

电压互感器铁磁谐振的产生与消除

杨斌文, 李文圣

(湖南文理学院 电气工程系, 湖南 常德 415003)

摘要: 从本地系统产生谐振的实例出发, 分析了电压互感器产生铁磁谐振的机理, 包括直接接地系统对地电容引发的铁磁谐振、不接地系统单相接地引起的铁磁谐振和断路器接口并联的电容形成的铁磁谐振。找出了产生谐振的 4 个方面的具体原因。并从产生谐振的机理出发, 全面阐述了消除谐振的 8 项措施, 如在倒母线的操作中增加馈出线路的长度; 在电压互感器一次侧中性点接地线上投入电阻; 安装零序电压互感器; 装设消谐器等。根据谐振的程度大小和出现谐振的具体原因, 恰当运用这些措施, 就能确保系统的可靠运行。

关键词: 电磁式电压互感器; 铁磁谐振; 机理; 消除措施

中图分类号: TM 451

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2010)03-0134-03

0 引言

电压互感器(TV)广泛用于电力系统,起着隔离高电压与变换电压的作用,对电力系统和电力设备的安全性、可靠性有着十分重要的意义。然而,由于一般所用电磁式 TV 的电磁特性、线路与设备的接地电容,使得系统产生铁磁谐振,出现误发接地信号、烧毁高压熔断器,甚至使 TV 也过热烧毁、喷油爆炸,严重影响电力系统的安全运行^[1-2]。本文结合本地相关实际情况,深入分析了产生铁磁谐振的原因,全面总结了消除铁磁谐振的方法。

1 铁磁谐振的产生

1.1 产生谐振的实例

电力系统出现 TV 铁磁谐振是比较常见的,仅举 3 例有代表性的情况。

a. 例 1,本地津市一所 220 kV 变电站,有多条负载出线,采用双母线带旁路母线的接线方式,于 2007-10-12 出现 TV 铁磁谐振。当时母线 II 经母线联络开关热备用,母线 I 带负荷运行。当母线 II 刀闸关合,断路器对母线 II 充电,约 1 min 后,母线 II C 相 TV 爆炸,飞出的瓷管碎片损坏了母线的三相避雷器与另一组 TV,喷出的高温油涌进靠近的电缆沟,使得 100 余根控制电缆着火烧坏。

b. 例 2,本地岗市变电站是一座具有 110/35/10 kV 3 个电压等级的变电站,2007-07-21~2007-07-23 系统共发生了 5 次 TV 铁磁谐振,三相高压熔断器同时熔断的故障,共烧毁 10 kV 的熔断器 15 只。具体情况是:每次出现系统单相接地故障后,A、B 两相的电压 U_A 、 U_B 升高至 17.5 kV,告警铃响,大约 1 min 后 TV 高压侧熔断器熔断,光字屏显示 TV 断线报警,三相电压变为零。

c. 例 3,本地石门一 110 kV 变电站,2008-03-08 在设备运行过程中发生了 TV 铁磁谐振。尽管谐振经过熔断器断口的并联电容器,使其能量减小,但还是损坏了 2 台 TV(共由 3 只单相互感器组成 Y_0 , y_0 , d 联接)。对 TV 解体后发现,其内部绝缘损坏,二次绕组烧毁,互感器所装波纹金属膨胀器也全部顶出互感器。

1.2 产生谐振的机理

TV 铁磁谐振基本上有 3 种情况。

a. 直接接地系统对地电容引发的铁磁谐振。系统的接线图如图 1(a)所示,图中 C_A 、 C_B 、 C_C 为线路及设备中的接地电容(忽略很小的线间电容), L_A 、 L_B 、 L_C 为 TV 一次侧绕组电感。图 1(b)为 A 相的等效电路图(其他两相电路相同),其中 R_1 、 R_2 为相应线路的等效电阻。该并联电路的总导纳:

$$Y = \frac{1}{R_1 + 1/(j\omega C_A)} + \frac{1}{R_2 + j\omega L_A} = \left[\frac{R_1}{R_1^2 + 1/(\omega C_A)^2} + \frac{R_2}{R_2^2 + (\omega L_A)^2} \right] + j \left[\frac{1/(\omega C_A)}{R_1^2 + 1/(\omega C_A)^2} - \frac{\omega L_A}{R_2^2 + (\omega L_A)^2} \right] \quad (1)$$

