

变压器空载合闸导致电能质量问题研究

田立军,秦英林,孙晓明

(山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要: 针对由投运空载变压器引起的电能质量问题进行了实验研究,并对实验结果进行了理论分析;提出了一种基于信号自回归模型的电压骤降检测方法,采用固定阶数的时变自回归模型对电压的采样序列进行处理,并给出了具体步骤。在 Matlab 下对实验结果按所提的方法进行了仿真分析,结果证明了该方法的正确性。

关键词: 电压骤降; 变压器; 励磁涌流; 自回归模型; 电能质量

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)03-0041-03

0 引言

合空载电力变压器是电网中的常见操作方式,变压器空载合闸会导致许多电能质量问题,主要体现在以下几个方面:变压器空载合闸产生的励磁涌流含有大量的谐波成分,注入电网可能导致谐波放大甚至谐振,影响电气设备的安全稳定运行;励磁涌流引起电网电压骤降^[1],会引起邻近敏感控制器不必要的动作,包括计算机系统失灵、自动化控制装置误动、设备低电压保护启动、电动机停机等,给工商业造成巨大的经济损失和社会影响;三相励磁涌流严重不对称,容易造成电动机保护误动,励磁涌流中的直流分量还会造成电动机振动和老化。

本文通过变压器空载合闸的动模实验,对由此导致的电能质量问题进行了详细分析,提出一种基于信号自回归模型(AR 模型)的实用电压骤降检测方法,Matlab 下仿真结果证明所提方法的正确性。

1 动模实验结果及分析

Y_0/Δ 型连接的变压器空载合闸,其动模实验接线如图 1 所示,无穷大电源电压为 1 030 V,变压器为 3 个单相变压器组(1 030 V/380 V),其容量为 $3 \times 5 \text{ kV} \cdot \text{A}$, $I_0 = 1.38 \%$, $P_0 = 1.032 \%$,计算得额定电流为 8.41 A。数据记录使用莱姆公司 PQPT 1000 电能质量分析仪。

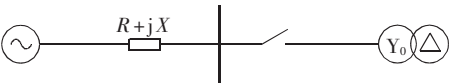
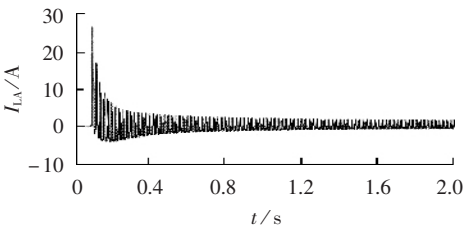


图 1 动模实验接线图

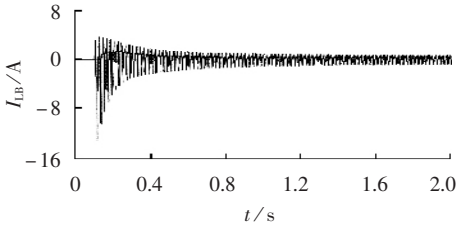
Fig.1 Dynamic model of experiment

因为励磁涌流的大小与合闸时电压初相角大小有关,考虑到合闸时间的分散性,合闸时操作 60 次,

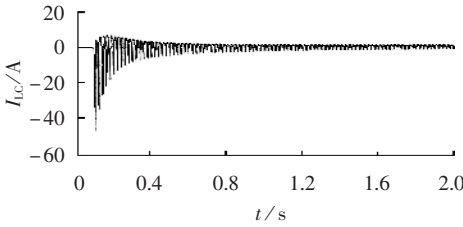
所得励磁涌流最大峰值呈正态分布,找出 60 次操作中 A、B、C 三相的最大励磁涌流峰值,实验结果中最大值发生在 C 相,其三相励磁涌流波形如图 2 所示。



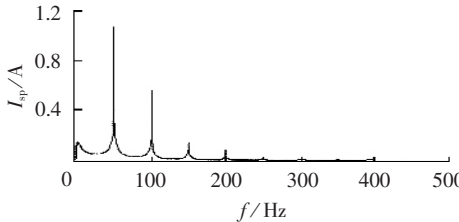
(a) A 相励磁涌流



(b) B 相励磁涌流



(c) C 相励磁涌流



(d) C 相励磁涌流频谱图

图 2 变压器空载合闸三相励磁涌流

Fig.2 Three-phase magnetizing inrush currents during no-load transformer commission

图 2 中 C 相励磁涌流的最大峰值达 47.2 A, 接近为额定电流的 6 倍, A 相和 B 相电流最大峰值分别约为 27.5 A 和 13.5 A。A、B、C 三相励磁涌流严重不对称。

对励磁涌流进行谐波分析, 三相励磁涌流的频谱非常接近, 图 2(d) 给出 C 相励磁涌流的频谱 (I_{sp}) 图, 由此可见励磁涌流主要含有直流分量及 2, 3, 4, 5 次谐波, 直流及谐波电流含有率 (HRI_h) 分别为: 13%, 51.8%, 12%, 7.9%, 1.9%, 其中 2 次谐波含量超过了基波分量的 50%。

