

电网谐波对消弧线圈接地系统的影响

金百荣, 李 电

(绍兴电力局, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 为验证某制造厂新型自动调谐消弧线圈装置性能, 笔者进行了消弧线圈成套装置金属接地、电阻接地、弧光接地等现场试验, 结果发现, 当电网具有较高谐波时, 单相接地电流含有丰富的谐波成分, 消弧线圈并不能补偿谐波接地电流, 造成以谐波为主的残流值超标, 影响补偿效果, 对此问题应引起关注。

关键词: 消弧线圈; 电网谐波; 残流; 接地系统

中图分类号: TM475

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0159-04

The Impact of Power Grid Harmonics on Grounding System of Arc-suppression Coil

JIN Bai-rong, LI Dian

(Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to test the performance of new type automatic tuning arc-suppression coil of some factory, the metal grounding, resistance grounding and arc grounding test of arc-suppression coil whole set tests were carried out. By analyzed the test result, abundant harmonic component was discovered in single-phase grounding current when power grid have more harmonics, and arc-suppression coil can not compensate for harmonic grounding currents. This will cause harmonic residual grounding current exceed the standard value, compensation effects be affected. It needs more attention to this question.

Key words: arc suppression coil; harmonics; residual current; grounding system

0 引言

我国 10 kV 配电网普遍采用中性点不直接接地方式, 随着配电网电缆线路日益增加, 单相接地电容电流越来越大, 单相接地电弧及弧光接地过电压严重威胁系统的安全可靠运行。采用自动调谐消弧线圈接地方式可以自动补偿单相接地电流, 有效抑制弧光接地过电压, 大大提高配电网的运行可靠性, 并可基本消除 PT 引起的铁磁谐振的发生。因此 10 kV 配电网采用自动调谐消弧线圈接地方式具有明显的优越性^[1,2], 目前得到了广泛的推广应用。

随着我国的经济发展, 电网谐波污染日趋严重, 特别是一些以工业负荷为主的经济开发区以 5 次谐波为主的谐波普遍超标, 对电力系统及用户用电设备的运行均造成不利影响。

对电网谐波目前关注的重点集中在对电能计量、并补装置运行(谐振)、继电保护、附带损耗等方

面的不利影响以及相关检测、治理技术方面^[3,4]。对消弧线圈装置, 关注的重点集中在电容电流测量跟踪、接地判断、接地选线等检测控制技术以及装置本身的可靠性方面^[5,6]。而对于谐波电流问题, 出于限制接地残流的考虑, 仅对消弧线圈装置本身发出的谐波电流进行了限制^[7,8], 而对电网谐波污染背景下, 谐波对消弧线圈接地系统运行特性的影响特别是对接地残流的不利影响, 相关标准及运行规范均未涉及, 目前未有相关文献报道。

为验证某制造厂生产的调匝式自动调谐消弧线圈产品性能, 进行了现场接地试验, 由于系统电网具有明显的谐波污染, 在单相金属接地时发现, 未投入消弧线圈时的系统单相接地电流及投入消弧线圈时的接地残流中, 均包含有丰富的谐波电流成分。试验结果表明, 当系统谐波污染较重及对地电容较大时, 系统接地电容电流中包含较高的谐波电流成分, 消弧线圈装置仅对工频单相接地电流具有良好的补偿作用, 对谐波接地电流不具备补偿作用, 接地残流明

收稿日期: 2008-12-26; 修回日期: 2009-03-24

作者简介: 金百荣(1969), 男, 高级工程师, 主要从事无功补偿装置、电能质量等方面检测及研究工作。

显以谐波电流为主且幅值较大,大大超过消弧线圈标准规范对接地残流的要求,影响补偿效果。对此问题应引起关注。

1 电网谐波背景下的消弧系统接地试验

为考核某制造厂生产的 10 kV 调匝式自动跟踪补偿消弧线圈成套装置产品性能,对该产品在实际电网环境下进行了包括电容电流检测、单相金属接地、电阻接地、弧光接地等多项试验考核。接地试验在 A 相进行,系统对地电容通过外加电容调节,采用单相金属接地试验实测获得。由于受非线性负荷的影响,试验时发现,系统谐波污染比较明显,实测系统母线电压谐波背景含量见表 1。

