

# 无刷同步电机转子绕组接地检测新原理的研究

高仕红, 黄勇, 钟建伟, 杨庆

(湖北民族学院电气工程系, 湖北 恩施 445000)

**摘要:** 同步电机采用无刷励磁是同步电机结构上的重大改革, 取消了滑环和炭刷, 但使转子接地故障检测变得较困难。目前无刷同步电机转子绕组接地检测主要采用传统的方式, 没有考虑到无刷同步电机的特殊结构。针对这一情况, 提出了一种无刷同步电机转子绕组接地检测的新原理, 详细地分析了它的接地检测原理。提出了消除接地检测死区的条件和接地检测的灵敏度不受励磁电压影响的方法。另外, 还考虑了电网突然发生短路故障对接地监测的影响, 仿真结果证明, 在突然短路的过渡过程中, 接地监测不会发生误动作, 说明了该无刷同步电机接地监测具有较高的可靠性。该接地检测新原理为无刷同步电机接地检测的工程应用提供了一定的理论参考依据。

**关键词:** 无刷同步电机; 转子绕组; 接地检测; 死区

## Study on new principle of rotor windings' grounding detection of brushless synchronous electrical machine

GAO Shi-hong, HUANG Yong, ZHONG Jian-wei, YANG Qing

(Department of Electrical Engineering, Hubei Institute for Nationalities, Enshi 445000, China)

**Abstract:** It is an important reformation that synchronous machine introduces brushless excitation, which canceled slide-ring and charcoal brush, while rotor windings' grounding faults detection is more difficult accordingly. At present, rotor windings' grounding detection for brushless synchronous electrical machine adopts conventional manner mostly, without considering its special structure. Aiming at this case, a sort of new principle of rotor windings' grounding detection for brushless synchronous electrical machine is put forward in this paper and its principle is analyzed in detail. The condition of eliminating grounding detection's dead area is put forward, and after dealing logically, sensitivity of grounding detection is unacted on excitation voltage. In addition, its influence towards grounding detection is also considered when the power systems burst with short fault, the simulational results prove that grounding detection didn't occur misoperation during bursting with short fault, which illuminates this sort of grounding detection with better reliability. The proposed new principle of grounding detection provides a certain theoretical reference basis for engineering applications of grounding detection for brushless synchronous electrical machine.

**Key words:** brushless synchronous electrical machine; rotor windings; grounding detection; dead area

中图分类号: TM307; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)13-0032-06

## 0 引言

同步电机采用无刷励磁是同步电机结构上的重大改革, 它不仅取消了直流机励磁系统中的机械整流部分, 而且也取消了半导体励磁系统中的炭刷和集电环。但是, 由于取消了滑环和炭刷, 使转子接地故障监视较困难<sup>[1,2]</sup>。通常同步电机转子绕组是不接地运行的, 当转子绕组发生一点接地时, 对发电机的运行不会产生影响和损害。但若未能及时处理, 一旦发生两点接地故障。这将严重威胁同步电机的安全, 因此大中型同步电机需装设转子一点、两点接地保护<sup>[3~6]</sup>。

目前无刷同步电机转子绕组接地检测主要采用

传统的方式, 主要有电桥式、叠加直流电压式、叠加交流电压式(利用导纳继电器)以及乒乓切换采样变电桥式等<sup>[3~9]</sup>。针对无刷同步电机的特殊结构, 有必要探究一种适于无刷同步电机转子绕组接地检测方法。由于无刷同步电机转子绕组接地检测电路一般是安装在高速旋转的转子上, 针对这一情况, 无刷同步电机转子绕组接地监测电路必须要求简单、可靠。在传统的转子绕组接地检测方法中, 电阻平衡电桥接地检测满足简单、可靠。但它存在死区, 而且灵敏度受励磁电压变化的影响。若要把电阻平衡电桥接地检测应用到无刷励磁同步电机上, 必须对其进行改进。

