

# 变压器噪声有源控制技术新方法研究

陈涛涛, 华晓珠, 陆 金  
(江苏省电力公司检修分公司, 江苏 宿迁 223800)

**摘 要:**近年来, 变压器辐射的低频噪声备受人们关注且成为了噪声有源控制研究的热点。文中首先采用冒泡排序法自动辨识变压器噪声频谱中能量最大的几个频率分量, 在此基础上利用基于扰动技术的波形合成算法自动生成次级声源控制信号, 用来中和变压器发出的初级声源信号, 以达到抑制变压器噪声的目的。然后, 实测了城区某 110 kV 变电站变压器噪声数据, 并对其进行基于上述理论的分析。最后通过仿真实验验证了该理论的正确性和有效性。

**关键词:**变压器; 噪声; 自适应辨识; 波形合成; 次级通道; 有源控制

**中图分类号:** TM401.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2015)04-0044-04

伴随着电力事业的发展, 大型变压器的应用越来越广泛。同时, 变压器的噪声污染也成为人们关注的焦点, 变压器运行产生的低频噪声具有穿透能力强、传播距离远等特点, 对周边居民的生理和心理产生很大影响, 控制变压器噪声成为当务之急<sup>[1]</sup>。传统的被动噪声控制方式主要对中高频率噪声有效, 而对控制像变压器那样的低频噪声效果不大, 因此采用有源噪声控制技术抑制变压器噪声成为人们关注的热点。另外, 由于变压器所辐射的低频噪声具有明显的离散线谱特性, 也决定了非常适合开展有源噪声控制技术<sup>[2]</sup>。

国外很早就有学者对变压器噪声进行有源控制的研究, 文献[3-10]的研究证实了用声源或力源进行变压器噪声有源控制的可行性, 同时也验证了各种不同控制算法的性能。文献[5]针对某小型变压器设计出一种连续型分布式参数弯曲板声源进行局部空间噪声控制, 通过实验验证取得了较好的降噪效果。文献[6]提出一种新的近场误差传感策略, 并设计出相应的算法, 针对某小型变压器在实验室取得了较好的效果。本文首先通过自适应识别技术筛选出变压器噪声能量最大的几个频率分量, 再结合波形合成算法进行变压器噪声数据处理。对大型变压器实测数据的仿真分析表明, 基于自适应识别和改进波形合成算法的技术降低了计算量并提高了降噪效率。

## 1 变压器有源降噪

### 1.1 传统变压器有源降噪方法和原理

所谓变压器有源降噪, 就是在变压器近旁(通常离变压器 1 m 以内)放置若干个噪声发生器, 使它们产生的噪声分别与变压器的基频噪声及二、三、四次高频噪声相互抵消, 从而使变压器的噪声受到抑制和衰减。其基本工作原理: 首先将变压器的噪声信号转换为电讯号, 并将电讯号调制放大以后用来激励噪声发生器, 使

各噪声发生器发射出来的噪声, 其幅值分别与变压器噪声的基频及二、三、四次高频分量的幅值相等、相位相反, 从而使变压器的噪声受到破坏性干扰, 使其声压和声功率明显降低。

### 1.2 基于冒泡排序法的噪声频率分量辨识

传统的变压器噪声有源控制都是针对特定频率分量来实施降噪的, 例如专门针对变压器噪声的基频、二倍频、三倍频、四倍频来产生对应的有源信号。但是通过分析 110 kV 变压器的噪声实测数据, 由于噪声传感器的布放位置和角度不同, 接收到的噪声信号中能量最大的频率分量并不一定总是 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 有时会出现 400 Hz, 500 Hz 的频率分量能量大于 200 Hz, 300 Hz 频率分量的情况, 即变压器噪声的能量频带分布并不是固定的。采用传统的噪声有源控制方法, 仅对前 3 个频率分量(100 Hz, 200 Hz, 300 Hz)进行降噪处理, 仅有局限意义, 缺乏灵活性, 变压器降噪的效率相对较低。而通过自适应辨识技术先自动筛选出能量最大的几个频率分量, 然后再对这几个频率分量实施动态降噪, 提高了变压器噪声控制的针对性, 增强了降噪效果, 同时可以减小不必要的软硬件开销<sup>[13]</sup>。频率分量识别流程图如图 1 所示。某 110 kV 变电站变压器噪声时频图如图 2 所示。