该次合闸操作导致的母线电压骤降如图 3 所示。

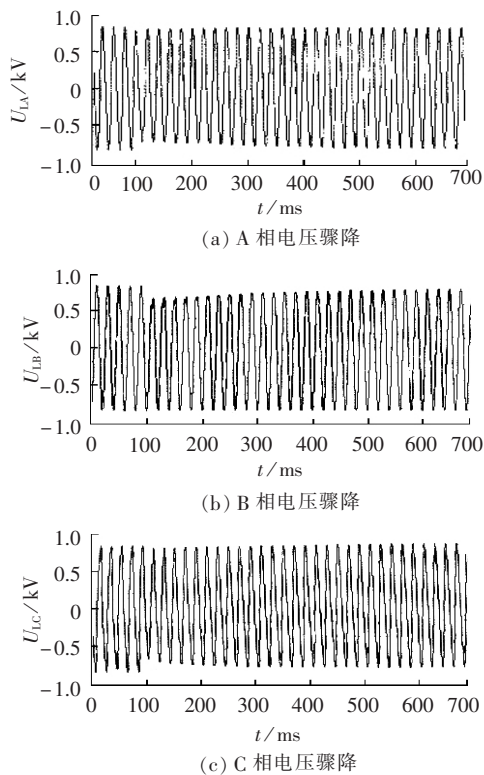


图 3 变压器空载合闸导致的母线电压骤降

Fig.3 Voltage sag caused by no-load transformer commission

图 1 所示无穷大电源至变压器母线的等效阻抗上的电压损耗为

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (1)$$

式中 φ 为功率因数角。

从上式可见变压器空载合闸产生的瞬变的励磁涌流必然导致母线电压骤降。从图 3 可见, 电压骤降幅值下降到额定值的 90% 以下, 持续时间在 25 个周期左右。

2 电压骤降检测方法

电压骤降的检测主要有电压骤降的幅值、骤降发生的时刻、持续时间及电压骤降发生的原因等。对电压骤降的幅值检测, 目前常用的方法是有效值法, 找到电压偏离正常电压有效值大小; 对骤降发生时刻的检测目前常用的是小波变换模极大值的方法^[2,3];

电压骤降发生的原因主要是考察引起电压骤降扰动的类型, 已有几种算法^[4,5]可以识别出由变压器空载投运、电力系统故障及电动机启动引起的电压骤降。本文基于信号的自回归模型, 提出一种电压骤降发生时刻的检测方法。

2.1 信号自回归模型线性预测理论

假设所研究的过程 $x(n)$ 是由一个输入序列 $u(n)$ 激励一个线性系统 $H(z)$ 的输出, 如图 4 所示, 则有如下输入、输出关系:

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + \sum_{k=0}^q b_k u(n-k) \quad (2)$$

$$x(n) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k) u(n-k) \quad (3)$$

对式(2)(3)两边分别取 Z 变换, 并假定 $b_0=1$, 得:

$$H(z) = \frac{1 + \sum_{k=1}^q b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} = \sum_{k=0}^{\infty} h(k) z^{-k} \quad (4)$$

若 $b_0, b_1, \dots, b_q$ 全为零, 则式(2)和式(4)分别为

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + u(n) \quad (5)$$

$$H(z) = 1 / (1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}) \quad (6)$$

式中 p 为模型的阶数。

式(5)(6)给出信号 $x(n)$ 的模型称为自回归模型, 简称 AR 模型, 是一个全极点模型。自回归的含义是: 该模型现在的输出是现在的输入和过去的 p 个输出的加权和。根据文献[6], 一个 p 阶 AR 模型和线性预测是等价的, 由式(5)可得到, 第 n 个点可以由其以前的 p 个点进行预测, 得到 $x(n)$ 的估计值如下:

$$\hat{x}(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + u(n) \quad (7)$$

式(7)中的系数可以根据自相关算法^[5]得到。

2.2 基于 AR 模型的扰动定位

为了对电压骤降扰动进行分析, 采用固定阶数 p 的时变的 AR 模型对电压的采样序列进行处理, 其过程如下:

a. 首先, 将采样序列分割成固定长度的相互重叠的数据块, 假设分割长度为 M , 每次跳过的长度为 L , 则重叠块的长度为 $M-L$, 则第 i 块中元素可表示为

$$x^i(n) = x(iL + n) \quad n=0, 1, \dots, M-1$$

b. 对每一分块数据, 利用 AR 模型线性预测理论对各个采样点数据进行预测, 得到当前采样点的估计值 $\hat{x}(n)$, 然后对每一采样点求取估计值和实际值的残差量, 即