针对电阻平衡电桥接地检测存在的问题, 本文提出了一种基于有源电阻电桥原理的无刷同步电机

转子绕组接地检测方法。

### 1 有源电阻电桥原理

由于利用电阻平衡电桥原理构成的同步电机转子绕组接地监测, 转子一点接地时, 在转子绕组中点附近即使发生金属性接地故障, 接地监测存在死区; 转子两点接地时, 接地监测也存在死区, 并且接地监测死区受接地电阻的影响。而且这两种接地故障对于不同的励磁电压, 其灵敏度也不相同。从电阻平衡电桥一点接地监测原理的分析来看, 接地监测的死区发生在同步电机转子绕组中心点附近, 若要消除此死区, 此时只要抬高电桥中点的电位, 打破此时的电桥平衡, 就可以克服接地监测的死区。因此, 若在接地信号检测臂上外加一个直流电压, 人为地抬高电桥中点的电位, 就可克服电阻平衡电桥接地监测的死区。通过理论分析, 这种作法是可以的。无刷同步电机转子绕组接地检测新原理的原理如图 1 所示。

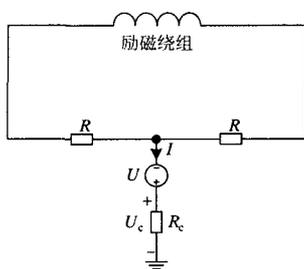


图 1 接地检测原理图

Fig.1 Principle diagram of grounding detection

#### 1.1 一点接地分析

当在励磁绕组中发生一点接地时, 其等值电路如图 2 所示。设 k 点距转子绕组正极端为  $\alpha$ , 同步电机的励磁电压为  $U_f$ , 接地信号采样电阻为  $R_c$ , 接地检测臂上外加直流电压为  $U$ 。

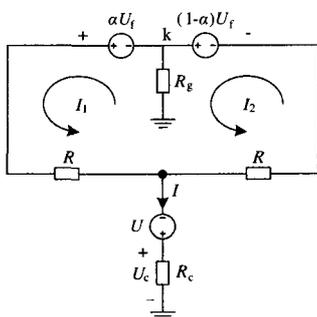


图 2 一点接地监测等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of one-point grounding detection

由电路原理知识可得一点接地时的网孔电流方

程:

$$\begin{bmatrix} R+R_g+R_c & -(R_g+R_c) \\ -(R_g+R_c) & R+R_g+R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 1 \\ 1-\alpha & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_f \\ U \end{bmatrix} \quad (1)$$

由式(1)可得:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{R} + \frac{2\alpha-1}{R+2(R_g+R_c)} & \frac{2}{R+2(R_g+R_c)} \\ \frac{1}{R} - \frac{2\alpha-1}{R+2(R_g+R_c)} & -\frac{2}{R+2(R_g+R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_f \\ U \end{bmatrix} \quad (2)$$

接地信号采样电阻  $R_c$  上的电压为:

$$U_c = (I_1 - I_2)R_c = \frac{R_c}{R+2(R_g+R_c)} [(2\alpha-1)U_f + 2U] \quad (3)$$

为了考察一点接地时, 接地监测是否存在死区, 令  $U_c = 0$ , 由式(3)可得:

$$(2\alpha-1)U_f + 2U = 0, \text{ 即 } \alpha = \frac{1}{2} - \frac{U}{U_f} \quad (4)$$

由于  $0 \leq \alpha \leq 1$ , 因此, 由式(4)可得:

$$0 \leq \frac{1}{2} - \frac{U}{U_f} \leq 1, \text{ 即 } 0 \leq \frac{U}{U_f} \leq \frac{1}{2} \quad (5)$$

