

# 对 BMH-2 型母线差动保护误动原因的调查和分析

葛洲坝二江电厂 李毅军

**摘要** 本文分析了 BMH-2 型母线差动保护在葛洲坝二江电厂发生误动的原因,介绍了在调查过程中所使用的检查试验方法,提出了提高 BMH-2 型母差保护可靠性的几点措施。

## 1 情况简介

1990 年 11 月 16 日 11 时 07 分,葛洲坝二江电厂联接于 I 号母线的 220kV 出线葛旗线 B 相发生出口金属性接地短路,当出线开关(代号 G31)重合于故障上时,220kV 母线差动保护(BMH-2 型)发生误动,跳掉了当时在 220kV I 号母线上运行的 6 条 220kV 出线和 4 台发电机,造成一次大面积停电事故。事故前的二江电厂运行方式如图 1 所示,各开关所配的电流互感器(以下简称 CT)变比见图上所标。

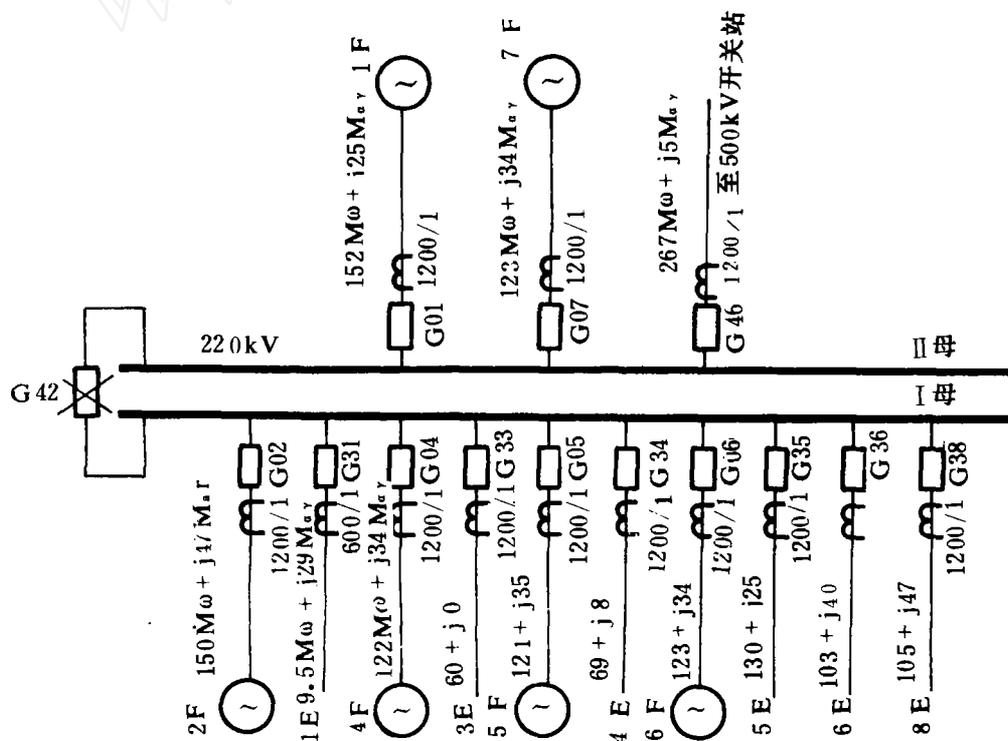


图 1 事故前的二江电厂运行状况

事故后我们会同华中电管局、中试所和生产厂家的设计人员对这套母差保护及其外围设备进行了反复细致的检查和模拟试验。通过这些检查工作我们大大地加深了对这套母差保护装置原理性能的认识,找出了引起保护误动的原因,并摸索出了一些提高这种母差保护可靠性的正确检修方法和整组试验方法。鉴于这种型号的母差保护在华中电网及其它电网中还有

使用，为此将我们此次的检查工作及对保护误动原因的分析总结如下，供电力同行们参考。

## 2 BMH-2 型母差保护原理概述

BMH-2 型母差保护为相位比较制动差电流母线保护。其原理是利用母线在发生内部故障与外部故障时各元件电流与差电流具有不同特征这一点，并以差电流的绝对值作为动作量，以各元件电流绝对值的最大值减去差电流的绝对值作为制动量构成综合制动方式，并经相位比较动作于出口。