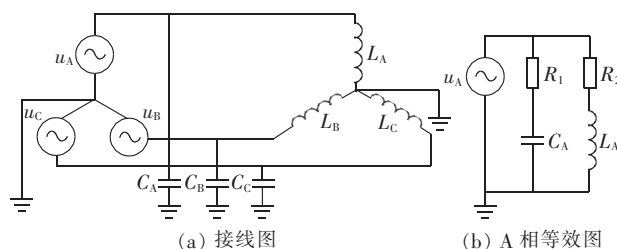


图 1 对地电容引发谐振的线路图

Fig.1 Circuit diagrams of system-earth capacitance causing ferroresonance

根据发生并联谐振的条件:电路总电纳等于零^[3],则由式(1)有

$$\frac{1/(\omega C_A)}{R_1^2 + 1/(\omega C_A)^2} - \frac{\omega L_A}{R_2^2 + (\omega L_A)^2} = 0 \quad (2)$$

即当系统的 ω 、 R_1 、 R_2 、 L_A 、 C_A 中的某些参数发生改变,使之满足式(2),系统就发生并联谐振,其谐振的频率为固有频率,由式(2)求得:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_A C_A}} \sqrt{\frac{L_A / C_A - R_2^2}{L_A / C_A - R_1^2}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_A C_A}} \sqrt{\frac{L_A / C_A - R_2^2}{L_A / C_A - R_1^2}}$$

b. 不接地系统的单相接地引起的铁磁谐振。

系统的接线图如图2(a)所示,正常运行时TV铁心不饱和,各相电路的 $X_C < X_L$,系统呈容性,每相等效为电容 C' 。当系统出现单相(如C相)接地时,其他两相(A、B相)的相电压会升高 $\sqrt{3}$ 倍,使其TV的铁心饱和,此时A、B两相的负荷将发生反倾,即由容性变为感性^[4],则可用一个等效电感 L' 来表示,而C相仍然等效为 C' ,其等效电路如图2(b)所示。进一步化简,整个电路可等效为图2(c),其中 R 为线路的等效电阻。显然这是一个串联电路。

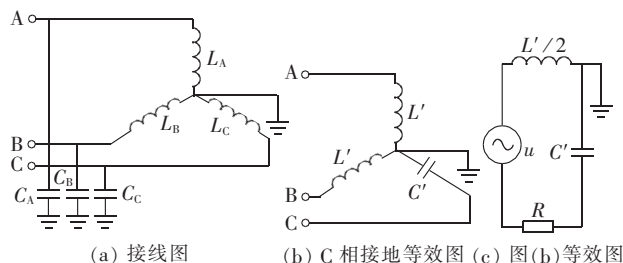


图2 单相接地引起谐振的线路图

Fig.2 Circuit diagrams of single-phase grounding fault causing ferroresonance

根据发生串联谐振的条件:其容抗与感抗相等^[3],则有

$$\frac{1}{\omega C'} = \frac{\omega L'}{2} \quad (3)$$

即当单相接地后,系统的参数满足式(3),则发生串联谐振,谐振的频率为固有频率,由式(3)求得:

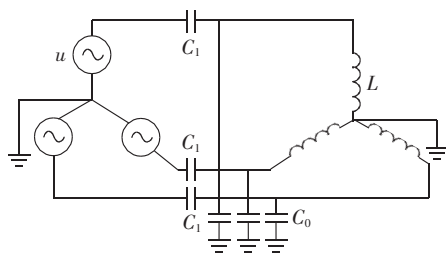
$$\omega_0 = \sqrt{2/(L'C')}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2/(L'C')}$$

c. 断路器接口并联的电容形成的铁磁谐振。在110 kV及以上直接接地系统中,为增加断路器的灭弧能力,一般在断路器的高压断口并联电容器^[5]。在倒母线的操作中,出线断路器拉开,该电容 C_1 就和接地电容 C_0 共同存在系统中,其接线图如图3(a)所示。图3(b)是一相的等效电路图,进一步化简可等效为图3(c)所示电路,图中 $C' = C_1 + C_0$, $u' = uC_1/(C_1 + C_0)$, R 为一相线路的等效电阻。显然这也是一个串联电路,同上当系统参数满足 $1/(\omega C') = \omega L$ 时,系统也会出现谐振。

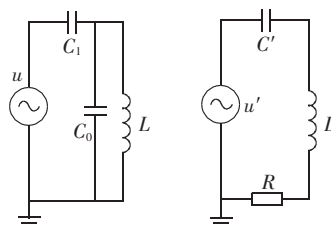
1.3 产生谐振的原因

依据上述产生谐振的条件,有4个原因可引起谐振。

a. 当投入电力系统的电力线路长度发生变化时,线路对地电容与线路电阻将发生改变。如空载线路投切操作、对空母线充电,尤其是短母线进行



(a) 接线图



(b) 一相等效图

(c) 图(b)等效图

图3 断路器断口电容形成谐振的线路图

Fig.3 Circuit diagrams of parallel capacitor of breaker causing ferroresonance

倒母线操作时,易产生对地电容引起的并联谐振。前述例1就是此类情况。

b. 当系统运行状态突变,在暂态激发条件下,TV铁心饱和,其电感量 L 处于非线性变化。如有线路瞬间接地、雷电感应侵入电网,尤其系统出现单相接地,易产生串联谐振^[6]。前述例2就是此类情况。