也就是说, 当  $0 \leq \frac{U}{U_f} \leq \frac{1}{2}$  时, 总有一接地点位置  $\alpha$  使得  $U_c = 0$ , 即接地监测存在死区。若要使  $U_c \neq 0$  总是成立, 则只要  $\frac{U}{U_f} > \frac{1}{2}$  即可。也就是说只要信号检测臂上外加直流电压  $U > \frac{1}{2}U_f$  就可克服一点接地监测的死区。

#### 1.2 两点接地分析

转子绕组一点接地后, 又发生另一点接地, 这样就形成了转子绕组两点接地。其等值电路如图 3 所示。

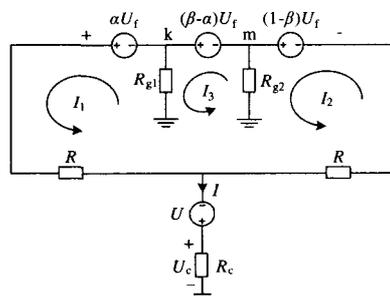


图 3 两点接地监测等值电路

Fig.3 Equivalent circuit of two-point grounding detection

设 k 点距转子绕组正极端为  $\alpha$ , 接地电阻为  $R_{g1}$ , m 点距转子绕组正极端为  $\beta$ , 接

地电阻为  $R_{g2}$ ，同步电机的励磁电压为  $U_f$ ，接地信号采样电阻为  $R_c$ ，接地检测臂上外加直流电压为  $U$ 。

由电路原理知识可得两点接地时的网孔电流方程：

$$\begin{bmatrix} R+R_{g1}+R_c & -R_c & -R_{g1} \\ -R_c & R+R_{g2}+R_c & -R_{g2} \\ -R_{g1} & -R_{g2} & R_{g1}+R_{g2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 1 \\ 1-\beta & -1 \\ \beta-\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_f \\ U \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)可得：

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(\alpha R_{g2} + \beta R_{g1})R + R_{g1}R_{g2} + R_c(R_{g1} + R_{g2})}{R[(R_{g1} + R_{g2})(R + 2R_c) + 2R_{g1}R_{g2}]} \\ \frac{-(\alpha R_{g2} + \beta R_{g1})R + R_{g1}R_{g2} + (R + R_c)(R_{g1} + R_{g2})}{R[(R_{g1} + R_{g2})(R + 2R_c) + 2R_{g1}R_{g2}]} \\ \frac{R[(\beta - \alpha)(R + 2R_c) + \beta R_{g1} - \alpha R_{g2}] + (R + R_{g1})R_{g2} + (R_{g1} + R_{g2})R_c}{R[(R_{g1} + R_{g2})(R + 2R_c) + 2R_{g1}R_{g2}]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_f \\ U \\ U \end{bmatrix} \quad (7)$$

接地信号采样电阻  $R_c$  上的电压为：

$$U_c = (I_1 - I_2)R_c = R_c \left[ \frac{(2\alpha - 1)R_{g2} + (2\beta - 1)R_{g1}}{(R_{g1} + R_{g2})(R + 2R_c) + 2R_{g1}R_{g2}} - \frac{2(R_{g1} + R_{g2})}{(R_{g1} + R_{g2})(R + 2R_c) + 2R_{g1}R_{g2}} \right] \begin{bmatrix} U_f \\ U \end{bmatrix} \quad (8)$$

为了考察两点接地时，接地监测是否存在死区，令  $U_c = 0$ ，则由式(8)可得：

$$[(2\alpha - 1)R_{g2} + (2\beta - 1)R_{g1}]U_f + 2(R_{g1} + R_{g2})U = 0 \quad (9)$$

由式(9)可得：

$$\frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}}\alpha + \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}}\beta = \frac{1}{2} - \frac{U}{U_f} \quad (10)$$

由于  $0 \leq \alpha \leq 1$ 、 $0 \leq \beta \leq 1$ ，因此，

$0 \leq \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}}\alpha + \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}}\beta \leq 1$ 。由式(10)可得：

$$0 \leq \frac{1}{2} - \frac{U}{U_f} \leq 1, \quad \text{即} \quad 0 \leq \frac{U}{U_f} \leq \frac{1}{2} \quad (11)$$

