

发电机励磁回路接地保护新原理的研究

毕大强,徐振宇

(清华大学电机工程系,北京 100084)

摘要:提出了一种发电机励磁回路接地保护的新原理,利用双电桥间检测电阻的电压差值判断出电机转子一点接地故障后,再利用前后检测电阻电压差的变化量来完成转子两点接地保护。新一点接地保护原理无死区,灵敏度高,而且各点接地的保护灵敏度基本相同。两点接地故障保护判据的整定值按照转子一点接地故障时的过渡电阻自适应调整,并且整定值与两个接地点之间的绕组匝数无关,提高了两点接地保护的灵敏度。

关键词:励磁回路; 接地故障; 双电桥; 自适应

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)07-0037-04

1 引言

通常发电机转子是不接地运行的,当励磁回路发生一点接地故障时,对发电机的运行不会产生影响和损害,然而由于一点接地故障的存在增加了励磁回路第二点接地的可能性。励磁回路两点接地将严重威胁发电机的安全,因此大中型发电机需要装设转子一点、两点接地保护。

目前,励磁回路一点接地保护主要有电桥式、叠加直流电压式、叠加交流电压式、利用导纳继电器的叠加交流电压式和切换采样式。通常的电桥式一点接地保护在故障发生在励磁绕组中点附近时,即使是金属性接地,保护也不能动作,因而保护存在一定的死区。叠加直流电压式一点接地保护在励磁绕组上不同点接地时,流过继电器的电流相差很大,因而不同点接地时灵敏度相差很大。叠加交流电压式一点接地保护由于受励磁绕组对地电容的影响较大,灵敏度较低。用导纳继电器的叠加交流电压式一点接地保护在实际运行中,动作特性受很多因素影响,易发生误动和拒动,整定要求精确,分析起来复杂。

转子两点接地保护主要是基于实时求解两个不同的接地回路方程,计算转子过渡电阻及接地点位置,一点接地故障后,启动两点接地保护,当测得的接地位置值发生变化,并且变化值超过整定阈值时,确认为已发生两点接地故障。这种两点接地保护的过渡电阻整定值越大,检测故障位置偏差的整定值越大,保护的灵敏度越低,当故障位置偏差很小时存在保护死区的问题。

综上所述,针对目前发电机励磁回路一点、两点接地保护原理存在的问题,有必要对新保护原理作以研究探讨。本文提出了一种基于双电桥检测电路的发电机励磁回路一点、两点接地保护新原理。

2 接地保护原理

2.1 一点接地故障

图1为新保护方案的主要检测原理结构图。故障检测电路由并联在励磁绕组两端的带抽头的电阻 R_1 和 R_2 组成,两个抽头的位置分别在 x 和 $1-x$ ($x < 1/2$)处,开关 s_1 、 s_2 和两个检测电阻 R_J 与地相连接, s_1 、 s_2 轮流导通。当在励磁绕组中发生一点接地时,检测电路可被分解成两个等效电桥回路(如图2所示)。假设电压检测电阻为 R_J ,励磁绕组的电阻为 R_w ,励磁绕组在 K 处发生接地故障,过渡电阻为 R_f 。这时两个桥的平衡被破坏,在两个检测电阻中有故障电流 I_1 和 I_2 。按图3(a)故障检测桥的等效电路列写节点电压方程:

$$-\frac{U_c}{R_{11}} + \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_J + R_f} \right) U_{T1} - \frac{U_k}{R_J + R_f} = 0 \quad (1)$$

$$-\frac{U_c}{R_{w1}} - \frac{U_{T1}}{R_J + R_f} + \left(\frac{1}{R_{w1}} + \frac{1}{R_{w2}} + \frac{1}{R_J + R_f} \right) U_k = 0 \quad (2)$$

$$I_1 = \frac{U_k - U_{T1}}{R_J + R_f} \quad (3)$$

其中: $R_1 = R_2 = R$; $R_{11} = R_{22} = xR$;

