

三种失磁保护判据与低励限制配合研究

季 杰, 黄建琼

(锦屏水力发电厂, 四川 西昌 615000)

摘 要: 通过介绍南瑞 RCS-985 发变组失磁保护判据特性, 对二滩水电站失磁保护典型配置方案进行了分析。结合二滩水电站定值, 通过将三种不同坐标系下的失磁保护判据映射到阻抗平面和功率平面两种方法, 系统研究失磁保护与低励限制的配合关系, 验证其定值的合理性。

关键词: 失磁保护; 典型配置; 低励限制; 映射

Abstract: The typical configuration of loss-of-excitation protection in Ertan Hydropower Station is analyzed according to the criteria characteristics of loss-of-excitation of RCS_985 generator-transformer unit manufactured by Nanrui. Combined with the constant value of Ertan Hydropower Station, the cooperation between loss-of-excitation and low excitation limit is studied by mapping the criteria of loss-of-excitation protection under three different coordinate systems to the impedance plane and power plane, and the rationality of the constant value is verified.

Key words: loss-of-excitation protection; typical configuration; low excitation limit; mapping

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)06-0046-06

二滩水电站自 1998 年投运以来其发变组保护装置最长已运行 13 年, 达到规程^[1]规定的运行年限, 且在运行中逐渐暴露出一些问题, 例如元器件老化、采购周期长且价格昂贵等。鉴于上述原因, 二滩水电站已在 2012 年检修过程中将 5 号发变组保护装置改造为南瑞 RCS-985 发变组保护装置。

针对大型水轮发电机组应采用合理的失磁保护配置方案, 在保证发生失磁故障时能可靠动作, 异常工况时不误动情况下, 应能满足低励限制优先于失磁保护动作。文献^[2]虽将失磁保护定子阻抗圆判据映射到 $R-X$ 坐标系和 $P-Q$ 坐标系中研究其与低励限制之间的关系, 却未对机端低电压判据和转子侧电压判据进行研究。结合二滩水电站实际参数, 通过将三种不同坐标系的失磁保护判据统一到阻抗平面和功率平面两种方法, 研究其定值的合理性。

1 失磁保护配置方案

二滩水电站失磁保护配置由机端低电压判据、定子侧滴状静稳阻抗圆判据、转子侧判据和灭磁开关跳功能组成。

1.1 低电压判据

失磁保护必须在发电机失磁后系统电压下降时

迅速跳开失磁发电机, 以保证系统的稳定。水电站首台机组投入运行和枯水期单机运行时, 由于系统容量相对较小, 系统联系电抗较大, 因此失磁保护后, 系统母线的电压下降很快, 系统母线低电压判据的重要性尤为突出。水轮发电机失磁后, 机端电压严重下降, 会引起厂用系统电机过流等。

二滩水电站 6 台单机容量 550 MW 混流式水轮发电机组并联运行, 文献^[3]指出发电机在满负荷运行失磁时, 机端电压会下降到 0.8 倍额定电压以下, 而母线电压却难以达到该定值, 因此一台机组的失磁难以引起高压母线的电压大幅下降, 但会导致故障机组机端电压过低, 危及厂用电系统的正常工作, 因此若采用系统母线电压则可能导致失磁保护拒动, 故采用机端三相同步低电压判据作为失磁保护的判据。

在系统发生不对称故障时, 系统不可能出现三相同步低电压, 因此失磁保护不会误动。在发电机机端发生三相对称短路时, 机端低电压判据会满足, 但通过合理的失磁保护动作延时可以使其滞后于主保护动作, 因此机端三相电压同时低判据不会在系统短路时误动。

1.2 定子侧判据

为提高定子侧判据的可靠性, 保证在最恶劣的

运行工况下失磁保护也能可靠动作,一般以系统最小运行方式在阻抗平面上作出等有功圆、静稳圆和异步圆。若在最小运行方式下异步圆能与等有功圆相交,则选择异步圆作为失磁保护定子侧判据,否则选择静稳圆。经计算,二滩水电站实选择滴状静稳阻抗圆作为失磁保护的定子侧判据。

