

# 变压器绕组变形监测的研究现状综述

诸 兵, 曾雪梅, 黄晓艳

(自贡电业局调度局, 四川 自贡 643000)

**摘 要:** 电力变压器是电网中最为重要、昂贵的设备之一, 它的安全稳定运行对整个电网的安全意义极其重大。但是由于受到短路电流冲击等各种因素的影响, 变压器绕组可能发生变形, 而且不易被发现。全面介绍了目前变压器绕组变形检测的研究现状, 详细分析了目前变压器绕组变形监测的几种方法及其优缺点。

**关键词:** 电力变压器; 绕组变形; 检测

**Abstract:** Power transformer is one of the most important and expensive equipment in power grid whose safe operation is very important to the safe operation of the whole grid. But the power transformer winding may be distorted and it can not be found easily under the influence of short-circuit current impact. The research status of winding deformation detection is introduced totally. Several methods of monitoring power transformer winding deformation are analyzed in detail as well as their strong and weak points.

**Key words:** power transformer; winding deformation; detection

**中图分类号:** TM406 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0048-06

在电力系统的各种设备中, 如果一台大型电力变压器在系统中运行时发生事故, 则很可能导致大面积停电, 其检修期一般在半年以上, 不但花费巨大, 而且影响面很广。据有关变压器的故障资料的分析表明, 绕组是发生故障较多的部件之一。对引发故障的原因进行统计表明: 出口短路引起变压器损坏事故的比例在 110 kV 以上等级变压器事故中占较大比例, 而短路电流正是引起变压器绕组变形的最主要原因。据统计, 绕组在电动力作用下发生机械变形导致的严重故障占绕组总事故的 70%<sup>[1]</sup>。

由于短路冲击电流引起的绕组变形并非总能马上导致保护动作, 绕组已发生变形的变压器常会在相当长时间内继续运行, 如不能得到适时的维修, 累积效应会进一步发展, 即使不再出现短路事故, 也会导致变压器非正常地退出运行。但是常规的电气试验很难发现变压器的绕组变形的情况, 而吊心检查需要花费较大的人力、物力, 并且对于变压器内侧绕组变形也不容易发现。正确及时的变形检测与诊断不但能保证变压器故障元件得到及时的替换, 无故障元件得到最大限度的使用和延长变压器的实际使用寿命, 还可以最大限度地避免由于变压器的绕组故障隐患加重而导致的变压器非正常退出运行和由此而产生的大面积停电事故。因此对变压器不吊心的情况下判断变压器绕组是否变形对提高电网安全、稳定供电

和事故时快速恢复供电有重要意义。国内外在这方面做了很多研究工作, 也提出了一些方法, 有的还运用于实际中。目前国内外主要采用的诊断方法有低压脉冲法、频率响应法、短路电抗法和振动检测法。下面分别介绍这几种方法。

## 1 低压脉冲法

低压脉冲法 (Low Voltage Impulse) 简称 LVI 法。它是将持续时间很短 (如 0.1/5、0.3/1.5、0.1/1.0  $\mu$ s)、重复频率为 1 000 Hz 或更高的脉冲加到被试变压器的一端, 同时记录该端和另一端上的电压波形, 则响应信号在变压器绕组变形前后的变化就可以反映出绕组形变的信息。

由电路理论可知: 一个无源、线性、单输入、单输出的网络特性可以用传递函数  $H(j\omega)$  或  $h(t)$  来描述。由于当所加信号的频率超过 1 kHz 时变压器的铁心基本不起作用, 所以变压器可以看作一个由线性电阻、电感和电容所组成的网络, 若忽视绕组的电阻, 则变压器绕组的等值电路图如图 1。

图 1 可以看出变压器的等效电路是一个无源性、单端口输入、单端口输出的网络。当变压器发生线饼间的相对位移或线饼变形时, 变压器绕组等效电

路中的单位长度内的分布参数  $L$ 、 $C_1$ 、 $C$  将发生改变。而随着网络参数的改变,其频率特性也随之改变。因此,如果将一相同的低压脉冲信号施加于变压器绕组上,则响应信号在变压器绕组变形前后的变化也能反映出绕组变形的信息,这就是传统的低压脉冲法的监测原理<sup>[2~4]</sup>。