c. 直接因突然投入系统的电容变化而引起谐振。如补偿电容器的投入、断路器断口打开时的并联电容,易产生类似例3的串联谐振。

d. 由于线路分合或运行状态突变时,会产生多次或分次谐波,从而使 ω 发生变化。如拉合刀闸、跌落式熔断器动作等,可能引起并联或串联谐振^[7]。

2 消除谐振的措施

由前述产生谐振的机理可知,要消除谐振就要破坏产生谐振的条件,即改变电力线路的参数。具体有8项措施。

a. 在倒母线的操作中增加馈出线路的长度。实用中一般是投入一段几十千米长的空载架空线路,增大母线对地电容及线路电阻^[8]。

b. 在TV一次侧中性点接地线上接入电阻以增大阻尼。原则上所接电阻越大越好,但太大有可能发生单相接地时损坏中性点绝缘,实用中一般为几十千欧。

c. 在TV二次侧辅助开口三角形绕组两端接入电阻或白炽灯泡,使在谐振时开口三角形绕组中产生附加励磁电流,改变TV一次侧的等效电感。原则上所接电阻越小越好,但太小系统单相接地时易使绕组电流过大,危及TV的安全。实用中一般电阻约为30 Ω 或300~500 W灯泡^[9]。

d. 利用母线上安装的补偿电容器(大部分配电站已安装,一般未投入),当发生谐振或倒闸后电压表显示混乱时,可把电容器投入,增大母线电容。待

谐振消除后再切除电容器以避免过补偿。

e. 取消断路器断口的电容器,可避免该电容器引起的谐振。应注意取消后断路器的灭弧能力有所下降,其开断容量降低到原来的 70% 左右,若容量不够,应重新更换。

f. 安装零序 TV。就是在原 TV 的中性点串入单相零序 TV₀^[10],如图 4 所示。

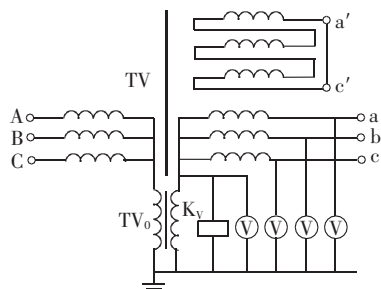


图 4 零序电压互感器消谐接线图

Fig.4 Circuit diagrams of zero-sequence PT for ferroresonance depression

当系统出现单相接地时,其零序电压主要加在 TV₀ 上,使原 TV 非接地相绕组上承受的电压也只为相电压(不会升高为 $\sqrt{3}$ 倍相电压),TV 的铁心不会进入磁饱和状态,因而不会产生铁磁谐振。

应该注意的是:原 TV 的辅助开口三角形绕组两端 a'c' 要短接或接上小电阻、灯泡以消除 3 次谐波的影响;为正确反应电压变化,TV₀ 的变比和原 TV 的变比要一致;接地继电器 K_V 的整定值应比原来接在辅助三角形绕组开口端的整定值小一些(减少约 1/4),以保证可靠发出接地信号。

g. 装设消谐器。目前有 2 种类型的消谐器^[11]:一种是由晶闸管和鉴频电路组成,接在 TV 辅助绕组开口三角形两端,如 KFX 型等消谐器。当开口处出现约 25 Hz 的电压时,鉴频电路向晶闸管门极输出一个大于 0.7 V 的电压信号,晶闸管导通短接开口三角形绕组,达到消除谐振的作用。另一种是由多个非线性电阻串联而成,接在 TV 一次侧绕组中性点与地之间,如 LXQ 型、RXQ 型等消谐器。它是利用电阻来阻尼 TV 铁心饱和引起的铁磁谐振。研究表明:当消谐器电阻 $R \geq 6\%$ TV 在线电压下的励磁阻抗时,基本上可以消除铁磁谐振。

从本地的实际应用情况看,TV 开口三角形绕组两端使用 KFX 型消谐器,虽然没有出现烧毁 TV 的现象,但时常发生 TV 高压侧熔断器熔断的事故,如前述例 2。后来改用 TV 一次侧中性点所接的消谐器(35 kV 及以上用 RXQ 型,10 kV 用 LXQ 型),能有效地消除 TV 铁心饱和引发的铁磁谐振,至今未出现烧毁 TV 与因谐振熔断高压熔断器的现象。

h. 采用性能优良的 TV。对于电磁式 TV,可选用励磁特性饱和点较高的互感器(如三相五柱油绝缘 TV),铁心不易饱和,很难激发起谐振^[12]。另外,可选用电容式 TV,则能避免系统铁磁谐振的产生,且自身的谐振有阻尼器保护。但这种互感器次级容量