$R_{12} = R_{21} = (1-x)R$; $R_w = R_{w1} + R_{w2}$;

$R_{w1} = kR_w$; $R_{w2} = (1-k)R_w$

U_c 是励磁电压, U_{T1} 是电阻 R_1 的抽头处电压, U_k 是故障点电压, U_1 为检测电阻 R_J 两端电压, I_1 是流过检测电阻 R_J 的电流, k 为接地点位置。

通过求解方程组(1)~(3),得图3(a)故障检测电桥1中检测电阻两端的电压 U_1 为:

$$U_1 = I_1 R_J = \frac{(x-k)R_1}{(R_J + R_f) + k(1-k)R_w + x(1-x)R} U_c \quad (4)$$

同理可得图3(b)故障检测电桥2中检测电阻两端

的电压 U_2 为

$$U_2 = I_2 R_J = \frac{(1-x-k)R_I}{(R_J + R_f) + k(1-k)R_w + x(1-x)R} U_e \quad (5)$$

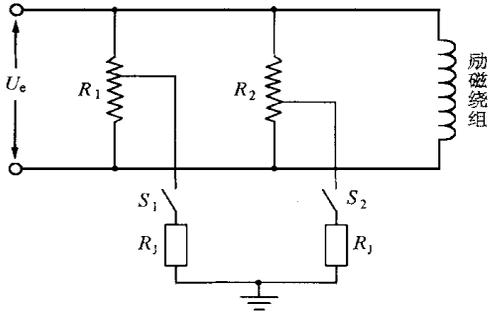


图1 接地故障检测原理图

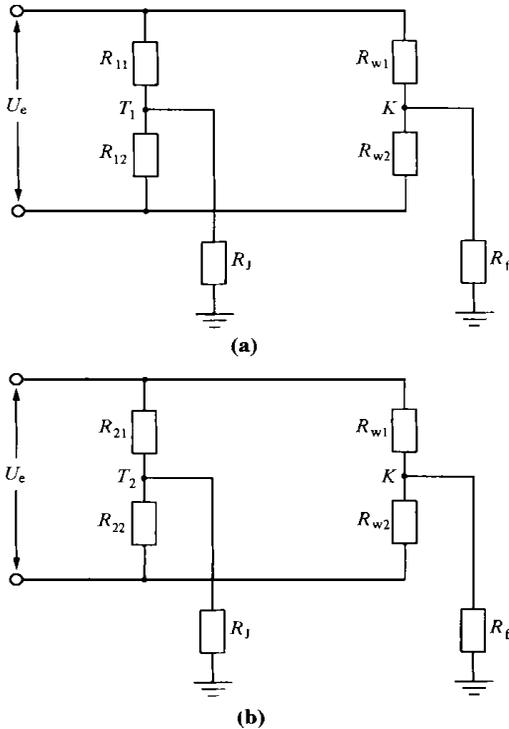


图2 分解的检测电路

从(4)、(5)式可以看出 U_1 和 U_2 不同时为零，即当励磁绕组有一点接地时，至少有一个电压检测电路的电压不为零，因此利用此条件可使保护无死区。进一步有

$$U_2 - U_1 = \frac{(1-2x)R_I}{(R_J + R_f) + k(1-K)R_w + x(1-x)R} U_e$$

恒大于0。

而正常运行时有 $U_2 - U_1 = 0$ ，也即只要发生故

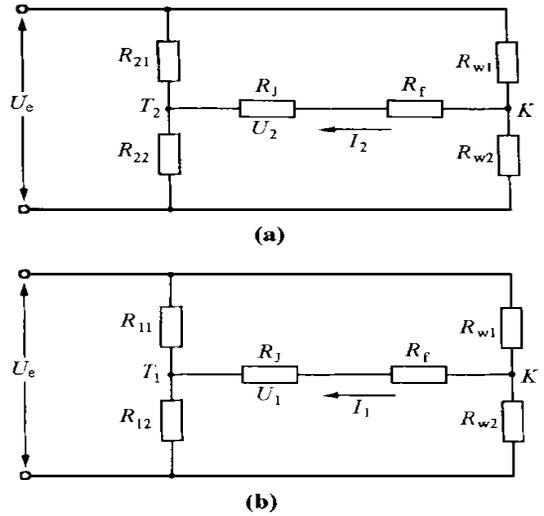


图3 一点接地故障检测电桥的等效电路

障就有 $U_2 - U_1 > 0$ ，此式为断定一点接地的新判据。但实际由于发电机励磁绕组的绝缘电阻的缘故使电桥存在不平衡电流，所以应使 $U_2 - U_1$ 大于两个电桥中检测电阻的不平衡电压 U_{z1} 、 U_{z2} 的差值 U_z 。

