

交直流不对称双电桥微机型发电机转子 一点、两点接地保护新原理的研究

宋聚忠 黄生春

姚晴林

林 韩

许昌继电器研究所 (461000) 合肥工业大学 (230009) 福建电力试验研究所 (350003)

摘要 本文详细论述了利用交直流两种电桥电压及其变化量由微机来实现的发电机转子一点、两点接地保护的新方案,电桥之一是由励磁直流电压和电阻等构成的直流电桥,另一是由外加交流电压、隔直谐振电路和电阻等构成的交流电桥。经过分析,这两种电桥电压是转子一点接地电阻和接地点位置的函数,而这两种电桥电压的变化量又都是转子两点接地电阻和转子绕组短路匝数百分比的函数,通过求解两个二元方程组,可将转子一点接地电阻和接地点位置及转子两点接地时的绕组短路匝数的百分比直接求出。方案在实现时,先判断一点接地,一旦发生一点接地,就立即进行两点接地的判断。该方案计算准确、可靠,可瞬时动作于出口或发信号,一点接地保护的判断和计算不受励磁直流电压波动的影响;两点接地保护的判断和计算不受励磁电压波动的影响。本保护方案外围电路结构简单,实现方便。

关键词 转子接地 不对称 双电桥

概述

对于大型发电机来说,当转子发生一点接地故障时,对发电机还没有造成直接的危害,可以继续运行一段时间,但当发展成两点接地时,很可能把励磁绕组烧伤、损坏,同时由于励磁的不平衡,会造成机身剧烈振动,会导致严重后果,再者,由于励磁的降低,对系统也将造成不良影响;故对大中型火电发电机一般都要装设转子一点、两点接地保护。当前国内外的发电机转子一点接地保护都不很理想,而转子两点接地保护方案更不完善,这一直困扰着继电保护界,给电力部门安全运行留下隐患。为此笔者研究出一种利用相互消除死区的交直流双电桥来实现的微机保护方案。

1 两种电桥电压的计算

1.1 直流电桥的构成如图1所示,该电桥电压直接取自转子两端的励磁电压, $R_1 \sim R_7$ 均取相同的值,设为 R_0 。 R_1 和 R_4 用于分压和限流, R_2 、 R_3 、 R_5 和 R_7 构成电桥的四个臂, R_6 为电桥电阻,其一端接地,电桥电压 U_6 就取自 R_6 两端;正常情况下,电桥平衡, $U_6 = 0$, U_L 为励磁电压。

当转子发生一点接地时,设接地电阻为 R_j ,接地点把励磁绕组总匝数分成 α 和 $(1 - \alpha)$ 两部分, $0 \leq \alpha \leq 1$,其等效电路如图2所示(忽略了励磁绕组本身的电阻),这时电桥不再平衡,故 $U_6' \neq 0$ 。根据叠加原理,图2可分解成图3a和图3b所示的两部分。由此可见:

$$U_6' = U_{61}' + U_{62}' \quad (1)$$

为了求出 U_6' ,可把 U_{61}' 和 U_{62}' 分别求出,下面先计算 U_{61}' 。

收稿日期:1995-10-11

《继电器》1996年第1期 7

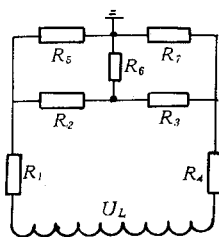


图 1

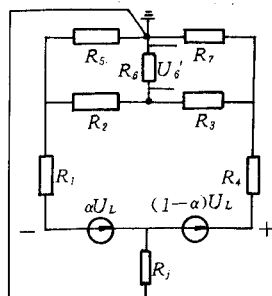
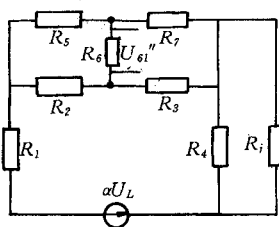
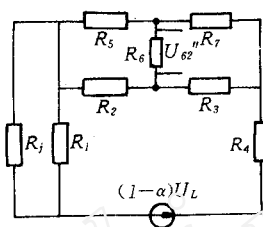


图 2



(a)



(b)