设在一条母线上有  $n$  个连接元件， $i_1^{(1)} \dots i_1^{(n)}$  为各元件一次电流， $n_1^{(1)}$ 、 $n_1^{(2)} \dots n_1^{(n)}$  为各元件 CT 变比， $n_2^{(1)}$ 、 $n_2^{(2)} \dots n_2^{(n)}$  为各连接元件对应的装置内变流器变比，则保护内差电流为：

$$i_c = [i_1^{(1)}/n_1^{(1)}n_2^{(1)} + i_1^{(2)}/n_1^{(2)}n_2^{(2)} + \dots + i_1^{(n)}/n_1^{(n)}n_2^{(n)}]/n_c \quad (1)$$

参与制动回路的各元件电流为：

$$i_z^{(m)} = [i_1^{(m)}/n_1^{(m)}n_2^{(m)}]_{m=1,2,\dots,n} \quad (2)$$

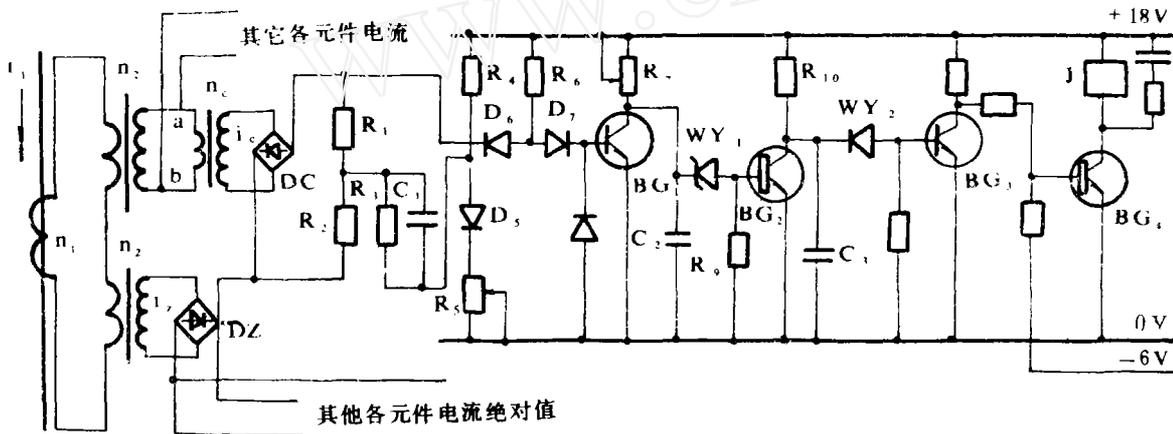


图 2 BMH-2 型母线保护的一相原理示意图

根据该型保护的原理接线示意图（见图 2）可见，保护的工作电压是经变换后的差电流在  $R_1$  上所得之电压，而制动电压则是由经变换后的各元件电流经整流后取最大值与差电流在  $R_2$  上的压降之差的正值，当工作电压与制动电压之差大于保护的动作用值  $U_{ad}$  时，执行元件第一级 BG1 翻转。由此可归纳出这种保护的动作用方程式为：

$$|i_c|R_1 - \{[|i_2^{(1)}| \times |i_2^{(2)}| \dots |i_2^{(n)}|]_{\max}(R_2 + R_3) - |i_c|R_2\}_+ \geq U_{ad} \quad (3)$$

(3) 式中“+”号表示大括号内只取正值，如为负值时则取为零，这表征在母线内部故障时由于差电流远远大于各元件电流，差电流整流桥 DC 输出量在  $R_2$  上的压降将各元件电流制动整流桥 DZ 反向封住，制动电流的输出为零，则在  $R_3$  上的制动电流也为零，即在母线内部故障时保护的制动量为零。实际上在母线内部故障时差电流与各元件电流并不完全同相，故在每个差电流的半个周期中制动量并不完全为零，而在母线外部故障且短路支路电流互感器发生饱和的情况下，保护内动作量与制动量交替出现，会在保护内产生较大的差流。为防止这两种情况下母差保护发生误动，在保护的执行回路中设置了一个积分型充电延时电路作为差电流的相位判别回路，该积分时间整定在 6 毫秒左右，相当于要求差电流波形出现的角度大于  $108^\circ$  左右保护装置才能动作，籍此以防止 CT 饱和而引起的误动作。

