

控制电缆的分布电容对继电保护的 影响及防范措施

吴剑鸣, 严 正

(上海交通大学 电气工程学院, 上海 200030)

摘要: 通过对一起 500 kV 变电站高压并联电抗器保护误跳闸事故的调查分析, 说明了控制电缆对地分布电容对继电保护的影响。根据对误跳闸事故的理论分析作了模拟直流正电源接地、模拟直流正母线和负母线对地之间迭加交流电源 3 个试验, 结果表明: 在发生直流系统接地或误将交流串入直流系统时, 就会通过控制电缆的分布电容构成回路, 产生电容电流, 引起一些动作值较低的灵敏继电器发生误动作。误动作取决于 3 个因素, 即电缆对地分布电容值的大小、继电器的动作值大小及外界干扰因素, 并据此提出了防范措施。

关键词: 控制电缆; 分布电容; 继电保护; 防范措施

中图分类号: TM 711

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)11-0115-04

随着继电保护技术的发展, 集成电路保护和微机保护在电力系统中的应用越来越广泛。在 220 kV 及以上变电站中, 所有由开关场引入控制室继电保护设备的交流电流、电压和直流跳闸等回路都可能由开关场引入干扰电压到基于微电子器件的继电保护设备, 因此二次回路要采用带屏蔽层的电缆, 且要求屏蔽层在开关场和控制室两端同时接地。电缆的芯线和屏蔽层之间存在有分布电容, 电缆越长, 分布电容效应越明显。由于屏蔽层两端接地, 实际上这种分布电容也就是电缆芯线对地之间的分布电容。

在直流系统受到某些干扰时, 如发生直流接地或交流电源串入到直流回路时, 由于长电缆对地分布电容效应的存在, 往往可能导致一些灵敏保护继电器的误动作^[1]。在某 500 kV 变电站发生的一起高压并联电抗器保护误跳闸事故就充分说明了这一点。

1 事故情况介绍

在该 500 kV 变电站中, 一条装设有高压并联电抗器的 500 kV 线路开关发生跳闸。值班人员对继电保护信号进行检查时发现高压并联电抗器保护中本体保护的跳闸单元有出口掉牌信号, 除此以外, 未发现其它保护动作信号。运行人员对高压并联电抗器本体进行检查, 未发现异常情况; 从录波图上也未看出故障电流或故障电压波形, 说明系统当时并没有事故发生, 跳闸前也无人在该条线路的线路保护和高压并联电抗器保护回路上进行工作。

2 事故原因分析

事故发生后, 保护专业人员迅速组织对高压并联电抗器保护进行了检查。检查的重点在其保护的

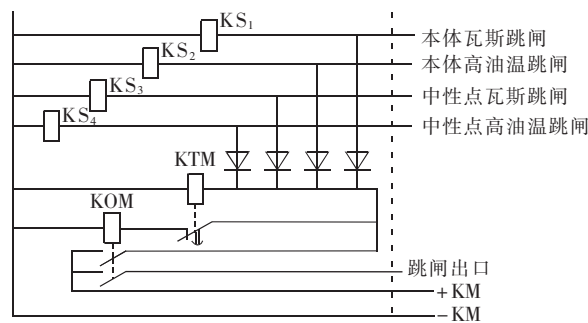


图 1 本体保护回路图

Fig.1 Protective circuits

KS₁、KS₂、KS₃、KS₄ 为掉牌继电器, 指示本体保护动作信号, 跳闸时这 4 只继电器都未掉牌; KOM 为本体保护出口中间继电器, 其触点启动本体跳闸单元; KTM 为时间继电器, 其作用是在接收本体跳闸信号后, 无论本体跳闸信号闭合时间的长短, 都使 KOM 保持一固定的动作时间, 保证开关可靠跳闸。

