

数字式励磁回路接地保护方案的研究

胡泊, 何奔腾

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对乒乓式励磁回路接地保护, 结合开关自检方法提出了完整的一点接地保护方案; 在两点接地保护方案中估算了开关切换过程中过渡电阻变化对接地点位置计算的影响, 提出了故障位置偏差式两点接地的自适应判据, 为了弥补该判据的缺陷, 提出了结合二次谐波辅助判据的综合方案。

关键词: 发电机励磁回路接地; 自检; 自适应; 保护

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)14-0020-05

0 前言

发电机励磁回路一点接地故障, 是常见的故障形式之一。此时, 励磁绕组与地之间尚未形成电气回路, 所以并不对发电机造成危害。如相继发生第二点接地故障, 则会严重威胁发电机安全。目前的励磁回路一点接地保护主要有: 电桥式、叠加直流电压式、叠加交流电压式和乒乓式等不同原理的保护。其中, 乒乓式保护是一种简单有效的保护原理。乒乓式一点接地保护灵敏度和接地位置无关, 在励磁回路各点接地时都有较高的灵敏度。由于保护反映的是直流分量, 且有一定时间延时躲开关切换的暂态过程, 因此与励磁回路对地分布电容无关。所以采用乒乓式励磁回路一点接地保护装置是有优势的。

不过乒乓式两点接地保护却存在着一些问题。乒乓式两点接地保护是基于故障位置偏差判据的, 一点接地故障后启动该判据, 当测得的接地点位置变化值超过整定阈值时, 则确认为已发生两点接地故障。但是开关切换过程中过渡电阻的变化会使接地点位置的计算产生误差, 造成一定的接地点位置变化, 从而对两点接地的判断产生影响。此外, 该保护还存在两个重要的缺陷: 无法判别同时两点接地和一点接地紧接着第二点接地; 当第一接地点位于绕组端侧时保护无输出, 此时两点接地保护具有100%的死区。

综上所述, 针对乒乓式保护原理存在的问题, 本文估算了过渡电阻变化对接地点位置计算的影响, 给出了故障位置偏差方法的自适应判据, 提出了结合二次谐波电压辅助判据的综合两点接地保护方案, 并且在综合方案中给出了二次谐波方法的自适应判据。

1 一点接地方案

乒乓式励磁回路一点接地保护的设计思想是: 切换电桥两臂电阻值的大小, 使电桥没有一个固定的平衡点, 通过测量回路电阻上的电压量求解过渡电阻和接地位置。具体实现电路有以下两种, 分别如图1(a)^[1]和(b)所示。

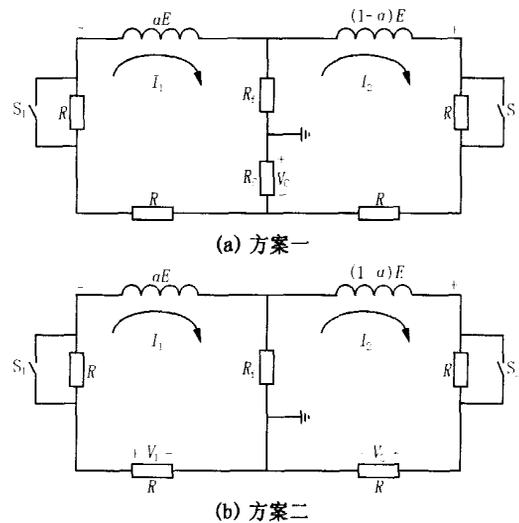


图1 乒乓式一点接地保护原理图

Fig. 1 Schematic diagrams of one-point-to-ground protection using ping-pong type

图1中, R 为高阻桥臂电阻(如 10 k), R_c 为低阻测量电阻(如 200), R_f 为过渡电阻, a 为接地点距绕组左端匝数百分比(绕组接地位置), E 为励磁线圈两端的电压。 S_1 和 S_2 为电子开关。设 S_1 闭合 S_2 断开为状态1, S_1 断开 S_2 闭合为状态2。方案一是通过两种状态下的电压 E 和电阻 R_c 上电压 V_c 来检测转子是否接地; 方案二则是通过两种状态下的桥臂上电压 V_1 和 V_2 来检测的。在实际运行时可

