

10 kV 系统中铁磁谐振过电压的计算机仿真研究

王亮, 李文艺, 施围

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Study on the Computer Simulation of Ferroresonance Overvoltage in 10 kV Distribution System

WANG Liang, LI Wen-yi, SHI Wei

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 采用通用的电磁暂态计算程序 EMTP, 对某 10 kV 系统中由电磁式电压互感器饱和引起的铁磁谐振过电压进行了计算机仿真计算研究, 计算得到了消除该铁磁谐振的阻尼电阻值范围。同时介绍了利用 EMTP 分析铁磁谐振现象的一般方法。

关键词: 电磁式电压互感器; 铁磁谐振; 电磁暂态计算程序; 临界电阻

中图分类号: TM864

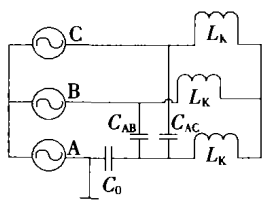
文献标识码: A

Abstract: The ferroresonance overvoltage, which results from the electromagnetic potential transformer in a 10 kV distribution system, is simulated and studied by the electromagnetic transient program (EMTP). Then the ranges of resistance value to restrict the ferroresonance are worked out. The method to analyze ferroresonances by using EMTP is also introduced in this paper.

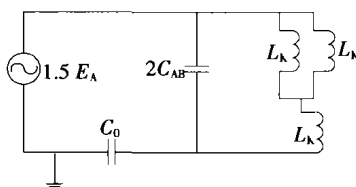
Key words: electromagnetic potential transformer; ferroresonance; EMTP; critical resistance

1 前言

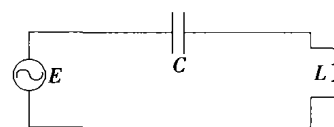
铁磁谐振过电压是电力系统运行中经常出现的



(a) 单相断线电源侧接地时的等效谐振电路



(b) 等值单相电路图



(c) 仿真计算的电路图

图 1 谐振电路的简化

设发生单相断线的地点到电源的距离与线路总长度之比为 x (x 在 $0 \sim 1$ 之间), 线路对地自电容和相间互电容分别为 C_D 和 C_X , 线路正序和零序电容的比值为 $\delta = \frac{C_D + 3C_X}{C_D}$, 故 $C_X = \frac{1}{3}(\delta - 1)C_D$, $C_0 = (1 - x)C_D$,

一种内过电压, 它是由线路中非线性电感饱和引起的, 可以在任何电压等级中发生, 尤其在配电网中更为频繁, 严重威胁系统的安全运行。传统上研究铁磁谐振主要通过理论分析和模拟试验, 并得到了大量结论。但由于铁磁谐振的复杂性和研究方法的局限性, 问题还没有很好解决。随着计算机技术的飞速发展, 铁磁谐振的计算机仿真计算研究方法越来越得到重视, 它的主要优点是参数改变灵活, 且计算准确度较高。电磁暂态计算程序 (EMTP) 就是仿真算法中的一种。

2 仿真计算模型的建立

某 10 kV 中性点不接地系统中, 线路带电压互感器, A 相断线, 且在电源侧接地, 发生谐振时电路见图 1(a)。图中略去了不参与谐振的部分。 C_0 为断线后负载侧对地电容, C_{AB}, C_{AC} 为断线后负载侧相间电容, L_K 为单相电压互感器等效的非线性电感。因 B, C 两相在电路上是完全对称的, 故可将其合并, 得到图 1(b) 电路。再用等值发电机原理将图 1(b) 进一步简化得到图 1(c), 这就是仿真计算的电路图。

