

从一次变压器差动保护误动的联想

史建增, 刘建敏, 刘长利, 高云飞

(北京安通尼电子科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 电力系统运行中继电器保护误动的原因很多, 其中谐波电流注入到系统中, 会给电网运行造成一定的危害, 并由此可能引发继电器保护误动。在现场, 对中频电炉产生的谐波电流进行了测试, 对谐波电流造成的保护误动进行了分析。并联电容器对谐波有一定的放大作用, 当系统参数符合电流谐振条件时系统将产生谐振, 将严重影响继电器保护的正确动作。为此, 建议在谐波源处增设谐波治理装置或改变系统的 LC 参数避免谐振的出现, 微机继电器保护在原理设计上应避免谐波因素的影响。

关键词: 差动保护; 谐波; 电力系统; 电能质量; 动作分析

The association of a transformer differential protection mal-operation

SHI Jian-zeng, LIU Jian-min, LIU Chang-li, GAO Yun-fei

(Beijing Autony Electronic Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: There are many reasons in the operation of power system relay protection maloperation. Thus harmonic current injects into the system and does harm to the power grid, which may lead to the wrong operation of relay protection. In the field, harmonic current generated by intermediate frequency electric furnace is tested and the protection of harmonic currents caused by wrong operation is analyzed. Shunt capacitors have a certain amplification to harmonic currents. When the system parameters accord with the resonance conditions, the system will produce resonance, which will seriously affect the right action of the relay protection. Harmonic source control device is advised or the system parameters of the LC resonator are altered to avoid resonance. Microcomputer relay protection is designed according to the principles of avoiding the effect of harmonic factors.

Key words: differential protection; harmonic current; power system; power quality; motion analysis

中图分类号: TM772 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)07-0132-04

0 引言

随着国民经济对电力的不断需求, 谐波的污染现象依然存在。早在 1993 年国家已制定了“电能质量公用电网谐波”GB/T14549-93 的国家标准, 并于 1994 年 3 月 1 日开始实施。但在电能的使用中仍然存在着谐波电流的影响, 除了给设备运行带来许多不良影响外还可能影响继电器保护的正确动作, 这给工农业生产带来一定的损失。

先将差动保护误动分析回顾一下, 以作引玉。因现场运行设备状态、系统参数及用户的电力电子装置技术参数不详, 因此给定量分析带来困难。

1 跳闸经过及变电站概况

1.1 跳闸经过

某变电站 2008 年 8 月 12 日凌晨 1# 变差动保护动作, 之后 9 月 11 日 4: 37 分 1#、2# 变压器差动保护又分别动作。现将 08 年 9 月 11 日跳闸经过作

以说明。9 月 11 日 1# 变压器差动保护动作跳变压器两侧开关, 瞬间后 2# 变压器差动保护动作跳 2# 变压器两侧开关, 造成全站停电。随后检查保护装置动作记录 1#、2# 变差动动作时间分别是 4 时 37 分 19 秒 735 毫秒, 和 4 时 37 分 19 分 805 毫秒, 两套保护保护装置动作之间仅差 $805-735=70$ ms。

保护装置采用 AST-211 型 订货 2004 年 6 月
差动保护定值: (1#、2# 变压器)

差速断 = 32.9 A

最小差动动作值 = 2.1 A

最小制动值 = 4.12 A

比例制动系数 = 0.5

二次谐波制动系数 = 0.2

差流告警 = 1.26 A

保护跳闸后检查变压器绝缘、耐压、线圈直流电阻、CT、变压器油等均未发现问题, 没有故障点。当时 10 kV 母线所带负荷配线均无故障, 随即送电。

1.2 变电站概况

电压等级 35/10.5 kV, 变压器容量 5 000 kVA 接线组别 Y/Δ-11, 两台变压器并列运行。

35 kV 进线两条(一用一备), 35 及 10.5 kV 母线均为单母线, 有一组 10 kV 补偿电容器, 配线中有一铸造厂的中频炉线路, 其余为一般乡镇负荷。变压器低压侧日常夜间功率因数 0.98~1 之间, 白天 0.92~0.94 左右。变压器 CT 高压侧 100/5; 低压侧 400/5; 电容器 50/5; 400 kvar; 铸造厂(中频炉)线 300/5 带 630 kVA 变×3 台、315 kVA 变×1 台; 中频炉 1 吨 2 座、0.5 吨 1 座。