兼顾失磁保护的可靠性,选择滴状静稳阻抗圆作为失磁保护定子侧判据时,应与无功反向判据相结合,以消除阻抗平面一、二象限的动作区,防止静稳圆阻抗判据在非失磁工况下误动。

1.3 转子侧判据

在一些非失磁异常工况下,定子阻抗判据也会满足,为了弥补这一不足可增加转子电压判据。转子低电压是失磁过程中电量变化的显著特征之一,且能与多种非失磁故障相区分,因此增加转子电压判据可提高失磁保护的可靠性。

转子低电压判据沿用德国西门子公司的 $0.8 U_f$, 该定值是发电机在额定功率下达到静稳极限的最小转子电压值。发电机在重负荷下发生失磁故障时,定励磁低电压判据的整定值偏低,导致转子低电压判据比静稳极限判据动作要晚得多,因此需增加定值随功率变化的转子低电压判据。

1.4 灭磁开关联跳

二滩水电站发生过灭磁开关偷跳,失磁保护未动作前单原件横差保护先动作的情况,如果等待失磁保护动作,此时对系统已有较大冲击,可以增加灭磁开关联跳功能进行补充。当灭磁开关跳位开入和 GCB 处于合闸位置同时满足时,保护动作出口。

2 二滩水电站失磁保护参数

二滩水电站 RCS-985 发变组失磁保护整定所需参数见表 1。

根据《四川 220 kV 及 500 kV 电力系统 2011 年度继电保护整定运行方案》,二滩水电站与系统的联系等值正序电抗标在容量基准值为 100 MVA 下计算出的标么值为 0.008 0/0.011 4(大方式/小方式)。

所有公式均采用以发电机额定容量、额定电压为基准的标么值进行计算。根据表 1 所示参数以单台发变组为研究对象,将其外部等效为系统电源,失磁保护整定计算等值电路如图 1 所示。

表 1 设备参数

设备	参数名称	数值
发电机	额定容量 /MVA	612
发电机	额定功率 /MW	550.8
发电机	额定电压 /kV	18
发电机	额定电流 /A	19 629
发电机	额定励磁电压 /V	318
发电机	额定励磁电流 /A	2709
发电机	空载励磁电压 /V	159.2
发电机	强励倍数/时间 /s	2/10
发电机	直轴同步电抗	0.996
发电机	交轴同步电抗	0.71
升压主变压器	容量 /MVA	3×214
升压主变压器	电压 kV	550/18
升压主变压器	X_T	0.15

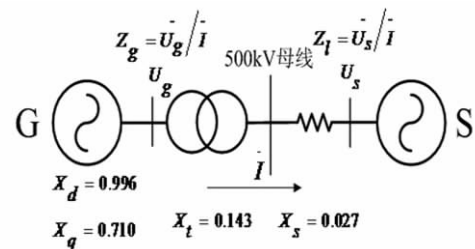


图 1 失磁保护等值电路图

3 低励限制与失磁保护配合关系

南瑞 RCS-985 发变组失磁保护判据可以根据厂家装置技术说明书进行整定。定值的合理性主要在于研究其与低励限制的配合关系。

3.1 水轮发电机 PQ 功率圆

忽略发电机定子绕组电阻压降,水轮发电机相量图如图 2 实线所示,图中 δ 为内功率因数角, φ 为外功率因数角。延长 E_q 使 $AB = IX_d$,作平行线 $BC \parallel E_0$ 交 AO 于 C 点,以 OC 为直径作圆交 CB 于 D 点,过 E_q 点作 $E_q M \perp BC$,垂足为 M ,则 $BM = (X_d - X_q) I_d = E_0 - E_q$,因此 $DB = E_0$ 。

在图 2 的基础上乘以 U/X_d ,则三角形 ABC 可转化为 PQ 功率平面的特征三角形,如图 3 所示。

根据发电机定子线棒、端部和转子绕组发热限制和机组最大允许出力确定其功率允许运行区。端电压为额定电压时,以 A 点为 $P-Q$ 坐标系的原点,建立同步发电机的 PQ 功率曲线,如图 4 所示。当