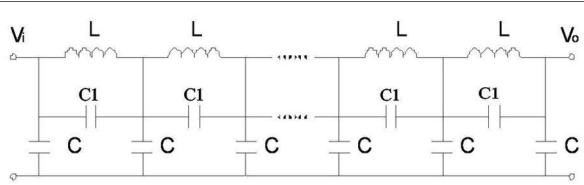


图 1 单相变压器高频等效电路图

文献 [5] 提出的方法对传统的低压脉冲法作了一些改进。传统的低压脉冲法采用模拟示波器记录绕组的低压脉冲响应,并从时域响应波形的变化来判断变压器绕组有无变形。随着计算机技术及数字存储技术的发展,将时域信号以数字形式记录并传输给计算机做各种分析处理越来越显示出其优越性。例如对数字形式的信号可进行平滑、滤波、频谱分析、相关分析及传递函数分析等。这些分析手段的引入较之单纯的时域分析能更有效地提取信号特征,更准确地对信号畸变的原因给出判断。因此采用了以计算机为中心的低压脉冲法绕组变形测试系统。如图 2 所示。

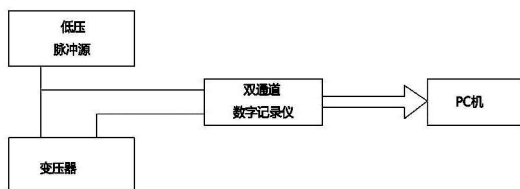


图 2 LVI 测试法接线框图

其中低压脉冲源产生幅值 800 V、前沿 0.25  $\mu$ s 半幅宽 2.5  $\mu$ s 的单极性脉冲电压信号。数据采集单元为两通道、8 位、20 ms/s 采样率的数据采集板,直接插在 PC 机扩展槽内。对施加在变压器绕组上的低压脉冲信号及响应信号进行记录,并将数据传输给计算机。计算机软件对采集到的输入、输出信号进行处理、分析,并将信号曲线进行显示或以硬拷贝形式输出。

## 2 频率响应分析法

### 频率响应分析法 (Frequency Response Analysis)

简称 FRA 法。它是 1978 年加拿大 E. P. Dick 提出来的<sup>[6]</sup>,现在在各国得到广泛应用。CIGRE (International Council On Large Electric Systems) 的变压器委员会推荐的变压器绕组变形诊断方法为频率响应法。

频率响应法的原理是将一扫描信号送入绕组的一个端口,从另一端测量其输出响应,并将各频率点的输入输出之比根据频率描绘成曲线——频谱曲线(图谱)。通过对绕组的频谱曲线进行对比分析,可以判断绕组的结构变化。另外,可以从绕组的频率响应图谱,对绕组的防雷特性及防雷水平做出估计。从前面可知,当频率超过 1 kHz 时,变压器绕组可以被看作是一个由多个电容和电感组成的无源二端口网络。当频率较低时,感抗较小,容抗较大,电感起主要作用,电路呈感性;随着频率的增加,感抗变大,容抗变小,二者同时起作用;当频率继续增加时,电容起主要作用。

绕组中电压分布不均匀,在某一频率下会达到极端情况,即产生谐振时,电压会出现极不均匀分布,在频谱图上表现为峰和谷。当然不同的峰谷及峰谷的高低、分布曲线的描述也不一样。频谱图实际上是描述了变压器绕组在不同频率下电压分布不均匀的情况。绕组的频谱曲线中出现若干峰值点和谷点。这些峰点和谷点是在不同频率下绕组中出现谐振的结果,其中峰点是发生串联谐振的结果,谷点是发生并联谐振的结果。

谐振是由绕组电感和饼间电容及对地分布电容等引起的。对于一给定绕组,它的频谱曲线是确定的。而当绕组因某种因素发生变形时,其分布参数发生变化,改变了绕组部分电感或电容,即改变了绕组的转移阻抗,这时测得的频谱曲线,就会与正常时测得的频谱曲线不同。这种差异反映了绕组结构的变化。分析这种差异,就可以分析出绕组的变形情况<sup>[7~10]</sup>。