2 动作分析(初步判断)

2.1 差动保护动作行为

保护动作后运行人员分别读取 1#、2#变压器差动保护数据, 如下:

1#变压器 动作时间: 4 时 37 分 19 秒 735 毫秒
差流值

$I_{C.A}=18.16$ A $I_{C.B}=17.57$ A $I_{C.C}=15.52$ A

高压值

$I_{A.H}=29.00$ A $I_{B.H}=29.30$ A $I_{C.H}=28.12$ A

低压侧

$I_{A.L}=40.86$ A $I_{B.L}=40.72$ A $I_{C.L}=38.52$ A

2#变压器 动作时间: 4 时 37 分 19 秒 805 毫秒

差流值

$I_{C.A}=29.66$ A $I_{C.B}=28.93$ A $I_{C.C}=25.34$ A

高压值

$I_{A.H}=38.45$ A $I_{B.H}=39.33$ A $I_{C.H}=37.50$ A

低压侧

$I_{A.L}=57.93$ A $I_{B.L}=58.22$ A $I_{C.L}=54.71$ A

从 1#、2#变压器装置的动作时数值看, 差电流值已超过定值范围。

差动保护 CT 接线相角差 180° 时, 差动电流 $I_C = |I_H + I_L|$, 制动电流 $I_{ZD} = 1/2 |I_H - I_L|$ [1]。公式为相量值。(采用电流和接线方式)

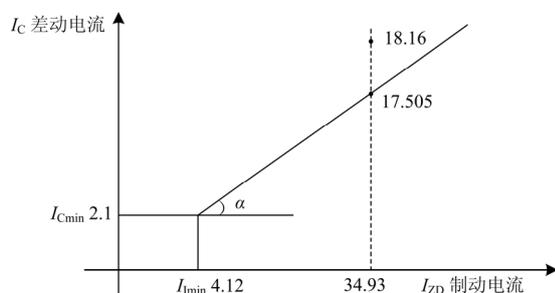


图 1 差动保护特性曲线

Fig.1 Characteristic curve of the differential protection

差动保护动作电流临界值:

$$I_{dz} = K_1 (I_{ZD} - I_{ZDmin}) + I_{Cmin} = 0.5 (1/2 < I_H - I_L > - 4.12) + 2.1 = 0.5 \times (34.93 - 4.12) + 2.1 = 17.705 \text{ A}$$

现装置测得差电流为 18.16 A, 在保护的動作区内, 装置动作了。其他相, 及 2#变数值可类推。

日常 1#、2#变压器 10 kV 侧工作电流, 一次侧就是 97.7 A, 二次为 $97.7/400/5=1.22$ A。

而差动保护动作跳闸时出现的低压侧二次电流在 40~60 A 左右。高压侧二次记录电流为 30~40 A 左右。这么大的电流量是哪来的? 很是疑惑不解。当时 1#、2# 变并列运行。1#变差动保护动作跳闸仅 70 ms 后 2#变差动保护也跳闸, 造成全站停电。这是一个穿越性电流。

很明显, 1#变跳闸(两侧断路器)后, 这一故障并未解除, 说明故障没在 1#变差动保护区内, 相继 2#变差动保护也动作出口(两侧断路器)。对 1#、2#变压器进行了详细检查, 均未发现问题。送电一切正常——这个故障电流来自区外。继电保护装置应属误动。

