

对电压互感器饱和引起电位偏移 与铁磁谐振的分析

刘增良¹,李铁玲¹,刘国亭²

(1. 铜陵学院 电气工程系, 安徽 铜陵 244000;

2. 河北工程技术高等专科学校 电机工程系, 河北 沧州 061001)

摘要: 分析了串联铁磁谐振电路的 2 种稳定工作状态, 即非谐振状态和谐振状态。前者电路呈感性, 回路电流和电感、电容上电压都不大; 后者电路呈电容性, 不仅回路电流大, 且电感、电容上产生过电压。利用等值电路变换及矢量分析的方法, 对配电网中电磁式电压互感器饱和引起的过电压现象进行了分析。结果表明: 在中性点绝缘系统中, 电磁式电压互感器饱和会使系统中出现不同程度的中性点电位偏移, 导致一相或两相对地电压升高, 但系统中并未发生真正的工频铁磁谐振。故可得出结论: 在中性点绝缘系统中, 因电磁式电压互感器饱和引起的过电压现象属于工频位移过电压。

关键词: 电压互感器; 铁磁谐振; 电位偏移

中图分类号: TM 451

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)11-0021-03

1 铁磁谐振电路及其 2 种稳定工作状态

众所周知, 铁磁谐振电路有 2 种: 一种是非线性电感与电容相串联, 另一种是两者相并联, 铁磁电压谐振发生在前一种电路中^[1-3]。简单的 LC 串联等值电路如图 1(a) 所示。设回路中只有基波电压和电流, 电感及电容上的电压随电流变化的曲线如图 1(b) 所示。曲线上的电压及电流均用有效值表示。

由于 C 为常数, 故电容上的电压 U_C 与电流 I 的关系是一条直线。铁芯电感则由于其磁饱和特性, 电流较小时具有未饱和的电感值 L_0 , 随着电流增加, 铁芯逐渐饱和, 电感值将逐渐下降, 故 U_L 与 I 的关系不是一条直线。若铁芯未饱和时有

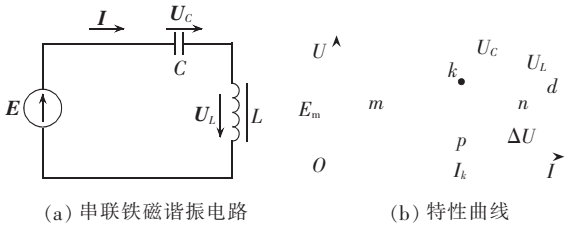


图 1 串联铁磁谐振电路及其特性曲线

Fig.1 The series ferromagnetic resonance circuit and its characteristic curve

$$\omega L_0 > 1 / (\omega C) \tag{1}$$

其中, ω 为电源角频率, 则在铁芯逐渐饱和的过程中, 两曲线将有交点 k 。相交时 $U_C = U_L; I = I_k$ 。根据电压的平衡条件可得出:

$$E = U_L + U_C \tag{2}$$

收稿日期: 2005-11-25; 修回日期: 2006-03-20

因 U_L 与 U_C 反相, 故有

$$E = |U_L - U_C| = \Delta U \quad (3)$$

ΔU 为回路电压降总和的绝对值, 它与电流 I 的关系表示于图 1(b) 中。 $I = I_k$ 时, $\Delta U = 0$ 。图中的 p 点如同线性回路的谐振点, 但又与线性谐振有着重要的区别。首先, 铁芯电感的磁饱和特性使回路的自振频率不是一个常数。铁芯未饱和时回路的自振频率低于电源频率, 随着电流增加, 电感值下降, 自振频率上升。上升至接近或等于电源频率时, 便满足了串联谐振条件。其次, 用“小扰动”法判断^[1,4]可知; 实际上 p 点为不稳定工作点, 回路的工作状态只能稳定在曲线的 Om 段或 pd 段, 其中 Om 段为非谐振区, pd 段为谐振区。

由以上分析可知: 铁磁电压谐振电路有 2 种稳定工作状态, 即非谐振状态和谐振状态。若工作在非谐振状态, 回路呈电感性, 即电感上的电压 U_L 总是高于电容上的电压 U_C , 此时回路电流和电感与电容上的电压都不大; 若工作在谐振状态, 回路呈电容性, 即电容上的电压 U_C 总是高于电感上的电压 U_L , 此时不仅回路电流大, 电感及电容上也会出现过电压。由于存在非稳定工作区, 故当回路参数平滑变化时, 回路的工作状态可能发生突变。如果电源电势 E 由零逐渐增加, 回路工作点将由 O 点逐渐增加至 m 点, 随后突变到 n 点, 回路也由电感性突变到电容性。若电势 E 缓慢下降, 工作点将由 n 点逐渐降到 p 点, 再突降到零点。这种工作点的跃变现象可使回路电流相位发生 180° 变化, 称之为相位反倾现象。