也就是说，当  $0 \leq \frac{U}{U_f} \leq \frac{1}{2}$  时，总有一接地点位置  $\alpha$ 、 $\beta$  使得  $U_c = 0$ ，即接地监测存在死区，并且接地监测死区受接地电阻  $R_{g1}$ 、 $R_{g2}$  和  $\frac{U}{U_f}$  的影响。若要

使  $U_c \neq 0$  总是成立，则只要  $\frac{U}{U_f} > \frac{1}{2}$  即可。也就是说

只要信号检测臂上外加直流电压  $U > \frac{1}{2}U_f$  就可克服

两点接地监测的死区。这与克服一点接地死区的条件完全吻合。

### 1.3 消除接地检测灵敏度受励磁电压的影响

一般情况下，同步电机的励磁电压有三种特定状态，即空载、额定和强励励磁电压。由于强励时的励磁电压约为额定励磁电压的 2 倍，额定励磁电压约为空载励磁电压的 2.5 倍。由上面的分析可知，

只要满足  $U > \frac{1}{2}U_f$  条件，接地检测无死区，为了消

除接地检测的灵敏度不受励磁电压的影响，使信号检测臂上外加直流电压  $U$  随励磁电压线性变化，即  $U^* = \frac{U}{U_f}$  为常数。因此，在整个励磁电压范围内保护

不存在死区。

转子绕组一点接地时，由式(3)可以看出，当接地点位置  $\alpha$  和接地电阻  $R_g$  不变时，接地信号采样电阻  $R_c$  上的电压  $U_c$  随同步电机励磁电压  $U_f$  线性变化。为了克服励磁电压  $U_f$  对接地监测灵敏度的影响，对式(3)如下处理：在式(3)等式两边同时除以同步电机的励磁电压  $U_f$ ，由此可得：

$$\frac{U_c}{U_f} = \frac{R_c}{R + 2(R_g + R_c)} [(2\alpha - 1) + 2\frac{U}{U_f}] \quad (12)$$

令  $U_c^* = \frac{U_c}{U_f}$ ， $U^* = \frac{U}{U_f}$ ，式(12)可化为：

$$U_c^* = \frac{R_c}{R + 2(R_g + R_c)} [(2\alpha - 1) + 2U^*] = \mu[(2\alpha - 1) + 2U^*] \quad (13)$$

由式(13)可知，在不同励磁电压时，只要信号检测臂上外加直流电压  $U^*$  为常数。这样接地信号采样电阻  $R_c$  上的电压  $U_c^*$  就与同步电机励磁电压  $U_f$  的大小无关。也就是说对于不同的励磁电压  $U_f$ ，接地监测的灵敏度是相同的。

转子绕组两点接地时，为了克服不同的励磁电压其灵敏度不相同的缺点，处理方法与一点接地时一样，由式(8)可得：

$$\frac{U_c}{U_f} = R_c \left[ \frac{(2\alpha - 1)R_{g2} + (2\beta - 1)R_{g1}}{(R_{g1} + R_{g2})(R + 2R_c) + 2R_{g1}R_{g2}} - \frac{2(R_{g1} + R_{g2})}{(R_{g1} + R_{g2})(R + 2R_c) + 2R_{g1}R_{g2}} \right] \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{U}{U_f} \end{bmatrix} = \quad (14)$$

$$[\lambda(2\alpha - 1) + \tau(2\beta - 1) \quad 2(\lambda + \tau)] \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{U}{U_f} \end{bmatrix}$$