### 3 对事故资料的分析

故障时事件记录装置打印的有关事故记录如下：

11:07:18:785.5 母差复合电压元件动作

11:07:18:788.9 葛旗线保护动作

11:07:18:792.7 母差起动元件动作

11:07:19:796.0 母差 I 选择元件动作

11:07:19:796.7 I 母母差保护动作

从事件记录可以看出,在第一次故障时母差保护的起动元件和复合电压闭锁元件动作,但选择元件没动,因而母差保护没有动作出口。当经过 1 秒左右 G31 开关重合于故障上时母差保护的起动元件、选择元件和复合电压继电器均动作,母差保护动作出口。

微机故障录波装置打印的事故电流录波图如图 3 所示。

由故障录波图可以看出以下几点：

(1) 故障电流达 15kA (录波装置的测量打印值)。

(2) 故障波形中有较明显的非周期分量,且故障波形在幅值和相位上都发生了畸变。

(3) 由故障电压的波形图(略)可以看出故障初始角  $\alpha$  约为  $65^\circ$  左右。

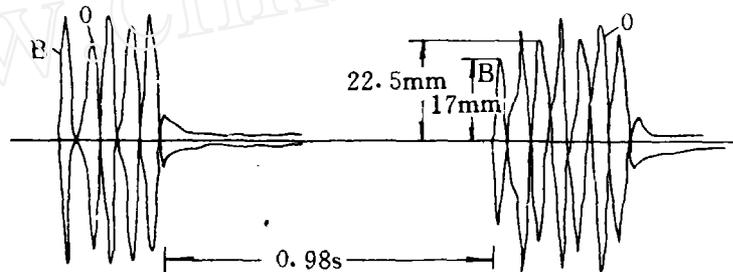


图 3 故障电流录波图

(4) 第一次故障切除时间为 55 毫秒,重合闸时间为 0.98 秒,第二次故障切除时间为 75 毫秒。

(5) 此次故障为葛旗线 B 相出口金属性短路故障,因而若 CT 未发生暂态饱和时其故障电流波形的幅值应是基本相同的,即使由于衰减非周期分量的影响其波形也应是先高后低,但由 G31 开关重合于故障后的波形可见该波形却是先低后高。可以这样推断:在第一次故障时很大的故障电流使 G31B 相 CT 具有较大的剩磁,开关重合于永久性故障后剩磁与短路电流的共同作用使 CT 暂态饱和更加严重,至使一次电流不能被线性地传递到二次侧,由重合于故障后的波形可见,第一个半波的幅值与相邻半波的幅值相差达  $[(22.5-17)/22.5]\% = 24.4\%$

### 4 检查项目及方法

我们在事故后按下面的检查项目对保护进行了检查：

(1) 利用母差保护巡检装置对母差保护进行巡检,保护装置正常。

(2) 在 1.2 倍整定值下由任两个连接元件的电流变换元件同极性加入电流或只一个电流变换元件加入电流模拟区内故障,保护装置可靠动作。

(3) 在 5 倍整定值下由任两个连接元件的电流变换器反极性加入电流模拟区外故障,保护装置不动作。

(4) 对有关二次回路的绝缘进行检查,绝缘正常,对地绝缘电阻值在  $40M\Omega$  以上。

(5) 对保护装置进行动作值检查,选择 I 元件、选择 II 元件和起动元件的动作值基本与整

定值相符。按照厂家装置说明书的测试方法测试选择 I、选择 II 和起动元件的比相积分时间在厂家要求的 6~6.5ms 的范围内。装置的逻辑回路正常，无元件损坏的情况。

(6) 对 G31 电流互感器进行了伏安特性试验、二次阻抗测定和负载阻抗测定，并作出了 G31CT 各相母差保护用绕组的 10% 误差曲线，CT 的各项性能均符合出厂指标。