机端电压低于额定电压时,该功率曲线随之等比例缩小。由于 DB 正比于 E_0 ($E_0 = I_f X_{ad}$), 因此 DB 正比于 I_f , OA 则正比于空载额定励磁电流 I_0 。

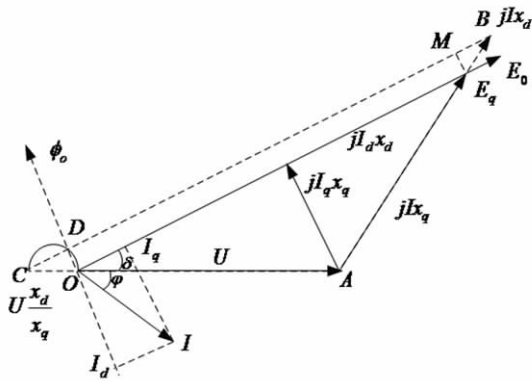


图2 凸极同步发电机相量图

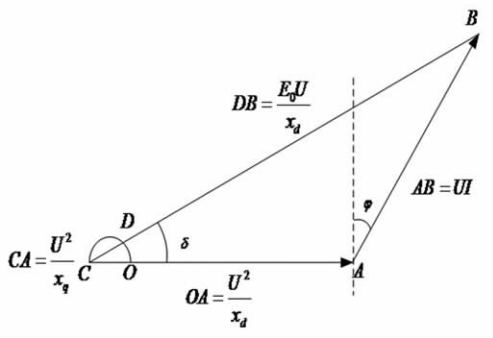


图3 功率圆特征三角形

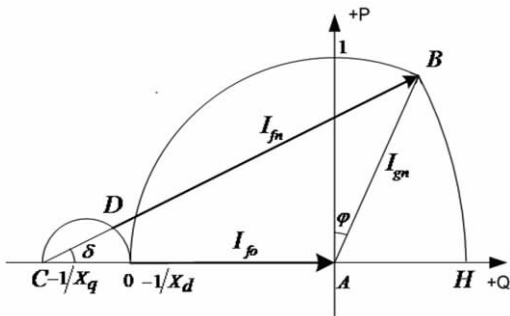


图4 PQ功率圆

二滩水电站发电机励磁系统采用的是 ABB UNITROL5000 型励磁调节器,该系统低励限制单元包含了额定励磁电流极限、额定定子电流极限、额定有功功率极限。由于二滩水电站在枯水期进相运行较汛期深,这里以枯水期为例进行研究。

励磁系统在自动模式时,起励电流大于空载额定励磁电流的 20%,进相运行低励限制为直线,由 $PQ(550 \text{ MW}, -50 \text{ MVar})$ 和 $PQ(0 \text{ MW}, -300 \text{ MVar})$ 两点确定,定子电流限制曲线由发电机额定电流决定且不受机端电压影响,转子电流限制曲线由额定励磁电流决定,由此可以确定 P/Q 限制曲

线,如图5中加粗线所示。

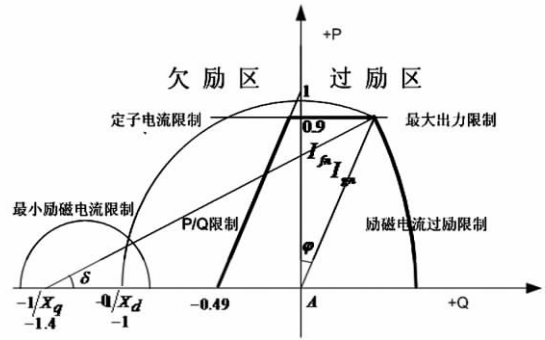


图5 P/Q 限制曲线

在机组运行过程中,机组越过 P/Q 限制曲线时,计算机控制中心会发“ P/Q 曲线越限”报警信号,此时必须手动加励磁以减轻进相深度。

P/Q 限制曲线建立在 $P-Q$ 坐标系,由反演定律可知不经过反演极的直线的反演是经过反演极的圆,通过式(1)可以将其转化至图6所示阻抗坐标系,圆与横坐标交点为 M ,与纵坐标交点为 N 。 P/Q 限制曲线在阻抗平面即为该平面第三象限圆弧 MN ,当机端阻抗进入圆弧 MN 时,低励限制报警。

$$\begin{cases} r = \frac{PU^2}{P^2 + Q^2} \\ x = \frac{QU^2}{P^2 + Q^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 P 为发电机有功功率; Q 为发电机无功功率; U 为机端额定电压。

