

电力系统局部电路谐波谐振产生原因分析及对策

董国震, 和敬涵

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 对在谐波源产生的谐波作用下, 电力系统局部电路发生串、并联谐振的原因进行深入分析, 论述了电力系统运行中较常见的电磁式电压互感器铁芯饱和引起的谐波谐振的发生原理, 针对谐波谐振过电压的危害提出了预防和应对措施, 通过减少谐波源, 限制注入电网的谐波电流和采取措施使系统参数处于谐振范围之外来预防和抑制谐波谐振的发生。

关键词: 谐波谐振; 谐波源; 串联谐振; 并联谐振

Causal analysis and countermeasure on harmonic resonance in local circuit of electric power systems

DONG Guo-zhen, HE Jing-han

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper analyses the reasons of series resonance and parallel resonance effected by harmonic from the harmonic source in local circuit of electric power system, discusses the theory that core saturation of electromagnetic potential transformer results in harmonic resonance in the running of electric power system, and puts forward precautionary measure and countermeasure to deal with the overvoltage's harm of harmonic resonance. Decreasing harmonic source, limiting harmonic electrical current breathed into electric network, and taking action which can keep system parameter out of the range of resonance can prevent and restrain harmonic resonance.

Key words: harmonic resonance; harmonic source; series resonance; parallel resonance

中图分类号: TM711

文献标识码: B

文章编号: 1003-4897(2007)01-0077-05

0 引言

谐波谐振是电力系统运行中一种较常见的现象, 由于它发生时对电力系统危害较大, 已经日益引起人们的重视。

谐波作为一个周期性电气量的正弦分量, 其频率是基波频率的整数倍。当电力系统向非线性设备(所加的电压与产生的电流不成线性关系而造成的波形畸变)及负荷供电时, 这些设备或负荷在传递、变换、吸收系统发电机所供给基波能量的同时, 又把部分基波能量转换为谐波能量, 向系统倒送大量的高次谐波, 使电力系统的正弦波形畸变。电力系统中引起系统正弦波形畸变, 产生高次谐波的谐波源主要分为三类:

1) 铁磁饱和型: 各种铁芯设备, 如变压器、电磁式电压互感器、电抗器等, 其铁磁饱和特性表现为非线性, 产生的谐波以3、5、7次为主。

2) 电子开关型: 主要是各种交直流换流装置(整流器、逆变器)以及双向晶闸管、可控开关设

备(可控硅装置)等, 其交流波形的开关切合和换向特性表现为非线性, 产生的谐波以奇次谐波为主。

3) 电弧型: 各种炼钢电弧炉在熔化期间、交流电弧焊机在焊接期间以及电力高压断路器开合时断口拉弧瞬间, 电弧的点燃和剧烈变动所形成的电弧电压与电流的高度非线性, 产生的谐波以2、3、4、5、7次为主。

由于电力系统谐波源固有的非线性伏安特性决定了电流波形的畸变, 使其产生的谐波电流与基波电流具有一定的比例, 因此非线性负荷一般都是谐波电流源。

当电力系统局部电路中的感抗和容抗在谐波的作用下相等时, 便发生谐波谐振现象。电磁式电压互感器作为感性负荷常参与谐振, 当电磁式电压互感器因过电压而发生铁芯饱和时, 产生的高次谐波会成为谐波谐振的谐波源。

1 谐波谐振产生原因

电力系统中的谐波谐振电路经简化后,可划分为串联谐振(电压谐振)和并联谐振(电流谐振)两种形式。

1.1 串联谐振

当系统中某些电感、电容元件与谐波源形成串联回路时,就可能发生串联谐振。谐振回路简化后如图1所示。

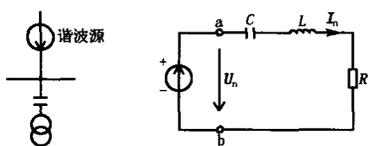


图1 串联谐振回路

Fig.1 Series resonance circuit

发生串联谐振的条件是:在谐波源产生的 n_r 次谐波的作用下,串联回路中的感抗与容抗相等,即:

$$n_r X_L = \frac{X_c}{n_r}$$

其中: X_c 为基波容抗; X_L 为基波感抗; n_r 为谐振时谐波的次数, $n_r = \frac{f_r}{f_1}$, f_r 为谐振时谐波频率, f_1 为基波频率。