查变电站 10 kV 母线所带各配线当时均无故障现象, 但变压器差动保护记录的电流数值是哪来的呢? 通过了解 10 kV 母线带有中频炉负荷, 我们研究的着眼点落在了带有铸件厂的中频电炉负荷。中频炉在生产过程中是要产生谐波电流的, 作为电流源将谐波注入电力系统 [2]。

通过变电站日常运行记录了解, 该中频炉负荷是这个变电站的主要负荷, 而其它负荷的比重很小, 铸件厂是这个站的用电大户, 占全站负荷的 1/2 左右。

2.2 铸造厂中频炉概况

1) 变电站侧出线断路器的 CT 比 300/5。

2) 电炉及变压器的规格, 铸造厂变压器 630 kVA 变×3 台带 2 座 1 t 中频炉, 315 kVA 变×1 台带 1 座中频炉 0.5 t 中频炉。

变压器 30 kVA×1 台 厂用变压器。

3) 工作时间 铸造厂中频炉为节省电费, 都是在夜间 22: 00 或 0: 00 开始生产, 到第二天早上的 6: 00 左右。

4) 电弧炉现场没有谐波吸收装置。

查钢铁企业电力设计手册表 8-2, 对普通功率炼钢电弧炉应配置的设备参数 [2]

0.5 t 的电炉对应的变压器额定容量应为 0.65 MVA

1.5 t 的电炉对应的变压器额定容量应为 1.25 MVA

表 8-2 中未列 1 t 电炉规格对应变压器的数据,

但从 0.5 t、1.5 t 的要求容量看，该铸件厂的配置偏小，不排除由 3 台 630 kVA 变压器并列后带 2 台 1 t 电炉的运行方式（我们称最大方式）；也有 1 台 630 kVA 变压器对应 1 座 1 t 电弧炉（偏小），另 1 台 630 kVA 变做备用的方式。

2.3 分析思路

中频炉生产产生谐波电流源注入电网系统（变电站 10 kV 母线），并通过正在运行的 400 kvar 电容器将谐波放大。在某次谐波的作用下，以至与 10 kV 系统发生电流谐振，使差动回路中出现很大的不平衡电流，造成微机继电保护误动。

3 关于谐波

3.1 概述

谐波源分为谐波电压源和谐波电流源两种。发变电设备一般为谐波电压源；而变流装置、电弧炉和电抗器等为谐波电流源^[2]。

正弦电压施加在线性无源元件，电阻、电感和电容上，其电流和电压分别按比例、微分、积分关系仍为同频率的正弦波。但若正弦电压施加在非线性电路上时，电流就变为非正弦波，非正弦电流在电网阻抗上又会产生非正弦波的压降。

对于一个非正弦电流（电压）可用傅里叶级数分解。公式略。

频率为 50 Hz 的分量为基波，而大于 50 倍整数的分量称为谐波。许多文献多有阐述。电弧炉的谐波主要是由起弧的延时和电弧的严重非线性引起的。电弧长度有很大的随机性、不稳定性，故使得其电流谐波频率十分复杂。一般中频炉的频率范围在 0.25~60 kHz，电弧炉工作在熔炼期间谐波很大，此谐波电流注入电力系统后，对系统有很大的危害性。

①谐波使公用电网中的元件产生附加的损耗、产生机械振动、噪声、过电压，使设备温度增高，加速老化。

②谐波会引起公用电网中局部的并联谐振和串联谐振，从而使谐波放大，引起严重事故。

③谐波会导致继电保护和自动装置误动，并会使电气测量仪表不准确。

④干扰邻近的通信系统。

⑤谐波还会造成电压波形畸变。

3.2 谐波引起的谐振，电容器对谐波电流的放大

为了提高系统的功率因数，补偿负载的感性无功（一般情况下多是变压器、电动机的感性负载），常在负载处装有并联电容器。有的集中补偿在变电站，在供电母线上加装电容器。一般补偿电容器都