$C_{AB} = (1 - x)C_X$ 。则图 1(c) 中:

$$E = 1.5 E_A \frac{C_0}{C_0 + 2C_{AB}} = 1.5 E_A \frac{3}{1 + 2\delta} = 1.5 Q E_A \quad (1)$$

$$C = C_0 + 2C_{AB} = \frac{(1 - x)(1 + 2\delta)}{3} C_D = K C_D \quad (2)$$

$$L = 1.5 L_K \quad (3)$$

式中: Q, K 均为系数。

以上是单相断线,电源侧接地的情况。对同一系统,随着断线种类的不同,推导得到的 Q, K 的表达式也不相同。表 1 为不同断线情况下 Q, K 的表达式^[1]。

表 1 不同断线情况下 Q, K 的表达式

断线种类	Q	K
单相断线,但未发生单相接地	$\frac{1}{1+2\delta/x}$	$\frac{(1-x)(2\delta+x)}{3}$
单相断线,电源侧发生单相接地	$\frac{3}{1+2\delta}$	$\frac{(1-x)(1+2\delta)}{3}$
单相断线,负载侧发生单相接地	$\frac{3x}{4+5x+2\delta(1-x)}$	$\frac{4+5x+2\delta(1-x)}{3}$

该 10 kV 系统中 $\delta=1.3$, 运行相电压 E_A 的有效值为 6 350.9 V, $C_D=0.05 \mu\text{F}$, 电磁式电压互感器的励磁电感 L_K 的励磁特性见表 2。从表 1 可以看到,未发生单相接地或负载侧发生单相接地的情况下, Q 在 $x=1$, 即断线发生在负载处时有最大值, 分别计算得 0.28 和 0.33, 由式(1)得 E 分别为 $0.42 E_A$ 和 $0.50 E_A$, 等效电源电压较小, 较难发生谐振。而在电源侧发生单相接地的情况下 $E=1.25 E_A$, 发生谐振的危险性很高。笔者将对断线时电源侧发生单相接地的情况进行仿真计算, 并讨论其消谐措施。

表 2 PT 的励磁特性数值

$U/\text{p.u.}$	1.000	1.328	1.501	1.790	1.963
$I/\text{p.u.}$	1.000	1.733	3.067	7.330	11.930

注:电压:1 p.u.=10/ $\sqrt{3}$ kV; 电流:1 p.u.=2.5 mA

EMTP 仿真中, 对非线性电感使用的是磁链电流的瞬时值特性, 因而必须先将电压电流有效值特性转换为磁链电流瞬时值特性。采用逐点递推法进行转换^[2], 得到 PT 的 $\Phi - I$ 特性见表 3。

表 3 PT 的磁链, 电流数值

i/mA	0	3.536	7.068	15.192	35.594	60.473
Φ/Wb	0	25.990	34.515	39.011	46.522	51.018

3 谐振状况的仿真计算

从前面分析已知, 单相断线时电源侧发生接地的情况下谐振最为严重, 此时:

$$Q = \frac{3}{1+2\delta} = \frac{3}{1+2 \times 1.3} = 0.83$$

$$K = \frac{(1-x)(1+2\delta)}{3} = \frac{6}{5}(1-x)$$

只要 x 确定, 即断线位置确定, 电路参数就可全部确定, 但事实上断线可能发生在线路的任何位置。变化 x 值, 分别进行仿真计算发现, x 在 0.83~0.99 的范围内, 谐振均可以发生。