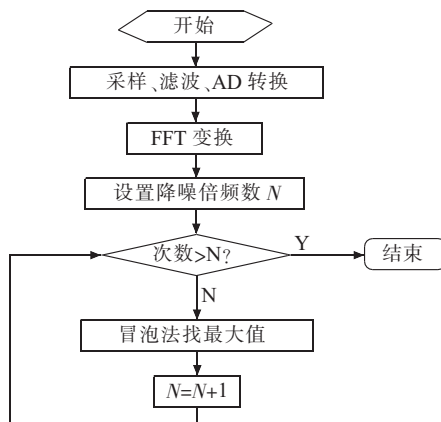


图 1 噪声频率分量辨识流程图

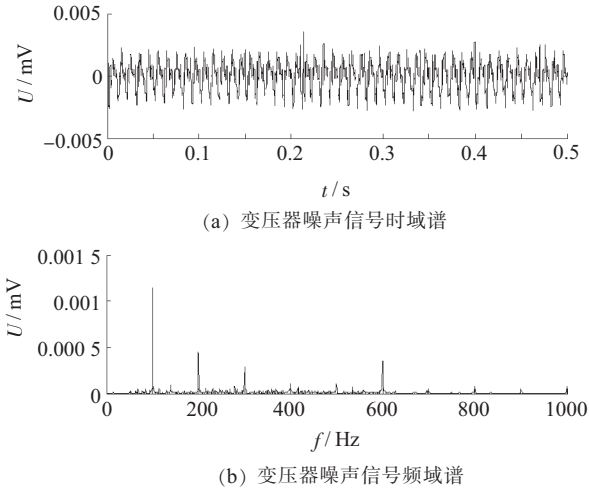


图2 某110 kV变电站变压器噪声时频图

按图1流程计算得出频率分量幅值由大到小依次为100 Hz, 200 Hz, 600 Hz, 300 Hz。由此,若是只针对前3个频率分量实施静态降噪,则达不到最佳降噪效果。

### 1.3 基于波形合成算法的变压器有源降噪

波形合成算法的单通道有源控制系统如图3所示。初级声源用  $\sin(\omega n + \varphi_0)$  表示,其频率和相位都是稳定的,这点与变压器噪声的特征类似。 $P(Z)$ 为初级传输路径的传递函数,它在初级声源  $p(n)$  和误差传感器之间, $s(n)$ 为在误差传感器处的实际控制信号,消噪路径传递函数为  $S(Z)$ ,  $v(n)$ 表示其他附加噪声,误差信号是  $p(n)$ ,  $s(n)$ 及  $v(n)$ 之和。

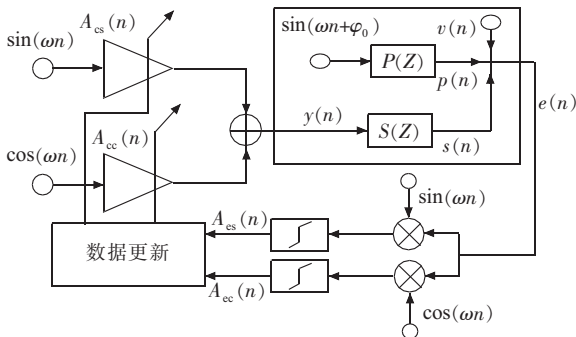


图3 波形合成算法原理示意图

控制输出信号  $y(n)$  由一个正弦发生器和一个余弦发生器产生:

$$y(n) = A_{es}(n)\sin(\omega n) + A_{cc}(n)\cos(\omega n) \quad (1)$$

式(1)中:  $A_{es}(n)$  为对应控制输出的正弦分量权重系数;  $A_{cc}(n)$  为对应控制输出的余弦分量权重系数。

正弦函数发生器和余弦函数发生器同时也用来产生误差信号  $e(n)$  的正弦分量权重系数  $A_{es}(n)$  和余弦分量权重系数  $A_{cc}(n)$ 。

$$A_{es}(n) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \sin(\omega(n-N+i))e(n-N+i) \quad (2)$$

$$A_{cc}(n) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \cos(\omega(n-N+i))e(n-N+i) \quad (3)$$