是按工频（50 Hz）选配的，在工频下呈现一定的容抗，但在谐波电网环境中，其容抗和系统的感抗都会发生很大的变化。从公式可以看出：

容抗 $X_C=1/(2\pi fC)$ ，感抗 $X_L=2\pi fL$ ，一个与频率成反比，一个与频率成正比，在某次谐波的作用下，系统可能出现并联（电流）谐振或串联（电压）谐振。

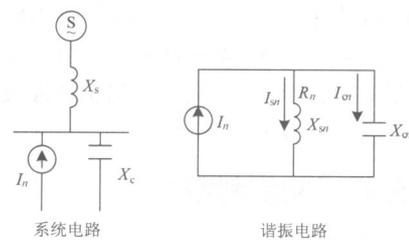


图 2 系统电路及谐振电路

Fig.2 System circuit & resonant circuit

系统阻抗是感性，其中电阻很小很小可忽略。 X_C 为基波容抗， X_{Cn} 为在 n 次谐波时的容抗， X_{sn} 为系统在 n 次谐波下的感抗； R_n 为系统在谐波下的电阻。

当电路满足 $X_{sn}=X_{Cn}$ 时，会发生并联谐振，谐振次数 $n_0=\sqrt{X_C/X_S}$ 。

在没有并联电容时，且在计算中不考虑输电线路的电容时，电力系统的谐波阻抗 $Z_{sn}=R_{sn}+jX_{sn}$ 即 n 次谐波下的阻抗。在并联了电容器后，系统总的参数发生了很大都变化。

并联后总阻抗

$$Z_{sn} = \frac{-jX_{Cn} \times Z_{sn}}{R_{sn} + j(X_{sn} - X_{Cn})}$$

从公式可以看出，当电路满足 $X_{sn}=X_{Cn}$ 时，且在忽略系统线路电阻时，系统将出现很大的阻抗，系统总的电流当然会很小。

各支路电流：

$$\text{系统 } I_{sn} = \frac{-jX_{Cn}}{R_{sn} + j(X_{sn} - X_{Cn})} \times I_n ;$$

电容器

$$I_{Cn} = \left[\frac{R_{sn} + jX_{sn}}{R_{sn} + j(X_{sn} - X_{Cn})} \right] \times I_n ;$$

从以上公式可知：这时各分支电流非常大，由此可以看出，由于并联了电容器，将谐波的电流放大了、并注入了电力系统。谐振点谐波次数为 $n_0=\sqrt{X_C/X_S}$ ，即当谐波源中含有次数为 $\sqrt{X_C/X_S}$ 的谐波时，将引起谐振。

数值接近 $\sqrt{X_C/X_S}$ ，虽不能引起谐振，但也会导致该次谐波电流的放大^[3]。

3.3 对该变电站的谐波测试

调查测试谐波的目的, 主要是考虑 10 kV 中频炉配线生产中是否产生谐波, 分析对变压器保护的影响。测试点分别取 2#变压器 35 kV 侧和 10 kV 侧电流, 串入变压器高低压的测量电流回路中, 使用两台测试仪(高压侧一台低压侧一台)分别测试 A、C 两相电流。

测试时间: 08 年 9 月 24 日 23: 55~9 月 25 日凌晨 0: 19

运行方式: 1#、2#变压器并列运行, 变电站 400 kvar 电容器投运, 中频炉投运。

测试数据见表 1。

表 1 谐波电流测试数据表

Tab.1 Test data of the harmonic current

谐波次数		基波	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
35kV	U_L													
	I_L	1.39				0.16		0.09				0.06		0.03
	I_C	1.36				0.17		0.09				0.04		0.02
35kV	U_L													
	I_L	1.37				0.16		0.07				0.07		0.03
	I_C	1.34				0.16		0.09				0.06		0.05
10kV	U_L													
	I_L	1.17				0.12		0.06				0.05		0.05
	I_C	1.17				0.14		0.08				0.07		0.01
10kV	U_L													
	I_L	1.2				0.13		0.09				0.06		0.03
	I_C	1.19				0.14		0.09				0.04		0.02