图 2 为 $C=0.005 \mu\text{F}$, 即 $x=0.92$ 时 L 上电流波形, 此时 L 上电压峰值达 40 kV 以上。

4 消谐措施

消谐措施的选择要考虑到可能发生的最严重情况。该例中, 在可引发谐振的 x 取值范围内, $x=0.83$

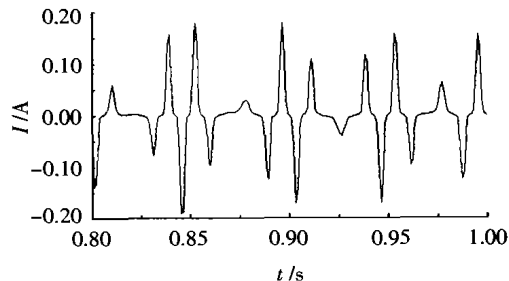


图 2 $x=0.92$ 时 L 上电流波形

时等效回路中的电容 C 最大, 谐振最严重, 因此讨论该参数配合下的消谐措施。

从回路参数上入手, 有 3 种消除谐振的对策: ①增大系统对地电容^[3], 但在实际中受条件限制, 这一方案不易实施, 且对地电容增大之后, 一旦无法消除谐振, 情况会更严重; ②在谐振产生之后, 在 PT 高压绕组串入阻尼电阻^[4], 阻值越大消谐效果越好, 但阻值越大对 PT 绝缘强度要求越高; ③在 PT 低压绕组并入阻尼电阻, 阻值越小消谐效果越好, 但阻值越小对 PT 低压侧热容量要求越高^[5]。因此用后两种方法消谐, 找到可以消除谐振的临界电阻值是问题的关键。

4.1 高压侧串入阻尼电阻

此时的等效电路见图 3。变化 R 值进行仿真计算得表 4, 其中 U_L, U_C 分别为投入消谐电阻后感、电容上电压幅值, I 为投入消谐电阻后回路电流幅值。

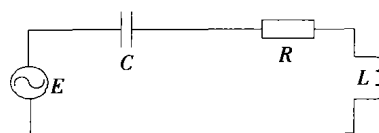


图 3 高压侧串入阻尼电阻之后的等效电路

表 4 不同串联电阻下电压、电流幅值

$R/\text{k}\Omega$	U_L/kV	U_C/kV	I/mA
5	33.42	42.54	224.63
10	31.49	40.34	205.69
15	32.26	40.17	210.57
20	32.47	39.94	211.39
25	32.45	39.47	208.37
30	13.57	2.25	5.65

进一步查找发现, 消除谐振的临界电阻值约为 30 k Ω 。从表 4 还可看到, 当串联电阻小于临界电阻时, 对过电压、过电流几乎没有限制作用。这说明铁磁谐振对参数的变化非常敏感, 这也解释了很多在一些地方非常有效的消谐装置在特定场合下消谐失败的原因。

图 4 为仿真得到的投入 30 k Ω 的串联电阻后感 L 上电流波形变化图。此时相当于 PT 高压侧投入 20 k Ω 的串联消谐电阻, 为了保险起见, 实际中可更大些, 留一定裕量。

4.2 低压侧并入阻尼电阻

此时等效于在图 1(c) 的非线性电感上并一个电阻, 从而降低 PT 上的电压, 并为 PT 上的电流分流,

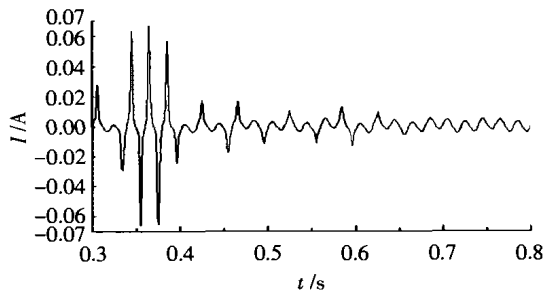


图4 投入 30 kΩ 的串联电阻后电流波形

达到消谐目的。等效电路见图5。变化 R 值进行仿真计算得表5。

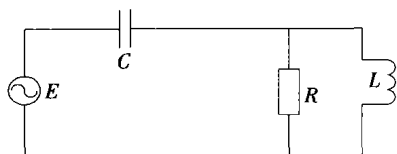


图5 低压侧并入阻尼电阻之后的等效电路

表5 不同并联电阻下电压、电流幅值

$R / M\Omega$	U_L / kV	U_C / kV	I / mA
3.5	31.03	41.08	212.30
3.0	30.73	40.85	210.00
2.5	30.35	40.67	205.43
2.0	30.57	40.58	202.45
1.5	29.75	39.93	194.03
1.0	11.67	3.87	3.37