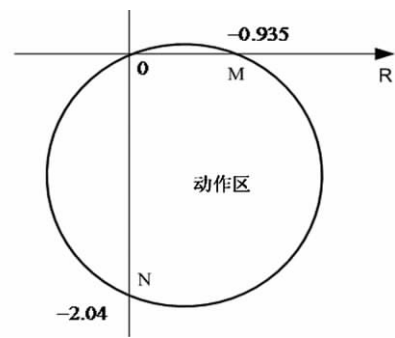


图6 阻抗平面 P/Q 限制曲线

3.2 机端低电压判据

机端三相同时候低电压判据整定值如下。

$$U_{op, 3ph} = 0.85 U_{gn} / n_v \quad (2)$$

式中 $U_{op, 3ph}$ 为机端三相同时候低电压定值; U_{gn} 为发电机额定电压; n_v 为机端 TV 变比。

为了将机端三相同时候低电压判据转化到 $P-Q$ 坐标系,首先需计算出其阻抗特性。根据图1所示等值电路图,假定无穷大系统在单机失磁时系统电

压 U_s 恒定不变,机端电压为 U_g ,系统负荷为 Z_l ,发电机出口测量阻抗为 Z_g ,则有

$$Z_l = \dot{U}_s / \dot{I} = |Z_l| e^{j\varphi_s} \quad (3)$$

$$Z_g = \dot{U}_g / \dot{I} = |Z_g| e^{j\varphi_g} \quad (4)$$

式(3)、(4)中,阻抗角均随负荷变化而变化。

定义 $K = |U_g| / |U_s| = 0.85$,则有

$$\dot{U}_g / \dot{U}_s = \frac{Z_g}{Z_l} = \frac{Z_l + X_l + X_s}{Z_l} = K e^{j(\varphi_s - \varphi_g)} \quad (5)$$

由式(5)可得低电压判据阻抗特性。

$$Z_g = \frac{K^2(X_l + X_s)}{K^2 - 1} + \frac{K(X_l + X_s)}{K^2 - 1} e^{j(\varphi - 2\alpha)} \quad (6)$$

$$\text{式中 } \alpha = \arctg \frac{K \sin(\varphi_s - \varphi_g)}{K \cos(\varphi_s - \varphi_g) - 1}$$

式(6)是圆的方程,根据二滩水电站相关参数,其机端阻抗特性如下。

$$R^2 + (X + 0.443)^2 < 0.521^2 \quad (7)$$

由于低励限制与失磁保护之间的关系位于发电机欠励区,因此仅绘出欠励区的轨迹,其在 $R-X$ 坐标系的动作区如图7所示,动作区位于曲线1的内侧。

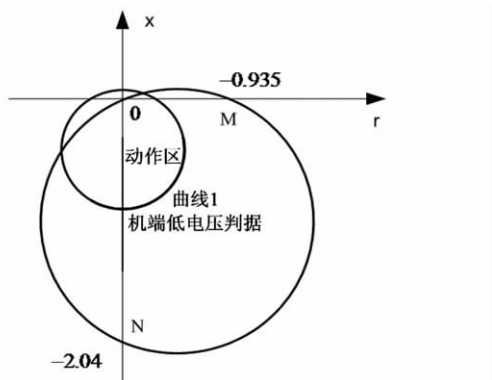


图7 机端低电压 $R-X$ 坐标系动作区

通过阻抗坐标系与功率平面的转换^[4]可知,在阻抗 $R-X$ 坐标系中,对于圆心为 $(0, X_0)$ 、半径为 R_0 的方程可表示为

$$R^2 + (X - X_0)^2 < R_0^2 \quad (8)$$

映射到 $P-Q$ 坐标系的表达式为

$$P^2 + \left(Q - \frac{X_0 U^2}{X_0^2 - R_0^2}\right)^2 > \left(\frac{R_0 U^2}{X_0^2 - R_0^2}\right)^2 \quad (9)$$

