,自并励发电机因为励磁电源(励磁变)取自发电机定子出线端,在发电机定子出线侧发生相间短路后,尤其是机端发生三相短路时,由发电机侧提供的短路电流急剧衰减。这时发电机的后备保护已不宜再按常规方式配置、整定。

传统的发变组保护配置中,发变组相间短路的后备保护一般有复合电压过流保护、阻抗保护等。用做发电机变压器组的相间短路后备保护,一般二次电压取自发电机机端 PT(电压互感器,下同),二次电流取自发电机中性点侧 CT(电流互感器,下同)。(对于配置于主变高压侧的阻抗保护,电压取自系统电压、电流取自主变高压侧 CT,一般只做主变高压侧绕组及系统母线故障的后备保护,不做发电机定子绕组短路故障的后备保护)。

1 配置于发电机机端的阻抗保护在定子短路过程中的问题

发电机短路瞬间,因为励磁绕组的磁链不能突变,且因为转子阻尼绕组的作用,电枢磁通将通过定子与转子之间的空气隙、转子阻尼绕组旁的漏磁路径和励磁绕组旁的漏磁路径,此时主磁路径所对应的电抗即为直轴次暂态电抗 $X_{d'}^{\prime}$ 。

短路发生几个周波之后,既经过 T_d' 时间后,转子阻尼绕组作用消失,电枢磁通主要通过励磁绕组旁的漏磁磁通、空气隙,此时主磁路径所对应的电抗比次暂态要大,称为 $X_{d''}$ 。

自短路开始经过 T_d' 之后各种电磁关系已达到稳态,稳态后的电枢磁通通过转子铁芯及其周围的

漏磁路径,此时主磁路径所对应的电抗为 X_d ,因为励磁电源的消失,此时的短路电流 $I < I/X_d$ 。

因为定子绕组短路过程中,电枢绕组反应电抗的变化,将使得以发电机做为保护对象的阻抗保护失去目标。因为后备保护一般动作时间稍长,一般均大于 3 s,有的甚至大于 7 s,经过此延时的定子绕组反应电抗已变为稳态值 X_d 。因此若阻抗保护按 X_d 整定显然是不对的,因为延时后的阻抗轨迹点已滑出阻抗圆,将导致阻抗拒动。而阻抗保护不可能按 X_d 整定。

另外,对于电流回路取自发电机中性点侧 CT,电压取自机端 PT的情况,当定子绕组发生短路时,保护感受到的故障电流为发电机提供的故障电流,电压则为系统提供的故障电压。在这种情况下,电流与电压不是同一系统的故障量,因此没有相位方向上的比较关系,只有比值关系。因此此种情况的阻抗保护只能按正圆整定,整定半径取所有保护对象中的阻抗最小值,即取变压器短路阻抗 X_T 整定。

如果阻抗保护的电流量取自发电机出线侧 CT,则不存在计算阻抗用的电压、电流不是一个系统的问题,可以按抛圆整定,抛向发电机,但同样存在感受电抗变化的问题,而且应该注意与失磁保护、失步保护等反应异常运行工况的保护元件的配合。阻抗保护的电流取自机端 CT时,保护在发电机并网前及并网于弱电网时将失去保护作用,因为此种情况下发电机发生相间短路故障时,系统无法提供故障电流。

根据清华大学电机系“多回路分析法”计算结果,取用机端 CT、PT的阻抗在发电机发生短路故障时,测量数据大多数位于“以原点为圆心、以 X_d 为

半径的圆外,且多为第、象限。

根据以上分析,因为整定原则、保护区的不明确,本人认为不宜取以阻抗保护来做发电机相间短路故障的后备保护。

2 复合电压闭锁过流保护在自并励发电机定子绕组相间短路过程中的问题

传统复合电压闭锁过流保护采用:相间低电压与负序电压“或”之后,再与相过电流“与”,形成保护逻辑。这种保护在用于自并励发电机后备保护时,相间故障情况下,复合电压条件会一直满足,而过电流元件却会因故障电流的衰减而无法一直满足,最终结果是无法起到后备保护的作用。通过下面(例解)的计算我们得知,3 s后故障电流已衰减至0.25倍额定电流,因此按躲负荷电流整定的过电流元件是无法动作的。

3 自并励发电机短路故障电流计算算例

以河北南网—200 MW 发电机变压器组分析:

(注:以下计算未注明单位的量均为标么值,基准侧为发电机侧)