图 3

把图 3a 的部分电路进行 Y-△ 变换,变换后的电路如图 4 所示。

$$\text{其中 } R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_5} = R_0 + R_0 + R_0 = 3R_0 \quad (2)$$

$$\text{同理 } R_{25} = R_{51} = R_{12} = 3R_0 \quad (3)$$

$$\text{用同样的方法可以计算出: } R_{47} = R_{73} = R_{34} = 3R_0 \quad (4)$$

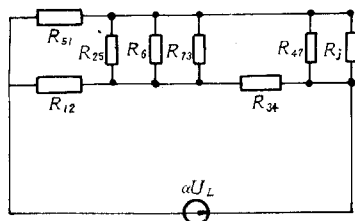


图 4

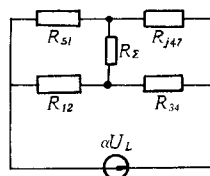


图 5

将 R_{25} 、 R_6 及 R_{73} 合并成 R_Σ , 则:

$$R_\Sigma = \frac{R_{25} R_6 R_{73}}{R_{25} R_6 + R_6 R_{73} + R_{73} R_{25}} = \frac{3 \times 1 \times 3}{3 + 3 + 9} R_0 = \frac{3}{5} R_0 \quad (5)$$

设 $R_j = KR_0$, K 为无量纲的正实数, 把 R_{47} 、 R_j 合并成 R_{j47} , 则:

$$R_{j47} = \frac{R_{47} R_j}{R_{47} + R_j} = \frac{3K}{3 + K} R_0 \quad (6)$$

这样图 4 就变成图 5, 可以看出, R_Σ 两端的电压即为 U_{61}' , 把图 5 继续化成图 6, 不难求出:

$$R_{51 \cdot 12} = \frac{R_{12} R_{51}}{R_{12} + R_{\Sigma} + R_{51}} = \frac{3 \times 3}{3 + \frac{3}{5} + 3} = \frac{15}{11} R_0 \quad (7)$$

$$R_{\Sigma 12} = R_{\Sigma 51} = \frac{3}{11} R_0 \quad (8)$$

A、B 两点间的电压即为 U_{61}'

$$\text{由图 6 得: } R_{j47} + R_{\Sigma 51} = \frac{3K}{3+K} R_0 + \frac{3}{11} R_0 = \frac{36K+9}{11(3+K)} R_0 \quad (9)$$

$$R_{\Sigma 12} + R_{34} = \frac{3}{11} R_0 + 3R_0 = \frac{36}{11} R_0 \quad (10)$$

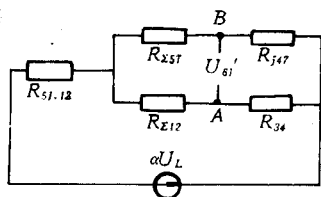


图 6

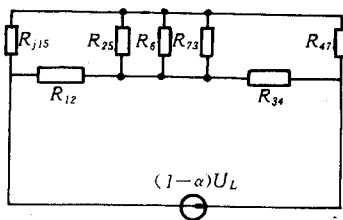


图 7

把上述两和电阻并联得:

$$R_{\#} = \frac{36(36K+9)}{11(72K+117)} R_0 \quad (11)$$

这样就很容易求出 $R_{\#}$ 两端的电压 $U_{\#}$:

$$U_{\#} = \frac{R_{\#} aU_L}{R_{51 \cdot 12} + R_{\#}} = \frac{36(36K+9)aU_L}{36(36K+9) + 15(72K+117)} \quad (12)$$

$$\text{由此得: } U_{\Sigma 12} = \frac{R_{\Sigma 12} \cdot U_{\#}}{R_{\Sigma 12} + R_{34}} = \frac{U_{\#}}{12} = \frac{3(36K+9)aU_L}{36(36K+9) + 15(72K+117)} \quad (13)$$

$$U_{\Sigma 51} = \frac{R_{\Sigma 51} U_{\#}}{R_{\Sigma 51} + R_{j47}} = \frac{3K+9}{36K+9} U_{\#} = \frac{36(3K+9)aU_L}{36(36K+9) + 15(72K+117)} \quad (14)$$

$$\text{故有 } U_{61}' = U_{\Sigma 12} - U_{\Sigma 51} = \frac{-11aU_L}{12(4K+1) + 5(8K+13)}$$