(7) 短路故障模拟。做这项模拟试验时，按照故障当时的二江电厂一次系统接线（如图 1 示）将 3E、4E、5E、6E、8E、2F、4F、5F、6F 的电流变换元件同极性并联起来，正极性加入模拟电流  $I_1$ ，而从 1E 的电流变换元件反向加入模拟电流  $I_2$ 。由于 G31CT 变比为 600/1，而其它所有元件的 CT 变比均为 1200/1，故  $I_1$  与  $I_2$  的数值关系为  $I_2 = 2I_1$ 。试验接线如图 4 所示。

当  $I_2 = 25A$ ，冲击合上 K 时，保护发生误动。

(8) 保护装置的制动系数测试

对于 BMH 型母线差动保护，厂家没有提供制动系数的具体指标，为了掌握这种类型的母差保护在区外故障时的制动能力，我们此次采取了两种方法测试其制动系数。

方法 1，将提供制动电流的电流变换元件的差电流变流

器的二次绕组短接（使该电流变换元件仅提供制动电流），再从任一电流变换元件通入动作电流，将保护执行元件刚开始动作时的电流值除以先加的制动电流值即为制动系数。测得起动元件、选择 I 元件和选择 II 元件的制动系数均在 0.4 左右。

方法 2，为了验证用方法 1 所测得的制动系数是否准确，我们按照保护装置设计者的要求用下面的方法复测了制动系数。试验接线如图 5 示。

测试时先合上 K 和  $K_1$  将制动电流  $I_1$  升至预定值，由于此时为一个元件加电流，相当于区内故障，因此当  $I_1$  大于保护的整定值时保护会动作，然后合上  $K_2$  加大  $I_2$  值使保护返回，再缓慢减小  $I_2$  值，并记录下使保护刚好动作时的  $I_2$  值， $I_2$  与  $I_1$  的比值即为制动系数。用此方法测得的制动系数与方法 1 测得的值基本相同。可见这种母差保护的制动系数的确为 0.4 左右。

(9) BMH-2 型母差保护抗 CT 饱和能力测试

从录波图可以看出，故障波形发生了较严重的畸变，这说明在短路的暂态过程中 G31B 相 CT 由于非周期分量和 CT 剩磁的影响发生了较严重的暂态饱和。可以推断这是造成母差保护误动的主要原因。为了证实这一推断，我们又测试了母差保护的抗 CT 饱和能力。模拟试验接线如图 6 所示。

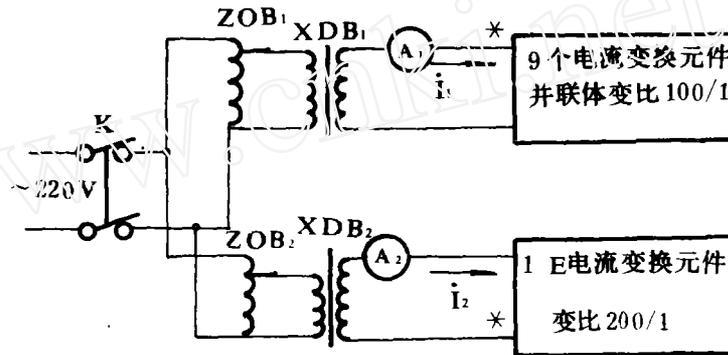


图 4 短路故障模拟试验接线

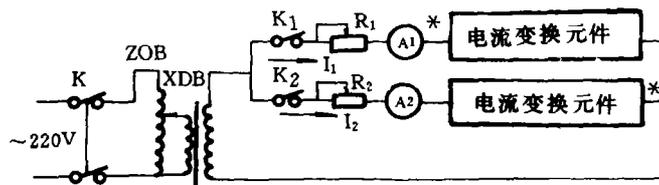
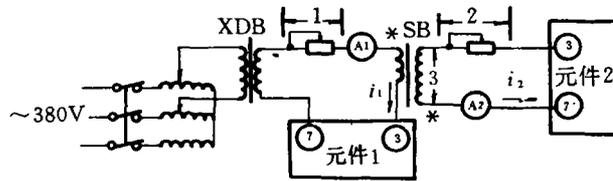


