

一起单相接地引发系统谐振的事故分析

袁光伟, 沙 倩

(徐州供电公司, 江苏 徐州 221005)

摘 要: 由于电磁式电压互感器具有励磁饱和特性, 在一定的激发条件下容易产生铁磁谐振过电压, 将严重影响系统的安全稳定运行。本文从理论上分析了铁磁谐振产生的原因及危害, 并通过对徐州地区一起单相接地引发系统谐振的事故的分析, 提出了一些铁磁谐振的防治措施和建议, 对电网的安全可靠运行有一定的指导意义。

关键词: 电压互感器; 单相接地; 铁磁谐振

0 引言

当电力系统遭受一定程度的冲击或者扰动, 在满足一定条件时, 就会激发谐振。谐振时, 系统会产生较高的过电压和过电流, 严重影响电网的安全运行^[1-2]。而在中性点不接地系统中, 单相接地是最为常见的一种故障。由单相接地故障引发的铁磁谐振过电压, 继而造成电压互感器熔丝熔断、铁心烧损以及避雷器爆炸的事故更是时有发生。本文首先分析了谐振过电压产生的原因和危害, 并通过对一起由单相接地引发系统谐振的事故经过和原因进行分析, 针对目前的系统状况, 提出了一些铁磁谐振的防治措施和建议。

1 谐振过电压产生的原因及危害

在中性点不接地系统中发生单相接地时, 以C相单相接地为例, 虽然 $U_{Cd} = 0$, 中性点对地电位 $U_0 = -U_C$, 但系统的线电压却依然对称, 如图1所示, 因而不影响对用户的连续供电, 仍可继续运行2h^[3]。但非故障相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍, 系统中的绝缘薄弱点有可能被进一步损坏, 甚至击穿。此外, 在带接地运行期间, 接地点要流过全系统的对地电容电流, $I_k = I_{CA} + I_{CB}$, 如图2所示。随着配电网容量的扩大、出线回路数的增多、线路总长度的增长以及电缆线路的大量使用, 当系统对地电容电流增大到一定数值后, 单相接地时接地电弧不能自行熄灭, 将引发断续性弧光接地, 产生弧光接地过电压, 一般为3~5倍相电压, 致使电网中绝缘

薄弱的地方放电击穿, 并会发展为相间短路进而造成设备损坏和停电事故。

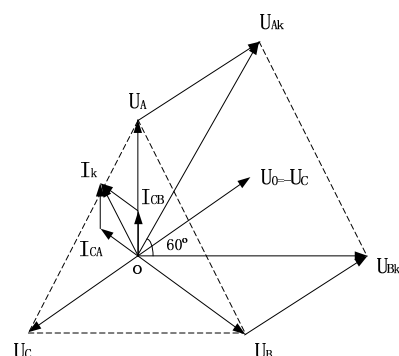


图1 C相接地时系统向量图

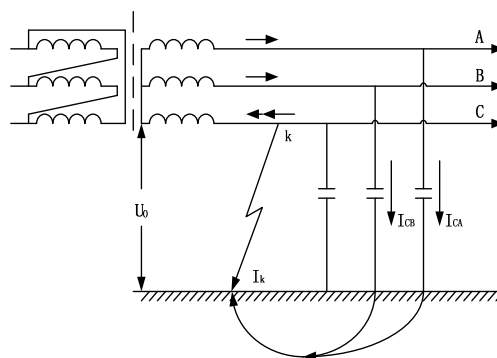


图2 简单网络接线示意图

图3为铁磁谐振电路的伏安特性曲线, 其中曲线1为电感的伏安特性曲线 $U_L(I)$, 曲线2为电容的伏安特性曲线 $U_C = I \cdot 1/\omega C$, 曲线2近似为一条直线。正常情况下, 系统的感抗大于容抗, 所以两伏安特性必然有交点。系统正常运行时, 电压互感