为了求解 U_{62}' , 可把图 3b 依次化简成图 7、8、9。

很明显, 图 9 和图 6 结构完全一样, 不难得出:

$$U_{12} = \frac{R_{12} U_{\#}}{R_{12} + R_{\Sigma 34}} = \frac{3U_{\#}}{\frac{36}{11}} = \frac{33(36+9)(1-\alpha)U_L}{36(36K+9) + 15(72K+117)} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} U_{j15} &= \frac{R_{j15} U_{\#}}{R_{j15} + R_{\Sigma 47}} = \frac{\frac{3K}{3+K} U_{\#}}{\frac{36K+9}{11(3+K)}} = \frac{33K}{36K+9} U_{\#} \\ &= \frac{36 \cdot 33K(1-\alpha)U_L}{36(36K+9) + 15(72K+117)} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{故有: } U_{62}' &= U_{12} - U_{j15} = \frac{297(1-\alpha)U_L}{36(36K+9) + 15(72K+117)} \\ &= \frac{11(1-\alpha)U_L}{12(4K+1) + 5(8K+13)} \end{aligned} \quad (18)$$

由 15、18 两式得:

$$U_6' = U_{61}' + U_{62}' = \frac{11(1-2\alpha)U_L}{12(4K+1) + 5(8K+13)} = \frac{(1-\alpha)U_L}{8K+7} - \frac{\alpha U_L}{8K+7} \quad (19)$$

可见,当 $\alpha = 0.5$ 时, $U_6' = 0$,也即,当转子绕组中点发生一点接地时,直流电桥仍平衡,不反应,是死区。

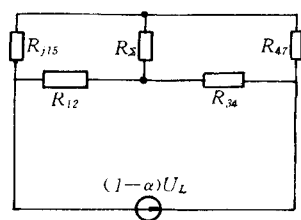


图 8

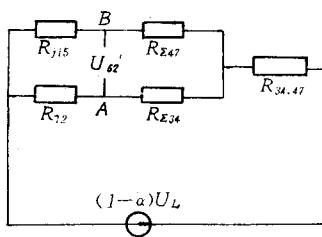


图 9

1.2 交流电桥电压的计算

电桥结构如图 10 所示,分压电阻 R_1 和 R_4 可不相等,电桥两侧的电阻 R_2 、 R_5 和 R_3 、 R_7 也不相等,这里取 $R_1 = R_2 = R_5 = 3R_0$, $R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = R_0$ (同直流电桥一样),也即在正常情况下,电桥平衡,但两侧阻值不对称。

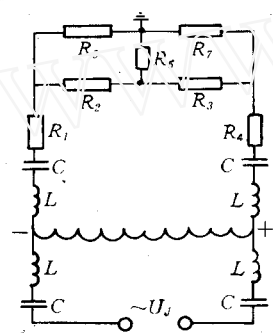


图 10

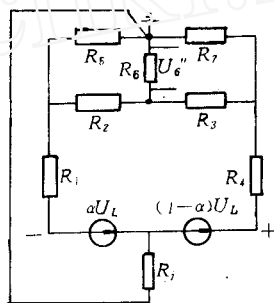


图 11

L、C 构成隔直谐振电路,其谐振频率与在励磁绕组上并联的交流电压 U_J 频率一致。和直流电桥的分析类似,当发电机转子一点接地时,其等效电路如图 11 所示,根据叠加原理,图 11 可分解成图 12a、b 两部分,设电桥电压为 U_6'' ,则

$$U_6'' = U_{61}'' + U_{62}'' \quad (20)$$

按照求直流电桥电压 U_6' 类似的方法可求出 U_{61}'' 和 U_{62}'' :

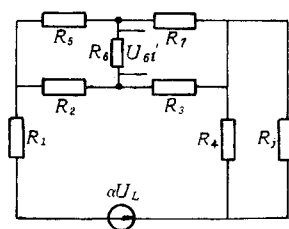
$$U_{61}'' = \frac{-87\alpha U_J}{1160K + 1479} \quad (21)$$

$$U_{62}'' = \frac{261(1-\alpha)U_J}{1160K + 1479} \quad (22)$$

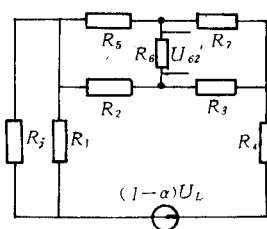
则 $U_6'' = U_{61}'' + U_{62}''$

$$= \frac{261(1-\alpha)}{1160K + 1479}U_J - \frac{87\alpha}{1160K + 1479}U_J = \frac{87(3-4\alpha)}{1160K + 1479}U_J \quad (23)$$