表 1 试验系统电压谐波背景含量(A 相)

相电压/kV	基波/kV	THD/%	各主要次谐波电压含量/%			
			3	5	7	9
6.0	6.0	3.7	0.1	3.5	1.1	0

可见电压谐波总畸变率(THD)为 3.7%,主要谐波成分为 5 次谐波 3.5%,其次为 7 次谐波 1.1%,其他可忽略不计。

1.1 金属接地试验

消弧线圈投入前,在不同的对地电容下进行了系统单相金属接地试验,以检测系统对地电容。试验发现接地电流波形畸变严重,实测单相金属接地电流谐波数据见表 2(消弧线圈退出)。

表 2 单相金属接地电流谐波测试(消弧线圈退出)

对地电容/ μF	接地电流/A	基波/A	THD/%	各主要次谐波电流值/A			
				3	5	7	9
19.1	38.1	36.0	20.3	0	7.0	/	/
30.1	57.5	57.0	21.3	0.1	10.5	7.2	0.4
39.6	77.3	75.0	24.3	0.1	16.9	5.3	0.8
49.5	98.3	94.2	29.4	0.1	25.2	11.1	1.0

测试数据表明,接地电流中含有丰富的谐波成分,电流谐波总畸变率 THD 均超过 20%,并随着对地电容的增大有放大趋势,主要谐波成分与电网背景谐波成分相一致。当对地电容为 49.5 μF (相应接地电流接近 100 A 时),仅 5 次谐波电流就高达 25.2 A。

投入消弧线圈进行单相金属接地试验,以验证消弧线圈装置跟踪检测对地电容精度及补偿效果。试验发现尽管消弧线圈装置跟踪检测系统对地电容精度良好,但单相金属接地时的残流仍大大超标,残流以谐波为主,远远达不到装置要求的残流 $\leq 5\text{ A}$ 的技术要求。

以对地电容 39.6 μF 时的接地试验为例,实测

消弧线圈补偿电流 I_L 及接地点残流 I_{Gnd} 谐波数据见表 3,试验波形见图 1。测试数据表明,消弧线圈补偿电流 THD 仅为 0.9%,波形正弦性良好,谐波成分可忽略不计,残流中工频分量仅为 2.2 A,说明消弧线圈对工频容性接地电流补偿效果良好,可以确保接地残流中工频分量小于 5 A 的要求。但接地残流仍达到 17.2 A,主要为 15.7 A 的 5 次谐波,以及 6.0 A 的 7 次谐波,残流波形总畸变率达到 720%(见图 2),显然在 3.7% 的背景谐波电压下,电网谐波对接地残流的影响十分显著,谐波在接地残流中占了主导地位,消弧线圈对接地谐波基本无补偿作用,从而无法达到装置要求的残流 $\leq 5\text{ A}$ 的要求,补偿效果受到了显著影响。

表 3 金属接地试验消弧线圈电流及残流谐波测试

测试项目	有效值/A	基波/A	THD/%	各主要次谐波电流/A			
				3	5	7	9
消弧线圈电流	74.0	73.7	0.9	0.0	0.6	0.2	0.0
残流	17.2	1.4	1223	0.6	15.7	6.0	0.7

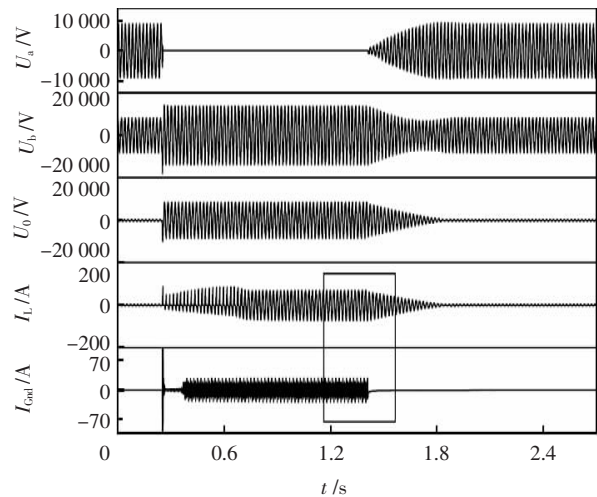


图 1 单相金属接地试验波形(消弧线圈投入)