频率响应分析法诊断变压器绕组变形的主要原理是建立在比较绕组频率响应特性变化的基础上的,即相当于比较变压器绕组的结构特征“指纹”图。具体而言,是通过对不同曲线的谐振点的个数、位置、幅值、趋势等来判断曲线间的相似程度,即一致性。为了定量表示曲线的相近程度,引入了相关系数 R 作为量化结果来表示所比较特性曲线的相近程度,R 值越大表示曲线的相似程度越好。

相关系数  $R$  可按照下列公式计算。设有 2 个长度为  $N$  的传递函数幅度序列  $X(k)$  和  $Y(k)$ ,  $k=0, 1, \dots, N-1$ , 且  $X(k)$  和  $Y(k)$  为实数。

(1) 计算 2 个序列的标准方差

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right]^2 \quad (1)$$

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right]^2 \quad (2)$$

(2) 计算 2 个序列的协方差

$$C_{XY} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ \left[ X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right] \cdot \left[ Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right] \right] \quad (3)$$

(3) 计算 2 个序列的归一化协方差系数

$$I_{R_{XY}} = \frac{C_{XY}}{\sqrt{D_x D_y}} \quad (4)$$

(4) 按照如下公式计算出符合工程需要的相关系数

$$R_{XY} = \begin{cases} 10 & 1 - I_{R_{XY}} < e^{-10} \\ -1 \lg(1 - I_{R_{XY}}) & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

通过大量测试分析及结合变压器吊检结果, 得出相关系数与曲线相似的关系如下: 一般而言,  $R > 1.0$ , 则认为曲线相似程度好;  $R < 0.6$ , 则认为曲线相异很大;  $0.6 < R < 1.0$ , 则认为曲线轻度相异。对同一台变压器的同一相前后两次测试图谱进行比较, 特别是与投运前新变压器所测的特征图谱进行比较, 来判断变压器是否存在绕组变形, 称为纵向比较法; 以同一台变压器的 A、B、C 三相图谱进行比较, 或同型号变压器的同一相图谱进行比较, 以此判断其是否存在绕组变形, 则称为横向比较法。对于大部分缺乏原始特征图谱的变压器, 在实际工作中需要更多地使用横向比较法。

以 A、B、C 三相图谱的差异来判断绕组是否变形, 其理由是对于制造工艺良好的变压器, 其三相绕组的结构基本是一致的, 因此三相图谱也是一致的。以同厂同型变压器的图谱进行比较, 其理由是同厂家同型号的产品, 其设计水平和制造工艺是相对固定的, 绕组的结构也是相似的, 因此其特征图谱具有一致性。在现场工作中, 往往同一个变电站的几台变压器采用的是同厂同型的产品, 通过测量和比较这些变压器的图谱, 则可以避免或减少误判。前期的变压器绕组变形测试工作由于缺乏变压器的原始“指纹”图, 因此应采用横向比较法作为分析的主要手段<sup>[11]</sup>。

### 3 短路电抗分析法

变压器短路阻抗是当负载阻抗为零时, 变压器内部的等值阻抗。短路阻抗的电抗分量, 即短路电抗, 就是绕组的漏电抗。由变压器的理论分析可知, 变压器绕组的漏电抗由纵向漏电抗和横向漏电抗两部分组成。一般情况下, 横向漏电抗比纵向漏电抗小得多。无论是横向漏电抗还是纵向漏电抗, 其电抗值都是由绕组的几何尺寸所决定的。也就是说, 在工作频率一定的情况下, 变压器的短路电抗是由绕组的结构所决定的, 其可由短路阻抗求出。对于一台变压器而言, 当绕组变形、几何尺寸发生变化时, 其短路电抗值也要变化。反之, 如果运行中的变压器受到了短路电流的冲击, 为了检查其绕组是否变形, 可将短路前后的短路电抗值加以比较来判断。如果短路后的短路电抗值变化很小, 则可认为绕组没有变形; 如果变化较大, 则可认为绕组有显著变形。所以, 有关标准规定, 变压器在进行短路试验前后, 都要求测量每一相的短路阻抗, 并把试验前后所测量的电抗值加以比较, 根据其变化的程度, 作为判断被试变压器是否合格的重要依据之一<sup>[12~14]</sup>。