取 $U_2 - U_1 > U_z$ 作为判据比取 $|U_2 - U_{z2}| > 0$ 或 $|U_1 - U_{z1}| > 0$ 作为判据更灵敏。为提高可靠性，进一步取 $U_{21} = U_2 - U_1 > K_{rel} U_z$ (K_{rel} 为可靠性系数) 作为判据，新判据的灵敏度与 x 、 k 、 U_e 、 R 、 R_J 和 R_f 有关。通常 U_e 是给定的外加电压， R 是固定电阻，范围可取 $10 \sim 50k$ ， R_J 是固定电阻，根据电压转换能力可取 $50 \sim 100$ ， R_w 可以忽略不计。所以，灵敏度取决于过渡电阻 R_f 大小和 x 的取值，不同接地位置的灵敏度相同。现研究 x 对灵敏度的影响，对

$$U_{21} \text{ 求导有 } \frac{d(U_{21})}{dx} = \frac{-2[(R_J + R_f) + k(1-k)R_w + x(1-x)R + (1-2x)^2 R] R_I}{[(R_J + R_f) + k(1-k)R_w + x(1-x)R]^2} U_e$$

< 0

这表明 U_{21} 随着 x 增加单调减小。

$$\text{忽略 } R_w, U_{21} = \frac{(1-2x)R_I}{R_J + R_f + x(1-x)R} U_e \quad (6)$$

取 $U_e = 440V$ 、 $R = 20K$ 、 $R_J = 100$ 、 $R_f = 50k$ ，对比

$$x = \frac{1}{10} \text{ 时 } U_{21} = 0.678V$$

$$x = \frac{1}{5} \text{ 时 } U_{21} = 0.495V$$

$$x = \frac{1}{3} \text{ 时 } U_{21} = 0.269V$$

可看出,选择较小的 x 可增大 U_{21} 的值,提高保护灵敏度。

$$\text{由 } \frac{U_1}{U_2} = \frac{x-k}{1-x-k} \text{ 可得}$$

$$\text{接地处位置 } k = \frac{x(U_2 - U_1) - U_1}{U_2 - U_1}$$

$$\text{过渡电阻 } R_f = \frac{(1-2x)R_J}{U_2 - U_1} U_e - R_J - x(1-x)R$$

2.2 两点接地故障

转子绕组在一点 K 接地基础上(过渡电阻为 R_{f1}),又在 M 点发生第二点接地故障(过渡电阻为 R_{f2} ,两接地点之间绕组占总绕组匝数的比例),如图4所示,等效电桥电路如图5所示。