对高压并联电抗器本体保护进行检查试验, 未发现在继电保护和二次回路中有足以引起保护误动作的缺陷。但由于本体保护的跳闸单元确有出口掉牌信号, 则从本体保护误出口的可能性非常大。由于能同时启动跳闸单元 3 的跳闸出口继电器和掉牌继电器的, 只有图 1 中所示 KOM 继电器的一对触点, 从回路上看基本上能认定 KOM 继电器触点闭合引起动作的可能性非常大。

保护专业人员在检查时发现了 3 点情况。

a. KOM 动作电压过低, 动作值为 DC 28 V, 在额定电压下其动作时间为 3 ms。

b. 本体保护继电器的输入回路是由长电缆从远方引来的空触点启动, 电缆长度约为 500 m, 为变电站内最长的二次控制电缆。该电缆为屏蔽电缆, 屏蔽层两端分别在开关场和控制室接地。

c. 事故跳闸的同时,变电站直流系统发生了波动,这从直流绝缘监视装置发出的信号可以证实。

由此经再三推敲,只能作这样的假设:因引入本体信号的控制电缆很长,电缆的芯线对屏蔽层(屏蔽层两侧接地)存在较大的分布电容。在直流正电源接地或交流电源串入直流回路时,会由于长电缆对地分布电容的作用引起继电器动作。具体分析后认为有 3 种情况,其中的每一种情况都可能引起 KOM 的动作出口。

a. 变电站直流电源(蓄电池)正母线接地。发生接地后,变电站的直流电源通过 KOM 的线圈对电缆芯线与屏蔽层之间的分布电容充电,在其线圈中有电容充电电流流过。若充电电流足够大,充电时间足够长,就有可能使动作较灵敏的 KOM 的触点瞬时闭合一下,触点一旦闭合,其线圈就会通过自身的一对触点以及 KTM 的一对触点构成自保持回路,使动作保持一段时间(保持时间为 KTM 的整定时间),从而启动跳闸出口回路,引起断路器跳闸。

b. 对地交流电源串接到直流电源系统正母线上。如果有交流电源串接到直流电源系统正电源侧,就可以通过 KOM 的线圈、蓄电池以及电缆芯线与屏蔽层之间的分布电容构成回路,KOM 线圈就有电容电流流过。若电容电流足够大,就可能启动 KOM,使其触点抖动。而只要 KOM 触点一旦闭合,也会通过本身的一对触点和 KTM 一对触点构成自保持回路保持一段时间(保持时间为 KTM 的整定时间),从而启动跳闸出口回路,引起断路器跳闸^[3]。与上一种情况不同的是,只要交流电源不消失,在 KOM 和 KTM 都返回后,会再次重复上述动作过程,直到交流电源消失。

c. 对地交流电源串接到直流电源系统负母线上^[2]。如果有交流电源串接到直流电源系统负电源侧,就可以通过 KOM 的线圈和电缆芯线与屏蔽层之间的分布电容构成回路,线圈有电容电流流过。发生与 b 同样的情况。

上述 3 种情况到底是哪种,是否都有可能,需要通过试验进行验证。

3 试验

3.1 模拟直流正电源+KM 接地试验

图 2 所示为模拟直流正电源+KM 接地试验,图中 R_1 、 R_2 为直流系统对地绝缘电阻。

变电站直流电压为 110 V,+KM 对地为 +55 V,-KM 对地为 -55 V,正常情况下 A、B、C、D 点对地电位为 -55 V。将+KM 对地短接,则+KM 对地电位变为 0 V,-KM 对地电位变为 -110 V,A、B、C、D 点由于电容的作用,对地电位不能突变,在刚开始短路的瞬间仍为 -55 V。这样在刚开始短路的瞬间在继电器线圈的两端就产生了 55 V 的电压,随后通过继电器线圈对电容进行充电,即 A、B、C、D 点对地电位由 -55 V 逐渐变为 -110 V,加在继电器线圈两