能出现电子开关 S_1 或 S_2 损坏的情况,如果保护装置能够实时检测出,对保护的可靠性是很有利的。对于方案一,在正常运行时,过渡电阻 R_f 为无穷大,由图 1(a)知,不论是状态 1 还是状态 2,电压 V_c 都为零,在电子开关 S_1 或 S_2 损坏时, V_c 也为零,故不能检测出。但方案二由于是检测桥臂上的电压,在状态改变时,电压也改变,由后面的分析知,可以实时检测出电子开关是否完好。故本文把方案二作为转子接地保护的检测电路。下面介绍转子一点接地的检测方法,参见图 1(b),开关在状态 1,2 下分别可以列回路方程如下:

$$\begin{cases} (R + R_f) I_{11} - R_f I_{21} = E_1 \\ I_{11} = -V_{11}/R \\ I_{21} = V_{21}/R \\ E_1 = -V_{11} + 2V_{21} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} (2R + R_f) I_{12} - R_f I_{22} = E_2 \\ I_{12} = -V_{12}/R \\ I_{22} = V_{22}/R \\ E_2 = -2V_{12} + V_{22} \end{cases} \quad (2)$$

由方程组(1)、(2)可以得到过渡电阻 R_f 和接地位置:

$$R_f = \frac{(V_{11}V_{22} - 4V_{12}V_{21})R}{V_{11}(V_{12} - 2V_{22}) + V_{21}(4V_{12} + V_{22})} \quad (3)$$

$$= \frac{V_{11}(V_{12} - V_{22}) + 2V_{12}V_{21}}{V_{11}(V_{12} - 2V_{22}) + V_{21}(4V_{12} + V_{22})} \quad (4)$$

计算出过渡电阻 R_f 就可以决定保护的動作行为。由式(3)和式(4)都可以看到 R_f 与故障点位置无关,灵敏度不随故障点位置改变。一点接地的動作判据为:

$$R_f \leq R_{fdz} \quad (5)$$

R_{fdz} 为一点接地过渡电阻整定值,整定范围通常取 $5 \sim 50 \text{ k}$ 。

显然, S_1 或 S_2 损坏时计算会产生错误。为了检查电子开关是否损坏,本文还测量 S_1 和 S_2 均断开时 V_1 和 V_2 的数值。设 S_1 和 S_2 均断开为状态 3。一个检测环节中,在 1、2、3 状态下分别测量得到电压 $V_{11}, V_{21}; V_{12}, V_{22}; V_{13}, V_{23}$ 。因为开关切换间隔时间短暂,所以认为在一个检测环节中励磁电压不变。如果 S_1 损坏,则状态 1,3 下图 1(b) 的拓扑是相同的,有 $V_{11} = V_{13}$;如果 S_2 损坏,则状态 2,3 下图 1(b) 的拓扑是相同的,有 $V_{22} = V_{23}$ 。所以 $V_{11} = V_{13}$ 和 $V_{22} = V_{23}$ 就构成了开关是否完好的自检条件。但是一个检测环节的时间虽然短暂,过渡电阻和桥臂电阻

的大小还是可能会有变动的,这就改变了电路的拓扑。为了自检条件的严密性,将其改写为: $|V_{13} - V_{11}| < \epsilon_1$ 和 $|V_{23} - V_{22}| < \epsilon_2$ 。其中 ϵ_1 和 ϵ_2 为阈值,均可取 0.1。

结合开关自检的一点接地保护软件流程图如图 2 所示。测量得到 3 个状态下 V_1 和 V_2 的数值后由 $|V_{13} - V_{11}| < \epsilon_1$ 和 $|V_{23} - V_{22}| < \epsilon_2$ 两个自检条件进行开关完好性的检查,若 S_1 和 S_2 都完好,则由式(3)、(4)计算 R_f 和 a ,满足一点接地判据则动作于一点接地信号。