图 5 测母差保护制动系数的试验接线

图 6 中 SB 为一变流比 2 : 1 的变流器, 元件 1 为 G31 开关用电流变换元件, 其内部的变流器变比为 200 : 1, 元件 2 为事故时所有提供短路电流的电流变换元件 (9 个) 的同极性并联体, 其内部变流器的变



比均为 100 : 1。在模拟外部故障时若试验电流互感器不饱和, 则在理论上母差保护内的差流为  $i_1 \times 1/200 - i_2 \times 1/100 = 0$ , 但实际由于各电流变换元件的变流器特性不一致, 会在母差保护内部产生一定的差流 (不平衡电流)。我们在加入电流进行模拟试验的同时用光线示波器录制了图 6 中的 1、2、3 处和图 2 中 a、b 两点间的波形, 现提供部分波形如图 7 示。

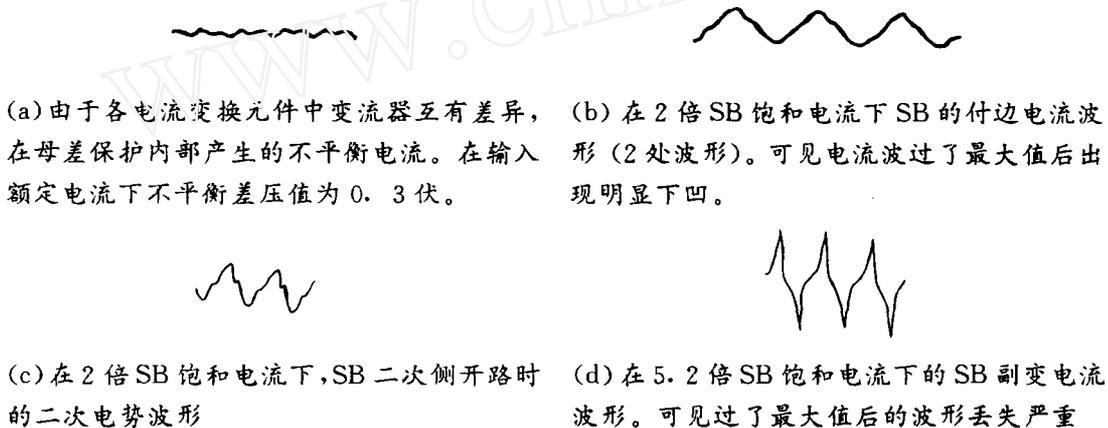


图 7 测量保护抗 CT 饱和能力试验时录得的有关波形

试验时实测 SB 的起始饱和电流为 3.5A, 在起动元件、选择 I 元件和选择 II 元件的各相比相积分时间为 6~6.5ms 及保护整定值为 1.4A 的状况下用图 6 示的试验接线模拟区外故障, 当 SB 原边电流  $i_1$  (为标准正弦波) 值等于 18.2A 时母差保护发生误动。保护发生误动时的元件 2 输入电流波形如图 7 (d) 所示。这说明 BMH-2 型母差保护的比相积分时间整定在 6~6.5ms 时基本上可以抵御小于 5.2 倍 (18.2/3.5) 的 CT 饱和电流下的稳态外部故障。根据保护设计者介绍, 这种原理的母差保护在 5 倍稳态 CT 饱和电流下不会误动, 但在外部短路的暂态过程中保护的抗 CT 饱和能力会有较大的下降, 具体为多少没有实测过。

### 5 对 G31CT 暂态过程的分析

通过对事故资料的分析 and 现场模拟试验可以断定造成 1990 年 11 月 16 日区外故障时母差保护误动的原因是 G31B 相 CT 在短路故障时的暂态饱和, 下面就此作进一步的定量分析:

根据有关资料, 在短路故障的暂态过程中考虑非周期分量的影响时, CT 的暂态电流倍数  $K_c$  可用下式计算:

$$K_c = K_r (K_z + K_{fz})_n \quad (4)$$

式中  $K_r$  称剩磁系数。若以  $B_s$  表 CT 的饱和磁密,  $B_r$  表剩磁磁密, 则  $K_r = B_s / (B_s - B_r)$ 。对于闭路铁芯的 CT 一般剩磁磁密可达饱和磁密的 (50~70)% , 则  $K_r = 1 / [1 - 0.5 \sim 0.$