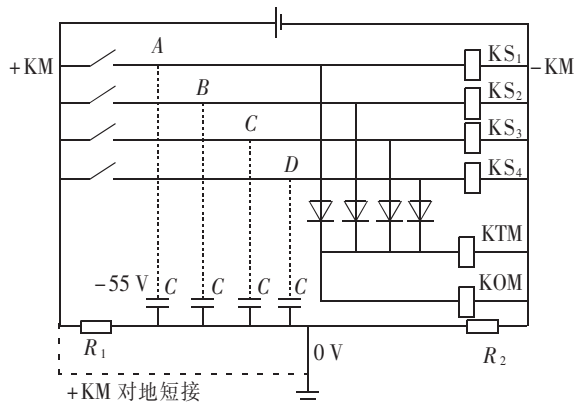


图 2 模拟直流正电源接地试验

Fig.2 Simulation of DC positive bus grounding fault
端的电压也由 -55 V 逐渐变为 0 V。用示波器观察加在 KOM 两端的电压,其波形如图 3 所示。

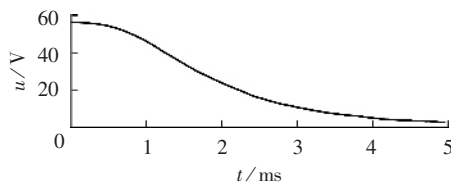


图 3 用示波器观察到的加在继电器 KOM 线圈上的电压波形

Fig.3 Voltage exerted on coil of relay KOM,observed on oscillograph

若将直流试验电源增加到 220 V 时,KOM 动作,而掉牌继电器动作值较高,所以未动作。这与故障时情况相同。但由于该变电站直流为 110 V,达不到动作时要求的直流系统电压 220 V。故可以判定本次故障中,由于直流正电源接地不足以引起保护误动,即故障不是由直流正电源接地的原因造成的。

3.2 模拟直流正母线对地之间迭加交流电压

图 4 所示为模拟直流正母线对地之间迭加交流电源试验。在直流正母线对地之间迭加一工频交流电压,交流电压由小逐渐加大。当交流电压达到 100 V 时,KOM 动作,本体保护的動作情况也同当时的跳闸情况完全一样,即只有出口继电器动作,本体掉牌不动作。将交流电压增加到 220 V 时,其动作情形仍然一样。这说明如果将所用的交流电误碰到直流正母线侧,就有可能发生跳闸事故。

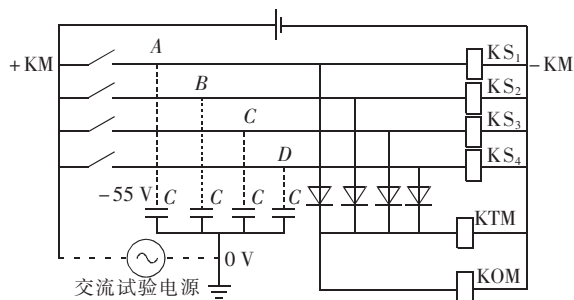


图 4 在直流正母线与地之间迭加一交流电源

Fig.4 AC current exerted between DC positive bus and ground

3.3 模拟直流负母线对地之间迭加交流电压

图 5 所示为模拟直流负母线对地之间迭加交流电源试验。

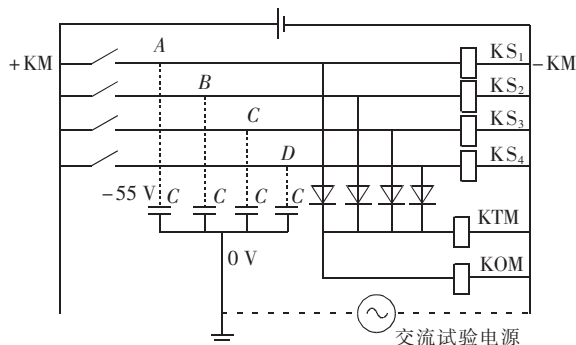


图 5 在直流负母线与地之间迭加一交流电压

Fig.5 AC current exerted between DC negative bus and ground

在直流负母线对地之间迭加一工频交流电压,电压由小逐渐加大。当交流电压也在达到 100 V 时,KOM 动作,本体保护的動作情况同当时的跳闸情况也完全一样,即只有出口继电器动作,本体掉牌不动作。将交流电压增加到 220 V 时,其动作情形也仍然一样。这说明如果将所用的交流电误碰到直流负母线侧,也有可能发生事故跳闸。