短路实验法的原理接线图如 3 所示:

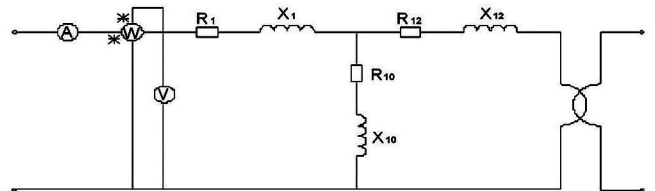


图 3 短路实验法的接线原理图

图中, 功率表  $W$  测量的是有功功率, 伏特表  $V$  测量的是电压的有效值, 安培表测量的是电流的有效值。一般由于  $R_{10}$  和  $X_{10}$  在数值上相对于  $R_1 + R_{12}$  和  $X_1 + X_{12}$  而言很大, 计算时可以忽略不计。由图 4 可得:

$$Z_k = |R_1 + X_1 + R_{12} + X_{12}| \\ = \sqrt{(R_1 + R_{12})^2 + (X_1 + X_{12})^2} = V/I \quad (6)$$

$$R_k = R_1 + R_{12} = P/I^2 \quad (7)$$

$$X_k = X_1 + X_{12} = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (8)$$

由上面 3 式可以计算到短路电抗  $X_k$ , 通过短路电抗值的变化就可以判定绕组的状态。对于实验前后变压器的短路电抗值的变化范围, 国家标准和 IEC

都以电力变压器耐受短路试验前后的短路电抗的变化不超过某一限值作为变压器耐受短路能力的判据, 如对普遍使用的同心式绕组, 短路电抗的变化不能超过 2%, 箔式和短路电抗 3% 以上者不能超过 4%<sup>[15]</sup>。理论和实践都说明, 测量短路电抗是判断变压器绕组变形的一种有效方法。

### 3.1 变压器的振动机理分析

#### 3.1.1 变压器铁心的振动

国内外的研究表明铁心的振动来源于:

- ① 硅钢片的磁致伸缩引起的铁心振动
- ② 硅钢片接缝处和叠片之间存在漏磁而产生的电磁吸引力引起的振动。

近年来由于铁心制造工艺和结构上的改进以及铁心工作磁密的降低, 使硅钢片接缝处和叠片间的电磁力引起的铁心振动很小。因此可以认为, 铁心的振动主要取决于硅钢片的磁致伸缩。下面简介磁致伸缩的原理<sup>[16]</sup>。

铁磁晶体在外磁场中被磁化时, 其长度及体积均发生变化, 这种现象称为磁致伸缩或磁致伸缩效应。磁致伸缩与磁感应强度平方成正比, 磁致伸缩的变化周期为电源电流周期的一半, 故磁致伸缩引起的铁心振动是以两倍的电源频率为基频的。

#### 3.1.2 变压器绕组的振动

绕组的振动是由于电流流过绕组时在绕组间、线饼间、线匝间产生的动态电磁力引起绕组的振动。变压器绕组在负载电流与漏磁产生的电动力作用下振动, 并通过绝缘油传至油箱。如高、低压绕组之一变形、位移或崩塌, 绕组间压紧不够, 使高、低压绕组间高度差逐渐扩大, 绕组安匝不平衡加剧, 漏磁造成的轴向力增大, 则绕组振动加剧。

变压器绕组及铁心的振动会通过变压器油和支撑部件传到油箱壁上, 所以通过监测变压器油箱壁上的振动就可以反映出绕组和铁心的振动<sup>[17~19]</sup>。

### 3.2 传感器位置的选择

在油箱表面安装传感器的位置选择原则是使在此处测得的振动信号最接近变压器绕组和铁心的振动信号且振动信号最强, 以确保所采集的信号能真实地反映绕组和铁心的振动状况。绕组的振动可分为径向和轴向两个方向。径向振动信号的测试位置选择在油箱侧面, 靠近变压器的上下端部, 即图 4 中的 ac2、ac3。这样可以获得较强的径向振动信号<sup>[20]</sup>。轴向振动信号的测试位置选择在油箱底部靠近铁心