发电机 $S_n = 235.3 \text{ MVA}$, $I_n = 7547 \text{ A}$, $U_n = 18 \text{ kV}$, $X_{d(\text{不饱合值})} = 190\%$, $X_{d(\text{饱合值})} = 178\%$, $X_{d(\text{不饱合值})} = 19.6\%$, $X_{d(\text{饱合值})} = 17.8\%$, $X_{d(\text{不饱合值})} = 15.1\%$, $X_{d(\text{饱合值})} = 10.9\%$, $X_{2(\text{不饱合值})} = 15.4\%$, $X_{2(\text{饱合值})} = 11.5\%$, $T_d = 1.017 \text{ s}$, $T_{d0} = 9.87 \text{ s}$, $T_d = 0.033 \text{ s}$, $T_{d0} = 0.043 \text{ s}$, $U_{fd0} = 91 \text{ V}$, $I_{fd0} = 492 \text{ A}$, $U_{fdn} = 301 \text{ V}$ 。主变压器 $S_n = 240 \text{ MVA}$, 变比 $18/242 \text{ kV}$, $X_t = 14\%$ 。励磁变变比 $18/0.48 \text{ kV}$ 。整流方式:三相全控桥整流。接线形式:发变组单元接线。

短路电流的理论计算用数学表达式为:

$$I_d = I_{d1} + I_{d2} + I = \left[\frac{1}{X_{d1} + X_s} - \frac{1}{X_{d1} + X_j} \right] e^{-t/T_{d1}} + \left[\frac{1}{X_{d2} + X_s} - \frac{1}{X_{d2} + X_j} \right] e^{-t/T_{d2}} + \frac{1}{X_{d1} + X_s}$$

其中: X_{d1} 、 X_{d2} 、 X_{d3} 为发电机次暂态电抗、暂态电抗、同步电抗; T_{d1} 、 T_{d2} 为发电机次暂态时间常数、暂态时间常数; X_s 为机端以外的全部电抗; I_{d1} 、 I_{d2} 、 I 为短路电流中的次暂态分量、暂态分量、稳态分量。因为自并励发电机短路稳态后励磁电源已消失,因此不用考虑短路电流中的稳态分量,短路电流表达式实际为:

$$I_d = \left[\frac{1}{X_{d1} + X_s} - \frac{1}{X_{d1} + X_j} \right] e^{-t/T_{d1}} + \left[\frac{1}{X_{d2} + X_s} - \frac{1}{X_{d2} + X_j} \right] e^{-t/T_{d2}}$$

其中: T_{dk} 为等效时间常数。

$$T_{dk} = T_d \frac{R_{FD}}{\left[1 - C \frac{X_s}{X_{d1} + X_j} \right] (R_{FD} + R_D)}$$

其中: R_{FD} 为转子回路直阻; R_D 为整流变换弧电抗的等效直阻; 通常取 $R_{FD} / (R_{FD} + R_D) = 0.90 \sim 0.96$ 。

因为我们计算的目的是分析发电机相间后备保护的动作为,发电机后备保护的电流取自发电机中性点 CT,因此在实际计算时,只考虑发电机提供的短路电流,不必考虑 X_s 的作用。因此短路电流计算公式变为:

$$I_d = \left[\frac{1}{X_{d1}} - \frac{1}{X_{j1}} \right] e^{-t/T_{d1}} + \left[\frac{1}{X_{d2}} - \frac{1}{X_{j2}} \right] e^{-t/T_{dk}} \quad (1)$$

本机组临界外接电抗的计算:

$$X_{s,cr} = \frac{X_{d1}}{C - 1}$$

其中: $C = \cos \alpha_k / \cos \alpha_0 = 5.86$; α_0 为空载额定电压时整流硅触发角; α_k 为强励时硅整流触发角。

因此 $X_{s,cr} = 0.366$

由机端看出的主变阻抗 $X_T = X_T \frac{S_G}{S_T} = 0.137 <$

$X_{s,cr}$,因此主变高压侧三相相间短路时,短路电流衰减。只有当 $X_t + X_s$ 大于 $X_{s,cr}$ 时,短路电流才不衰减。

因为三相短路发生机会较小,发电机相间短路后备保护一般与主变高压侧两相相间短路配合,需计算两相相间短路的临界外接电抗:

$$\text{计算公式: } X_{s,cr} = \frac{X_{d1}}{C - 1} - X$$

其中: X 为额外电抗,两相不对称短路时 $X = X_2$

两相相间短路的临界外接电抗为:

$$X_{s,cr}^{(2)} = 0.1 < X_T = 0.143$$

因此,当主变高压侧发生两相相间短路时,发电机提供的短路电流不衰减。同样可以算出,当机端发生两相短路,短路电流是衰减的。

机端发生三相短路时,发电机提供的故障电流计算方程如下,由机组参数代入式(1)得出:

$$I_d = 3.556e^{-30.3t} + 5.056e^{-1.02t} \quad (2)$$

因此可以计算出机端短路故障电流与时间的衰减关系:

$$t = 1.19 \text{ s时}, I_d = 1.5; t = 3.0 \text{ s时}, I_d = 0.252$$

常规发电机后备保护所配置的复合电压过流保护中,电流定值按 1.5 倍 I_n (额定负荷电流)整定,动作时间与系统保护配合,一般与线路保护一段距

离配合,通常取值为 $3 \sim 4.5$ s(有时调度要求此时间可能更大)。根据计算结果可以看出,当 $t > 1.19$ s,故障电流已衰减至小于 $1.5I_n$ 。因此按常规原理配置的复合电压过流保护在动作延时范围内故障量已低于整定值,保护根本无法动作。

4 几种常见的用于自并励发电机的后备保护的原理简介及相关定值整定

4.1 电压限制过流保护(见于 BECKW 的 M3425、GE 的 G60、ABB 的 REG216 等)

保护原理见图 1。

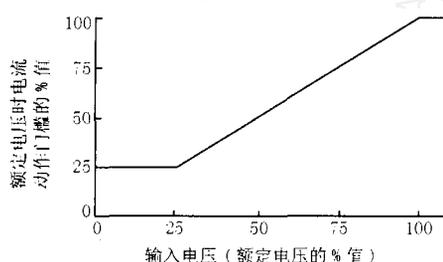


图 1 Beckwith M3425 电压限制过流保护的动特性

Fig 1 Characteristic of voltage restraint overcurrent protection of Beckwith M3425

电压 U (均指线电压) $> 100\% U_n$ 时,电流元件定值 $= 100\% I_{setting}$; $25\% U_n < \text{电压 } U < 100\% U_n$ 时,电流元件定值 $= 100\% I_{setting} \times (U/U_n)$; 电压 $U < 25\% U_n$ 时,电流元件定值 $= 25\% I_{setting}$ 。

一般保护装置提供的动作时间为一组反时限特性,包括反时限、非常反时限、极端反时限以及 IEC 等标准的反时限等。

电流定值一般按躲负荷电流整定,取 $1.5I_n$ 。

时间特性曲线的选取可按主变高压侧相间短路动作时间与系统保护备用段动作时间来配合整定曲线的长延时段,机端三相短路的动作时间与发电机主保护配合整定曲线的短延时段。

分析看出,电压限制过流反时限保护可以很好地起到后备保护的作用,既可与系统保护正常配合,又可作为发变组后备保护。

4.2 电流记忆型复合电压过流保护(见于国产保护)

保护原理见图 2。如图所示,保护启动后,电流元件保持,延时出口动作;若期间故障消失,则电压元件返回,保护返回。

保护的整定与常规复合电压过流保护整定相

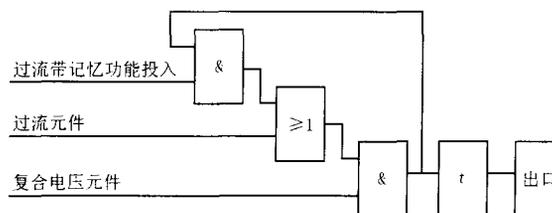


图 2 电流记忆型复合电压过流保护动作逻辑

Fig 2 Overcurrent protection logic of seal-in current based compound voltage

同:电流元件按躲过正常负荷电流考虑,低电压按 $0.5 \sim 0.6 U_{\phi\phi}$ 整定,负序电压按 $0.06 \sim 0.08 U_{\phi\phi}$ 整定。

电流记忆型复合电压过流保护原理简单,整定计算简单。与电压制动过流保护相比,无论是发电机相间故障还是变压器高压侧相间故障,动作时间相同;而电压限制过流保护在反应发电机相间故障时,动作延时比反应变压器高压侧相间故障时短,更利于发电机严重故障的尽快切除。

4.3 电压保持型阻抗保护(见于 SIEMENS 的 7UM516)