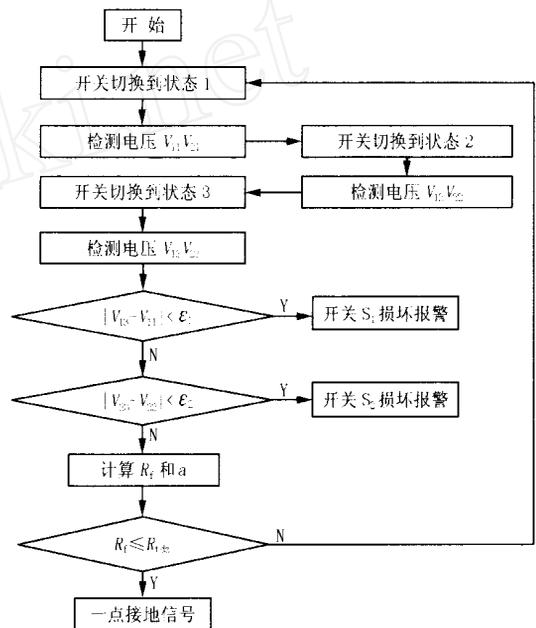


图 2 一点接地保护软件流程图

Fig. 2 Flow chart of one-point-to-ground protection software

2 两点接地方案

如图 3 所示,设转子发生一点接地(过渡电阻 R_{f1} 、接地点 a)后又在 b 处发生接地,过渡电阻为 R_{f2} 。由于第一点接地的 R_{f1} 和 a 已在一点接地保护中算出,在发生两点接地时,状态 1 和状态 2 时各电气量分别有如下的关系:

$$\begin{cases} RI_{11} + R_{f1} I_{f11} = E_1 \\ RI_{11} + R_{f2} I_{f21} = (R + R_{f1}) E_1 \\ I_{f21} = I_{11} - I_{f11} - I_{f11} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} 2RI_{12} + R_{f1} I_{f12} = E_2 \\ 2RI_{12} + R_{f2} I_{f22} = (R + R_{f1}) E_2 \\ I_{f22} = I_{12} - I_{f12} - I_{f12} \end{cases} \quad (7)$$

整理为:

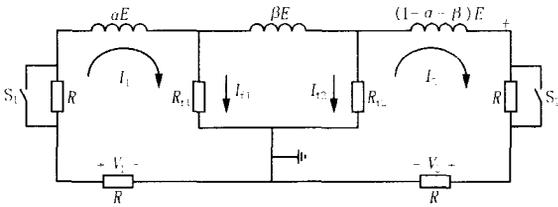


图3 乒乓式两点接地保护原理图

Fig. 3 Schematic diagram of two-point-to-ground protection using ping pong type

$$\begin{cases} (I_{11} - I_{21} - (E_1 - RI_{11})/R_{f1})R_{f2} - E_1 = E_1 - RI_{11} \\ (I_{12} - I_{22} - (E_2 - 2RI_{12})/R_{f1})R_{f2} - E_2 = E_2 - 2RI_{12} \end{cases} \quad (8)$$

考虑到,

$$\begin{cases} E_1 = 2V_{21} - V_{11} \\ E_2 = V_{22} - 2V_{12} \\ I_{11} = -V_{11}/R, I_{12} = -V_{12}/R \\ I_{21} = V_{21}/R, I_{22} = V_{22}/R \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)可得 R_{f2} 和 I_{12} 为:

$$R_{f2} = \frac{[(V_{11} + 4V_{21})V_{12} - (2V_{11} - V_{21})V_{22}] - V_{11}(V_{12} - V_{22}) - 2V_{21}V_{12}}{(V_{11}V_{22} - 4V_{12}V_{21})R - [(V_{12} - 2V_{22})V_{11} + (4V_{12} + V_{22})V_{21}]R_{f1}} \quad (10)$$

$$I_{12} = \frac{-RR_{f1}(-4V_{12}V_{21} + V_{11}V_{22})}{(V_{11}V_{22} - 4V_{12}V_{21})R - [(V_{12} - 2V_{22})V_{11} + (4V_{12} + V_{22})V_{21}]R_{f1}} \quad (11)$$