当发生串联谐振时,在a、b端口的电压向量 U_n 与电流向量 I_n 相位相同, U_{Ln} 与 U_{Cn} 大小相等,方向相反,相互抵消,所以串联谐振又被称为电压谐振。

$$U_n = U_{Rn} + U_{Xn}, \text{ 其中 } U_{Xn} = U_{Ln} + U_{Cn} = 0$$

$$\text{因此 } U_n = U_{Rn}; U_{Cn} = -j \frac{1}{n_r \omega_1 C} \frac{U_n}{R} = -$$

$$jQU_n; U_{Ln} = jn_r \omega_1 L \frac{U_n}{R} = jQU_n$$

其中: Q 为谐振回路品质因数, $Q = \frac{1}{n_r \omega_1 CR} =$

$\frac{n_r \omega_1 L}{R}$; U_{Rn} 为电阻电压; U_{Xn} 为电抗电压; U_{Cn} 为电容电压; U_{Ln} 为电感电压; ω_1 为基波角频率。

当 U_n 为常数时,电流的最大值完全取决于电阻值,而与电感、电容值无关,这是串联谐振电路的一个重要特征。当谐波源产生 n_r 次高次谐波使 Q 远大于1时,就会在电感 L (如电磁式电压互感

器、变压器)和电容器 C (如断路器均压电容)上产生很高的谐波过电压,造成电力设备绝缘损坏。

谐振时回路阻抗: $Z_{nr} = R + X_{nr}$

其中: R 为谐振回路电阻; X_{nr} 为谐振回路电抗,

$$X_{nr} = j \left(n_r X_L - \frac{X_c}{n_r} \right) = 0$$

谐振时谐波源产生的谐波次数:

$$n_r = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

谐振时谐波频率: $f_r = n_r f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

由于发生串联谐振使该回路的阻抗较低,造成系统中邻近的谐波源也向其注入谐波电流,使电流增大,回路ab端电压 U_n 升高。

例如在110 kV中性点直接接地系统中,用于提高01少油断路器遮断容量而并接于断口的均压电容器与空载母线上的电磁式电压互感器形成的串联回路,如图2所示。

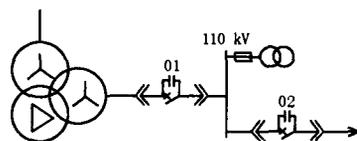


图2 110 kV 电力电路图

Fig.2 110 kV Electric Power circuit

01断路器处于热备用状态,02断路器处于冷备用状态,当主变压器送电后,在系统谐波的作用下当电压互感器的感抗 $n_r X_L$ 与01断路器均压电容器的容抗 $\frac{X_c}{n_r}$ 相等时,就会引起串联谐振。

1.2 并联谐振

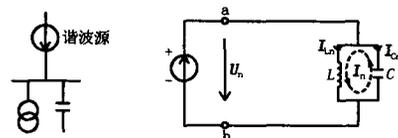


图3 并联谐振回路

Fig.3 Parallel resonance circuit

当电力系统中的某些电感、电容元件与谐波源形成并联回路时,就可能发生并联谐振。谐振回路简化后如图3所示。

联谐振的条件是: 在谐波源产生的 n_r 次谐波的作用下, 并联支路的感抗与容抗相等, 即:

$$n_r X_L = \frac{X_C}{n_r}$$

谐振时谐波源产生的谐波次数: $n_r = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\frac{1}{LC}}$; 谐

振时谐波频率: $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

回路的谐振阻抗趋向于无限大即:

$$Z_{\text{rr}} = -j \frac{X_L X_C}{n_r X_L - \frac{X_C}{n_r}} \rightarrow \infty$$

当在回路端点 a、b 外有外加谐波电流源时, 由于 $Z_{\text{rr}} \rightarrow \infty$, 即使有少量的 n_r 次谐波电流流入, a、b 间的端电压 U_n 就会无限升高, 因此在两支路中产生的电感电流 I_{Ln} 、电容电流 I_{Cn} 会无限增大, 且 I_{Ln} 与 I_{Cn} 相位相反, 两者作用形成的谐振环流 I_n 将大大超过谐波源注入的电流, 因此并联谐振又称为电流谐振。由谐波引起的过电流和过电压将会对电感、电容等设备的安全运行造成危害, 因此并联谐振比串联谐振具有更大的危害性。