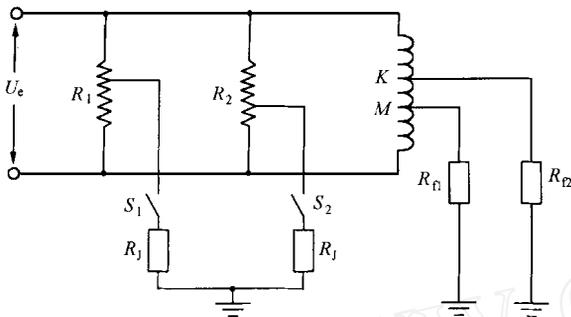


图4 两点接地故障检测原理图

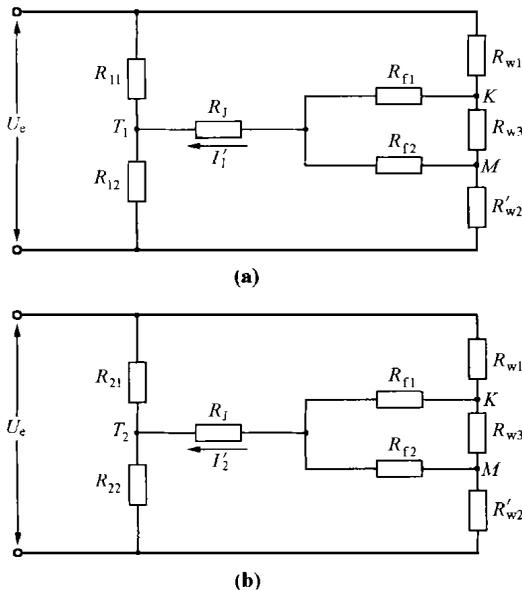


图5 两点接地故障检测电桥等效电路

$$U_1 = \left[R_J + \frac{R_{f2}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} R_{f1} \right] + \left[k + \frac{mR_{f1}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} \right] \left[\left(1 - k - m + \frac{mR_{f2}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} \right) R_w + x(1-x)R \right] U_e$$

其中: $R_w = R_{w1} + R_{w2} + R_{w3}$

$$R_{w1} = kR_w$$

$$R_{w3} = mR_w$$

$$R_{w2} = (1 - k - m)R_w$$

图5经电阻 - Y变换得图6,其中有

$$R_{w4} = \frac{mR_{f1}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} R_w$$

$$R_{w5} = \frac{mR_{f2}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} R_w$$

$$R_{f3} = \frac{R_{f2}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} R_{f1}$$

这样两点接地故障的情况可以等效成一点 K 接地的情况。

一点接地时的 k 变为 $k + \frac{mR_{f1}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w}$

$1 - k$ 变为 $1 - k - m + \frac{mR_{f2}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w}$

$R_J + R_f$ 变为 $R_J + \frac{R_{f2}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} R_{f1}$

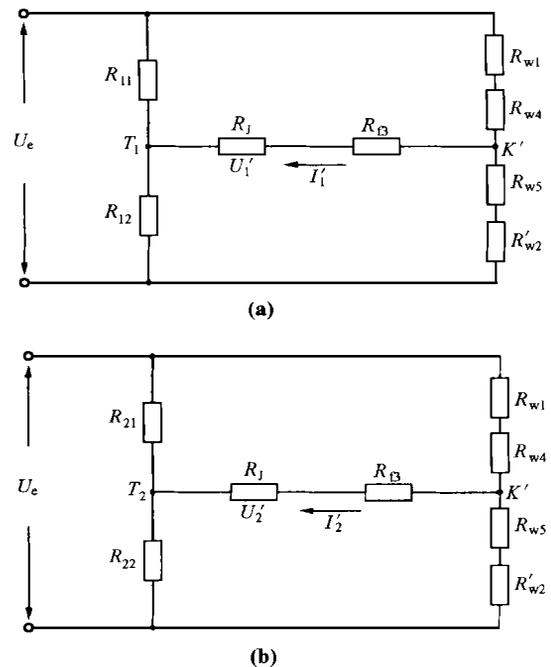


图6 经过 - Y变换后的两点接地故障检测电桥等效电路

解如图6所示等效电桥电路得:

$$\begin{aligned}
 U_2 &= \left[R_j + \frac{R_{f2}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} R_{f1} \right] + \left[k + \frac{mR_{f1}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} \right] \left[1 - x - k - \frac{mR_{f1}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} \right] R_j U_e \\
 U_2 - U_1 &= \left[R_j + \frac{R_{f2}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} R_{f1} \right] + \left[k + \frac{mR_{f1}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} \right] \left[1 - k - m + \frac{mR_{f2}}{R_{f1} + R_{f2} + mR_w} \right] R_w + x(1-x)R U_e \quad (7)
 \end{aligned}$$