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) \quad (8)$$

由于每次得到的估计值总要用到当前点以前的 p 个点的数值, 因此在每一块的边界处, 各点的估计值总要用到前一块中的数据, 这就保证了在残差计算中不引入人为误差;

c. 在各扰动发生点上, 由以上方法得到残差是比较突出的, 可以由最大的残差得到扰动发生的时刻。

2.3 仿真结果

利用以上方法对电压骤降进行了仿真研究。将电能质量分析仪记录的数据转换为文本文件,由Matlab读入进行仿真运算。电能质量分析仪的采样频率为6.4 kHz,分割块的长度为一个电气周期,即有128个采样点,每次跳过的点数为16,AR模型阶数为25。对图3(c)的仿真结果见图4(图中 e_v 为电压的残差,图5同)。从图4可以看出,在扰动发生点处得到的残差很大,可很方便地找到扰动发生时刻。另外,该方法对于由故障引起的电压骤降的发生与恢复时刻检测也非常有效,如图5所示。

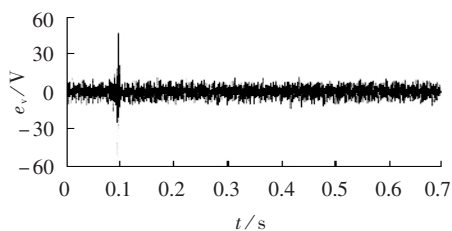
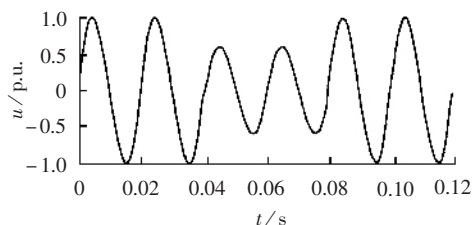
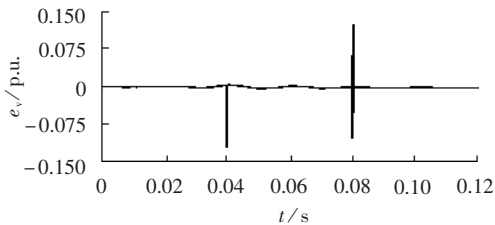


图4 图3(c)的仿真结果

Fig.4 The simulative result of Fig.3(c)



(a) 故障造成的电压骤降



(b) 检测结果

图5 由故障引起电压骤降及仿真结果

Fig.5 Voltage sag caused by fault and its simulative result

3 结论

本文对由空载投运变压器引起的电能质量问题

进行了实验研究,并对试验结果进行了理论分析,然后介绍了基于信号AR模型线性预测理论的电压骤降发生时刻的检测方法,并将其应用于对空投变压器引起电压骤降的分析,分析结果证明所提方法的正确性。

参考文献:

- [1] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(三)——电力系统的电压凹陷[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 1-4.
YANG Hong-geng, XIAO Xian-yong, LIU Jun-yong. Issues and technology assessment on power quality. Part 3: Voltage sags in power system [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2003, 23(12): 1-4.
- [2] 胡 铭, 陈 珩. 基于小波变换模极大值的电能质量检测与定位[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 12-16.
HU Ming, CHEN Heng. Detection and location of power quality disturbances using wavelet transform modulus maxima [J]. **Power System Technology**, 2001, 25(3): 12-16.
- [3] GU Yu-hua, BOLLEN M H J. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances [J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 2000, 5(4): 1279-1284.
- [4] KEZUNOVIC M, LIAO Y. A new method for classification and characterization of voltage sags [J]. **Electric Power System Research**, 2001, 58(1): 27-35.
- [5] 王克星,宋政湘,陈德桂,等. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 29-34.
WANG Ke-xing, SONG Zheng-xiang, CHEN De-gui, et al. Interference source identification of voltage sag in distribution system based on wavelet transform [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2003, 23(6): 29-34.
- [6] 胡广书. 数字信号处理——理论与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

田立军(1964-),男,山东潍坊人,副教授,博士,研究方向为电力系统运行与控制、电能质量分析与控制(E-mail: tlj3796@sdu.edu.cn);

秦英林(1976-),男,山东菏泽人,博士研究生,研究方向为电能质量分析与控制;

孙晓明(1979-),男,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制。

Study of power quality problems caused by no-load transformer commission

TIAN Li-jun, QIN Ying-lin, SUN Xiao-ming
(Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: Power quality problems caused by no-load transformer commission are studied through experiments and the results are analyzed theoretically. A method to detect the voltage sag based on auto-regressive model is proposed. The sampling sequence of voltage is processed with fixed-order time-varying auto-regressive model, and its steps are offered. According to the proposed method, simulation with Matlab is carried out, and the results show its correctness.

Key words: voltage sag; transformer; inrush current; auto-regressive model; power quality