由式(9)可得机端低电压判据在 $P-Q$ 坐标系下的失磁轨迹为

$$P^2 + (Q - 4.261)^2 > 5.005^2 \quad (10)$$

其映射到 $P-Q$ 坐标系的动作区如图8所示,动作区位于曲线2的左侧。

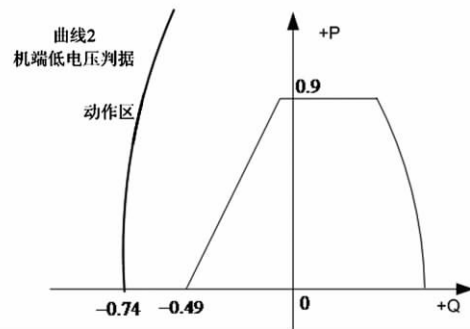


图8 机端低电压 $P-Q$ 坐标系动作区

3.3 定子侧判据

定子侧滴状静稳阻抗圆判据中系统联系电抗包含升压变压器电抗,对应于最小运行方式,整定如下。

$$X_a = X_s + X_l = 0.170 \quad (11)$$

$$X_b = -X_q = -0.710 \quad (12)$$

$$Q_{zd} = -0.0909 P_{Gn} \quad (13)$$

反向无功曲线在阻抗圆上是远离定子阻抗的曲线^[6],因此研究定子侧阻抗时可不作考虑。定子侧滴状静稳阻抗圆在 $R-X$ 坐标系的动作区如图9所示,动作区位于曲线3的内侧。

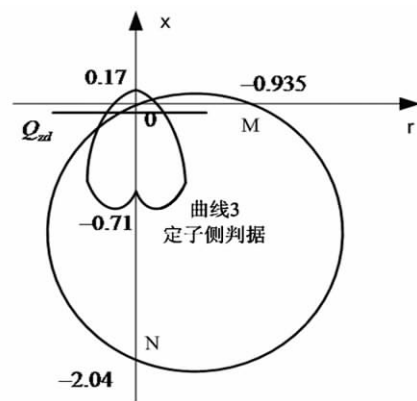


图9 定子侧判据 $R-X$ 坐标系动作区

使用作图法可以作出该判据在 $P-Q$ 坐标系的动作曲线^[5],如图10所示,动作区位于曲线4的左侧。

3.4 转子电压判据

励磁低电压判据整定如下。

$$U_{f.op} = 0.8 U_{f0} \quad (14)$$

式中 U_{f0} 为发电机空载额定励磁电压。

变励磁电压判据中对应于某一有功 P 会有维持静稳极限所必须的励磁电压 $U_{f.op}$ 与之对应,动作判据如下。

$$U_{f.op} = K_{rel}(X_d + X_s)(P - P_t) U_{f0} \quad (15)$$

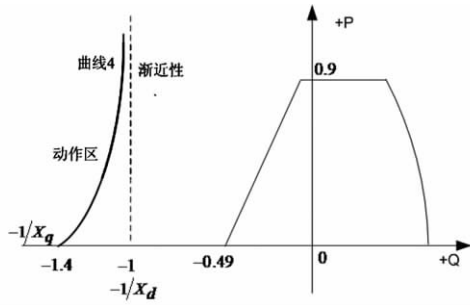


图10 定子侧判据 P-Q 坐标系动作区

式中 K_{rel} 为可靠系数,取 0.8; U_{j0} 为发电机空载额定励磁电压; P 为发电机当前有功功率; P_t 为发电机的凸极功率。

$$P_t = \frac{U_s^2}{2} \times \frac{X_d - X_q}{(X_d + X_s + X_t)(X_q + X_s + X_t)} \quad (16)$$