令  $U_c^* = \frac{U_c}{U_f}$ ,  $U^* = \frac{U}{U_f}$ , 则由式(14)可得:

$$U_c^* = R_c \left[ \frac{(2\alpha - 1)R_{g2} + (2\beta - 1)R_{g1}}{(R_{g1} + R_{g2})(R + 2R_c) + 2R_{g1}R_{g2}} \right] \begin{bmatrix} 1 \\ U^* \end{bmatrix} = \quad (15)$$

$$\left[ \lambda(2\alpha - 1) + \tau(2\beta - 1) \quad 2(\lambda + \tau) \right] \begin{bmatrix} 1 \\ U^* \end{bmatrix}$$

由式(15)可知, 两点接地时, 采取这样处理后, 对于不同的励磁电压  $U_f$ , 接地监测灵敏度是相同的, 从而克服了其灵敏度受励磁电压  $U_f$  的影响。

## 2 仿真和实验分析

设仿真数据如下: 励磁电压  $U_f = 100 \text{ V}$ , 励磁绕组电阻  $R_f = 0.4 \ \Omega$ , 桥电阻  $R = 50 \text{ k}\Omega$ , 接地信号采样电阻  $R_c = 480 \ \Omega$ , 接地电阻  $R_{g1} = 15 \text{ k}\Omega$ 、 $R_{g2} = 20 \text{ k}\Omega$ 。

### 2.1 接地故障的仿真分析

当  $0 \leq \frac{U}{U_f} \leq \frac{1}{2}$  时, 取信号检测臂上外加直流电压  $U = 40 \text{ V}$ ; 当  $\frac{U}{U_f} > \frac{1}{2}$  时, 取信号检测臂上外加直流电压  $U = 60 \text{ V}$ 。

①发生一点接地时, 接地点位置  $\alpha$  不同时的仿真波形如图 4(a)、(b)所示。

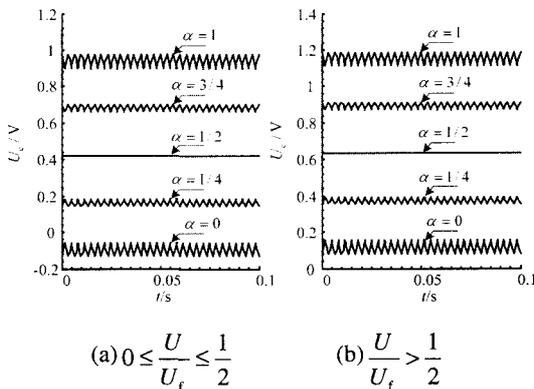


图 4  $\alpha$  不同时的仿真波形  
Fig.4 Simulation waveform of different  $\alpha$

②发生两点接地时, 接地点位置  $\alpha$ 、 $\beta$  不同时的仿真波形如图 5(a)、(b)所示。

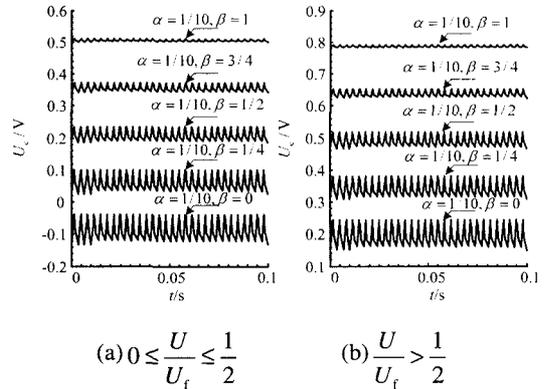


图 5  $\alpha$ 、 $\beta$  不同时的仿真波形

Fig.5 Simulation waveform of different  $\alpha$  and  $\beta$

由图 4 和图 5 可看出, 当  $0 \leq \frac{U}{U_f} \leq \frac{1}{2}$  时, 接地检测存在死区; 当  $\frac{U}{U_f} > \frac{1}{2}$  时, 接地检测不存在死区。

仿真分析与理论分析相吻合。

### 2.2 消除灵敏度受励磁电压影响的仿真分析

在  $U > \frac{1}{2}U_f$  条件下, 采用 1.3 的方法可以消除接地检测灵敏度受励磁电压的影响, 其仿真分析如下:

①一点接地时, 接地点位置  $\alpha = 0$ , 接地电阻  $R_g = 20 \text{ k}\Omega$ , 其它仿真数据同上, 仿真波形如图 6 所示。

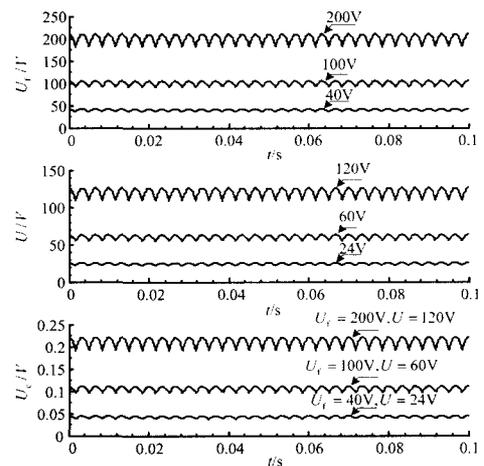


图 6 一点接地时的仿真波形

Fig.6 Simulation waveform while one-point grounding

②两点接地时, 接地点位置  $\alpha = 0$ 、 $\beta = \frac{1}{2}$ ,

接地电阻  $R_{g1} = 20 \text{ k}\Omega$ 、 $R_{g2} = 15 \text{ k}\Omega$ , 其它仿真数据同上, 仿真波形如图 7 所示。

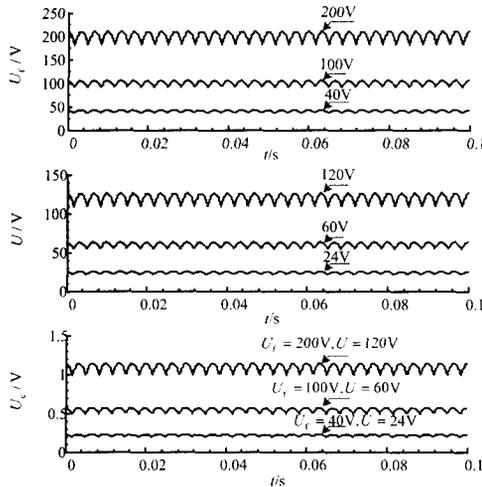


图7 两点接地时的仿真波形

Fig.7 Simulation waveform while two-point grounding

由图6和图7可看出,在空载、额定和强励励磁电压时,只要外加直流电压 $U$ 随励磁电压线性变化,即 $U' = \frac{U}{U_f}$ 为常数。接地信号采样电阻 $R_c$ 上的电压 $U_c$ 就与同步电机励磁电压 $U_f$ 的大小无关。也就是说对于不同的励磁电压 $U_f$ ,接地监测的灵敏度是相同的。

### 2.3 电网故障对接地检测影响的仿真分析

由于电网的突然短路是对同步电机有严重威胁的过渡过程,其中三相突然短路是最为严重事故<sup>[9]</sup>。因此,分析突然短路对接地监测的影响有重要意义。在此只考虑在转子绕组绝缘正常时,电网突然发生三相短路,在其过渡过程中接地监测是否发生误动作。设仿真数据如下:

①凸极同步发电机参数:  $P_N = 20 \text{ MW}$ ,  $U_N = 10.5 \text{ kV}$ ,  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,  $R_a = 2.8544e-3$ ,  $x_d = 1.305$ ,  $x_d' = 0.296$ ,  $x_d'' = 0.252$ ;  $x_q = 0.474$ ,  $x_q'' = 0.243$ ;  $T_d' = 1.01 \text{ s}$ ,  $T_d'' = 0.053 \text{ s}$ ,  $T_q'' = 0.1 \text{ s}$ 。