可见,当 $\alpha = 0.75$ 时, $U_6'' = 0$,也即在 $\alpha = 0.75$ 处,转子绕组发生一点接地时,交流电桥仍平衡,不反应,为死区。



(a)



(b)

图 12

2 转子一点接地保护方案的提出

在这种新原理的微机保护中, U_L 、 U_J 、 U_6' 、 U_6'' 值可实时地测量, 作为已知数, 而 K 、 α 为未知数; 将 U_L 、 U_J 、 U_6' 、 U_6'' 值代入到 19 式和 23 式所组成的二元一次联立方程组中, 由微机能实时地计算出 K 和 α 值, 即能实时地计算出转子一点接地的接地电阻值和接地点的位置, 这是本文所研究的新型转子一点接地保护的基本原理。

由 19 式可得:

$$\alpha = \frac{11U_L - 12(4K + 1)U_6' - 5(8K + 13)U_6''}{22U_L} = \frac{U_L - (8K + 7)U_6'}{2U_L} \quad (24)$$

代入 23 式并化简, 可直接得出:

$$K = \frac{87U_JU_L + 1218U_6'U_J - 1479U_6''U_L}{1160U_LU_6'' - 1392U_JU_6'} \quad (25)$$

把 25 式代入 24 式, 就可直接求出 α :

$$\alpha = \frac{145U_LU_6'' - 2618U_6'U_J + 4649U_6''U_6'}{290U_LU_6'' - 348U_JU_6'} \quad (26)$$

至此, 当发电机转子一点接地时, 能立即求出接地点的相对位置和接地电阻的大小。在微机保护中, 设置 K 的整定值, 称为 K_{zd} , K_{zd} 值由用户选定, 一旦实际的 $K \leq K_{zd}$, 转子一点接地保护动作, 延时发信号或作用于跳闸。

3 转子两点接地保护方案的提出

一般情况下, 转子两点接地都是在转子一点接地的基础上演变而来的, 这样一旦发生一点接地, 就可立即对两点接地进行检测。

发生一点接地后, 两电桥不再平衡 (设 $\alpha \neq 0.5$ 或 $\alpha \neq 0.75$), 即 $U_6' \neq 0$ 或 $U_6'' \neq 0$, 对于给定的 K 值, U_6' 与 α 的关系及 U_6'' 与 α 的关系都是线性的, 分别如图 13 中的直流 1 和直流 2 所示。由此可见:

当 $\alpha > 0.5$ 时, $U_6' < 0$

$\alpha < 0.5$ 时, $U_6' > 0$

$\alpha > 0.75$ 时, $U_6'' < 0$

$\alpha < 0.75$ 时, $U_6'' > 0$

当转子发生两点接地时, 根据第二个接地点位置的不同, 又分两种情况, 假设两接地点之间的短路匝数百分比为 β , 为分析方便, 设两点分别通过 RJ_1 及 RJ_2 接地而短路, 如图 14 所示,

可等效成图 15 所示,图 15 中, $RJ = RJ_1 + RJ_2$,为进一步分析方便,这里先假设 $RJ = 0$,即两点金属性短路,这时励磁绕组上各部分的压降将重新分布,故 U_{61}' 、 U_{62}' 、 U_{61}'' 、 U_{62}'' 的大小将发生突变。

当另一点接地发生在 α 范围内时,

$$\begin{aligned}\Delta U_{61}'(t) &= U_{61}'(t + \Delta t) - U_{61}'(t) \\ &= -\left(\frac{a-\beta}{1-\beta} - \alpha\right) \cdot \frac{U_L}{8K+7} = \frac{(1-\alpha)\beta}{1-\beta} \cdot \frac{U_L}{8K+7}\end{aligned}\quad (27)$$

$$\begin{aligned}\Delta U_{62}'(t) &= U_{62}'(t + \Delta t) - U_{62}'(t) \\ &= \left[\frac{1-\alpha}{1-\beta} - (1-\alpha)\right] \cdot \frac{U_L}{8K+7} \\ &= \frac{(1-\alpha)\beta}{1-\beta} \cdot \frac{U_L}{8K+7}\end{aligned}\quad (28)$$

$$\begin{aligned}\text{故有: } \Delta U_6'(t) &= \Delta U_{61}'(t) + \Delta U_{62}'(t) \\ &= \frac{2(1-\alpha)\beta}{1-\beta} \cdot \frac{U_L}{8K+7}\end{aligned}\quad (29)$$