当检测到 R_{f2} 小于整定值时就判定为转子发生两点接地。在实际应用中,不必知道 R_{f2} 和 I_{12} 的具体数值,只要能够判定是两点接地就行了。事实上对于一点接地的检测公式,在一点接地,没发生两点接地的情况下,检测的结果是基本不变的。若发生两点接地,由于电路的拓扑改变,由一点接地的检测公式得到的检测结果必然会改变,因此一点接地判定后,若发现检测到的接地位置 d_z 改变,也可以判定为两点接地。即当

$$|d_z| > d_z \quad (12)$$

时判定为两点接地。 d_z 是接地位置偏差的整定值。以上就是故障位置偏差两点接地判据的基本原理。

一点接地后,若开关切换过程中过渡电阻发生变化,则由于电路拓扑的改变会影响到 R_{f2} 的检测,使之与实际接地点发生偏差。 d_z 必须要躲过此值,以防止两点接地的误判。

过渡电阻 R_f 由绕组接轴电阻和轴电刷接触电

阻两部分造成。轴电刷接触电阻由于受滑环表面油污、积灰、电刷压力降低等因素影响而增加,尤其当轴电刷架有共振现象时会引起电刷上下抖动,造成接触电阻在大范围内变化。根据文献[3],其变化范围可以达到 $0 \sim 2 \text{ k}$ 。从而导致了 R_f 的变化。以下估算一定量 R_f 的变化可能造成的计算偏差的最大值。

切换到状态 1 时,由方程组(1)可得:

$$= \frac{1}{E_1} \left[\frac{(E_1 - 3V_{21})R_f}{R} + E_1 - 2V_{21} \right] \quad (13)$$

设一点接地故障后,过渡电阻为 R_{f0} ,故障位置为 0 。在此后的求解接地回路方程、比较位置偏差的过程中任取一个环节来讨论。设第 $n(n > 0)$ 个环节计算得到的过渡电阻为 R_{fn} ,故障位置为 n ,过渡电阻变化量 $R_{fn} = |R_{fn} - R_{f(n-1)}|$,需要估算的是电路处于状态 1 时, R_{fn} 可能引起的最大变化量。在分析过程中认为 E_1 不变。可以看到在式(13)中, R_f 和 R_f 是线性关系,斜率随 V_{21} 变化,考虑到 $0 < V_{21} < 1$ 。所以 $R_f = R_{fn}$ 时,有 $V_{21} = 1$ 或者 0 时,

R_{fn} 能带来的最大变化量,此时的 V_{21} 通过计算分别为式(14)所示。

$$V_{21} = \begin{cases} \frac{R_{fn}E_1}{2R + 3R_{fn}} & (n = 1) \\ \frac{(R + R_{fn})E_1}{2R + 3R_{fn}} & (n = 2) \\ \frac{2R_{fn}}{2R + 3R_{fn}} & (n = 3) \\ \frac{R_{fn}}{2R + 3R_{fn}} & (n = 4) \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)代入式(13),相应的得到式(15)的偏差计算式。因此,

$$1_{\max, n} = \frac{2R_{fn}}{2R + 3R_{fn}} \quad (16)$$

同样的,状态 2 时有:

$$2_{\max, n} = \frac{2R_{fn}}{2R + 3R_{fn}} \quad (17)$$

因为本文中接地位置的检测由状态 1、2 下的测量的电压值计算完成,所以第 n 个环节计算偏差最大值可以由下式确定

$$\max, n = \max\{1_{\max, n}, 2_{\max, n}\} = \frac{2R_{fn}}{2R + 3R_{fn}} \quad (18)$$

当 $R = 10 \text{ k}$ 、 $R_{f(n-1)} = 5 \text{ k}$ 以及 $R_{fn} = 2 \text{ k}$ 时, $\max, n = 8.7\%$ 。