偏小,且价格较贵。

在上述消谐措施中,对于铁磁谐振发生次数较少、谐振程度不太严重的电力系统,方法 a~d 都具有一定的效果;方法 e 对于断路器高压断口并联电容器的系统效果较好;对于谐振次数发生较多、谐振程度又比较严重的系统,采用方法 f~h 效果较好,其中方法 f 的经济性要好一些,方法 h 中选用电容式 TV 则可完全避免铁磁谐振。

3 结论

由于电力系统运行状态突变等原因,使得系统对地电容或系统电感发生变化,一旦满足并联谐振或串联谐振的条件,就产生铁磁谐振,影响电网的可靠运行,甚至损坏电力设备。但是,只要根据产生谐振的原因与次数多少,恰当选用本文介绍的消谐措施,就能确保电网的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 周志敏. 变压器实用技术问答[M]. 北京:电子工业出版社, 2004:168.
- [2] 傅旭,王锡凡,杜正春. 电力系统电压稳定性研究现状及其展望[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):1-9.
FU Xu,WANG Xifan,DU Zhengchun. Survey of power system voltage stability study[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005,25(2):1-9.
- [3] 史仪凯. 电工技术[M]. 北京:科学出版社,2005:178-182.
- [4] 任力,张卫东. 一起电网系列过电压事故的分析[J]. 高压电器, 2005,41(4):310-312.
REN Li,ZHANG Weidong. Analysis of a serial power grid overvoltage accident[J]. High Voltage Apparatus,2005,41(4):310-312.
- [5] 苏文博,童明光. 由系统谐振引发的热电厂复故障分析[J]. 电力自动化设备,2005,25(4):92-95.
SU Wenbo,TONG Mingguang. Analysis of multi-fault caused by syntony in power plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(4):92-95.
- [6] 汪伟,汲胜昌,李彦明,等. 电压互感器饱和引起铁磁谐振过电压的定性分析与仿真验证[J]. 变压器,2009,46(2):30-33.
WANG Wei,JI Shengchang,LI Yanming,et al. Qualitative analysis and simulation verification of ferroresonant overvoltage caused by PT saturation[J]. Transformer,2009,46(2):30-33.
- [7] 周建军,樊高瑞. 10 kV 防谐振 PT 二次回路分析[J]. 高压电器, 2006,42(6):475-477.
ZHOU Jianjun,FAN Gaorui. Analysis of 10 kV anti-resonance PT secondary circuit[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(6): 475-477.
- [8] 李景禄. 实用配电网技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006: 157.
- [9] 周鹤良. 电气工程师手册[M]. 北京:中国电力出版社,2008: 103-104.
- [10] 吴锋,徐晨兰. 10 kV 用户变电所常用保护设备的级间保护[J]. 电工电气,2009(6):37-39.
WU Feng,XU Shenglan. Interstage protection for commonly used protection equipment in 10 kV user substation[J]. Electrotechnics Electric,2009(6):37-39.
- [11] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M].北京:中国电力出版社, 2005:97-98.
- [12] 李林峰. 变电站综合自动化技术的应用[J]. 供用电,2007,24(4): 24-27.

(上接第 136 页 continued from page 136)

LI Linfeng. Application of substation comprehensive automation system technology [J]. Distribution & Utilization, 2007, 24 (4): 24-27.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

杨斌文(1946-),男,湖南常德人,教授,研究方向为电机电力的控制与节能(**E-mail**: hh0822@126.com);

李文圣(1975-),男,湖南常德人,实验师,研究方向为电力电子设备的控制应用。

Causes of PT ferroresonance and countermeasures

YANG Binwen, LI Wensheng

(Department of Electric Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415003, China)

Abstract: The mechanism of PT ferroresonance is analyzed with the local system instances introduced by the system-earth capacitance in solid grounding system, the single-phase grounding of non-grounding system and the parallel capacitor of breaker. 4 causes of ferroresonance are found and 8 countermeasures are proposed: increase the length of output wire for bus transition, insert resistor into the neutral grounding line at PT primary side, install zero-sequence PT, fix resonance depressor, etc. For the reliable operation of electric power system, it is helpful to implement favorable countermeasures according to the degree and cause of ferroresonance.

Key words: electromagnetic PT; ferroresonance; principle; countermeasures