

注入式定子单相接地保护的应用分析

邵能灵,尹项根,胡玉峰,陈浩,陈德树

(华中理工大学电力系,湖北 武汉 430074)

摘要:注入式定子接地保护能单独实现发电机定子100%绕组的保护。在考虑注入电源内阻的基础上,通过对故障电流的详细分析,扩展定子接地保护中电流突变量的概念,采用更加有效的保护动作分量,提高了保护灵敏度。

关键词:定子单相接地保护;注入电源;灵敏度

中图分类号: TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2000)06-0015-04

1 引言

从目前的调查结果看,外加直流电源的定子接地保护运行情况不太理想。进口的外加20Hz电源的保护方案通过在配电变压器二次电阻上迭加交流信号来实现保护功能,设计上比12.5Hz的方案简单,运行情况良好^[1]。随着发电机单机容量的逐渐增大,其对地电容也在增大,保护难度相应增大,注入式定子接地保护的应用将更为广泛。因此,有必要对它的各种动作特性进行分析,以便对其做客观评价,并进行相应的改进。本文在考虑外加电源内阻影响的基础上,分析故障电流的变化情况,对常用保护判据作了简单比较,并提出以流经过渡电阻上的电流分量作为动作分量的保护方案。该方案具有简单方便,易于实现的优点,同时还有很高的灵敏度。

2 注入式定子接地保护原理分析

2.1 保护原理图

考虑电源从中性点注入,保护基本原理见图1。

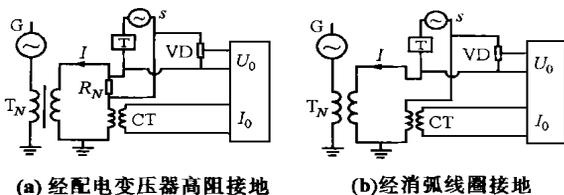


图1 注入电源接于中性点的定子单相接地保护

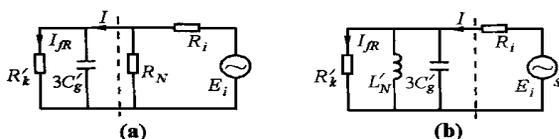


图2 图1的等值电路

图2是其等值电路,可用来分析保护动作行为。图中各参数为: $3C_g$ ——发电机三相对地电容(已折合到副方); R_k ——定子单相接地过渡电阻(同上); R_N ——接地变压器副方电阻; L_N ——发电机中性点消弧线圈(同上); R_i ——电源内阻。

2.2 常用保护判据分析

目前通常使用的保护方案包括电流比较和导纳判据^{[3][4]}。

以外加20Hz交流电源为例,正常运行时,发电机三相对地电容流有小量的20Hz零序电流。发电机发生单相接地故障后,通常认为定子回路零序阻抗将大大减小,20Hz零序电流骤增。若以该电流作为保护动作电流,发生接地故障后保护将能可靠动作^[3]。上述结论在忽略外加电源内阻的影响时是合适的,以中性点经配电变压器副方接电阻接地的发电机为例,如图2(a),正常运行电流:

$$i = E_i / (-jX_c / N^2) = jN^2 E_i / X_c \quad (1)$$

故障后,相当于在发电机对地电容与接地电阻旁并联一个短路电阻 R_k / N^2 ,此时:

$$i = E_i / (-jX_c / N^2) + E_i / (R_k / N^2) = N^2 E_i (1 / R_k - \frac{1}{jX_c}) \quad (2)$$

由于 $|i| > |i_0|$,可见在不计外加电源内阻时,定子接地保护将只存在高电阻接地的动作死区。但是当计及电源内阻的影响时,情况将有所不同。实际上,电源和滤波器T是有电阻的,因此为更全面地分析保护行为,应当计及它们的影响,并以 R_i 表示其值。若令: $R_0 = \frac{R_N \times R_i}{R_N + R_i}$, $E_i = \frac{E_i \times R_N}{R_N + R_i}$, $X_c = X_c / N^2$, $R_k = R_k / N^2$,可得正常运行电流为:

$$i = \frac{E_i}{-jX_c + R_0} \quad (3)$$

发生接地故障后,故障后的电流测量值 i 为:

$$\dot{i} = E_i / \left(\frac{R_k \times (-jX_c)}{R_k - jX_c} + R_0 \right) \quad (4)$$