忽略 R_w ,

$$\begin{aligned}
 \text{有 } \frac{1}{U_2 - U_1} - \frac{1}{U_2 - U_1} &= \frac{1}{(1-2x)R_j U_e} \cdot \frac{R_{f1}^2}{R_{f1} + R_{f2}} \\
 \text{得 } \left(\frac{1}{U_2 - U_1} - \frac{1}{U_2 - U_1} \right) &(1-2x)R_j U_e = \frac{R_{f1}^2}{R_{f1} + R_{f2}} \quad (8)
 \end{aligned}$$

方程式(8)右端含义可以理解为因为第二点接地的引入而使第一点接地故障的过渡电阻值发生变化,这样就可以利用上式判断出两点接地故障。记不等式左边为 R_{f21} ,判断出一点接地后,记住电压差 $U_2 - U_1$,并计算出 k 和 R_{f1} ,继续检测双电桥检测电阻之间的电压差 $U_2 - U_1$,可计算出左式 R_{f21} 。不等式右边记为 R_{f21} ,在只发生一点接地时 $R_{f2} =$, 右边 $R_{f21} = 0$ 。在理论上只要发生两点接地时就有 $R_{f21} > 0$ 。实际中为提高可靠性, R_{f21} 的整定过程如下, R_{f2} 按第二点接地的最小灵敏度时的过渡电阻 R_{f2} 整定,也可按一点接地的最小灵敏度时的过渡电阻 R_{f2} 整定,这样当 $R_{f21} > R_{f21} = \frac{R_{f1}^2}{R_{f1} + R_{f2}}$ 时判断为发生两点接地故障。可以看出 R_{f21} 的整定值并不是固定的,它随着一点接地时过渡电阻 R_{f1} 值的不同自适应调节整定值,提高了判断两点接地的灵敏度,而且整定值与两接地故障点的位置无关,即不同故障点保护灵敏度是相同的,不存在绕组最小保护范围的问题。

3 计算实例

$$\text{取 } x = \frac{1}{10} \quad U_e = 440V \quad R = 20k$$

$R_j = 95$, 忽略 R_w 。

空冷或氢冷发电机励磁绕组对地绝缘电阻通常为几兆欧级,计算例取 $1M$ 。

正常时双电桥不平衡电压差 $U_z = 33.3mV$ 取 $K_{rel} = 10$, 则当 $U_{21} > 0.33V$ 时(考虑 $U_1 < 20V$ 、 $U_2 < 20V$ 、 $U_{21} < 18V$, 而 12 位 A/D 转换最小分辨率可达 $5mV$, 所以精确测定 $0.33V$ 是完全能达到的)判断为一点接地故障,最小灵敏度的过渡电阻为 $R_{fz1} =$

$99.4k$ 。

整定第二点接地时的最小灵敏度过渡电阻 $R_{fz2} = R_{fz1} = 99.4k$, 如果发生一点接地故障的过渡电阻为 $R_{f1} = 50k$ 时,则整定 $R_{fz21} = 16.7k$, 当 $R_{f21} > R_{fz21}$ 时判断为两点接地。

过渡电阻为 $R_{f1} = 40k$ 时,则整定 $R_{fz21} = 11.5k$, 当 $R_{f21} > R_{fz21}$ 时判断为两点接地。

水冷发电机励磁绕组对地绝缘电阻通常为几千欧,计算例取为 $5k$ 。

正常时双电桥不平衡电压差 $U_z = 4.85V$ 取 $K_{rel} = 1.5$, 则当 $U_{21} > 7.28V$ 时判断为一点接地故障,最小灵敏度的过渡电阻为 $2.7k$ 。