若 d_z 按照此数值整定会使保护灵敏度很低。

实际上,绝大多数情况下开关切换过程中电刷接触电阻的变化要远小于 $2k$ 。为了提高灵敏度,本文采用如下自适应的方法。

考虑第 $N(N > 2)$ 个环节,为了提高可靠性,取前 $2 \sim 3$ 次估算得到的 \max 中的最大值加上前一次计算得到的 $|I_{(N-1)}| = |I_{(N-1)} - I_0|$ 作为 $d_{z,N}$,即第 N 个环节的动作值为:

$$d_{z,N} = k_a \left(|I_{(N-1)}| + \max \left\{ \max(N-2), \max(N-1), \max(N) \right\} \right) \quad (19)$$

上式取了3个估算量作比较, k_a 为可靠系数,取 $1.1 \sim 1.3$ 。此外

$$N=1 \text{ 时, } d_{z,1} = k_a \max.1 \quad (20)$$

$$N=2 \text{ 时, } d_{z,2} = k_a \left(|I_1| + \max \left\{ \max.1, \max.2 \right\} \right) \quad (21)$$

式(12)改写为:

$$|I_N| > d_{z,N} (N > 0) \quad (22)$$

这个自适应判据既可以较好地躲过开关切换过程过渡电阻变化对保护的影响,同时又保证了灵敏度的要求。

3 综合两点接地保护方案

由于检测故障位置偏差的判据必须是有一点接地故障在前才起作用,所以无法判别同时两点接地和一点接地紧接第二点接地。同时两点接地和一点接地紧接第二点接地本质上也是绕组绝缘的降低,所以反应于此的乒乓式一点接地保护可以起作用,置一点接地标志。此外由于乒乓式保护测量回路本身的限制,当第一接地点位于绕组端侧时保护无输出,此时两点接地保护具有100%的盲区。

为了弥补上述的缺陷,本文采用二次谐波方法作为辅助判据。当励磁回路发生两点接地故障后,励磁绕组部分线匝被短接,则气隙磁密南北极对称被破坏(短接线匝不对称于横轴时)。根据傅里叶级数的谐波分析,这样一个不对称与横轴的气隙磁密一定包含有包括二次谐波在内的偶次谐波,从而在定子中产生相应的偶次谐波电压。故可以采用检测定子二次谐波含量来检测两点接地。发电机外部故障时也会产生二次谐波,必须通过延时躲过。在正常运行时由于转子偏心等原因,励磁绕组中有微小的基波电压,相应的有定子二次谐波电压。在系统频率改变或振荡时,二次谐波滤波器也会产生不平衡输出,这就造成了动作门槛整定的困难,故该方法

不宜单独采用。但二次谐波在发电机发生一点接地前后是不会变化的,故本文采用自适应的动作门槛。

为提高可靠性,自适应门槛以在一点接地故障判定之前的一段时间的二次谐波电压和实测得到的不平衡二次谐波电压的最大幅值作为门槛,即

$$U_{12}^2 > k_u \max \{ U_{12t}^2, U_{120}^2 \} \quad (23)$$

其中: k_u 为可靠系数,取 $1.1 \sim 1.3$; U_{12t} 为一点接地故障判定前 $t(t > 0)$ 时间段内二次谐波电压的最大幅值; U_{120} 是发电机实测得到不平衡二次谐波电压,可取 0.15% ^[2]。

综合方案的保护逻辑框图如图4所示。

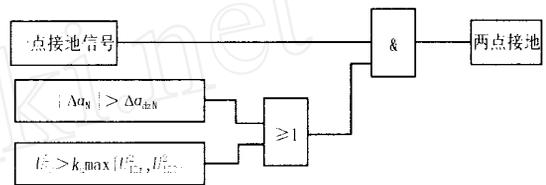


图4 综合方案逻辑框图

Fig. 4 Logic diagram of comprehensive scheme

如图所示,一点接地故障发生后,同时启动两个判据进行故障的判定。二次谐波判据动作而故障位置偏差判据未动作这种情况就包含了同时两点接地,一点接地紧接第二点接地以及第一接地点位于绕组端侧的状况,所以综合方案可以在很大程度上弥补检测故障位置偏差判据的缺陷。