器线圈的电压为电网的额定电压,通过线圈的电流 I 较小,此时互感器铁芯并不饱和,励磁电感数值很大,为一常数。而当系统发生单相接地故障时,由于非故障相的对地电压突然升高至线电压,电压互感器三相铁芯随着电压的升高就出现了不同程度的饱和,饱和后的电压互感器励磁电感变小^[4-5]。同时由于线路或者负荷性质的变化等原因使得系统的电气参数发生了较大的变化,若此时系统的对地电感与对地电容参数相匹配,即电感值降低至 $\omega L = 1/\omega C$,或者说当电压互感器的感性电压与系统的容性电压相等时,即满足谐振条件,从而产生铁磁谐振过电压。铁磁谐振过电压会使电压互感器铁芯处于高度饱和状态,使电压互感器的励磁电流大大增加,继而导致电压互感器高压熔丝熔断、铁芯烧损甚至爆炸^[6-8]。

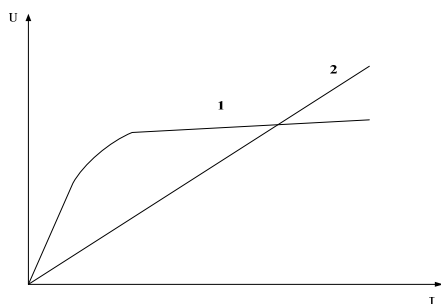


图 3 铁磁谐振电路伏安特性曲线

铁磁谐振过电压包括分频、工频和高频谐振过电压三种类型^[9]。工频和高频谐振过电压的倍数一般都比较高,幅值可达额定电压的 3 倍以上,起始暂态过程中的电压幅值可能更高,将严重危及系统中电气设备的绝缘。分频谐振可导致三相电压在不同的范围内出现低频摆动,过电压的幅值虽然不高,一般在 2 倍额定电压以下,但因其频率低,励磁感抗成倍下降,从而使励磁回路严重饱和,励磁电流急剧加大,电流大大超过额定值,使电压互感器高压熔丝过热烧毁。

2 事故经过

正常运行方式下,35kV 张庄变 1#、2#主变分别由热张 303 线、黄张 304 线供电,35kV、10kV 均分列运行。如图 4 所示。

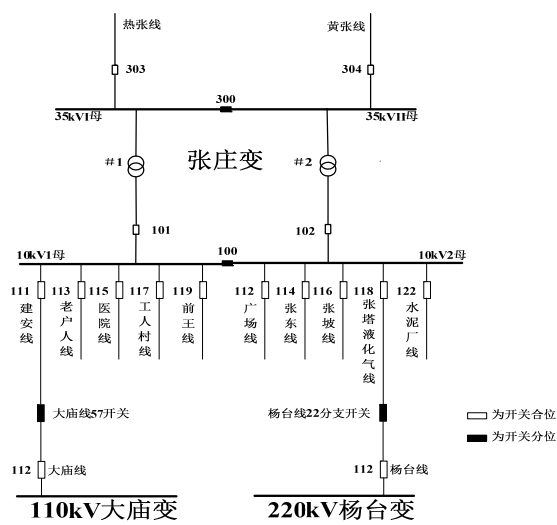


图 4 系统接线图

(1) 2014 年 2 月 3 日 01:45 分,35kV 张庄变 10kV1 母线 C 相接地, $U_A=10.5\text{kV}$, $U_B=9.37\text{kV}$, $U_C=0.73\text{kV}$ 。在拉合 10kV1 母线出线后,判断接地故障在 10kV 医院线。通过分段查找,确认并隔离医院线故障点后接地消失。

(2) 10kV 医院线故障处理完毕恢复送电时,10kV1 母线再次出现 C 相接地。在接地查找过程中,系统发生谐振,三相电压同时升高至 12kV 左右。现场运行人员拉开一条空载线路 10kV 前王线,改变系统参数,谐振消失。

(3) 通过查找,确认 10kV1 母线建安线、老户人线 2 条出线同时存在故障点。

(4) 隔离 10kV 建安线、老户人线 2 条线路故障点后,10kV1#PT C 相熔丝熔断,熔丝更换后,发现 1#主变 10kV 侧避雷器 C 相冒烟。将 1#主变隔离后,10kV1 母线倒由 2#主变供电。