②变压器参数:  $S_N = 21 \text{ MVA}$ ,  $U_{1N}/U_{2N} = 10.5 \text{ kV}/110 \text{ kV}$ ,  $R_1 = 0.0027$ ,  $L_1 = 0.08$ ,  $R_2 = 0.0027$ ,  $L_2 = 0.08$ ,  $L_m = 500$ 。

③线路参数: 电阻  $0.01273 \Omega/\text{km}$ , 电抗  $0.35182 \Omega/\text{km}$ ,  $110 \text{ kV}$ , 同步电机经过  $200 \text{ km}$  单回线与无穷大电网相联。在线路末端突然发生三相短路。

④其它参数: 励磁电压  $U_f = 100 \text{ V}$ , 励磁绕组电阻  $R_f = 0.4 \Omega$ , 励磁绕组电感  $L_f = 1 \times 10^{-3} \text{ H}$ , 桥电阻  $R = 50 \text{ k}\Omega$ , 接地信号采样电阻  $R_c = 480 \Omega$ ,

正常时转子绕组对地绝缘电阻  $R_g = 5 \text{ M}\Omega$ , 信号检测臂上外加直流电压  $U = 60 \text{ V}$ , 接地点位置  $\alpha = 0$ 。当  $t = 0.4 \text{ s}$  时, 发生突然三相短路,  $t = 0.42 \text{ s}$  时, 故障切除。接地信号采样电压  $U_c$  的仿真波形如图8所示。

由图8可看出,当电网发生三相突然短路时,接地信号采样电压的最大冲击值为  $6 \text{ mV}$ , 小于接地监测的最小整定值  $40 \text{ mV}$  [对应接地电阻  $R_g = 500 \text{ k}\Omega$ , 转子绕组正端发生接地故障(由于此接地点位置是接地监测灵敏度最低位置)]。由此看来,在电网发生三相突然短路时,接地监测不会发生误动作。

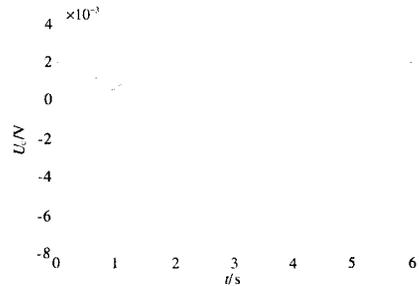


图8 电网发生三相短路时  $U_c$  的仿真波形

Fig.8 Simulation waveform of  $U_c$  when the grid happened three-phase short circuit

### 2.4 实验分析

实验数据如下: 励磁电压为  $40 \text{ V}$ , 励磁绕组电阻为  $0.4 \Omega$ , 电阻桥的电阻值为  $50 \text{ k}\Omega$ , 接地信号监测臂上的外加直流电源电压为  $24 \text{ V}$ , 接地信号采样电阻值为  $1.5 \text{ k}\Omega$ 。

一点接地时, 接地点位置  $\alpha$  不同, 接地电阻为  $0$ , 即金属性接地时, 实验与仿真数据如表1所示。

表1 采样电压  $U_c$

Tab.1 Sampling voltage  $U_c$

接地点位置( $\alpha$ )	采样电压 $U_c / \text{V}$	
	仿真值	实验值
0	0.231	0.213
1/4	0.786	0.696
1/2	1.34	1.324
3/4	1.895	1.943
1	2.45	2.444

两点接地时, 接地点位置  $\alpha$ 、 $\beta$  不同, 接地电阻为  $0$ , 即金属性接地时, 实验与仿真数据如表2所示。

表 2 采样电压  $U_c$   
Tab.2 Sampling voltage  $U_c$

接地点位置 ( $\alpha$ 、 $\beta$ )		采样电压 $U_c/V$	
$\alpha$	$\beta$	仿真值	实验值
0	1/4	0.231	0.24
	1/2	0.232	0.245
	3/4	0.233	0.25
	1/2	0.971	0.98
1/4	3/4	1.341	1.34
	1	2.448	2.45
1/2	3/4	1.71	1.65
	1	2.45	2.55
3/4	1	2.45	2.55