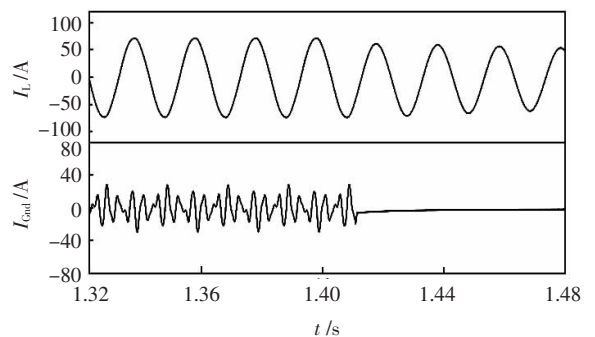


图 2 单相金属接地试验波形放大(图 1 方框部分)

1.2 电阻接地试验

为验证消弧线圈装置在高阻接地工况的性能,进行了 100 Ω 电阻的高阻接地试验,测试在系统对

地电容 $30.1 \mu\text{F}$ 下进行,实测接地点残流为 2.71 A ,可见接地电阻的存在可以大大抑制残流中的谐波成分,当接地电阻较高时,谐波对残流的影响可以忽略不计。

1.3 弧光接地试验

为验证消弧线圈在弧光接地工况下的性能,进行了模拟弧光接地试验,弧光间隙采用放置于水泥地面的铜接头——接地扁铁,间隙空气间距 43 mm 。试验时对地电容为 $30.1 \mu\text{F}$ 。实测弧光接地试验波形见图3。模拟弧光接地试验发现,弧光接地后电弧持续时间极短,在 10 ms 左右快速熄弧,其余也基本在 50 ms 内熄弧。电弧电流为快速衰减的高频暂态电流,在尚未衰减至较小值(30 A 以下)时,电弧就高频过零熄灭,电压缓慢恢复后再次击穿燃弧-熄灭,如此循环往复,显示出模拟空气间隙熄弧效果较强,未能模拟实现 15 A 左右以谐波残流为主的持续电弧。

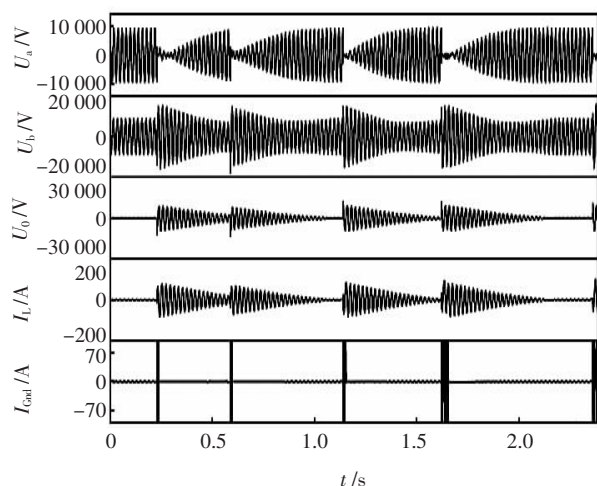


图3 弧光接地试验波形(消弧线圈投入)

在 10 kV 中性点不接地系统^[1]中,如果接地电流较大(30 A 以上时),将产生稳定的电弧,形成持续性的电弧接地,可能导致相间短路;当接地电流大于 $5 \sim 10 \text{ A}$ 而小于 30 A 时,有可能产生一种不稳定的间隙性电弧,这是由于网络中的电感和电容所形成的振荡回路所致,从而产生弧光接地过电压。该次模拟试验可以证实,无论是否存在较高的谐波成分,消弧线圈装置对抑制弧光接地过电压的效果不受影响,实测弧光接地过电压稳定在 2.5 倍左右(最大 2.6 倍)。

2 电网谐波背景下消弧线圈运行特性分析

包括 DL/T 1057-2007^[2]《自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术条件》在内的标准规范及其他文献对消弧线圈装置现场使用环境及型式试验中谐波对