(5) 30 min 后 10kV 张东线电缆中间接头爆炸,2#主变 C 相避雷器冒烟。

(6) 将 10kV 张东线、2#主变隔离后,通过 10kV 建安线拉手线路 110kV 大庙变 10kV 大庙线返带张庄变 10 kV 1 母线,通过 10kV 张塔线液化线拉手线路 220kV 杨台变 10kV 杨台线返带张庄变 10kV2 母线。

(7) 45 min 后,1#、2#主变避雷器故障处理完毕,1#、2#主变恢复运行。

(8) 20 min 后 10kV1 母线 C 相接地。在接地查找过程中,系统再次发生谐振,三相电压同时升高至 12kV 左右。56 min 后 1#主变 10kV 侧避雷器

爆炸，将 1#主变隔离后，将 10kV1 母线倒由 2#主变供电。

(9) 39 min 后，10kV 老户人线 7#开关避雷器烧坏，35kV 张庄变 10kV1#PT 烧毁，2#主变 102 开关低压电缆烧坏。

(10) 将 10kV 老户人线故障点、10kV1#PT 及 2#主变隔离后，再次通过 10kV 建安线拉手线路 110kV 大庙变 10kV 大庙线返带张庄变 10 kV 1 母线，通过 10kV 张塔线液化线拉手线路 220kV 杨台变 10kV 杨台线返带张庄变 10 kV 2 母线。

(11) 2014 年 2 月 4 日 04:39 分，全部故障处理完毕，1#、2#主变送电，恢复正常方式。

这是一起典型的由单相接地引发系统谐振，继而造成多个故障的事故，谐振过电压的产生是造成系统连锁故障的直接原因。

3 事故原因分析

(1) 避雷器爆炸情况如图 5 所示。可以看出避雷器绝缘瓷套除爆炸点外基本完好，避雷器表面较为污秽，瓷套两端法兰基本完好，阀片几乎全部破碎。由事故现象初步判断避雷器爆炸是由过电压引起的。

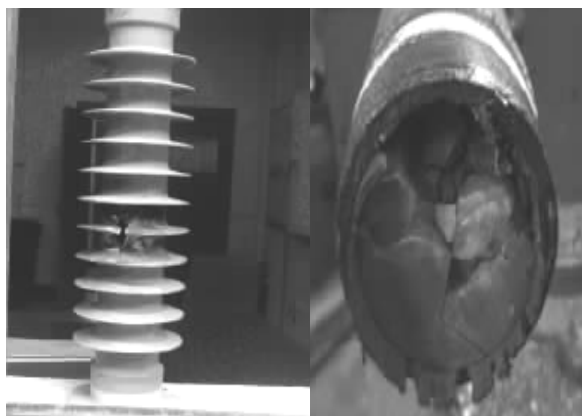


图 5 避雷器爆炸图片

由于氧化锌避雷器没有放电间隙的隔离作用，长期直接承受工频电压的波动，特别是在系统单相接地并产生谐振时，更是加速了氧化锌电阻片的老化，引起避雷器性能的下降和泄漏电流的增加。随着使用时间的增长特性逐渐变坏，阻性电流分量大幅增大，在谐振过电压的作用下，阀片温度急剧上升导致热崩溃^[10]，造成避雷器爆炸。

此外，因密封不严，避雷器内部构件受潮，也将导致避雷器泄漏电流增加、氧化锌阀片特性劣

化，阻性电流分量急剧增大，当电压增加时（如系统过电压或遭受雷击），也将造成避雷器爆炸。

(2) 2013 年该站 10kV 新出一条电缆线路，且多条 10kV 出线电缆进行更换，大量架空线更换为入地电缆，因此系统电容电流发生变化。由于该变电站 10kV 母线未安装消弧线圈以平衡电容电流，当电网发生单相接地故障时，无法提供足够的电感电流进行补偿，造成接地电弧不能自行熄灭，引发断续性弧光接地，产生的弧光过电压使电缆绝缘击穿，并波及整个系统。