由二滩水电站的参数和式(14)、(15)可计算出转子电压判据如下。

$$\begin{cases} U_f < 0.8 \\ U_f < p - 0.07 \end{cases} \quad (17)$$

从 PQ 功率圆推导过程可知,图 3 中 OA 和 DE 以同一比例正比于 U 和 E_0 。在派克标么值系统中 $U_f = E_0$ 机端额定电压 $U = 1$,空载额定励磁电压为 $U_{j0} = 1$,OA 也可以看作空载额定励磁电压 U_{j0} ,DB 可以看作是产生 E_0 的励磁电压 U_f 。将转子电压判据映射到 P-Q 坐标系的近似动作区如图 11 所示^[6],其中曲线 5 为定励磁低电压判据,曲线 6 为变励磁低电压判据,动作区位于曲线 5、曲线 6 左侧。

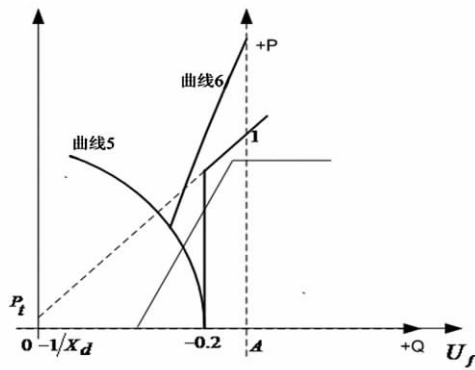


图11 转子电压判据映射到 P-Q 坐标系动作区

由图 11 可以看出,在重负荷下发生失磁故障时,水轮发电机进入转子变励磁电压判据曲线 6 的速度要比励磁低电压判据曲线 5 的速度快。转子电压判据通过式(1)可得到其在 R-X 坐标系的动作区如图 12 所示。

3.5 失磁保护逻辑图

二滩水电站失磁保护投 I 段和 II 段, I 段延时

1.5 s 报警, II 段延时 1.0 s 切机,其逻辑图如图 13 所示。

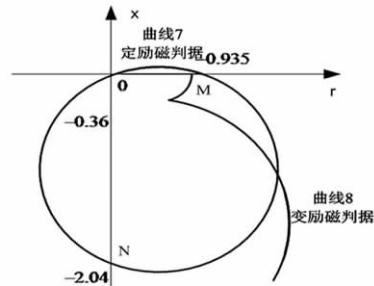


图12 转子电压判据映射到 R-X 坐标系动作区

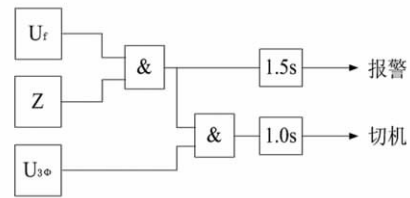


图13 失磁保护逻辑图

3.6 低励限制与失磁保护配合关系

通过失磁保护计算,已经将失磁保护中的三个判据转换到 R-X 坐标系和 P-Q 坐标系中。由逻辑图 13 可知 3 个判据为相与的关系,因此必须三个判据同时满足时失磁保护才会动作。在 R-X 坐标系的图 14 和 P-Q 坐标系的图 15 可以验证失磁保护与低励限制配合关系满足低励限制能优先于失磁保护动作,且存在一定的稳定裕度。

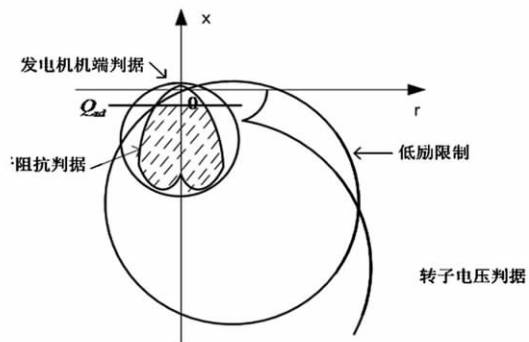


图14 R-X 坐标系低励限制与失磁保护配合关系

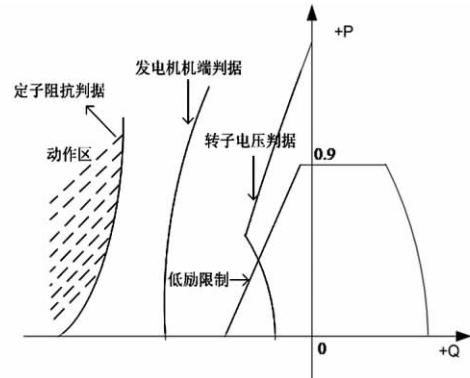


图15 P-Q 坐标系低励限制与失磁保护配合关系

4 结 语

介绍了二滩水电站 RCS - 985 发变组失磁保护配置方案,并对其采用相应判据的原因作了阐述。结合二滩水电站保护定值和实际运行参数将失磁保护不同坐标系内的判据分别映射到 R - X 坐标系和 P - Q 坐标系,验证了失磁保护与低励限制的配合关系符合国网公司《发电厂并网安全性评价》中低励限制优先于失磁保护动作的要求。