考虑动作电流增大的条件时,接地电阻应满足如下条件:

$$R_k^3 (2R_0^3 + 2R_0X_c^2) + R_k^2 (3R_0^2X_c^2 - X_c^4) + R_k (2R_0^3X_c^2 - 2R_0X_c^4) - R_0^2X_c^4 < 0 \quad (5)$$

以附录中三峡发电机为例,对中性点经配电变副方接地电阻接地的情况, $R_0 = 0.967$, $X_c = -2.746$: 计算得: $R_k = 3.8989$, 折算至原方 $R_k = 2080.5$ 。即当接地电阻小于2080.5 时,保护动作电流比正常运行的电流值大,但当该电阻值大于2080.5 时,保护动作电流将小于正常运行时的电流值,如表1。对中性点经消弧线圈接地的情况, $R_0 = 8$, $X_L = 0.6533$, 同样计算得一实根 $R_k = 0.0267$, 原方电阻则为14.23, 可见对于对中性点经消弧线圈接地的三峡发电机,只有在接地电阻值低于14.23 的情况下,所测量到的动作电流值才是增大的,如表2。因此,考虑一定的安全系数后,定子接地保护不仅存在高电阻接地的动作死区,还将存在接近上述计算电阻的一段动作死区。

另一方面,故障后定子回路的阻抗将会发生变化,因此故障后所测量到的动作电流相量是不等于正常电流相量的。为了充分利用这种故障前后电流相量的差别,引入导纳判据的概念。

根据导纳计算定义,设 E_c 为已知的测量电压,则导纳方程为:

$$g = \frac{(jX_c - R_0)\dot{I} + E_i}{jE_cX_c} \quad (6)$$

导纳判据只存在高阻接地的动作死区,灵敏度有所提高。但导纳判据需要通过分压器测量电压,与电流判据相比,稍显复杂,同时它的计算精度也要受测量电量 i 和 E_c 两个因素的影响。因此,可以单独采用故障后流经接地电阻的电流分量 i_{fR} 作为保护动作判据。从物理概念来看,导纳 g 与 i_{fR} 的含义是一致的,它们都是从无到有,直接表征接地电阻大小的一个参量。但 i_{fR} 电流判据只利用了一个测量量,与导纳判据相比,由测量误差带来的影响要小一些^{[2][5]}。设故障后测量电流与正常电流间的变化量为 i , 则有关系式:

$$\dot{i}_{fR} = (jX_c - R_0) \dot{I} / jX_c \quad (7)$$

$$g = \dot{i}_{fR} / E_c = [(jX_c - R_0) \dot{I} / jX_c] / E_c \quad (8)$$

上式表明, i_{fR} 电流判据和导纳判据都是以故障

前后测量电流的变化量为基础的。对高电阻接地故障, E_c 近似为常数;对低电阻接地故障, E_c 或 i 都会有较大变化。因此两者的保护灵敏度大致相同。而对 i_{fR} 电流判据来说,不仅有很高的灵敏度,还具有简单方便,易于实现的优点。

2.3 电流突变量判据研究

首先考虑忽略电源内阻的情况,接地故障发生后,根据式(2),流经 CT 的电流变化量应等于流过接地电阻的电流分量 i_{fR} 。实际上,电源内阻的影响是必须要考虑的。这时测量的电流变化量应为:

$$\dot{i} = jX_c \dot{i}_{fR} / (jX_c - R_0) \quad (9)$$

$$\frac{|\dot{i}_{fR}|}{|\dot{i}|} = \frac{\sqrt{R_0^2 + X_c^2}}{X_c} \quad (10)$$

即测量到的电流变化量 i 的幅值是 i_{fR} 的 $X_c / \sqrt{R_0^2 + X_c^2}$ 。可见,发生接地故障后,测量电流中包含的故障分量电流只是 i_{fR} 的一部分,常规电流判据的保护灵敏度将会受到影响。以中性点经消弧线圈接地的发电机为例,有 $R_0 = R_i$, 而对中性点经配电变高阻接地的发电机, $R_0 = \frac{R_N \times R_i}{R_N + R_i}$, 故其测量电流中 i 的比例大于中性点经消弧线圈接地的情况。因此,常规电流判据的注入式定子接地保护方案比较适用于中性点经配电变高阻接地的发电机。若要提高该方案在中性点经消弧线圈接地方式下的保护灵敏度,可以通过以下两条途径:降低外加电源的内阻;适当提高注入电源的频率以增大 X_L , 如表3和表4。对中性点经配电变高阻接地的方式,则应同时降低外加电源的频率和内阻。