由表 1 和 2 可看出, 接地监测的灵敏度受接地点位置的影响, 转子绕组负端的灵敏度最高, 正端的灵敏度最低, 在整个区间内不存在接地监测死区。

### 3 总结

目前无刷同步电机转子接地检测广泛采用在转子回路与大地之间外加一个低频信号电源, 正常运行时, 此信号电源很少或不产生电流, 而当发生接地故障后, 产生相应频率的接地电流使保护动作。但这种低频信号源都是按编码的方式间歇注入到转子回路中的, 这对电源的可靠性和性能有很高的要求, 装置的现场调试复杂而且价格昂贵, 且外加电源的内阻会影响保护的灵敏度。而本文提出的无刷同步电机转子绕组接地检测新原理, 经过原理分析和仿真分析, 在满足  $\frac{U}{U_t} > \frac{1}{2}$  的条件下, 接地检测不

存在死区。并且通过合理的处理后, 接地监测灵敏度不受励磁电压的影响。另外, 当电网发生三相突然短路时, 在过渡过程中, 接地监测不会发生误动作。因此, 本文提出的接地检测新原理为无刷同步电机接地检测系统的设计和工程应用提供了理论基础和依据。

### 参考文献

- [1] Sottile J, Trutt F C, Leedy A W. Condition Monitoring of Brushless 3-phase Synchronous Generator with Stator Winding or Rotor Circuit Deterioration[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 42(5): 1209-1215.
- [2] GAN Zhi-jun, Khincha H P, et al. New Ground Fault Protection System for the Field Winding of a Brushless

Generator[J]. Electric Machines and Power Systems, 1997,(5): 475-483.

- [3] 毕大强, 徐振宇. 发电机励磁回路接地保护新原理的研究[J]. 继电器, 2000, 28(7): 37-40.
- BI Da-qiang, XU Zhen-yu. A Study into a New Ground Fault Protection Criterion for Field Winding of Generator[J]. Relay, 2000, 28(7): 37-40.
- [4] 郭光荣. 发电机转子励磁绕组接地保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 73-76.
- GUO Guang-rong. The Earth Fault Protection for Generator Rotor Field Coil[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 73-76.
- [5] 颜卓胜, 李振然. 微机型发电机励磁回路一点接地保护实验研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(11): 39-41.
- YAN Zhuo-sheng, LI Zhen-ran. Experimental Study on Microcomputer-based Earth Fault Protection of Generator Field Circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(11): 39-41.
- [6] Kulkarni A S, Ei-sharkawi M A, Marks R J, et al. Development of a Technique for On-line Detection of Shorts in Field Windings of Turbine-generator Rotor Circuit Design and Testing[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2000, 15(1): 8-13.
- [7] 夏勇军, 尹项根, 杨经超, 等. 发电机乒乓式转子接地保护电路设计[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 52-55.
- XIA Yong-jun, YIN Xiang-gen, YANG Jing-chao, et al. Circuitry Design of Ping-pong Type Grounding Fault Protection for Generator Rotor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 52-55.
- [8] 徐习东, 金宁, 郭晓明. 一种切换采样原理转子接地保护算法的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(6): 41-45.
- XU Xi-dong, JIN Ning, GUO Xiao-ming. Study of Rotor Earth-fault Protection with Switch Sampling Principle[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2005, 20(6): 41-45.
- [9] 高景德, 王祥珩, 李发海, 等. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

收稿日期: 2008-04-23; 修回日期: 2008-06-29

作者简介:

高仕红(1971-), 男, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向为新型电机及其控制; E-mail: gaosh0708@163.com

黄勇(1978-), 男, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向为电气信息检测技术;

钟建伟(1971-), 男, 副教授, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术及其应用。