式(2,3)中:  $N$  为一个周期或多个周期内的采样点数,设信号的频率为  $f_0$ , 系统的采样频率为  $f_s$ , 则角频率  $\omega = 2\pi \cdot f_0 / f_s$ 。

波形合成算法的成本估计函数是两分量振幅的平方和的期望值,即控制其期望值最小即可达到最佳降噪效果:

$$J = E(A_{es}^2(n) + A_{cc}^2(n)) \quad (4)$$

利用正弦信号和余弦信号的正交性,误差信号的正弦分量和余弦分量可以表示为:

$$A_{es}(n) = A_{ps}(n) + A_{vs}(n) + A_{cs}(n)C_{ss}(n) + A_{cc}(n)C_{cs}(n) \quad (5)$$

$$A_{cc}(n) = A_{pc}(n) + A_{vc}(n) + A_{cs}(n)C_{sc}(n) + A_{cc}(n)C_{cc}(n) \quad (6)$$

式(5,6)中:  $A_{ps}$  和  $A_{pc}$  为初级声源的正弦分量和余弦分量;  $A_{vs}$  和  $A_{vc}$  为不希望的附加噪声  $v(n)$  的正弦分量和余弦分量;  $C_{ss}, C_{sc}, C_{cs}, C_{cc}$  为消噪路径传递函数  $S(Z)$  的对应分量,它们可以通过施加扰动的方法得到。

这里使用和 LMS 算法相类似的梯度检索法来降低成本函数,从而递归权重系数的更新方程式为:

$$A_{cs}(n+1) = A_{cs}(n) - 2\mu(A_{es}(n)C_{ss}(n) + A_{cc}(n)C_{cs}(n)) \quad (7)$$

$$A_{cc}(n+1) = A_{cc}(n) - 2\mu(A_{cs}(n)C_{sc}(n) + A_{cc}(n)C_{cc}(n)) \quad (8)$$

式(7,8)中:  $\mu$  为收敛系数。

基于式(2)、式(3)中的  $N$  个采样点数更新式(7)、式(8)式一次,因此该算法的计算量较小。由于变压器噪声信号相对平稳,可以将特定水平下的扰动信号施加到控制输出中,从而来获取次级路径传输函数。所加的扰动大小应为误差传感器处初级谐波噪声变化量的5倍以上或者初级谐波噪声幅度的10%以上,以保证获得较好的次级路径传递函数的建模结果。对于多通道系统来说,如果将扰动信号  $\Delta A_{cl}$  施加到第  $l$  个控制输出信号的正弦分量幅值中,那么第  $m$  个误差信号的正弦分量和余弦分量的波动值可以通过下式得出:

$$\Delta A_{esm}(n) = \Delta A_{cl}(n)C_{sslm}(n) + \delta_1 \quad (9)$$

$$\Delta A_{ecm}(n) = \Delta A_{cl}(n)C_{sclm}(n) + \delta_1 \quad (10)$$

此处  $\delta_1$  是系统自身变化引起的波动,它远小于由  $\Delta A_{cl}$  产生的波动。从而可以通过下式得出消声通道传输路径中的矩阵元素:

$$C_{sslm}(n) \approx \frac{\Delta A_{esm}(n)}{\Delta A_{cl}(n)} \quad (11)$$

$$C_{sclm}(n) \approx \frac{\Delta A_{ecm}(n)}{\Delta A_{cl}(n)} \quad (12)$$

同理,  $C_{sclm}$  和  $C_{sslm}$  可以通过对第  $l$  个控制输出信号  $A_{ccl}(n)$  的余弦分量施加一个扰动  $\Delta A_{cl}$  来获得。对于一个具有  $L$  个控制输出和  $M$  个误差输入的多输入输出系统来说,消声通道传递函数(CPTF)是一个  $2M \times 2L$  阶的矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} C_{ssl} & C_{scl} & \cdots & \cdots & C_{ssl} & C_{scl} \\ C_{csl} & C_{ccl} & \cdots & \cdots & C_{csl} & C_{ccl} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ C_{sslM} & C_{sclM} & \cdots & \cdots & C_{sslM} & C_{sclM} \\ C_{cslM} & C_{cclM} & \cdots & \cdots & C_{cslM} & C_{cclM} \end{bmatrix}$$