上述试验结果表明,本次故障中,由于直流正母线接地引起的电缆对地分布电容的充电电流不足以使继电器动作;而在直流系统上加入交流电源时,不论加在直流正电源侧还是负电源侧,只要交流电压达到 100 V 以上,都可能引起继电器出口动作,使断路器发生跳闸。

事后查明,当时确实有其他工作人员误将交流电碰到直流负电源上,引起高压并联电抗器的 500 kV 线路开关跳闸。试验中对这根长电缆的分布电容值进行了实测,测量结果为每根芯线对地电容值均约为 0.115 μF ,4 根芯线总的对地分布电容值为 0.46 μF 。

4 控制电缆对地分布电容引起继电器误动的回路分析

上述试验表明,引至开关场所的长电缆确实在其芯线对屏蔽层之间有较大的分布电容,而当电缆两端的屏蔽层接地后,这种芯线对屏蔽层的分布电容就是电缆芯线对地分布电容。在发生直流系统接地时或误将交流串入直流系统时,就会通过这种分布电容构成回路,产生电容电流,引起一些动作值较低的灵敏继电器发生误动作^[3-4]。进一步分析有 5 种情况。

4.1 直流系统正电源接地

直流正电源(图 6 中 A 点)突然对地短路时,蓄电池以其 1/2 的直流电压通过继电器线圈对电缆分布电容充电。这实际上是一个简单的直

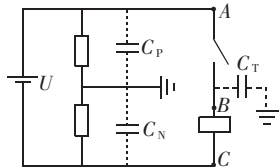


图 6 电气回路图

Fig.6 Electrical circuit

流激励下的零状态响应。

从发生直流正电源接地的瞬间开始,在继电器线圈上的电压 u_R 随时间 t 的变化关系为

$$u_R(t) = \frac{U}{2} e^{-t/RC_T}$$

式中 R 为继电器的线圈阻值; C_T 为电缆分布电容值。

在 $t=0$ 时,加在继电器线圈上的电压 u_R 最大,为 $U/2$,以后便随着时间 t 逐渐衰减。从式中可以看出:如果继电器的动作电压高于变电站直流电压的一半(即高于 $U/2$)时,继电器便不会发生误动作;如果继电器的动作电压低于变电站直流电压的一半(即低于 $U/2$)时,就有可能发生误动作。

电缆越长,分布电容 C_T 就越大,电压衰减得也就越慢。只要加在继电器线圈上的电压在衰减过程中高于继电器动作值的时间足够长而超过了继电器的动作时间,则继电器就会发生误动作。

4.2 继电器线圈一侧接地

当继电器线圈一侧(图 6 中 B 点)突然接地时,此时蓄电池以 $U/2$ 的直流电压通过继电器线圈对直流系统分布电容 C_P 和 C_N 充电。加在继电器线圈上的电压 u_R 随时间 t 的变化关系为

$$u_R(t) = \frac{U}{2} e^{-\frac{t}{R(C_P+C_N)}}$$

式中 C_P 、 C_N 为变电站直流正、负母线对地分布电容。

在 $t=0$ 时,加在继电器线圈上的电压 u_R 最大,为 $U/2$,以后便随着时间 t 逐渐衰减。从式中同样可以看出:如果继电器的动作电压高于变电站直流电压的一半(即高于 $U/2$)时,继电器便不会发生误动作;在继电器的动作电压低于变电站直流电压的一半(即低于 $U/2$)时,就有可能发生误动作。