整定第二点接地时的最小灵敏度过渡电阻 $R_{fz2} = R_{fz1} = 2.7k$, 如果发生一点接地故障的过渡电阻为 $R_{f1} = 2.5k$ 时,则整定 $R_{fz21} = 1.4k$, 当 $R_{f21} > R_{fz21}$ 时判断为两点接地。

过渡电阻为 $R_{f1} = 2k$ 时,则整定 $R_{fz21} = 0.85k$, 当 $R_{f21} > R_{fz21}$ 时判断为两点接地。

4 结论

本文提出的发电机励磁回路一点、两点接地保护新原理,没有死区现象,灵敏度与接地点位置无关,励磁绕组各点接地时都有很高的灵敏度。两点接地故障保护判据的整定值按照一点接地故障时的过渡电阻自适应调整,并且整定值与两个接地点之间的绕组匝数无关,提高了两点接地保护的灵敏度。接线简单,不需另外附加的电源装置,灵敏度不受励磁回路对地分布电容影响。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [2] Gan Zhijun, Khincha H P, Elangovan S. New ground fault protection system for the field winding of a brushless generator. *Electric Machines and Power Systems*, 1997, 25(5): 475 ~ 483.

(下转第 54 页)

参考文献:

- [1] 王维俭. 主设备保护的几个理论和运行问题. 电力系统自动化, 1999, (11).
- [2] DL/T 559 - 94, 220 ~ 500kV 电网继电保护装置运行整定规程.
- [3] 王梅义. 电网继电保护应用(第一版). 中国电力出版社, 1999:5.

- [4] DL 400 - 91, 继电保护和安全自动装置技术规程.
- [5] 王梅义. 电网继电保护应用(第一版). 中国电力出版社, 1999:154.

收稿日期: 2000-03-01

作者简介: 常凤然(1967 -), 男, 工程师, 1989年起从事继电保护的计算、运行、管理工作; 赵自刚(1962 -), 男, 教授级高工, 河北电力调度通信中心继电保护科科长; 李海生(1955 -), 男, 高工, 河北电力调度通信中心副主任。

Analysis and solving to the problems of the transformer protection operating in South Power Network in Hebei province

CHANG Feng-ran, ZHAO Zi-gang, LI Hai-sheng, CAO Shu-jiang, ZHANG Hong, ZHOU Ji-lu
(Hebei Electric Power Dispatch & Communication Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: It shows by practical operation of electric power network that the security and reliability of transformer protection is very important. In this paper, it takes the two events happened recently as examples to analyze the problems in the operation of the transformer protection in South Power Network in Hebei province and a countermeasure is proposed to solve these problems. The authors suggest that to solve these problems thoroughly, not only the protection's arrangement, pattern selection, operation mode and setting value, but also the DC system's arrangement and innovation, TA arrangement and system operation mode should be considered together.

Keywords: transformer; relay protection; differential; overcurrent; failure

(上接第 40 页)

收稿日期: 2000-03-08

作者简介: 毕大强(1973 -)男, 博士生, 主要从事电气主设备继电保护研究; 徐振宇(1963 -)男, 博士, 主要从事电气主设备继电保护研究。

A study into a new ground fault protection criterion for field winding of generator

BI Da-qiang, XU Zhen-yu

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084 China)

Abstract: This paper presents a new relaying scheme for the single and double ground faults in the field winding of synchronous generator. It completes the double ground fault protection by using the variation of voltage difference after the single ground fault has been detected by monitoring the difference of voltages of detecting resistance between dual bridge circuits. The new criterion of the single protection eliminates the blind spot with high sensitive and the sensitive is nearly same at different fault positions. The setting of double ground fault is adaptive according to the ground fault resistance of the single one and has nothing to do with the number of windings between two fault positions, so the sensitive is improved.

Keywords: field winding; ground fault; dual bridge circuit; adaptive

《继电器》全体同仁向广大读者朋友问好!