保护原理见图 3。保护由过流元件做为启动元件 (Fault detection),也可选为低压闭锁过流元件。启动元件动作后启动阻抗判别元件、开放出口跳闸矩阵。Siemens 推荐保护取用发电机中性点 CT、机端 PT。阻抗元件为三段对称四边形动作特性。 $Z_1 <$ 元件按保护发电机内部及主变低压侧绕组考虑,动作时间 T_1 与发电机差动、变压器差动配合,可以取尽量短。 $Z_{1B} <$ 为 $Z_1 <$ 的延伸,由发变组主开关辅助接点闭锁,主开关跳开后, $Z_{1B} <$ 元件开放,动作时间 T_{1B} 与 T_1 原则相同。因为受保护原理的限制, $Z_1 <$ 、 $Z_{1B} <$ 元件只能按变压器短路阻抗整定。 $Z_2 <$ 元件按保护至主变高压侧引线及开关站母线考虑,时间 T_2 应与系统保护配合。 T_3 元件为保护启动元件的出口跳闸延时,过流元件动作后由低压过流元件保持,因为过流元件动作值整定较低(一般按躲正常负荷电流考虑),因此动作延时 T_3 应取稍长的延时。启动元件的判别逻辑见图 4 (图中仅示出 L_3 相动作原理,其余两相与此相同)。

Siemens 7UM516 的阻抗保护逻辑虽然复杂,但使用时应根据现场具体情况进行整定配置。这种阻抗保护是记忆型复合电压过流保护与阻抗保护的一种延伸,因为原理的限制,仍然不能反应大多数发电机内部故障。

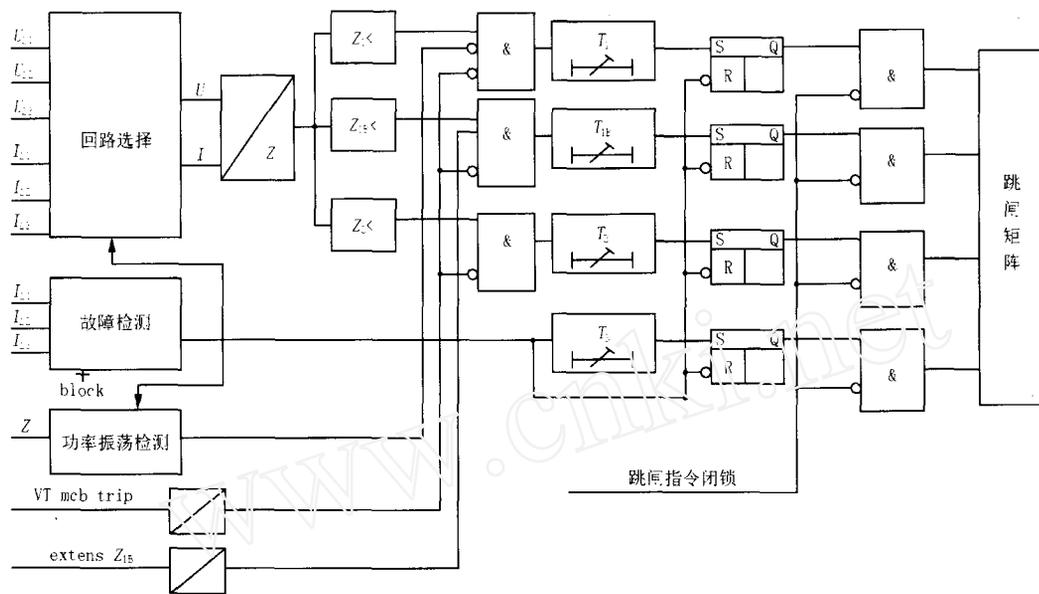


图 3 Siemens 7UM516低阻抗动作逻辑

Fig 3 Low impedance protection logic of Siemens 7UM516

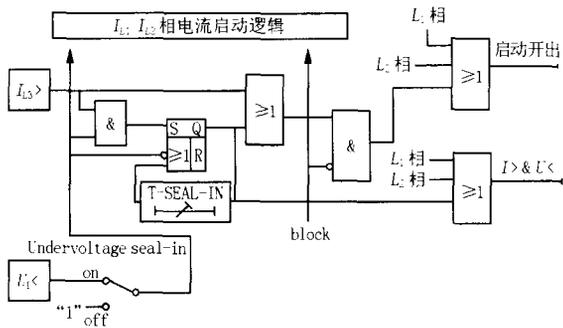


图 4 Siemens 7UM516低阻抗的电流启动元件

Fig 4 Current start logic of low impedance Siemens 7UM516

5 结论

1) 因为发电机定子绕组一般均为多分支并联组成,汽轮发电机一般为两个分支构成,发生内部相间短路时短路相的所有分支不可能都发生短路,因此阻抗保护计算轨迹大多位于以发电机 X_d 为半径的正圆之外,使保护无法反应。另因为暂态过程中发电机定子铁磁关系的变化,发电机阻抗也是变化的。因此说,发电机阻抗保护整定原则不明,保护区域不明。因此,发电机相间短路后备保护不宜配置阻抗保护。

2) 复合电压过流类后备保护可选择电压限制型,也可以选择电流记忆型。

3) 应将主保护双重化,加强主保护,简化后备保护。根据系统工况,宜尽量缩短后备保护动作时间。

参考文献:

[1] 李光琦. 电力系统暂态分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 1995.
 LI Guang-qi Power System Transient Analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

[2] 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, 2000.
 WANG Wei-jian Theory and Application of Protection for Electric Main Equipment [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

[3] 马士英. 自并励同步发电机机端短路电流及其保护方式 [J]. 湖南电力, 2002, 22 (5): 8-10.
 MA Shi-ying The Short-circuit Current Calculation of Self-shunt Excitation Generator Terminal Fault and Its Protection [J]. Hunan Electric Power, 2002, 22 (5): 8-10.