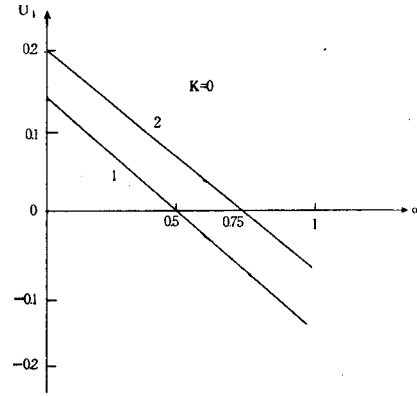


图 13

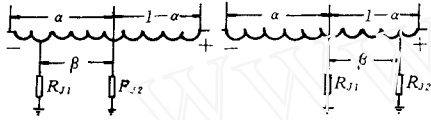


图 14

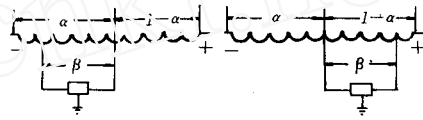


图 15

$$\text{同理可求得: } \Delta U_6''(t) = \frac{4(1-\alpha)\beta}{1-\beta} \cdot \frac{87U_J}{1160K+1479} \quad (30)$$

当另一点接地发生在 $(1-\alpha)$ 范围内时,用同样的方法可求得:

$$\Delta U_6'(t) = \frac{-2\alpha\beta}{1-\beta} \cdot \frac{U_L}{8K+7} \quad (31)$$

$$\Delta U_6''(t) = \frac{-4\alpha\beta}{1-\beta} \cdot \frac{87U_J}{1160K+1479} \quad (32)$$

把 21、30 和 31、32 分别组成以下两个议程组:

$$\Delta U_6'(t) = \frac{2(1-\alpha)\beta_1}{1-\beta_1} \cdot \frac{U_L}{8K_1+7} \quad (29')$$

$$\Delta U_6''(t) = \frac{4(1-\alpha)\beta_1}{1-\beta_1} \cdot \frac{87U_J}{1160K_1+1479} \quad (30')$$

$$\text{和 } \Delta U_6'(t) = \frac{-2\alpha\beta_2}{1-\beta_2} \cdot \frac{U_L}{8K_2+7} \quad (31')$$

$$\Delta U_6''(t) = \frac{-4\alpha\beta_2}{1-\beta_2} \cdot \frac{87U_J}{1160K_2+1479} \quad (32')$$

由 29' 得:

$$K_1 = \frac{1479\Delta U_6''(t)U_L - 1218\Delta U_6'(t)U_J}{1392\Delta U_6'(t)U_J - 1160\Delta U_6''(t)U_L} \quad (33)$$

代入 30' 得:

$$\beta_1 = \frac{3712\Delta U_6''(t)\Delta U_6'(t)}{3712\Delta U_6''(t)\Delta U_6'(t) + (1-\alpha)(2784U_6'(t)U_J - 2320\Delta U_6'(t)U_L)} \quad (34)$$

同理可求得:

$$\beta_2 = \frac{3712\Delta U_6''(t)\Delta U_6'(t)}{3712\Delta U_6''(t)\Delta U_6'(t) - \alpha(2784\Delta U_6'(t)U_J - 2320\Delta U_6'(t)U_L)} \quad (35)$$

由 29、31 两式,可直接得出下述结论:

当另一点接地发生在 α 范围内时, $\Delta U_6'(t) > 0$, 而当另一点接地发生在 $(1-\alpha)$ 范围内时, $\Delta U_6'(t) < 0$, 故有:

当 $\Delta U_6'(t) > 0$ 时, $\beta = \beta_1$

$\Delta U_6'(t) < 0$ 时, $\beta = \beta_2$ 。

现在反过来设 $R_J \neq 0$, 若励磁绕组的总阻抗为 Z , 则图 15 所示的等效图可用图 16 表示:

则 β_Z 与 R_J 的并联阻抗为:

$$Z_{\#} = \frac{\beta_Z \cdot R_J}{\beta_Z + R_J} \quad (36)$$

令 $\frac{Z_{\#}}{\beta_Z} = A$, 很显然, $A < 1$, 有:

$$\beta_Z - Z_{\#} = (1-A)\beta_Z \quad (37)$$

这样就相当于发生了 $(1-A)\beta$ 的金属性短路,

即: $(1-A)\beta_{\#} = \beta_{\#}$ (38)