的地方, 这样测得的绕组和铁心的轴向振动信号最强, 即图 4 中的 ac1<sup>[21]</sup>。

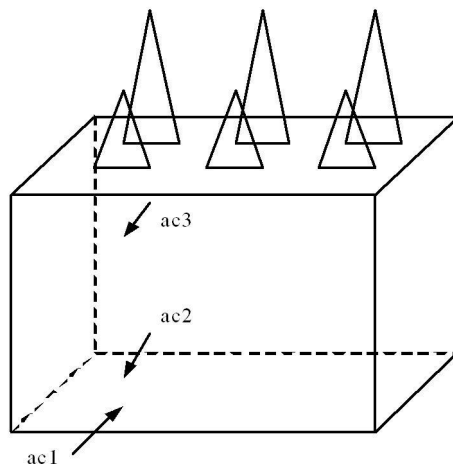


图 4 振动传感器在变压器器身上的位置

对于已经叠压成形的变压器铁心, 因磁致伸缩引起的铁心振动加速度信号基频成分与空载电压值的平方呈线性关系, 且铁心振动加速度信号的基频是空载电压基频的两倍。另外, 因铁心磁致伸缩的非线性以及沿铁心内框和外框的磁通路径长短不同等原因, 铁心振动频谱中除了基频外, 还包含有高次谐波成分。

### 3.3 变压器绕组的振动特征

绕组的振动是负载电流和漏磁相作用所产生的。在负载电流频率为 50 Hz 的情况下, 变压器绕组的振动频率是以两倍电流频率 (100 Hz) 为基频的。绕组振动基频 (100 Hz) 加速度的幅值和  $I^2$  成线性关系。除了 100 Hz 的基频外, 还有高次谐波。当变压器绕组发生变形或松散失稳时, 绕组的振动加速信号将会发生显著变化。由于 300~500 Hz 的频率成分很小且其幅值随绕组压紧力变化也小。只讨论 100 Hz 和 200 Hz 频率分量。100 Hz 和 200 Hz 振动分量随电流  $I$  的变化规律为: ① 绕组振动加速度信号基频 (100 Hz) 的幅值和基本成线性关系; ② 振动信号的 200 Hz 谐波幅值和  $I^2$  不是线性关系, 而随  $I^2$  的增大而增大; ③ 100 Hz 处, 绕组压紧时振动信号加速度幅值比松动时高; 200 Hz 处情况则相反<sup>[2]</sup>。

良好状态的变压器振动的特征向量可作为指纹量留用 (可作为指纹量的特征向量, 包括附加载流大小、绕组和铁心振动信号的频谱、功率谱、能量谱等), 由上述分析可以看出变压器绕组及铁心压紧状况的变化和绕组的位移及变形将引起作为指纹量的特征向量的变化, 因而可在线、及时地给出有关变压

器铁心及绕组状况的指示,一旦变压器发生故障,由当前特征向量与指纹量比较就可快速反映出来。

## 4 结 论

(1) 低压脉冲法在试验测试过程中,测量方法较为复杂,两次测量时间间隔较长,抗电磁干扰影响能力很差,且对绕组首端部位的变形响应不灵敏,很难判定绕组变形的部位,而现场运行环境中电磁干扰相当大,屏蔽测试系统将会带来很大困难,再加上仪器笨重,测试电压很高,因此未受到广泛关注和推广。

(2) 频率响应法因其检测灵敏度高、设备轻便、适合于现场测试,在国内外已经得到了较广泛的现场应用,但由于频率特性受干扰因素很多,其诊断的不确定性还相当明显,使用方法不当会使结果严重失真,有关的测试和判断方法也尚无统一的标准可依。

(3) 短路阻抗作为变压器重要参数,不但在变压器投入运行前要测量,而且在运行过程中也要定期或不定期的测量。作为监测变压器绕组状态的重要手段之一,该方法测试程序较简单,有确定的判断标准,IEC 和国家标准规定了较为可行的建议性判据,但是由于试验电源容量大、试验设备沉重、试验花费时间较长等因素影响,短路阻抗法在现场使用中受到了限制。