就讨论高灵敏度的新判据而言,着眼点应放在更有效的故障电流的应用上。根据上述分析,可以采用故障后流过接地电阻的电流分量 i_{fR} 来作为动作依据,由于只需要一个测量量,在实现上更为简单、直观,同时也具有很高的灵敏度。应用于装置时,应以被测电流的突变量作为计算基础,设:

$$\dot{i} = I_R + j I_I \quad (11)$$

则动作电流实、虚部分量分别为:

$$\begin{cases} I_{fRR} = I_R - R_0 I_I / X_c \\ I_{fRI} = I_I + R_0 I_R / X_c \end{cases} \quad (12)$$

$$I_{fR} = \sqrt{I_{fRR}^2 + I_{fRI}^2} \quad (13)$$

新方案对不同方式接地的发电机都能取得很高的保护灵敏度,而无须通过降低电源内阻或改变注入频率等复杂的措施来提高保护灵敏度。

表1 中性点经配电变压器高阻接地的发电机电流值
($R_i = 8$)

$R_k(k)$	正常	1	2	2.5	3	5	7	8
电流值								
I	1.246	1.505	1.253	1.218	1.201	1.188	1.194	1.197
I		1.173	0.699	0.581	0.497	0.315	0.231	0.203
I_{FR}		1.243	0.741	0.616	0.527	0.334	0.245	0.216

表2 中性点经消弧线圈接地的发电机电流值($R_i = 8$)

$R_k(k)$	正常	0.01	0.02	1	3	5	7	8
电流值								
I	3.738	3.741	3.733	3.648	3.703	3.717	3.723	3.725
I		0.304	0.303	0.098	0.035	0.021	0.015	0.013
I_{FR}		3.740	3.726	1.201	0.428	0.259	0.185	0.162

表3 中性点经消弧线圈接地的发电机电流值
($R_i = 2$)

$R_k(k)$	正常	1	3	5	7	8
电流值						
I	14.259	13.165	13.808	13.978	14.056	14.080
I		1.346	0.495	0.302	0.217	0.190
I_{FR}		4.334	1.594	0.972	0.699	0.613

表4 中性点经消弧线圈接地的发电机电流值
($R_i = 8, f = 45\text{Hz}$)

$R_k(k)$	正常	1	3	5	7	8
电流值						
I	0.676	3.039	2.214	1.758	1.474	1.370
I		2.987	2.16	1.691	1.388	1.274
I_{FR}		3.036	2.196	1.719	1.412	1.296

3 注入式定子接地保护判据研究

3.1 算法研究

以常用傅氏算法为例,假设输入频率为 w ,并令 $w/w_0 = p$,则该算法能滤掉除 $p = 1$ 和 $p = 11$ (只讨论 $p < 12$ 的情况)以外的其它整次谐波分量。就注入式定子接地保护而言,当低频电压源是12.5 Hz时,傅氏算法能有效地清除12.5 Hz的所有倍频干扰信号(包括50 Hz工频)的影响。但对20 Hz电流,由于50 Hz的奇次谐波分量都是20 Hz的分数次谐波,将不能有效地滤除,对保护产生很大影响。一种直接有效的办法是采用提取10 Hz频率的二次谐波分

量的傅氏计算来滤除各种干扰。这样不仅20 Hz分量能有效地提取出来,而且其它所有10 Hz的倍频信号(包括50 Hz工频)也能可靠滤除。

3.2 主判据

正常运行是没有接地电阻的, I_{FR} 为0。接地故障后, I_{FR} 大于0,取定值 >0 ,有主判据如下:

$$I_{FR} > \quad (14)$$

为保证动作的正确性,可以采用“多点表决法”,即在连续 m 次计算中有 n ($n = m$)次满足上式才判定为定子接地故障,并根据 I_{FR} 的大小决定告警或跳闸。另一方面,许多发电机在运行过程中,绕组对地绝缘水平是逐渐下降的,最后的绝缘损坏可能要持续很长的时间。因此,为了对待这类故障,需要增加一个辅助判据。