测试进行了高压侧 12 组数据, 低压侧 12 组数据。表中仅选取高压侧 2 组及所对应的低压侧 2 组的数据。测试数据表中电流单位 A (安培)。

①由测试数据可以初步看出: 35 kV 及 10 kV 侧的基波相电压, 均偏高于标准的 57.7 V, 且产生了 5、7、11、13 次一定数量的谐波电流。谐波电压占基波的 3%左右。

②可以看出其中 5 次谐波电流比较大, 占基波的 11%~12%, 7 次占基波的 7.5%~6.4%左右, 11、13 次的逐渐减少。从谐波测试结果证明, 该电炉为 6 脉冲整套装置^[2]。产生的特征谐波次数为 5、7、11、13, 测试中未对 17、19 次谐波进行。从测试结果看出, 10 kV 系统确实有谐波电流存在。由于谐波电流的注入, 且电容器对谐波的放大作用使系统出现了电流谐振, 否则系统不会出现 08 年 9 月 11 日动作时这样大的故障电流 (1#变: $I_{A-H}=29.00$ A,

$I_{A-L}=40.86$ A, 2#变: $I_{A-H}=38.45$ A, $I_{A-L}=57.93$ A) 由此看出, 当系统发生电流谐振时差动保护两侧出现了较大不平衡电流, 装置虽然有比率制动但差电流已超过动作特性曲线值使保护误动。

3.4 目前该变压器的差动保护误动定量分析尚困难

3.4.1 电容量随电压的变化而变

若实际运行电压与电容器额定电压不一致, 则电容器的实际补偿容量与当时的运行电压成正比

$$Q_{C1} = (U_W/U_{N-C})^2 Q_{N-C}$$

式中: Q_{C1} 为实际补偿容量; U_W 为电容器实际工作电压; Q_{N-C} 为电容器额定补偿容量。

如电容器投的多, 加之由于谐波的作用也可能使母线电压升高, 由公式可以看出 U_W 的上升而导致补偿电容量的增加, 由于补偿电容量的增加, 又会使电压升高。此参数是随机变化的。

3.4.2 电力系统参数不详

该 35 kV 站以上电源的系统阻抗了解不到, 10 kV 所带负荷铸件厂的线路参数、中频炉的技术参数、短网参数不详, 运行方式不确定性, 也给定量分析带来一定困难。

3.4.3 未能取得变电站在没有电容器时的谐波量。

4 问题的对策

(1) 一般为了避免谐振的出现应在电容器的支路串联电抗, 目的是改变原谐振系统的 LC 参数, 破坏其谐振点。

(2) 最好还是在用户加装谐波滤波装置, 将谐波消化在现场, 而不要使谐波电流注入电力系统的母线, 也就是采取就地解决的办法。

(3) 微机继电保护在原理设计运算上避免谐波的影响因素。

(4) 进一步作谐波叠加试验, 尽力模拟保护动作的原工况。

(5) 强化保护装置的录波功能。

电力系统的谐波危害性很大, 是系统中的污染, 应进一步引起各方面的重视并落实在治理上。关注谐波对继电保护的影响的研究工作。

参考文献

- [1] 高春如. 大型发电机组继电保护整套计算运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
GAO Chun-ru . Relay Protection of Large Generating Units to Run the Entire Computing Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [2] 钢铁企业电力设计手册[M]. 1996.