以电力系统中较常见的电磁式电压互感器铁磁饱和引起的谐波谐振为例: 在中性点不接地系统中, 母线系统的对地电容 (或线路电容) 与母线电压互感器的电感与谐波源组成的并联谐振回路。

系统正常运行时, 电压互感器不饱和, 各相回

路的 $n_r X_L > \frac{X_C}{n_r}$, 当系统由于运行方式的改变,

如线路故障跳闸、电力电容器投入或切除等, 会发生三相对地电压不平衡, 三相电压有升有降, 其中一相或两相的对地电压大于线电压, 当施加在电磁式电压互感器上的电压大到一定数值时, 会引起电压互感器线圈铁芯因过电压而饱和, 电压互感器感抗降低, 流经电压互感器的电流增大。同时由于电压互感器铁芯磁路的饱和特性, 使激磁电流的波形发生畸变, 产生 n_r 次高次谐波。在谐波的作用下,

当系统的 $n_r X_L = \frac{X_C}{n_r}$ 时就会发生并联谐振。

如图 4 所示, a 点是电磁式电压互感器铁芯开始饱和的起始点, 随着电压的升高, 铁芯饱和程度逐步加深, 电压互感器感抗减小, 电感电流非线性增大, 合成电流由容性电流向感性电流过渡, 当电压互感器伏安特性曲线 U_1 到达 b 点时, 感抗减小到

使 $n_r X_L = \frac{X_C}{n_r}$, 即合成伏安特性曲线中的 b' 点, b'

点是电路的并联谐振点, 此时电路中的 I_{Ln} 与 I_{Cn} 大小相等, 方向相反, 在并联电路中形成谐振环流。

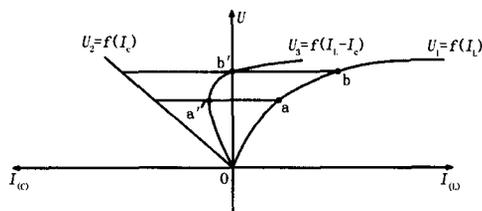


图 4 伏安特性曲线图

Fig. 4 U - I characteristic curves

其中: 电磁式电压互感器伏安特性曲线 $U_1 = f(I_1)$; 系统等值电容的伏安特性曲线 $U_2 = f(I_2)$; 两者合成的伏安特性曲线 $U_3 = f(I_1 - I_2)$ 。

由于电磁式电压互感器本身的伏安特性曲线各不相同, 因此其在不同电路中不同频次谐波作用下的谐振点也各不相同。

2 谐波谐振的危害

串联、并联电路谐振频率 f_r 与系统电阻 R 无关, 当系统谐波源频率 $f = f_r$ 时就会发生串联或并联谐振。若 L 、 C 很小, 可以激发二次或三次谐波的高次谐波谐振过电压; 若 L 、 C 很大, 则能激发分频谐波的谐振过电压, 这两种谐振过电压都表现为三相对地电压的同时升高, 而线电压正常。试验研究表明, 基波谐振和高次谐波谐振过电压一般不超过 3 倍额定电压, 对于分频谐波谐振, 由于受到电压互感器铁芯严重饱和的限制, 过电压一般不超过 2 倍额定电压, 但励磁电流急剧增加, 瞬时可达额定励磁电流的几十倍以上, 引起高压保险丝的频繁熔断。

1) 串联或并联谐振会产生高于电源数倍的电压, 施加在回路中的电容器、互感器、断路器等设备上, 引起高压电气设备绝缘损坏。在熔断器未及时熔断的情况下会引起电压互感器喷油、绕组烧毁甚至爆炸。

2) 谐振引起的过电压, 还可以导致氧化锌避雷器的损坏。无间隙氧化锌避雷器的过电压耐受能力有限, 如果选用氧化锌避雷器的直流 1 mA 电压偏低, 在过电压的作用下连续动作, 最终会发生热崩溃而损坏。