4 结论

本文首先就开关自检给出了完整的一点接地方案。之后在两点接地方案中估算了 R_f 变化对计算的影响,给出了故障位置偏差自适应判据,该判据可以较好地躲过开关切换过程过渡电阻变化对保护的影响,同时又保证了灵敏度的要求。

考虑到故障位置偏差判据的缺陷,提出了结合二次谐波电压辅助判据的综合方案,该方案可以在很大程度上弥补检测故障位置偏差判据的缺陷。

参考文献:

- [1] 王维俭(WANG Wei-jian). 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)(Theory and Application of Electric Equipment Protection, Second Edition) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),1996.
- [2] 王维俭,侯炳蕴(WANG Wei-jian, HOU Bing-yun). 大型机组继电保护理论基础(第二版)(Theory Basis of Large Capacity Sets Protection, Second Edition) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing:Hydraulic and Electric Power Press),

- 1988.
- [3] 高春如 (GAO Chun-ru). 叠加交流电压转子一点接地保护误动的分析 (Analysis of Failure Operation in the One-point Grounding Fault Protection for Field Winding of Generation Superposing AC Voltage) [J]. 继电器 (Relay), 1994, 22 (3):19-23.
- [4] 姚晴林, 刘圣奇, 祖伟 (YAO Qing-lin, LIU Sheng-qi, ZU Wei). 乒乓式发电机转子一点接地保护的研究 (Study on Ping-pong Type Protection for One-point Grounding Fault of Generator Exciting Rotor) [J]. 继电器 (Relay), 1993, 21 (2):7-10.
- [5] 姚翔 (YAO Xiang). 发电机转子一点接地乒乓式微机保

护的研究 (Study on Ping-pong Type Microcomputer Protection for One-point Grounding Fault of Generation Exciting Rotor) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2000, 20(6):27-28.

收稿日期: 2003-11-17; 修回日期: 2004-02-06

作者简介:

胡泊 (1979-), 男, 硕士研究生, 研究领域为电力系统继电保护;

何奔腾 (1959-), 男, 教授, 博导, 研究领域为电力系统继电保护和控制. E-mail: hebt@zju.edu.cn

A study of the digital grounding fault protection scheme for excitation winding of generator

HU Bo, HE Ben-teng

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on the ping-pong type field grounding protection, it presents one-point-to-ground protection scheme by integrating the self-checking method of switches. The two-point-to-ground protection scheme presents self-adapting fault location warp criterion after evaluating the effect on the calculation of fault location made by the change of transient resistance in the process of switching. In order to make up the short coming of location warp criterion, this paper presents a comprehensive scheme which integrates the second harmonic criterion.

Key words: excitation winding grounding fault of generator; self-checking; self-adapting; protection

(上接第 19 页 continued from page 19)

- [9] 邓佑满 (DENG You-man). 配电网优化的理论与算法 (The Optimum Theory and Algorithm of Distribution Network) [M]. 北京:清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1994.

作者简介:

宋轶博 (1978-), 男, 硕士, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用; E-mail: yi-bo-so0537@eyou.com

孙伟 (1980-), 男, 硕士, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用;

苗友忠 (1976-), 男, 博士, 研究方向为变电站综合自动化及智能控制。

收稿日期: 2003-11-14; 修回日期: 2003-12-18

Reactive power optimization with operational limitations of on-load tap changers and shunt capacitors

SONG Yi-bo, SUN Wei, MIAO You-zhong

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For the power system equipped with on-load tap changers and shunt capacitors in electricity market, this paper proposes a sectionized reactive power optimization method, which combines genetic and Alopex algorithm. This method can reduce the power losses effectively under the condition of the constraints of the maximum allowable number of switching operations and voltage percent of pass. Using Genetic Algorithm integrated with Alopex as the solution method, the computation result of the IEEE14 node system demonstrates that the proposed method is feasible.

Key words: power system; reactive power optimization; genetic algorithm; Alopex algorithm