2 工频电位偏移与铁磁电压谐振

中性点绝缘系统带 Y_0 联接的电压互感器三相等值电路如图 2(a) 所示。

图中 E_A, E_B, E_C 为对称的三相电源电势; L_A, L_B, L_C 为互感器各相激磁电感; C_0 为各相导线及母线的对地电容。令 C_0 与各相激磁电感并联后的导纳分别为 Y_A, Y_B, Y_C 。正常运行时三相参数对称, 由于电压互感器激磁电感较大, 故并联后的导纳呈容性, 也即 $Y_A = Y_B = Y_C = j\omega C$, 此时电源中性点具有地电位, 即若以 Y_A 为负载, 利用等效电源定理将图 2(a) 用单相等值电路表示, 如图 2(b) 所示, 则有

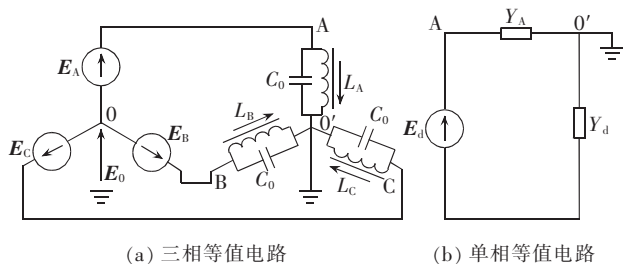


图 2 中性点绝缘系统带 Y_0 联接的电压互感器等值电路

Fig.2 Equivalent circuits of voltage transformer with Y_0 connection in system insulated neutral

$$E_0 = -\frac{E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = 0 \quad (4)$$

$$E_d = E_{AB} + E_{BC} / 2 = 3E_A / 2 \quad (5)$$

$$Y_d = Y_B + Y_C = 2j\omega C$$

由于相串联的 Y_A 及 Y_d 均为容性, 显然此时回路中不会产生铁磁电压谐振^[1-3]。

设系统受到干扰后三相参数不再相等, 但各相仍为容性导纳, 即 $Y_A = j\omega C_A; Y_B = j\omega C_B; Y_C = j\omega C_C$ 。此时电源中性点将产生电位偏移

$$E_0 = -\frac{E_A C_A + E_B C_B + E_C C_C}{C_A + C_B + C_C} \quad (6)$$

E_0 的产生使系统中将出现一相或两相对地电压升高, 如图 3 所示。

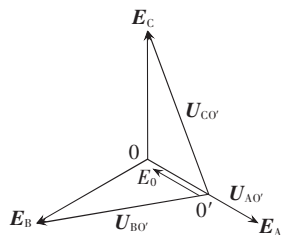


图 3 中性点产生电位偏移时三相等值电路矢量图

Fig.3 Vector diagram of three-phase equivalent circuit with voltage shift at neutral point

由于要满足 $I_A + I_B + I_C = 0$ 的电流平衡条件, 中性点偏移的位置在电压三角形之内, 故电压升高不会超过线电压。此时相应的单相等值电路参数为

$$E_d = E_{AB} + K E_{BC}, \quad Y_d = j\omega C_B + j\omega C_C \quad (7)$$

K 值由 C_B 与 C_C 的比值决定。由于 Y_d 及 Y_A 均为容性, 故此时电路中也不会产生铁磁电压谐振。

设系统受到干扰后, A 相因严重饱和使导纳呈感性, 其余两相仍为容性。

为便于分析设 $Y_A = 1/(j\omega L); Y_B = Y_C = j\omega C$, 则有

$$E_0 = -\frac{E_A / (j\omega L) + E_B j\omega C + E_C j\omega C}{1/(j\omega L) + j\omega C + j\omega C} = \frac{E_A \frac{\omega C + 1/(\omega L)}{2\omega C - 1/(\omega L)}} \quad (8)$$

其中

$$\frac{\omega C + 1/(\omega L)}{2\omega C - 1/(\omega L)} = \frac{1 + 1/(\omega^2 LC)}{2 - 1/(\omega^2 LC)} > \frac{1}{2}$$

根据上式可知 E_0 与 E_A 同相, 且 $E_0 > E_A / 2$, 造成系统中一相(饱和相)对地电压升高, 且可能超过线电压, 中性点 O 将位于电压三角形之外。单相等值电路的参数为

$$E_d = E_{AB} + E_{BC} / 2 = 3E_A / 2 \quad (9)$$

$$Y_d = Y_B + Y_C = 2j\omega C$$

由于此时 Y_A 为感性, Y_d 为容性, 回路中似乎有可能产生工频铁磁电压谐振, 但事实并非如此。可用矢量法进行分析。根据图 2(a), A 相对地电压为

$$U_A = E_A + E_0 \quad (10)$$

由式(8)及式(9)知,此时 E_A 、 E_0 、 E_d 均同相,故式(10)中的 U_A 也将与 E_d 同相。由图 2(b)又知

$$E_d = U_A + U_{Yd} \text{ 或 } U_A - E_d = -U_{Yd} \quad (11)$$

且因 Y_A 为感性, Y_d 为容性,故 U_A 与 U_{Yd} 一定反相,于是此时一定有 $U_A > E_d$ 、 $U_A > U_{Yd}$,即电感上的电压大于电容上的电压,因此电路仍不具备工频铁磁电压谐振的条件。