3) 在电压互感器熔断器不能及时熔断的情况下, 引起电压互感器二次电压升高, 对二次继电保

护设备和计量仪表的绝缘造成损坏或引起继电保护设备的误动。

4) 基波谐振时, 出现虚幻接地现象, 易引起值班人员的误判断, 表现为两相电压升高, 一相电压降低, 线电压正常, 其现象与单相接地相同。

5) 谐振时电磁式电压互感器铁芯的饱和会使变比误差增大, 影响计量、测量精度。

6) 谐波谐振引起电网的谐波损耗增大。

3 谐波谐振的预防和应对措施

3.1 减少谐波源的产生

1) 在选用铁芯设备时尽量选用励磁特性好、伏安特性高、铁芯不易饱和的电磁式电压互感器、变压器、电抗器。

在选用电磁电压互感器时应注意同时提高三相电压互感器的励磁特性和伏安特性曲线的线性度, 尽量选用同型号、同批次生产的单相电压互感器, 也可以采用电容式电压互感器代替电磁式电压互感器。

2) 保证断路器三相同期性

断路器三相不同时合闸, 由于合闸瞬间三相电压的不同, 会引起的三相负载的不对称, 使电源的中性点产生位移, 中性点对地电压与电源电压叠加会使三相对地电压同时升高或两相、单相对地电压升高, 使回路中的电磁式电压互感器或电抗器线圈很快饱和, 激磁电流的波形发生畸变, 产生高次谐波。

3.2 限制谐波源注入电网的谐波电流

1) 在谐波源处装设交流滤波器是防止谐波源向系统注入谐波电流的有效而通用的措施。

交流滤波器分为调谐滤波器(分为单调滤波器和双调滤波器)和高通滤波器, 对产生较低次数如 3、5、7 次谐波含量较大的大容量的谐波源, 可对每次谐波各装一个单调滤波器, 将谐波分别滤除; 对次数较高的各次谐波如 11 次及以上各次, 可通过安装一个高通滤波器将其谐波全部滤除。

2) 将有源电力滤波器装设在谐波源处, 用于抑制谐波源产生的绝大部分的谐波电流注入系统。

3.3 采取有效措施使系统的参数处于谐振范围之外

3.3.1 改变参数, 避开谐振区域

1) 控制投入电压互感器的台数。

2) 改变投入补偿电容器的组数, 在保证系统

功率因数要求的前提下, 通过改变系统的容性参数, 以避免谐振区域。

3) 中性点不接地系统经消弧线圈接地。

4) 少油断路器断口均压电容与母线电压互感器发生串联谐振时, 在断路器遮断容量允许的条件下, 取消断路器断口均压电容器。

5) 投入空载线路, 改变系统的感性或容性参数。

3.3.2 从倒闸操作程序上防止谐振的发生

在母线充电倒闸操作过程中, 若电源断路器由冷备用转为热备用时, 发生电压互感器铁磁饱和引起的母线谐波谐振, 则应立即将断路器转入运行, 通过接入空载变压器或空载线路改变电感、电容参数, 来避开谐振区域以消除谐振, 或先断开母线电压互感器刀闸, 再将电源断路器由冷备用转为热备用, 等母线充电后再将电压互感器投入; 在母线停电倒闸操作过程中, 若电源断路器由运行转为热备用时母线产生谐振, 则应立即将其返回运行状态, 将母线电压互感器刀闸断开后, 再操作电源断路器使母线停电。

3.3.3 增加回路损耗

1) 在电压互感器的高压绕组中性点串接阻尼电阻(9~20 k Ω) 或非线性电阻消谐器(如 LXQ 型消谐器) 后接地, 通过电阻的阻尼作用抑制流过绕组的谐波电流, 避免铁芯饱和产生的谐波引起谐振。

2) 在电压互感器的二次侧零序电压线圈(开口三角形绕组) 中接入低值消谐电阻(50~60 Ω), 或采用分频继电器, 当发生谐振时自动将非线性电阻接入电压互感器开口三角形回路中。

3) 采用零序电压互感器。将三台电压互感器一次侧接成星形, 中性点通过一台零序电压互感器接地, 主电压互感器二次辅助线圈接成闭口三角形以防止谐振。

4 结束语

通过上述分析可以看出, 电力系统局部电路在谐波源产生的高次谐波作用下, 当回路中的感抗与容抗相等时便会发生串联或并联谐振。电磁式电压互感器作为电力系统中常用的感性负荷常参与谐波谐振, 如果选用不当会因过电压造成铁芯饱和而产生高次谐波成为谐波源。我们可以通过减少谐波源, 限制注入电网的谐波电流和采取措施使系统参数处于谐振范围之外来预防和抑制谐波谐振的发生。

(下转第 84 页 continued on page 84)