7)] = 2~3。

$K_z$  称周期性暂态磁密系数，其计算式为：

$$K_z = -\sin(\omega t + \alpha + \delta + \psi) \quad (5)$$

$K_z$  的变化范围为 ±1，在计算暂态饱和电流倍数时一般取其幅值，即  $K_{zm}=1$ 。

$n$  称一次电流倍数，可用换算到二次侧的周期分量电流有效值  $I_{1z}$  与二次电流有效值  $I_{2c}$  的比值来计算，即  $n=I_{1z}/I_{2c}$ 。在此次故障中  $I_{1z} = (15240/\sqrt{2})/600=17.96A$ ， $I_{2c}=1A$ ，则  $n=17.96$ 。

$K_{fz}$  称为非周期暂态磁密系数，其计算式为：

$$K_{fz} = \omega T_1 T_\mu \cos\alpha (e^{-t/T} - e^{-t/T_1}) / (T - T_1) \quad (6)$$

式中  $T_1$  称为一次系统的时间常数，根据此次故障时的一次系统情况可取  $T_1=0.2$  秒。 $T_\mu$  为与 CT 励磁支路有关的时间常数。对于 220kV 闭路铁芯的 CT，一般  $T_\mu=2$  秒。 $\alpha$  为短路电压的初相角，由故障电压的录波图看出此次故障中  $\alpha$  为  $65^\circ$  左右。 $T$  称 CT 的时间常数， $T=T_1+T_2$ ， $T_2=L_2/R_2$  为 CT 二次回路的时间常数。根据对 G31B 相 CT 的测量计算结果， $T_2=0.0045$ 。

为了真实地考虑非周期分量对母差保护的影响，在此只计算母差保护出口前的  $K_{fz}$  值。根据实测该保护的出口时间在 30ms 以下，计算时取  $t=30ms$ 。

将上面数据代入式 (6) 求得：

$$K_{fz} = 314 \times 0.2 \times 2.0045 \cos 65^\circ (e^{-0.03/2.0045} - e^{-0.03/0.2}) / (2.0045 - 0.2) = 3.69$$

以  $K_r=2$ 、 $K_z=1$ 、 $K_{fz}=3.69$ 、 $n=17.96$  代入 (4) 式，求得故障时 G31B 相 CT 在故障发生 30ms 时的暂态电流倍数为：

$$K_c = 2(1 + 3.69) \times 17.96 = 168.5$$

在短路故障的暂态过程中，如要求 CT 的比误差不超过规定值，就必须使其饱和电流倍数  $n_s \geq K_c$ 。而 G31CT 的 10% 误差倍数为 40 倍，显然根据计算结果  $K_c=4.2n_s$ ，说明在 11 月 16 日的故障暂态过程中的 G31B 相 CT 会发生较严重的饱和。

由于母差保护是在 G31 开关重合于故障后发生误动的，这表明在重合于故障时 G31B 相 CT 的暂态电流倍数已超过 BMH-2 型母差保护的抗 CT 饱和电流倍数，即此时的  $K_c$  已在 5 倍以上。因此有必要进一步讨论在这种 CT 的两次励磁暂态过程中  $K_c$  的变化情况。

两次励磁时 CT 暂态磁密系数  $K=K_{zm}+K_{fz}$  的说明图如图 8 所示。由图 8 可以看出：短路故障发生后经时间  $t_1$  切除 ( $t_1$  包括保护装置和断路器动作时间及熄弧时间。由录波图看出此次故障中  $t_1=55ms$ )，故障被切除的瞬间暂态磁密系数  $K$  上升到 A 点，利用式 (6) 等可求得 A 点的暂态磁密系数为：

$$K_{(t-55ms)} = K_{fz(55ms)} + 1 = 7.92$$

A 点之后暂态磁密系数  $K$  从  $K(t_1)$  开始以时间常数  $T$  衰减，经重合闸时间  $t_s$  后又重合在故障上，则  $K$  从 B 点又开始上升，在保护动作时间内  $K$  上升到 C 点，则 C 点的暂态磁密系数为：