这里: $\beta_{\#}$, 实际经过渡电阻的短路匝数,

$\beta_{\#}$, 理论计算短路匝数。

故计算出的短路匝数比实际短路匝数要小。但当 $A \rightarrow 0$, 即 $R_J = 0$ 时, $\beta_{\#} = \beta_{\#}$ 。

在具体实现时, 只要 $\beta_{\#} > \beta_{zd}$ (整定值), 即判为两点接地。这样, 当 R_J 与 β_Z 相比不太大时, 不会影响保护的正确动作。

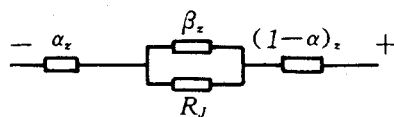


图 16

4 发生转子一点接地后的转子绕组匝间短路保护

从 3 的分析可见, 当 $R_J = 0$ 时, 就相当于发生了匝间短路, 这只是匝间短路的特殊情况, 实际上, 匝间短路不一定发生在一点接地处, 可以是任意的, 例如可在一点接地处的某侧, 或跨越该接地点, 如图 17 所示。

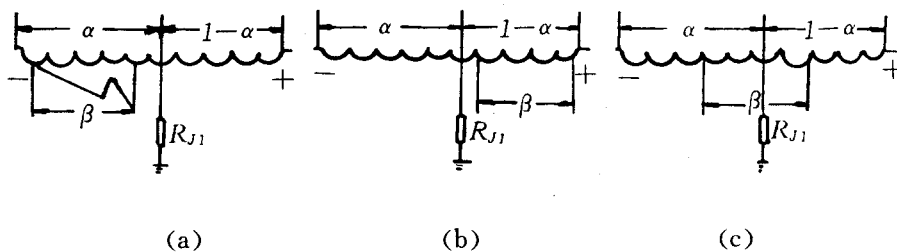


图 17

当匝间短路发生在接地点同一侧时, 分析方法同 3 中的 $A = 0$ 类似, $\beta_{\#} = \beta_{\#}$ 。

当匝间短路跨越接地点时, $\beta_{\#}$ 为接地点两侧短路匝数之差, 故当两侧短路匝数相等时, 为死区, 不反应。

事实上, 当发生一点接地后, 再发生两点接地或匝间短路时, 对本算法来说是无法区分的,

故只要 $\beta_{\text{计}} > \beta_{\text{ZD}}$, 都判为两点接地, 保护动作。

因为微机不断的高速循环运行, 实时处理各种数据, 故 K 和 α 被不停的计算也即它们是动态的, 时刻都反应着接地电阻和接地状态的最新变化。一点接地条件一旦满足, 即刻进行两点接地判断, 即计算 β 的值, 这样, 一旦 β 大于一整定值, 则立即发灭磁和跳闸等命令。

5 两种保护方案的微机实现方法

对于微机保护的整套硬件装置来说, 大体上可分为输入信号的形成、微机系统及命令的输出等三大部分。就本保护方案来说, 后两部分无特殊要求, 有多种电路可供选择, 如本文作者所从事的微机发变组成套保护的部分硬件就可直接利用, 最关键的是第一部分, 电路结构如图 18 所示。其中, DC/DC 用于把 R_6 两端的直流电压进行隔离变换, 以利于微机的数据采集并起抗干扰作用; PT_1 、 PT_2 用于把叠加的 U_J 及 r_6 两端的交流电压变换成合适的电平, 利于数据采集, 并起隔离和抗干扰作用。L、C 构成隔直谐振电路, 防止励磁电压对交流回路的影响。

从图 18 的结构来看, 上面是直流电桥, 下面是交流电桥, 上下不完全对称; 而对下面的交流电桥来说, 左右两侧的电阻值不一样大, 即左右也不完全对称, 故不对称双电桥由此得名。

在具体用微机来实现时, 还要解决一个问题, 就是 U_6'' 与 U_6' 不一样, 它不是直流电压, 没有正负之分, 但作为这里的电桥电压, 是要有正负的, 为此在求出其大小之后, 还要赋于一符号, 其正负取决于 U_6'' 与所外加的交流电压 U_J 是否同相, 当两者同相时, U_6'' 为正, 否则 U_6'' 为负。 U_6'' 随 α 的变化关系如图 13 的直线 2 所示。