综上所述,自并励磁系统具有接线简单、主轴系短、造价低、运行维护方便、反应速度快等明显特点,已被国内外推荐为大型发电机组的首选励磁方式。

从我院设计的各电厂的实际运行情况看,自并励磁系统事故率远低于无刷励磁系统,电厂运行管理人员欢迎使用自并励磁系统。

参考文献

- [1] GB/T7409. 1997, 同步电机励磁系统[S].
GB/T7409. 1997, Excitation System for Synchronous Electrical Machines[S].
- [2] DL/T0650-1998,大型汽轮发电机自并励静止励磁系统技术条件[S].
DL/T0650-1998,Specification for Potential Source Static Exciter Systems for Large Turbine Generators[S].
- [3] DL/T 843-2003,大型汽轮发电机交流励磁机励磁系统技术条件[S].

- DL/T 843-2003,Specification for A C Exciter Rectifier Excitation System for Large Turbine Generators[S].
- [4] 张蓉. 发电机组励磁系统技术改造[EB/OL]. 电力世界网.
ZHANG Rong. Technical Renovation of the Power Supply Unit's Excitation System[EB/OL]. www.electricpower.cn.
- [5] DeMello F P, Concordia C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control[J]. IEEE on PAS,1969,88(4).
- [6] Proke D, Sun Y, LU Xiong, et al. Nonlinear H ∞ Excitation Control[Z]. CSSPP'97,1997.

收稿日期: 2006-07-31; 修回日期: 2006-09-06

作者简介

陈利芳(1975-),女,工程师,本科,主要从事发电厂及变电站二次设计工作;E-mail: chenlifang@gedi.com.cn
陈天禄(1978-),男,大专,主要从事一、二次变电设备的维护及试验工作。

(上接第 67 页 continued from page 67)

- [6] Wakileh G J. 电力系统谐波—基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政,译. 北京:机械工业出版社,2003.
Wakileh G J. Power System Harmonic Fundamentals, Analysis and Filter Design[M]. XU Zheng, trans. Beijing: China Machine Press,2003.
- [7] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems [S].
- [8] Xu W, Marti J R, Dommel H W. Harmonic Analysis of Systems with Static Compensators [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 183-190.
- [9] 钱照明,叶忠明,董伯藩. 谐波抑制技术[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(10): 48-54.
QIAN Zhao-ming, YE Zhong-ming, DONG Bo-fan.

Harmonic Suppression Technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(10): 48-54.

- [10] 冯煜理,王雷,陈陈,等. 电力系统仿真软件 ETAP 的特性与功能简介[J]. 供用电, 2005, 22(5): 23-26.
FENG Yu-cheng, WANG Lei, CHEN Chen, et al. Synopsis about Characteristic and Function of Electric Power Systems Simulation Software ETAP [J]. Distribution & Utilization, 2005, 22(5): 23-26.

收稿日期: 2006-06-30; 修回日期: 2006-10-14

作者简介

余颖(1972-),女,电气工程师,硕士,主要研究方向为海上平台电力系统设计研究,模式识别与智能系统研究。
E-mail: yuer_033@sina.com

(上接第 80 页 continued from page 80)

随着经济的快速发展,由于众多的家用电器和电弧炉等非线性负荷的不断增多和容量增大,电力系统中的谐波水平日益提高,由谐波引起的系统谐振所产生的过电流、过电压对电力系统的安全运行带来的危害不容小视,开展预防和抑制谐波谐振方面的研究,对于电力系统的安全运行意义重大。

参考文献

- [1] 吕润余. 电力系统高次谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
Lü Run-yu. High Frequency Harmonic of Electric Power Systems [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] 董振亚. 电力系统的过电压保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1997.
DONG Zhen-ya. Overvoltage's Protection of Electric Power Systems[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power

Press, 1997.

- [3] 陈维贤. 电网过电压教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
CHEN Wei-xian. A Tutorial on Overvoltage of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [4] 张纬敏,何金良,高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
ZHANG Wei-po, HE Jin-liang, GAO Yu-ming. Overvoltage's Protection and Insulation Coordination[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002

收稿日期: 2006-07-01; 修回日期: 2006-11-05

作者简介

董国震(1973-),男,高级工程师,硕士研究生,从事电力系统运行设备试验、检测研究;E-mail: zhen3183@Yahoo.com.cn
和敬涵(1964-),女,副教授,从事电力系统稳定控制、在线监测与智能管理研究。