为获得 CPTF 矩阵的所有元素,扰动信号需要依次逐个地施加到控制输出的信号中。当一个控制输出被施加扰动分量后,在 CPTF 矩阵中从该控制输出到所有的误差输入( $M$ 个)的元素都可以同时得到。总共需将  $2L$  个扰动分量施加到控制系统中来获取得到完整的矩阵。对于一个控制  $K$  个频率分量的多输入输出系统,将产生  $K$  个  $2M \times 2L$  阶的 CPTF 矩阵。由于正弦信号的正交性,对不同频率分量产生的 CPTF 矩阵可以并列估计,减少运算开销。

## 2 次级通道估计与仿真

在变压器有源噪声控制中,次级通道问题是最基本最重要的问题。所谓次级通道问题,就是自适应算法需要得到次级通道的准确模型(从次级声源到误差传感器之间的传递函数),用以更新波形合成算法中误差信号正余弦分量的权值。在很多情况下,次级通道是时变的,当自适应有源降噪系统工作时,为了使自适应滤波器稳定并收敛,我们需要对次级通道传递函数进行在线估计,基于扰动法对次级通道传递函数进行建模的波形合成算法则能很好的满足这种需要。在计算机仿真中,通过命令生成一个从扬声器到误差传感器且带宽范围为  $160 \sim 2000$  Hz 的脉冲信号,滤波器长度为  $0.1$  s,采样频率取  $10$  kHz。次级通道传递函数的脉冲响应估计如图 4 所示。

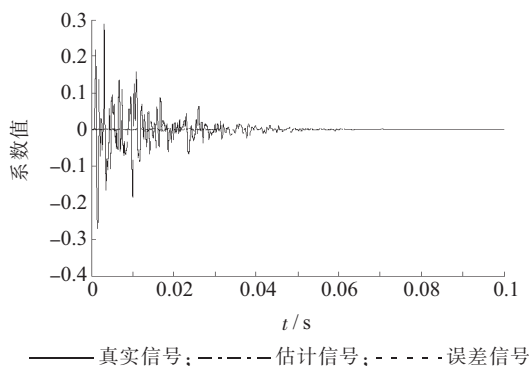


图 4 次级通道脉冲响应估计图

仅仅根据原始信号,生成单一的次级声源信号,满足不了工程降噪的效果,必须采用自适应跟踪环节实时调节控制信号,本实验采用基于扰动法的波形合成算法对经过能量辨识的原始噪声信号进行跟踪,并通过 matlab 仿真分析其自适应能力。通过波形合成算法