C_P 和 C_N 越大,电压衰减得也就越慢。只要加在继电器线圈上的电压在衰减过程中高于继电器动作值的时间足够长而超过了继电器的动作时间,则继电器就会发生误动作。从直流系统正、负电源侧引向开关场的电缆芯线越多,电缆越长,则分布电容 C_P 和 C_N 越大。

4.3 对地交流电源串入直流正、负母线侧

当有对地交流电源串入直流正电源侧(图 6 中 A 点)或负母线侧(图 6 中 C 点)时,就可以通过继电器线圈、蓄电池以及电缆分布电容构成回路。

整个回路的阻抗为

$$Z = R + 1/(j\omega C_T)$$

加在继电器线圈的电压为

$$u_R = u_s / [1 + 1/(j\omega RC_T)]$$

u_s 为串入的交流电压,控制电缆的分布电容 C_T 越大,加在继电器线圈上电压的有效值就越大。继电器线圈上的电压波形如图 7 所示。

若加在继电器线圈上的电压 u_R 在变化过程中高于继电器动作电压 u_D 的时间为 t_0 ,只要 t_0 足够长,超过继电器的动作时间,则继电器就会发生误动作。

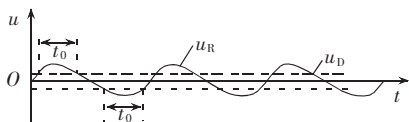


图 7 继电器线圈上的电压波形

Fig.7 Voltage waveform of relay coil

4.4 对地交流电源串入继电器线圈一侧(靠电缆侧)

当有交流电源串入继电器线圈一侧(靠电缆侧,即图 6 中 B 点)时,就可以通过继电器线圈和直流负电源侧对地分布电容 C_N 构成回路(直流负电源侧对地绝缘电阻很大,可以忽略)。

整个回路的阻抗为

$$Z = R + 1/(j\omega C_N)$$

加在继电器线圈的电压为

$$u_R = u_S / [1 + 1/(j\omega RC_N)]$$

控制电缆的分布电容 C_N 越大,加在继电器线圈上电压的有效值就越大。

加在继电器线圈上电压波形也如图 7 所示。同样,若加在继电器线圈上的电压 u_R 在变化过程中高于继电器动作电压 u_D 的时间为 t_0 ,只要 t_0 足够长,超过继电器的动作时间,则继电器就会发生误动作。

5 防范措施

500 kV 变电站一次设备多采用一个半开关结线方式,由于 500 kV 设备之间安全距离大,设备数量多,主变压器特别是线路并联高压电抗器距离控制室较远,二次控制电缆长度有时长达 400~500 m,其二次控制电缆对地分布电容效应尤为明显。忽视控制电缆分布电容的影响,不注意采取防范措施,往往会酿成继电保护误动事故。

从前面的分析不难看出,电缆对地分布电容的影响致使动作灵敏的继电器误动作取决于 3 个因素:

- 电缆对地分布电容值的大小;
- 继电器动作电压值的大小;
- 外界干扰因素。

5.1 减小控制电缆的分布电容值

第一,尽可能将二次电缆的长度控制在一定长度范围内。目前设计规程对此并无明确规定,原则上不宜超过 400 m。在变电站设计时,对于面积较大的变电站,可采取多个保护小室设计方式^[5];如果只采用一个保护室时,应尽可能将保护室或主控楼选在变电站地理中心位置^①。第二,变电站内户外高压配电装置采用封闭式组合电器(GIS)配电装置,可有效减小变电站占地面积,减少二次电缆的长度。第三,不同用途的电缆分开布置以减少分布电容效应;第四,通过光纤跳闸通道传送跳闸信号以消除电缆的分布电容效应^[5]。