(下转第 141 页 continued on page 141)

仅仅电网单相接地故障而引起的 C 站中性点电位升高值即 44.8 kV 并不能使棒间隙击穿。

根据当时的天气情况及 05 开关的保护报文信息可以推论, 当时线路 B 遭受了雷击, 雷电波自线路侵入 C 站, 在 C 站中性点产生了过电压, 接地故障产生的过电压与雷电过电压的共同作用, 导致间隙被击穿。据此我们查询了湖北电网雷电信息系统,

序号	时间	经度	纬度	电流/kA	回击	站数	距离/m	最近杆塔
1	2008-07-01 15:16:23.561	111.8676	31.7874	-12.4	1	2	29	17~21
2	2008-07-01 15:28:14.441	111.8672	31.7581	-72.3	1	13	250	21~26
3	2008-07-01 15:28:14.483	111.8683	31.7596	-30.4	1	7	105	21~26
4	2008-07-01 15:28:14.520	111.8674	31.7563	-54.8	1	10	288	21~26
5	2008-07-01 15:28:45.511	111.8744	31.7433	-49.2	1	3	5	21~26
6	2008-07-01 15:28:45.949	111.8749	31.7407	-19.5	1	3	35	21~26
7	2008-07-01 15:30:57.243	111.8819	31.7898	-38.5	1	6	178	15~17
8	2008-07-01 15:32:09.620	111.8743	31.7893	-28.6	1	5	37	17~21
9	2008-07-01 15:36:05.537	111.8761	31.7373	-39.4	1	10	23	21~26
10	2008-07-01 15:36:05.673	111.8651	31.7684	-67.0	1	10	146	21~26
11	2008-07-01 15:38:03.411	111.8797	31.7302	-31.1	1	6	105	21~26

图 3 湖北电网雷电信息系统查询结果

Fig.3 Research result in thunderbolt information system of Hubei power network

为什么这次的中性点过电压没有使中性点避雷器动作呢? 原因在于氧化锌避雷器的动作条件取决于过电压的幅值和侵入波陡度。在雷电波延线路到达变电站这一过程中, 由于线路波阻抗的作用, 减小了通过中性点避雷器的雷电流, 降低了中性点过电压幅值, 同时由于导线冲击电晕的影响削弱了侵入波的陡度。经过这一系列的作用后, 避雷器的两个动作条件没有同时满足。而间隙被击穿的条件是过电压幅值达到间隙的击穿电压即可。通过分析及故障后检查结果可以推断, 故障时中性点过电压值超过了棒间隙的工频放电电压即 70 kV, 这对中性点绝缘水平是有损害的。

由此可见, 对于中性点不接地的分级绝缘变压器, 中性点间隙不仅能抑制在 110 kV 有效接地系统中因故障形成局部不接地系统所产生的工频过电压, 以及非全相运行和铁磁谐振带来的过电压, 也能在线路遭受雷击, 雷电波从线路侵入变电站到达变压器中性点, 产生较高的雷电过电压, 而这一过

电压又不足以使避雷器动作, 以降低中性点过电压时, 可以靠间隙击穿来泄流, 保护变压器中性点绝缘不受损害。同时也表明主变压器中性点避雷器与棒间隙的配合使用可以有效保护变压器中性点绝缘。

参考文献

- [1] DL/T 620-1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [2] JB/T5894-91, 交流无间隙金属氧化物避雷器使用导则[S].
- [3] 卢文鹏. 发电厂变电站电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 张一尘. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

收稿日期: 2009-05-14

作者简介:

李爱华 (1979-), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事继电保护运行管理工作; E-mail: aiwar4674@163.com

卿 澳 (1980-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力系统二次工作。

(上接第 135 页 continued from page 135)

- Iron and Steel Enterprises Power Design Manual[M]. 1996.
- [3] 王兆安, 杨石, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- WANG Zhao-an, YANG Shi, LIU Jin-jun, et al. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

作者简介:

史建增 (1946-), 男, 工程师, 长期从事继电保护定值管理工作; E-mail: shi-jian-zeng@163.com

刘建敏 (1973-), 男, 工程师, 长期从事继电保护研制工作;

刘长利 (1963-), 男, 高级工程师, 长期从事继电保护研制工作。

收稿日期: 2009-04-08; 修回日期: 2009-05-27