对原始信号滤波的仿真分析图如图 5 所示,图 5(a)为原始信号;图 5(b)为滤波器输入信号;图 5(c)为自适应滤波器输出信号。

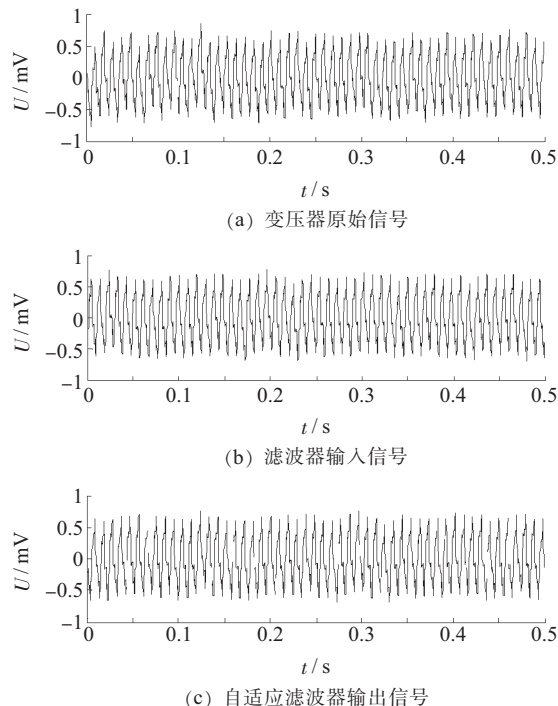


图 5 自适应滤波信号时域图

考虑到实际工程中的传输线路、各种硬件设备、环境条件引起的误差,本文在滤波器输入信号中加入了白噪声信号来模拟此误差信号。由图 5 可以看出,波形合成算法对原始信号有良好的追踪能力,对控制信号有实时的调节能力。

## 3 有源降噪的实验仿真分析

结合前述 2 种算法,对噪声信号进行 Matlab 实验仿真分析。首先对原始噪声进行傅里叶变换,在此基础上通过冒泡法自动识别出能量最大的 5 个频率分量,然后利用波形合成算法合成控制信号(次级声源信号),并采用自适应滤波技术不断调整误差信号频率分量,是其平方和的期望值最小,从而达到预期的降噪水准。实验分析流程如图 6 所示。

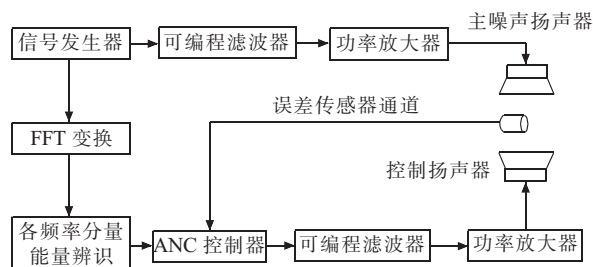


图 6 有源降噪实验分析流程图

本文对云南路  $110$  kV 变电站大型变压器的噪声数据进行了现场实测,并对其噪声进行仿真分析。现场测量的变压器噪声数据如图 7 所示。图 7(a)是其时域



波形图,纵坐标为噪声幅值,用电压表示;图 7(b)是对原始噪声进行 FFT 变换后得到的频谱图。

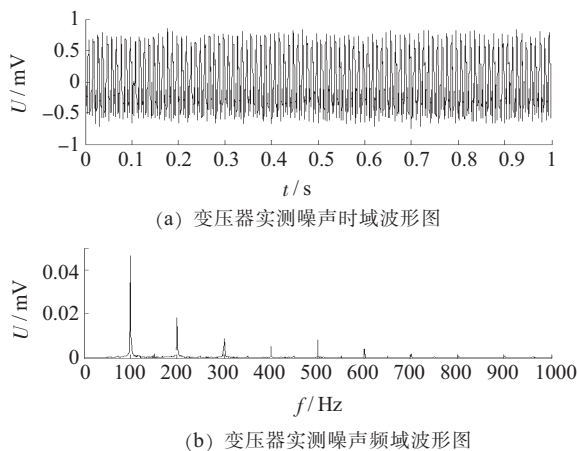


图 7 变压器噪声时域、频域图

从图 7 可以看出,变压器噪声的能量主要集中在基频 50 Hz 的偶数倍频率分量上,且变压器噪声为非突变量,其频谱成分相对稳定。因此,波形合成算法对变压器这种确定的稳定噪声的控制是行之有效的。

采用冒泡法筛选出前  $N$  个能量最大的频率分量,并用波形合成算法来构建次级声源,纵坐标为噪声幅值,用电压表示(随着  $N$  的增大,相对应的降噪效果越好,但考虑到实际系统的可行性, $N$  的取值有待最优化处理)。本文取  $N=5$  时,通过编程,自动筛选出能量最大的前 5 个频率分量,依次是 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 300 Hz, 400 Hz。如图 8 所示。