(4) 振动监测法的优点是可以做到在线监测,并且振动法在线监测是通过贴在变压器油箱壁上的传感器来监测其运行状况,与整个电力系统没有电气连接,对整个电力系统的运行无任何影响。但是由于变压器的振动信号受变压器的运行方式、变压器制造工艺和环境温度影响很大,因此目前还缺乏通用的判断标准。

## 参考文献

- [1] 徐大可. 监测变压器绕组变形的短路电抗在线测量技术 [D]. 西安交通大学博士论文, 2001. 3
- [2] 王钰, 徐大可, 李彦明, 张成良. 检测变压器绕组变形的低压脉冲法测试系统研究 [J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 24—27.
- [3] Wang M, Vandemaar A J, srivastava K D. Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range [J]. IEEE Trans on PWRD, 2005, 20(3): 1930—1938.
- [4] Drobyshevski A. A. Assessment of transformer winding mechanical condition by low voltage impulse method [J]. Power Tech Conference Proceedings 2003 IEEE Bologna volume 2, June 2003.
- [5] 秦少臻, 王钰, 李彦明. 监测变压器绕组变形的低压脉冲法的研究 [J]. 变压器, 1997(7): 24—29.
- [6] Dick E P, Erven C C. Transformer Diagnostic Testing by Frequency Analysis [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(6).
- [7] 舒乃秋, 武剑利, 王晓琪. 频率响应分析法检测电力变压器绕组变形的理论研究 [J]. 变压器, 2005(10): 23—25.
- [8] Liu Xiaowei, Sun Qiang. Test research on power transformer winding deformation by FRA method [J]. Electrical Insulation Materials, 2001.
- [9] 戴文进, 刘保彬. 用频率法检测变压器绕组的变形 [J]. 高压电器, 2004(6): 464—465.
- [10] Ryder S A. Diagnosing transformer faults using frequency response analysis [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(2): 16—22.
- [11] 姚森敬, 欧阳旭东, 林春耀. 电力变压器绕组变形诊断分析 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 95—98.
- [12] 曾刚远. 测量短路电抗是判断变压器绕组变形的有效方法 [J]. 变压器, 1998, 35(8): 13—17.
- [13] 高朝霞, 马涛, 王永儿, 汲胜昌. 短路阻抗法结合频率诊断变压器绕组变形的分析与应用 [J]. 电力设备, 2006, 7(12): 32—34.
- [14] 张琛. 变压器绕组变形的测试方法及应用 [J]. 变压器, 2007(2): 35—37.
- [15] 许婧, 王晶, 高峰, 束洪春. 电力设备状态检修技术综述 [J]. 电网技术, 2000(8): 48—52.
- [16] 宛德福. 磁性理论及其应用 [M]. 华中理工大学出版社, 1996.
- [17] 汲胜昌, 刘味果, 李彦明, 徐大可. 变压器铁心及绕组状况的振动测试系统 [J]. 高电压技术, 2000(6): 1—3.
- [18] Rusov V A. monitoring clamping forces in windings and cores of large power transformer using their vibration characteristics [J]. Electric power plants, 1998, 6: 53—57.
- [19] 汲胜昌, 程锦, 李彦明. 油浸式电力变压器绕组与铁心振动特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005(6): 616—619.
- [20] 程锦, 汲胜昌, 刘家齐, 李彦明. 绕组振动信号监测法中测试位置的影响与分析 [J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 46—48.

- [21] Belén García Juan Carlos Burgos Ángel Matías Alonso Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations—Part I. Theoretical Foundation. IEEE Trans on Power Delivery, Vol 21, No 1, January 2006.
- [22] 汲胜昌, 王世山, 李清泉, 李彦明, 孙强. 用振动信号分析法监测变压器绕组状况 [J]. 高电压技术, 2002, 28(4): 12—13.