[4] 黄家声. 电网事故导致自并励发电机失磁保护动作分析 [J]. 水电厂自动化, 1998, (4): 30-36.
 HUANG Jia-sheng Power Grid Faults Induce Loss-of-excitation Relay Operation for Self-shunt Excitation Generator [J]. Water Power Plant Automation, 1998, (4): 30-36.

[5] 王维俭. 主设备后备阻抗保护反应绕组短路的灵敏度分析 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (9): 1-4.
 WANG Wei-jian Backup Impedance Protection Sensitivity Analysis for Internal Winding Faults of Main Equipment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (9): 1-4.

(下转第 71 页 continued on page 71)

随着电网的发展,加之接地继电保护选择性难题的攻克,中压电网中性点采用谐振接地(经消弧线圈接地)的优越性已逐渐显示出来。而且自动跟踪补偿装置或自动调谐装置使消弧线圈的功能和应用又上了一个新台阶,这必将使谐振接地方式成为中压电网中性点接地方式的发展方向。

参考文献:

- [1] 杜丁香,徐玉琴. 配电网谐振接地方式的控制[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(12): 54-56
DU Ding-xiang, XU Yu-qin. The Control of Resonant Grounded Distribution Network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(12): 54-56
- [2] 程祥,李朝晖. 变电站小电流接地数值仿真研究[J]. 水电能源科学, 2001, 19(2): 48-50
CHENG Xiang, LI Zhao-hui. Simulation Study on Single Ground Fault of Transmission Line[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2001, 19(2): 48-50
- [3] 杜丁香. 自动补偿电网单相接地故障选线原理的研究(硕士学位论文)[D]. 保定:华北电力大学, 2002
DU Ding-xiang. Study on the Principle of the Faulted Line Selection in an Auto-compensating Network, Thesis[D].

- Baoding: North China Electric Power University, 2002
- [4] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社, 2000
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonant Grounded of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000
- [5] 曾文慧. 10 kV 中压电网中性点谐振接地方式[J]. 四川电力技术, 2002, (5): 38-40
ZENG Wen-hui. Resonant Grounded in a 10 kV Middle-voltage Network[J]. Sichuan Electric Power, 2002, (5): 38-40
- [6] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京:中国电力出版社, 1995.
CHEN Heng. Steady-state Analysis of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

收稿日期: 2004-07-02; 修回日期: 2004-09-13

作者简介:

陈亚(1979-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: cyncepu@163.com
任建文(1962-),男,博士,副教授,主要从事人工智能、电网调度自动化等方面的研究工作。

Simulation study of single-phase ground fault of different grounded distribution networks

CHEN Ya, REN Jian-wen

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Theory and characteristic of three kinds of grounded modes including ungrounded, grounded through a small resistance, resonant grounded are presented. After simulating and comparing these three grounded modes of a 10 kV distribution network with the graphics simulating software MATLAB, this paper derives resonant grounded is a rather proper grounded mode.

Key words: distribution network; resonant grounded; extinction coil; simulation

(上接第 66 页 continued from page 66)

收稿日期: 2004-06-16; 修回日期: 2004-07-09

作者简介:

张兵海(1968-),男,高级工程师,主要从事发电机变压器保护和线路保护的试验研究工作。

Configuration and setting research on back-up protection of turbine generator with self-shunt excitation

ZHANG Bing-hai

(Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Different from the traditional three-stage excitation, the excitation power of self-shunt excitation generator derives from the generator busbar by the excitation transformer. When phase-to-phase short-circuit fault occurs, the fault current will reduce quickly, further come to zero especially at the time of three-phase short-circuit fault happens at the generator terminal, because the generator start voltage reduces, and the excitation power will disappear in the following. So the principle, configuration and setting of the back-up protection should be different. In addition, this paper takes an overlook at the phase-to-phase fault back-up protection devices working on turbine generator units with self-shunt excitation, and details the methods of protection settings.

Key words: self-shunt excitation; generator; back-up protection