3.3 辅助判据

采用常规电流判据作为辅助判据,设高、低定值分别为 $I_{set, h}$ 和 $I_{set, l}$ 。经电流互感器以及数字滤波后,得相应频率的电流 I 。由此有如下动作方程:

$$(1) \text{ 延时发信: } |I - I_{set, l}| > 0 \quad (15)$$

$$(2) \text{ 延时跳闸: } |I - I_{set, h}| > 0 \quad (16)$$

4 结论

对注入式定子接地保护的研究通常是以忽略电源内阻为基础进行的。本文在考虑外加电源内阻影响的基础上,分析了故障电流的变化情况,并提出以流经过渡电阻上的电流分量作为动作分量的保护方案。基于过渡电阻电流分量的微机定子接地保护方案由于采用了更加有效的电流变化量,提高了保护灵敏度,节省了现场调试量。计算表明新方案具有较好的效果,能够满足现代大型机组对接地保护的要求。

附录

本文选用的三峡发电机参数为:定子每相对地电容 $C = 1.81 \mu\text{f}$,配电变压器变比 $N = 23.1$,接地电阻 $R_N = 1.1$ 。中性点消弧线圈采用欠补偿方式,补偿系数 $K = 1.2$,电源内阻 $R_i = 8$ 。

参考文献:

- [1] 大机组继电保护调查报告. 电力自动化设备, 1996, (5).
- [2] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术. 水利电力出版社, 1995.
- [3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用. 中国电力出

版社,1997.

- [4] 周强,易先举等. 三峡左岸电站发电机-变压器组保护方案. 电力系统自动化,1999,(11).
- [5] 尹项根,陈德树等. 故障分量差动保护. 电力系统自动化,1999,(11).

收稿日期: 1999-12-02

作者简介: 邵能灵(1972-),男,博士生,研究领域为大机组保护; 尹项根(1956-),男,博导,主要从事继电保护、配网自动化的研究。

Analysis and application of injection voltage scheme against generator stator ground faults

TAI Neng-ling, YIN Xiang-gen, HU Yu-feng, CHEN Hao, CHEN De-shu
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The stator ground fault protection with injection voltage can provide 100% winding's protection. Based on detailed analysis of fault current with the internal resistance of voltage source considered, the more effective fault contribution current is induced, and the application of it is also highlighted, which can obtain higher sensitivity.

Keywords: stator ground fault protection; injection voltage; sensitivity

(上接第6页)

采样率是16点/周,连续计算、判断7点,如果有5点电流满足式(10),就判为母线内部故障,这样故障检测时间为5~7ms。

对于双母线系统,利用式(10)分别进行大差和各段母线的小差电流计算、判断,大差电流计算使用母线上除母联和分段外所有连接元件,作为故障启动元件。小差电流计算用各段母线上所有连接元件,作为故障选择元件。只有大差、小差同时动作,才启动母线保护出口跳闸回路。

5 结论

基于采样值算法的计算机保护方案已成功运用于快速母线保护、光纤电流差动的线路保护和变压器保护中,并有大批基于此原理的保护装置应用于实际电力系统中。实践证明,这是一种切实可行的方案。

参考文献:

- [1] 陈德树. 计算机继电保护原理及技术. 水利电力出版社,1992.
- [2] 陈德树等. 采样值电流差动微机保护的一些问题. 第六届全国继电保护学术研讨会论文集,1996,11.
- [3] 程利军. 广东茂名500kV变电站220kV微机母线保护装置的研究. 继电器,2000,(2).
- [4] 程利军等. 自适应式微机母线保护装置的研究. 电网技术,1996,(9).

收稿日期: 2000-01-04; 改回日期: 2000-02-18

作者简介: 程利军(1966-),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为计算机在电力系统继电保护及自动控制中的应用; 杨奇逊(1937-),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事电力系统继电保护与自动化的研究开发与教学工作。

The research of the sampling arithmetic for numeric busbar protection

CHENGLi-jun, YANG Qi-xun

(Beijing North China Electric Power University, Beijing 100085, China)

Abstract: The reliability of busbar protection has influenced the safe and stable operation of electric power system. Analyzed the criteria of busbar protection, the sampling arithmetic used for numeric busbar protection is presented in this paper. Using this theory, the high speed for operation and stability for CT saturation of busbar protection is satisfied. The theories for voltage protection, charging protection and current break failure protection are also introduced. Hundred of protections using the sampling arithmetic have been served in electric power system.

Keywords: numeric busbar protection; sampling arithmetic; slope for differential relay