设系统受到干扰后,两相因严重饱和而呈感性,另一相仍为容性,如 $Y_B = Y_C = 1/(j\omega L)$, $Y_A = j\omega C$,系统中将出现两相对地电压同时升高,且超过线电压。如果按上述方法进行推导将会发现:此时单相等值电路中电感上的电压仍然高于电容上的电压,故依然不可能产生铁磁电压谐振。且不难分析,若系统受到干扰时三相均因严重饱和而呈感性,则与前面分析的三相呈容性的情况类似,回路中也不会产生铁磁电压谐振^[1-3]。

3 结论

由以上的分析可知:在中性点绝缘系统中,电磁式电压互感器饱和将使电源中性点产生工频电位偏移,造成一相或两相对地电压升高,但回路中并未发生铁磁电压谐振,故这种过电压实际上只是工频位移过电压。由于是发生在铁磁谐振电路中,是铁磁元件与电容相互作用的结果,故常被称之为铁磁谐振过电压^[5-7]。

若系统中存在谐波分量,电压互感器饱和也将使电源中性点产生谐波电位偏移,至于系统中是否能够发生各次谐波的铁磁电压谐振,则应另行分析^[8-9]。

电压互感器饱和引起三相对地工频电压同时升高的现象是很少见的,据分析,这是由于中性点存在对地电容引起的。

参考文献:

- [1] 张纬铨,高玉明. 电力系统过电压与绝缘配合[M]. 北京:清华大学出版社,1987.
- [2] 赵玉林. 高电压技术[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [3] 唐兴祚. 高电压技术[M]. 重庆:重庆大学出版社,1996.
- [4] 金秋生. 农村电力网产生铁磁谐振的机理及防范措施[J]. 电网技术,2001,25(6):61-63.
JIN Qiu-sheng. Mechanism of ferro-magnetic resonance occurred in rural power system and its counter-measures [J]. Power System Technology, 2001, 25(6): 61-63.
- [5] 张玲,郝春娟. 电压互感器铁磁谐振过电压及防止[J]. 电力自动化设备,2000,20(3):29-30.
ZHANG Ling, HAO Chun-juan. Ferroresonance over-voltage on power transformer and its prevention [J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(3): 29-30.
- [6] 储百森. 配电网铁磁谐振防治经验[J]. 电工技术杂志,2003(3):82-83.
CHU Bai-sen. Prevention experiences on ferroresonance in distribution networks [J]. Electrotechnical Journal, 2003(3): 82-83.
- [7] 金雄飞,李之昆. 电力系统铁磁谐振研究现状[J]. 四川电力技术,2004(1):10-13.
JIN Xiong-fei, LI Zhi-kun. Current status for research of ferro-resonance in electric power system [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2004(1): 10-13.
- [8] 杨秋霞,宗伟. 基于小波分析的铁磁谐振检测[J]. 电网技术,2001,25(11):55-57.
YANG Qiu-xia, ZONG Wei. Detection of ferro-magnetic resonance based on wavelet [J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 55-57.
- [9] 陈松波. 不接地系统产生谐振的原因及措施[J]. 农村电气化,2003(11):22-23.
CHEN Song-bo. Reasons of ferro-magnetic resonance occurred in unearthing system [J]. Rural Electrification, 2003(11): 22-23.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

刘增良(1959-),男,河北清苑人,教授,主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail: hbczlzl@163.com)。

Voltage shift and ferroresonance caused by voltage transformer saturation

LIU Zeng-liang¹, LI Tie-ling¹, LIU Guo-ting²

(1. Tongling College, Tongling 244000, China;

2. Hebei Engineering Technical College, Cangzhou 061001, China)

Abstract: Two kinds of stable conditions of series ferromagnetic resonance circuit are analyzed; non-resonance and resonance conditions. Under the former condition, the circuit is inductive, with the loop current as well as voltages on the inductance and the capacitance being small. Under the latter condition, the circuit is capacitive, with large loop current and over-voltages on the inductance and the capacitance. By means of the equivalent circuit conversion and the phase graph analysis, the over-voltage caused by the electromagnetic voltage transformer saturation in distribution networks is studied. Results show that, in the system with insulated neutral, the electromagnetic voltage transformer saturation will raise voltage shift of various degrees at the neutral point and lead to line-to-earth voltage increase on one or two phases, but the real voltage ferroresonance does not happen in these situations. Therefore, the over-voltage caused by the electromagnetic voltage transformer saturation in the system with insulated neutral belongs to shifting over-voltage.

Key words: voltage transformer; ferroresonance; voltage shift