补偿效果的影响均未涉及。实际上电网谐波普遍存在,对消弧线圈装置的运行特性特别是残流产生不可忽略的不利影响。

2.1 当前电网谐波背景调查

根据 GB/T 14549-93《电能质量 公用电网谐波》规定, $35, 10 \text{ kV}$ 母线电压总谐波畸变率限值分别为 $3.0\%、4.0\%$,其中 5 次谐波电压限值分别为 $2.4\%、3.2\%$ 。根据某局 2007 年度谐波普测调查,当前电网谐波超标普遍比较严重,主要谐波含量为 5 次谐波。与前几年谐波普测情况比较,超标比例增加,超标值更趋严重。

(1) 10 kV 系统:在总共 69 所 110 kV 变电所 10 kV 母线系统中,共有 14 个变电所母线电压谐波超标(主要次谐波为 5 次谐波,均超标), 6 个变电所母线电压谐波不超标但 5 次谐波超标,即总共有 20 个变电所存在谐波超标现象,超标比例达 29.0% 。其中有 9 个变电所 5 次谐波电压含量超过 5.0% ,最大达到 7.5% 。

(2) 35 kV 系统:在 17 个 220 kV 及 44 个 110 kV 变电所的 35 kV 母线系统中,有 3 个 220 kV 变电所、 7 个 110 kV 变电所的 35 kV 母线电压谐波总畸变率超标。另有 1 个 220 kV 变电所、 2 个 110 kV 变电所的 35 kV 母线电压虽然谐波总畸变率没有超标,但 5 次谐波电压超标,即 35 kV 系统超标比例为 21.3% 。

2.2 谐波背景下消弧线圈装置接地分析

谐波背景下消弧线圈接地系统发生单相金属接地时的原理图见图4。 10 kV 配电网单相接地通常不考虑谐波及系统阻抗 L_0 的影响,此时接地电流 $I_c = 3\omega_0 C U_0$ 。

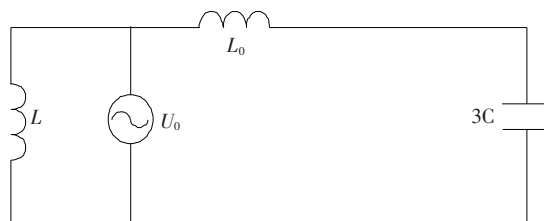


图4 谐波背景下消弧系统接地原理图

当电网谐波不可忽略时,消弧线圈接地系统发生单相金属接地(A相接地)时的中性点电压 U_0 必然也包含谐波成分,即

$$U_0 = U_a = U_1 + U_2 + \dots + U_n + \dots \quad (1)$$

相应的接地电流中必然也包含谐波成分,第 n 次谐波电流含有率 I_{cn} 取决于谐波电压含有率 U_n 。忽略 L_0 的影响, I_{cn} 近似值为

$$I_{cn} \approx n \times U_n \quad (2)$$

以 5 次谐波为例,当 5 次谐波电压含有率 U_n 为

5.0%时,相应5次谐波电流含有率为

$$I_{c5} \approx 5 \times 5\% = 25\%$$

可见较低含量的谐波电压将产生 n 倍的较高谐波电流含量。

当系统对地电容较大或谐波次数较高时,由于系统阻抗 L_0 的存在,接地谐波电流会出现比较明显的容升放大现象甚至趋于谐振。从表3可以看出,根据式(2)计算,在上例3.5%的5次谐波电压下,5次谐波电流含有率 I_{c5} 理论上应为 $5 \times 3.5\% = 17.5\%$,实测值当对地电容在 $30 \mu\text{F}$ 及以下时为20%左右,与忽略 L_0 影响的理论值比较接近,但随着对地电容的继续增大,尽管系统背景谐波含量没有增大,但实测谐波电流含量出现明显放大趋势,与忽略 L_0 影响的理论值偏差越来越大。可见当对地电容较大或谐波次数较高时,不能忽略系统谐波阻抗 L_0 对谐波的放大作用。