另外，在本次事故查找过程中，多次带故障电流操作不同类型的开关，产生频繁的操作过电压，各种过电压波形叠加、严重畸变。因此，多种不同类型过电压的同时存在是造成电缆事故的直接原因。

(3) 近年来，由于空调、电磁炉及其他一些感性用电设备的猛增，使 10kV 配电系统的电气参数发生了很大的变化，使系统更容易产生谐振，进而造成电缆、避雷器、电压互感器等元件的损坏。

4 铁磁谐振的防治措施

防治铁磁谐振过电压的主要技术措施包括两个方面：一是增加阻尼，限制谐振的产生和发展；二是设法改变系统参数，破坏谐振条件。

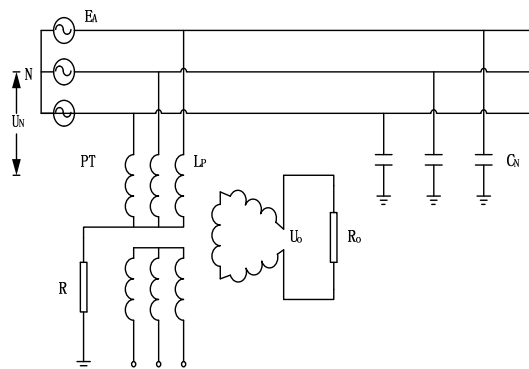


图 6 在开口三角串接阻尼电阻

(1) 如图 6 所示，系统正常运行时，开口三角绕组两端电压基本为零，串接电阻 R_0 并不影响系统的正常运行。当开口三角绕组两端出现不平衡电压 U_0 时，电阻 R_0 将起到消耗能量的作用， R_0 阻值越小，消耗的能量就越多，限制谐振的效果就越明显。但 R_0 阻值也不宜过小，因为中性点不接地系统允许带单相接地运行 2h，此时开口三角绕组两端会产生 100V 的零序电压（完全金属性接

地), 若 R_0 阻值过小会造成电压互感器发热严重而烧毁。在开口三角两端接入白炽灯泡^[11], 也是一种简单而有效的方法。

(2) 通过对该站事故原因的分析, 在电网运行和发展过程中, 根据电网的扩建情况, 应定期检测系统电容电流的大小, 适时安装消弧线圈, 并及时调整消弧线圈的补偿度。由于消弧线圈的感抗远小于电压互感器的励磁感抗, 与母线等设备的对地电容很难满足谐振条件, 因此中性点接入消弧线圈会大大减少铁磁谐振过电压发生的几率, 并能有效限制弧光接地过电压的产生。

(3) 该站 2 台 35kV 主变均为有载调压变压器, 在 10kV 医院线、建安线、老户人线、张东线 4 条出线故障处理完毕恢复送电时, 为避免再次发生谐振, 可通过调整变压器有载调压分接头, 并配合电容器组的投切, 在变电站母线电压和变压器受电率符合规定的前提下, 改变系统网络的参数, 躲开谐振区域。

实际操作时可先将变压器有载调压分接头调低 1~2 个档位, 然后将电容器组投入运行, 通过这种方式, 可以有效地破坏谐振条件。

(4) 选择伏安特性较好, 不易饱和的电压互感器, 如电容式电压互感器 (CVT)。CVT 在合闸充电或单相接地故障情况下铁心不易饱和, 从而避免了谐振的发生。

5 结束语

(1) 改变接地处理模式

为避免再次发生同类事故, 针对电缆出线密集的变电站建议采取以下措施:

①发生单相接地时, 不再采取分段查找故障点的方法, 直接将接地故障线路停运, 由配电运行工区在线路热备用的情况下查线, 避免单一元件故障影响整个系统。

②对于查线无问题的线路, 尽量采用其它电源送电, 若送电正常, 再倒回原站供电; 若送电后接地仍在, 应待故障处理完毕后再倒回原站供电。

(2) 采用有串联间隙的氧化锌避雷器

有串联间隙的氧化锌避雷器集中了氧化锌电阻片和串联间隙二者的优点。串联间隙起到了有效的隔离作用, 使氧化锌电阻片只承受很小的电压, 避免了正常工作时长期直接承受工频电压的波动和泄漏电流的劣化作用, 大大改善了电阻片的工作条