5.2 提高直流中间继电器的动作值

变电站一旦建成,一次设备的位置就固定下来了,从控制室到这些一次设备的电缆长度也确定下来,基本上不可改变,因此要改变电缆对地分布电容值的大小是很困难的。有效的防范措施就是提高继电器

的动作值。为了追求灵敏度而一味降低继电器的动作值(有些从国外进口的保护有这种现象)是不可取的。事故中 KOM 动作电压只有 28 V,比变电站直流电压的一半还低得多,显然不能满足运行中的安全要求。试验表明,换一只动作电压为 60 V 的继电器,即使将试验中的交流电压加到 300 V,也不会使继电器误动作。因此,可选用动作电压较高^[6]且动作速度快的中间继电器,这样既能保证安全性,又能保证灵敏度。此外,要注意控制回路直流电压的选取,48 V 直流回路不宜延伸至户外。

5.3 尽量避免外界干扰因素的影响

在进行二次电缆的设计和施工时,要避免在同一根二次电缆同时混有交、直流回路,强、弱电电缆之间要进行隔离。端子排排列设计时,在交流和直流回路之间宜采用一个空端子进行分离。

6 结论

在由静态继电器构成的继电保护回路中,当发生直流系统接地或误将交流串入直流系统时,继电器线圈就会通过控制电缆的分布电容构成回路,产生电容电流。该电容电流能否引发继电器误动作,取决于电缆对地分布电容值和继电器的动作值。其防范措施主要从 3 个方面考虑:减小二次电缆的分布电容、选用动作值较高的继电器以及尽量避免外界因素对直流系统产生干扰。

参考文献:

- [1] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [2] 周剑,聂凯生. 交流量串入直流控制回路造成保护误动的分析和对策[J]. 电力自动化设备,2001,21(12):60-62.
ZHOU Jian, NIE Kai-sheng. Analysis and solutions of misoperation when AC flows into DC control circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(12):60-62.
- [3] 康鹏,阳东升,李永忠. 电网中断路器异常跳闸事故分析[J]. 南方电网技术研究,2005,1(4):22-40.
KANG Peng, YANG Dong-sheng, LI Yong-zhong. Analysis on unusual-tripping faults of circuit breakers in a power grid[J]. Southern Power System Technology Research, 2005, 1(4):22-40.
- [4] 布列克勃恩 J L. 继电保护应用[M]. 陈志强,译. 北京:水利电力出版社,1984.
- [5] 宋继成. 220~500 kV 变电所二次接线设计[M]. 北京:中国电力出版社,1996.
- [6] 杨泽宇. 变电站直流系统设计方案的合理选择[J]. 电力建设,1996,17(8):16-18.
YANG Ze-yu. Selection of design schemes of substation DC system[J]. Electric Power Construction, 1996, 17(8):16-18.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

吴剑鸣(1967-),男,安徽桐城人,高级工程师,硕士研究生,主要从事电网技术管理工作(E-mail:wujm@ahpec.com.cn);
严 正(1964-),男,江西上犹人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统及自动化研究。

① 国家电力公司.“防止电力生产重大事故的二十五项重点要求”继电保护实施细则. 国电调[2002]138号文,2002.3.

Influence of control cable distributing capacitance on protection and its countermeasures

WU Jian ming, YAN Zheng

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The influence of the distributing capacitance of control cables on relay protection is explained by analyzing a faulty tripping of high voltage shunt reactor protection in a 500 kV sub-station. Based on the theoretical analysis, three simulative experiments are carried out: DC positive bus grounding fault, AC current exerted between DC positive bus and ground, and AC current exerted between DC negative bus and ground. The results show that, in above experimental conditions, the capacitance current introduced by the distributing capacitance of control cables leads to the misoperations of sensitive relay with low action threshold. The decisive factors are the level of distributing capacitance, the action threshold, and the environmental interference. The countermeasures are proposed.

Key words: control cable; distributing capacitance; relay protection; preventive measures