$$K = K(t_1)e^{-(t_s+t_d) \cdot T} + K(td) \quad (7)$$

以  $t_1=55ms$ 、 $t_s=0.98s$ 、 $t_d=30ms$  代入 (7) 式求得  $K=9.1$ ，则此时 G31B 相 CT 的暂态电流倍数为：

$$K_c = 2 \times 9.1 \times 17.96 = 326.87$$

该值为 10% 误差倍数的 8.17 倍, 已超过母差保护的抗 CT 饱和能力, 因此母差保护将发生误动。

CT 严重饱和的结果是一次电流不能准确地传变到二次侧, 致使二次电流发生缺损畸变, 如图 9 所示。图 9 中的阴影部分即为 CT 饱和所造成的。当其它非故障元件的二次电流与故障元件的这种二次电流波形相减后在外部故障的情况下将会在母差保护内形成差流 (即图中阴影部分), 只要该差流波出现的时间大于母差保护的比相积分时间, 且幅值大于保护的整定动作值, 就会使母差保护发生误动。根据前面对录波资料的分析故障二次电流波的幅值之差达 24.4%, 其相应的电流有效值为  $17.96 \times 24.4\% = 4.38\text{A}$ 。考虑到母差保护具有 0.4 的制动系数, 则使保护动作的电流为  $4.38 \times 0.4 = 1.75\text{A}$ , 该值大于保护的整定动作值, 满足了使保护动作的幅值条件。

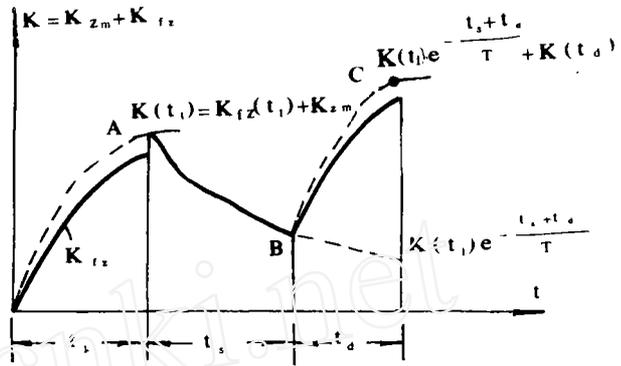


图 8 两次励磁时 CT 暂态磁密系数说明图

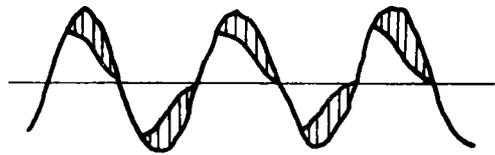


图 9 CT 严重饱和使二次电流出现缺损

## 6 改进措施

6.1 将 G31CT 的变比由 600/1 改为 1200/1, 并

将母差保护内 G31 电流变换元件的变比相应地由 200/1 改为 100/1。这是一项提高母差保护可靠性的极为有效的措施, 主要表现在以下两点:

(1) 提高了 G31CT 的抗饱和能力。由于更改变比后在相同的一次电流下二次电流值减小一半, 由式 (4) 可以看出在发生故障时流经故障元件所在 CT 的暂态电流倍数将减小一半。根据计算结果, 在 11 月 16 日的故障中若 G31CT 变比为 1200/1, 则暂态电流倍数最大也仅为 4.07, 不会超过母差保护的抗 CT 饱和倍数, 保护不会误动。

(2) 由于母差保护所用全部 CT 和保护内变流器的变比均实现了一致, 减小了因变比不一致而造成的不平衡电流。

6.2 将母差保护的比相积分时间适当延长, 由 6~6.5ms 改为 6.5~7ms。经过实测, 在保护的比相积分时间为 7ms 时 BMH-2 型母差保护的抗 CT 饱和电流倍数由 5.2 上升至 6.3。由于在发生区内故障时差电流半波出现的时间为 10ms, 因此在区内故障时仍可保证有足够的比相成功裕度。