进一步查找发现,消除谐振的临界电阻值约为1.47 MΩ。同样从表5可以看到,当并联电阻大于临界电阻时,对过电压、过电流的限制作用十分微弱。

图6为仿真得到的投入1.47 MΩ的并联电阻后感应 L 上电流波形变化图。此时相当于PT高压侧投入980 kΩ的并联消谐电阻,再根据PT变比算得变换到低压侧的阻值约为272 Ω,实际中可取小些,留一定裕量。

5 结论

(1)根据系统参数,利用EMTP仿真可以预见系

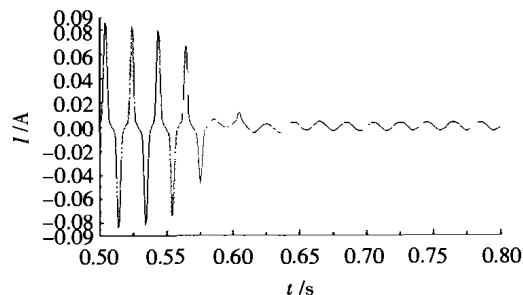


图6 投入 1.47 MΩ 的并联电阻后 L 上的电流波形

统中可能发生的铁磁谐振,提早采取措施,避免事故的发生。

(2)铁磁谐振对回路参数的改变极为敏感,因此在某些场合下有效的消谐措施在其他场合下可能作用会极其有限,甚至毫无作用。

(3)在PT高压侧串联大电阻,或在PT低压侧并联小电阻是抑制铁磁谐振的有效方法。利用EMTP仿真有助于快速方便地找到合适的消谐电阻值。算例中的高压侧串联临界阻值为20 kΩ,低压侧并联临界阻值为272 Ω。

参考文献:

- [1] 谢广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 李谦, 陈猷清, 王晓瑜, 等. 变压器和电磁式电压互感器铁心励磁特性曲线转换方法的讨论[J]. 变压器, 1993, 30(12): 10-13.
- [3] Y K Tong. NGC Experience on Ferroresonance in Power Transformers and Voltage Transformers on HV Transmission Systems[A]. IEE Colloquium on Ferroresonance[C], Glasgow, UK, 1997.
- [4] 周连洁, 吴少珍. 防止电压互感器的铁磁谐振过电压的有效措施[J]. 高压技术, 2001, 27(S1): 53-55.
- [5] LI Yunge, SHI Wei, QIN Rui, et al. A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral-grounded Substations[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(3): 1009-1014.

作者简介:王亮(1981-),男,河北石家庄人,硕士生,研究方向为铁磁谐振过电压的仿真分析。

(上接第268页)判断MOA的劣化情况^[5]。

4 结论

(1)适当选取平滑点数,用二次多项式滑动平滑法对采样数据进行平滑,可以有效滤除高频噪声,将有效信号提取出来。

(2)由于FFT也存在着编程复杂,采样点数需要是2的整数倍等问题,所以当采样点数较少时,可考虑采用离散傅立叶变换来进行数据处理。

(3)MOA检测的数字化处理技术包括对采样数据的数字滤波,频域变换和数值计算等,它大大提高了结果的可靠性和准确度。

参考文献:

- [1] 常越, 钱家骊. LCD4 仪器检测三相氧化锌避雷器阻性电流的分析[J]. 高压技术, 1995, 21(2): 77-80.
- [2] 游一捷. LCM 型氧化锌避雷器泄漏电流测试仪[J]. 高压电器, 1996(4): 60-62.
- [3] 文远芳. 高压技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [4] 胡上序, 陈德钊. 观测数据的分析与处理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996.
- [5] Yan Xianglian, Wen Yuanfang, Yi Xiaoyu. Study on the Resistive Leakage Current Characteristic of MOA Surge Arresters[J]. IEEE/PES, 2002, 2(6): 1198-1201.

作者简介:易小羽(1980-),男,硕士研究生,主要从事绝缘在线监测方面的研究。