相反,消弧线圈在高频的谐波电压下呈现高阻抗,相应第 n 次谐波电流含有率 I_{ln} 为

$$I_{ln} = \frac{I}{n} U_n \quad (3)$$

即使在 $U_n = 5\%$ 的5次谐波电压下,消弧线圈补偿电流中的5次谐波电流含有率 I_{ln} 仅达到1%,对谐波接地电流的补偿作用可忽略不计。

理论及实测表明,消弧线圈对工频接地电流补偿效果良好,但对接地电流中的谐波部分基本没有补偿效果,当电网明显存在谐波时,接地残流以谐波为主,极易超过10A的标准限值,当对地电容较大及谐波污染严重时,残流甚至可超过30A。

此外,自动调谐消弧线圈装置一般通过测量中性点电压、消弧线圈电流的有效值并调节电感来检测对地电容值(接地电流),而检测精度取决于基波,谐波分量的存在势必增大误差,只不过此时由于残流中谐波成分远超工频部分,工频补偿电流偏差已经不再主要。

当接地电弧通道存在电阻时,由于接地通道阻抗的增加以及电阻的阻尼效果,谐波对残流的影响可以得到明显的抑制。

2.3 对策

DL/T 1057-2007 标准对接地残流限值为 $\leq 10 \text{ A}$,一般厂家产品残流限值多为 $\leq 5 \text{ A}$,电容电流测量误差 $\leq 2\%$ 。实际上在系统明显存在谐波的情况下是无法达到的,可能严重超标。

消弧线圈接地系统的工作原理为谐振接地,谐振点接近工频50Hz,其工作原理决定了对高频谐波电流无补偿能力。当系统谐波超标且对地电容较

大时,接地残流必然以谐波为主且幅值较高,从而影响补偿效果。对此问题,消弧线圈装置本身无法解决,只能从系统方面进行谐波治理,使电网谐波降低到较低水平。因此,当电网谐波污染较重或对地电容较大时,采用消弧线圈接地方式应进行接地谐波残流计算校核,对谐波残流超过10A时,宜采取相应谐波治理措施。

3 结论

(1) 当今10kV配电网普遍存在谐波,部分变电所谐波污染严重,谐波含量一般以5次为主。当系统存在明显谐波时,单相接地电流包含较高的谐波电流成分,谐波电流含量取决于电网谐波电压含量。

(2) 中性点不接地系统采用消弧线圈接地方式,对限制弧光接地过电压及补偿工频接地电流具有良好的效果,但对接地电流中的谐波电流成分不具备补偿作用。

(3) 当电网谐波污染较重及对地电容较大时,消弧线圈接地系统残流以较高幅值的谐波接地电流为主,残流可能严重超标,无法达到残流 $\leq 5 \text{ A}$ 的要求,对补偿效果产生显著影响。

(4) 谐波的存在对降低弧光接地过电压的作用不受影响。同时接地通道电阻(电弧电阻)较大时可以明显抑制残流中的谐波成分。

(5) 谐波对消弧线圈接地系统残流的影响无法通过消弧线圈装置本身得到解决,当系统谐波污染较重时,采用消弧线圈接地方式宜进行谐波残流校核及系统谐波治理,使残流降到合理水平。

(6) 电网谐波对消弧线圈接地系统的残流存在较大影响,应引起使用、设计、制造及试验等各部门的重视,相关标准规程也应对此做出修改规范。

参考文献:

- [1] 尹克宁. 电力工程[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [2] 腾永禧, 许明. 10 kV TV 高压熔丝频繁熔断的分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 204-206.
- [3] 吴竟昌, 孙树勤. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [4] 边小青, 柳青. 谐波对电力系统的影响[J]. 宁夏电力, 2005(4): 10-12.
- [5] 陈忠仁, 吴维宁. 自动调谐式消弧线圈测量跟踪问题的研究[J]. 继电器, 2008, 32(18): 24-28.
- [6] 李勇. 自动跟踪补偿消弧装置在电力系统的应用[J]. 云南水利技术, 2007(4): 12-14.
- [7] DL/T 1057-2007. 自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术条件[S].
- [8] 陆国庆. 自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术规范[J]. 电力设备, 2007, 8(12): 48-52.