把两种保护合在一起实现, 也只有 4 个采样量, 即 U_6' 、 U_6'' 、 U_J 和 U_L , 当叠加工频交流量, 每周波采样 12 点时, 采样频率为 600Hz, 计算工作量不算大, 用一片 16 位单片机是完全可以胜任的, 而且具有通信功能, 可把接地状态、接地电阻的大小及位置等信息, 实时传出去。

比较两相同频率的交流量是同相还是反相, 在满足采样定理的条件下, 只要比较同一时刻的采样数据的符号是否相同即可。

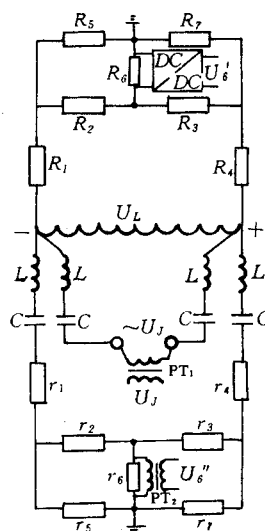


图 18

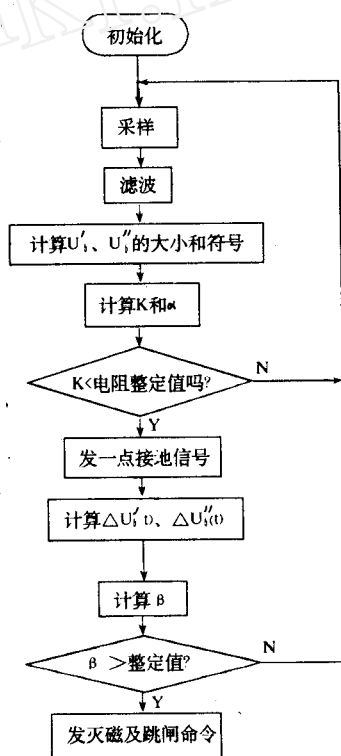


图 19

$I_{D\cdot\min}$ 。

要求测试的 K_B 与整定的 K_B 相符。

第二类多绕组制动特性纵差,各侧电流同极性相加组成动作电流,取各侧电流中的最大值电流为制动电流,区外故障,差电流为不平衡电流,制动电流为最大侧的故障电流。

设 高压侧电流为 I_A , 低压侧电流为 I_a , 模拟区外故障, 制动曲线测试方法与第一类差动继电器相同, 此时减少 I_A 电流以增大差电流 I_D , 但计算方法不同。

此时 动作电流 $I_D = I_a - I_A$

制动电流 $I_B = I_a$

7 结论

7.1 变压器微机保护装置的运行实践说明微机保护较常规保护优越,在电网 220kV 及以上电压等级变压器大规模使用微机保护是必然趋势。

7.2 220kV 及以上电压等级变压器使用微机保护有利于简化保护及接线,适合双重化保护配置。本文提出的 220~500kV 变压器微机保护的配置是根据东北电网变压器保护的运行实践,贯彻继电保护装置配置少而精的原则,从而提高了可靠性。

7.3 本文提出的微机保护比率制动级差保护简易整定法和比率制动曲线测试方法,经过实践证明是简单可行的。

7.4 微机保护在运行中,今后要不断地改进和完善,以推动电网继电保护技术向前发展。

(上接 14 页) 当不发生接地时,无论励磁电压怎么波动,电桥始终是平衡的,即 $U_0' = 0$,故一点接地电阻的大小和位置的计算不受励磁电压波动的影响。

从 34、35 两式可以看出,在进行两点接地判断时,即使直流励磁电压发生波动,即 $\Delta U_0'(t) \neq 0$,而外加交流电压可以认为是稳定不变的,即 $\Delta U_0''(t) = 0$,故计算出的 β 仍为 0,也即直流励磁电压的波动不会对两点接地计算造成影响。

微机软件简单框图如图 19。

6 结论

本保护方案可同时实现发电机转子一点接地保护和两点接地保护,因采用两电桥的互相监视,当一点接地时,可求出接地电阻的大小,并定位接地点,而且没有任何死区,同时也不受励磁电压波动的影响;当两点接地时,可计算出励磁绕组的短路匝数百分比,且不受励磁电压波动的影响。当一点接地时,可瞬时动作于跳闸或发信号,而当两点接地时,可瞬时动作于灭磁及跳闸。

当然,本方案不适用于无刷励磁系统及两点同时接地的情况。