6.3 提高母差保护的整定值。鉴于二江电厂的运行方式和提供短路电流的能力较前几年有较大的差异, 因而网局调度将二江电厂母差保护的定值由 1.4A 改为 2.2A, 定值更改后的保护灵敏度为 2。

6.4 停用 G31 开关的重合闸。葛旗线是一条故障发生率很高的 220kV 线路, 自 1988 年投运以来已发生了近三十次故障, 其中绝大部分为永久性故障。为了避免 G31 开关重合于永久性故障时恶化 CT 的工作条件及对电器设备的冲击, 因而 G31 开关不采用重合闸方式。

上述措施的采用大大提高了二江电厂母差保护的抵御区外大电流短路故障的能力。改进后重新模拟事故时的一次接线, 当加入模拟区外故障电流为 CT 二次额定电流的 25~30 倍

时,保护装置可靠不动,模拟区内故障可靠动作。经过一年多运行时间和七次区外故障的考验保护未发生误动。

## 7 提高 BMH-2 型母差保护运行可靠性的几点注意事项

根据我们的运行经验及此次事故检查的体会,我们认为在日常的检修维护中对下面事项予以足够的注意是很有必要的:

(1) 母差保护的比相积分时间一定要整定准确。设置比相积分时间是 BMH-2 型母差保护防止 CT 饱和使保护误动的最主要措施。厂家的技术要求是整定该时间为 6~6.5ms,若实际整定时间小于 6ms,则当区外故障 CT 发生饱和时易造成保护误动。厂家提供的测试方法是使用一个双刀扭子开关,一副触点去短接 BG1 的基极和发射极(参见图 2),另一副触点去起动手秒表。由于扭子开关的两副触点间的动作时间有差异,根据实测不同时期时间达 2ms,因而使积分时间的测试结果与整定值之间也会造成±2ms 的误差。在抢先起表的情况下保护内的比相积分时间实际只整定为 4ms 左右,这使在区外故障时 CT 的一般性饱和保护也难以抵御。因此,为较准确地整定该积分时间,要求起表和翻转 BG1 的两副触点动作时间基本一致。为此我们采用了具有两副开触点的 JGA-5A 型快速干簧继电器来取代扭子开关进行测试。根据实测这种干簧继电器两付开触点之间的不同时期时间在 0.2ms 以下,这样就可保证比相积分时间的整定误差不超过 0.2ms。

(2) 定期使用母差保护所配的巡检装置对运行中的保护进行巡检,及时发现保护内元件损坏情况及其它异常情况。此外还要经常用高内阻电压表测量母差保护的差压和制动电压值,当母差保护处于正常运行状态时其 A、B、C、0 各相的差压值应在 20 毫伏以下,且四相的值应基本对称。若出现差压值明显增大或四相不平衡的情况应立即查找原因消除隐患。在运行中出现差压值异常增大的大多数原因是由于保护内的切换继电器线圈发生断线,因为保护内的切换继电器为 DZ-100 型直流中间,线圈的匝数多线径细,在长期通电的情况下容易烧断。

(3) 注意保持电流回路的可靠性。BMH-2 型母差保护有为数不少的中间变流器,其中任一个绕组断线或引线压接不良都可能造成保护的不正确动作,因此在每次定检时都应检查每个变流器的完好性并紧固所有的螺丝。当在母差保护的 CT 二次回路上进行过工作时,应在工作后测试该二次回路的六角图,检查引入电流的极性是否正确。

(4) 对提供制动电压的整流桥的二极管应定期检查其好坏(这靠巡检装置是不能检测出来的),以防其中的一个二极管击穿损坏后短接最大制动电压的输出,当发生区外故障时母差保护因失去制动电压而误动。

## 后记

此次检查工作和事故分析得到了华中电管局调度局副局长李发棣同志、许昌继电器厂高工陈爱钦同志的指导帮助,参加检查工作的还有华中电管局的于谦、陈学道等同志,在此深表谢意。

## 参考文献

- 1 王维俭、侯炳蘊.大型机组继电保护理论基础.水力电力出版社
- 2 BMH-2 型母差保护说明书.许昌继电器厂