件, 从而能更好的发挥氧化锌电阻片的性能, 延长了使用寿命。由于氧化锌电阻片具有优异的非线性特性, 不存在间隙放电特定问题, 因此串联间隙动作后立即熄弧, 大大延长了间隙的使用寿命。有串联间隙的氧化锌避雷器还能在很大程度上减小操作过电压对系统绝缘的危害, 从而有效避免爆炸事故和谐振的发生。

(3) 针对季节特点强化设备运维

铁磁谐振过电压会对电网产生较大的危害, 且在中性点不接地系统中, 设备绝缘水平低且运行环境恶劣, 由绝缘子闪络等原因造成的单相接地故障更是频繁发生, 而单相接地又是最常见的激发铁磁谐振的诱因, 因此避免单相接地的发生对减少铁磁谐振的产生至关重要。2014 年春节期间, 很多地区都经历了严重的雾霾天气, 江苏地区因避雷器故障、瓷瓶闪络、污闪、异物短路等原因共造成 35kV 及以上输变电设备故障跳闸 12 起 (不含用户设备原因)。在东三 I 线故障抢修过程中, 省检组织应急抢修人员完成了 96 基塔玻璃绝缘子清扫, 省送组织完成了 8 串故障相绝缘子的更换工作, 35kV 及以下配电网因天气原因造成设备事故的情况更是频繁发生。因此应针对季节特点强化设备运维, 特别是加大雾霾、冰冻等恶劣天气下设备的运行维护工作, 并结合计划停电加强污秽严重地区避雷器外表的清洗, 及时消除缺陷和隐患, 避免因设备原因造成单相接地故障继而激发谐振过电压的发生。

(4) 加快配网自动化建设

随着城市的改造, 电缆化程度的提高, 由电缆故障导致单相接地的比率会逐步增加, 且电缆的事故象征较小, 故障点查找难度较大, 应加快配网自动化的建设, 依靠配网自动化的功能快速查找接地范围, 切除接地点。

建议对电缆线路使用分段重合器, 以快速定位并隔离故障, 并在配出回路加装接地和短路故障指示仪, 充分利用故障定位技术和带电检测技术, 减少接地故障的查找时间。

参考文献:

- [1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 张纬拨. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

- [3] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007. 10-12.
- [4] 兰华, 王彬, 杨龔亮. PT 励磁特性对铁磁谐振的影响及检测研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(10): 10-14.
- [5] 束洪春, 赵兴兵, 彭仕欣. 中压电网铁磁谐振及 TV 高压保险熔断分析与抑制措施[J]. 中国电力, 2009, 42(1): 17-23.
- [6] 胡强, 李泽冰, 叶君. PT 熔断器故障原因挖掘及治理方法分析[J]. 电测与仪表, 2011, 48(11): 58-62.
- [7] 张丰, 郭碧媛. 10kV 三相电磁式电压互感器并列运行时烧毁原因分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 108-111.
- [8] 周浩, 余宇红, 张利庭. 10kV 配电网铁磁谐振消谐措施的仿真比较研究[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 24-34.
- [9] 刘春玲, 耿卫星, 刘建武. 一起电力系统谐振事故分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 108-117.
- [10] 司增彦. 一起 110kV 氧化锌避雷器 (MOA) 事故的原因分析及对策[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 399-400.
- [11] 翁利民, 陈灵欣, 靳剑峰. 配电网电压互感器铁磁谐振的特点与抑制[J]. 继电器, 2004, 32(20): 40-42.

作者简介:

袁光伟 (1987—), 男, 江苏徐州人, 硕士, 从事电网调度工作;

沙 倩 (1987—), 女, 江苏徐州人, 硕士, 从事变电运维工作。