诸兵, 男, (1973—), 硕士研究生. 现为四川电力公司自贡电业局工程师, 主要从事电网运行与调度工作和电气设备故障监测研究。

曾雪梅, 女, (1968—), 大专, 现为四川电力公司自贡电业局技师、助理工程师, 从事电网的运行和调度工作。

黄晓艳, 女, (1979—) 年生, 本科, 现为华电内江发电总厂助理工程师, 从事变电站运行工作。

(收稿日期: 2009—01—05)

作者简介:

(上接第 30 页)

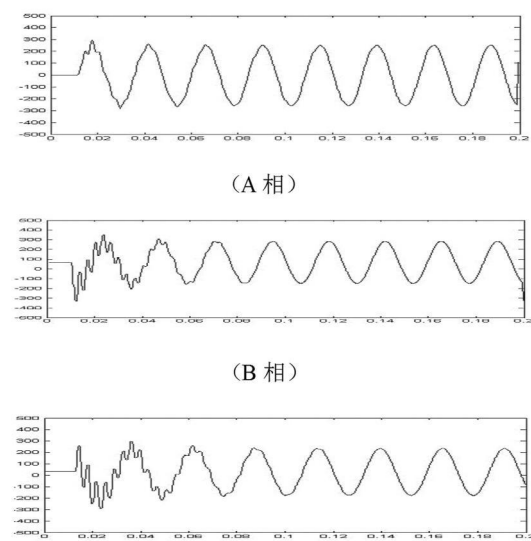


图 7 河北南网黑启动方案线路末端电压仿真图

线路合闸后末端 (西柏坡电厂 220 kV 母线) 单相过电压波形如图 7 所示。其中 A 相电压最大值 240.3 kV, B 相电压最大值 -351.9 kV, C 相电压最大值 -308.4 kV, 过电压以 B 相为最大, 过电压倍数为 1.959。没有超过最大允许过电压倍数, 满足电力线路运行要求, 此黑启动方案不存在过电压情况。

### 3 结论与措施

仿真计算结果分析表明, 电力系统在黑启动过程中对空载输电线路进行合闸操作时存在过电压的可能。在三相非同期合闸情况下, 线路末端过电压的情况要高于三相同期合闸的情况, 结合河北南网的实际情况, 在机组对 220 kV 线路进行空载充电合闸时, 线路末端出现的过电压情况满足运行要求。但是随电压等级的提高、线路的增长, 线路末端出现过电压的概率会增大, 因此要采取有效的措施来抑制过电压情况; 比如, 并联电抗器投入运行, 使电抗器的感性无功

功率可以对线路的容性无功进行部分补偿, 降低过电压值; 双回线路投一回; 或者可以采用断路器的合闸电阻来限制合闸过电压; 还可以通过控制断路器合闸相角的方法, 即使合闸相角在电压过零点附近, 从而降低合闸过电压。

### 参考文献

- [1] 房鑫炎, 郁维镛, 熊慧敏, 等. 电力系统黑启动研究 [J]. 中国电力, 2000, 33(1): 40—43.
- [2] 郭嘉阳, 等. 华北电网“黑启动”实验研究 [J]. 华北电力技术, 2001, (5): 3~17.
- [3] 陈维贤. 电网过电压教程 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [4] 李福寿编著. 电力系统过电压计算 [M]. 北京: 北京水利电力出版社, 1986.
- [5] 解广润, 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [6] 顾雪平, 赵书强, 刘艳, 等. 一个实用的电力系统黑启动决策支持系统 [J]. 电网技术, 2004, 28(9): 54—57.
- [7] 张其明, 王万军. 陕西电网黑启动方案研究 [J]. 电网技术, 2002, 26(4): 42—45.
- [8] Gbolaris P, Prousalidis JM, Hatziaegyriou N D, et al. Simulation of long transmission lines energization for black start studies [J]. IEEE Trans on Power Systems 1994, 12(3): 1093—1096.
- [9] 张小易, 顾雪平, 电力系统黑启动过程中过电压问题的研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2003.
- [10] 张纬钺, 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, 1988, 112—117.

作者简介:

刘连志 (1982—), 男. 硕士研究生, 主要研究方向电力系统安全防御与恢复控制, 人工智能在电力系统中的应用;

赵灿 (1983—), 男, 助理工程师, 从事方向: 变电站运行与维护管理;

韩振明 (1983—), 男, 助理工程师, 从事方向: 电能计量管理。

(收稿日期: 2009—01—05)