参考文献

[1] DL/T 587 - 2007,微机继电保护装置运行管理规程[S].

[2] 刘伟良,荀吉辉,薛玮. 发电机失磁保护与低励限制的整定配合[J]. 电力系统自动化,2008,32(18): 77 -

(上接第 42 页)

设计初,常闭母联开关运行时默认为闭合,如图 3 所示,备自投允许信号中,没有考虑常闭母联开关信息。由于常闭开关配置保护具备切除故障的能力,所以在实际运行中,存在常闭开关跳开的情况。如表 2 所示,在 3 M 带 3 M、4 M 带 4 M 的工况下,如果母联电缆发生故障,跳开常闭开关,3、4 M 均不失电,RS 触发器不闭锁备自投。这时再发生 3 M 或 4 M 失电,备自投合一备 G03K04,常闭开关 G04K03 已断开,一备 G03K04 在合位不会启动合二备的逻辑流程,造成母线失电。通过分析,在以上工况下,RS 触发器不能解决问题。

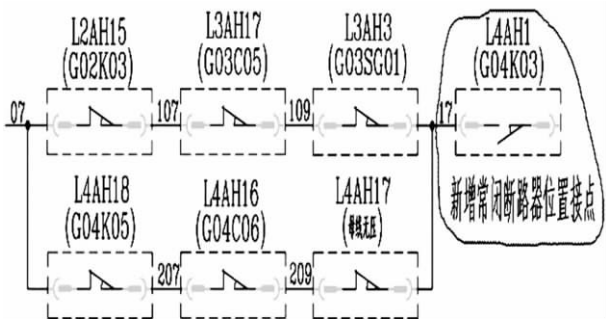


图 6 G03K04 合闸闭锁回路

无论是保护动作跳开常闭开关,还是其他原因跳开常闭开关,对不同的母线,应单独闭锁与常闭开

80.

[3] 殷建刚,彭丰,杨平,等. 发电机失磁保护中系统低电压判据的探讨[J]. 电力自动化设备,2003,23(12): 28 - 31.

[4] 赵华,吴春红. 两种坐标系下发电机低励限制整定与失磁保护配合[J]. 河南电力,2010(3): 12 - 14.

[5] DL/T 684 - 1999,大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].

[6] 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,2002: 186 - 262.

作者简介:

季 杰(1987),男,本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

黄建琼(1984),女,硕士,工程师,从事发电厂监控系统工作。

(收稿日期:2012 - 05 - 22)

关相连参与备自投的常开母联开关(一备或二备),而不是闭锁整个母线的备自投。要解决这个问题,必须引入常闭开关状态信息,在开入有限的情况下,在备自投逻辑里很难实现。经过研究,采用如图 6 所示的方案,即在常开开关硬接点合闸闭锁逻辑里,引入常闭开关位置接点。常闭开关跳开时,如果母线失电,闭锁常闭母联开关的合闸,常闭母联开关备投合闸失败,延时合其他备投电源使恢复母线供电。

4 结 语

水电站建设日新月异,厂用电接线方式日趋复杂,使备自投逻辑设计难度也相应增加。结合溪洛渡水电站的实际情况,通过对备自投设计过程中,备自投的开入、工作模式、闭锁和合闸闭锁等问题的探讨,解决了备自投设计的多个问题,对保障系统安全、稳定、可靠的运行具有重要意义,同时对于其他电站备自投装置的设计有一定的实际借鉴意义。

作者简介:

李光耀(1986),男,助理工程师,从事继电保护维护管理工作。

(收稿日期:2012 - 05 - 22)