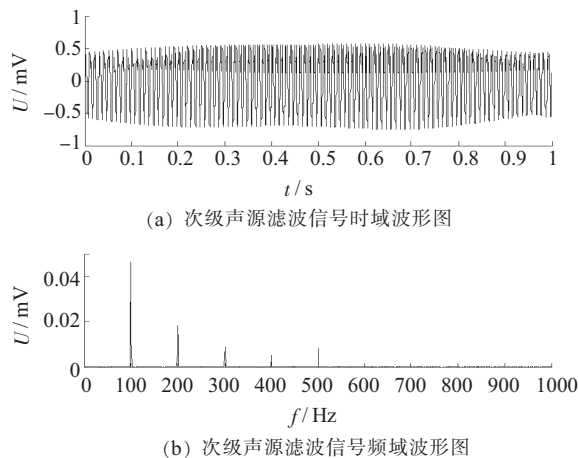


图 8 控制(次级声源)信号构建图

通过自适应有源降噪系统控制器合成控制信号后,再通过可编程滤波并经功率放大器放大后,与原始噪声信号进行叠加,将产生降噪后的声音信号。降噪后信号的时域和频率谱图如图 9 所示。纵坐标为噪声幅值,用电压表示。

由频域谱中可以看出,消噪后的声音信号对应的频率分量得到有效抑制,降噪效果较为明显。当  $N=6$  时,消噪前后几个频率分量的能量对比,纵坐标为噪声幅值,用电压表示。如图 10 所示。

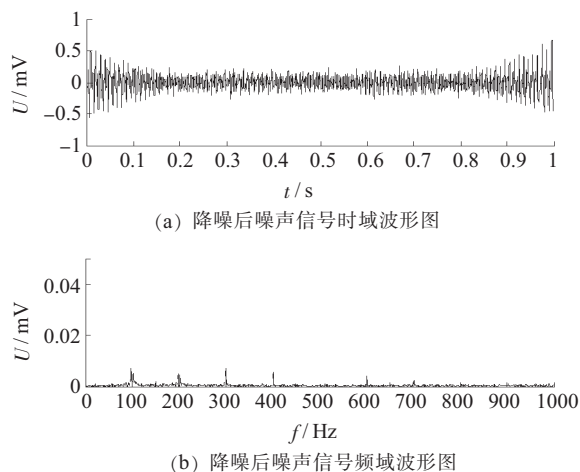


图 9 有源降噪后噪声信号时频谱图

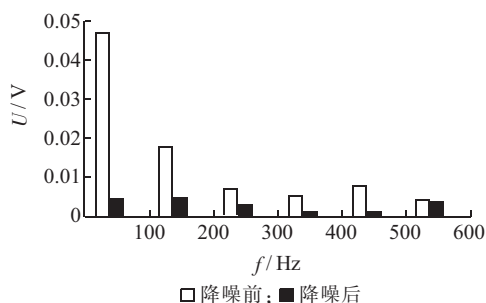


图 10 降噪前后噪声频率分量幅值对比图

由图 10 可知,对低频的噪声,如 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 500 Hz, 自适应消噪的效果较好。由于本文在变压器噪声频率分量能量辨识中只取  $N=5$  (前 5 个能量最大频率分量),故 600 Hz 处无降噪效果。

## 4 结束语

针对变压器噪声控制问题,先通过冒泡法对变压器噪声的主要频率分量进行能量辨识,筛选出能量最大的前 5 个频率分量,然后针对这几个频率分量采用直接数字合成参考信号,仅需要拾取初级噪声中的主要频率分量分成,参考信号获取简单且针对性强。同时采用在线扰动建模方法,简化了建模过程并保证了建模的正确性。基于自适应能量辨识和波形合成算法结合的变压器降噪方法,提高了降噪针对性,降低了数据存储空间,减少了计算量,并能更好地将程序算法嵌入到硬件中,提高了降噪效率。因此该方法对变压器噪声有良好的控制效果。

## 参考文献:

- [1] 吴鹏,陆云才,陈铭明. 江苏电网非晶合金变压器综合评估[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(3): 1-5.
- [2] 邓王君,杨向宇,龙巍. 变压器降噪技术[J]. 变压器, 2009, 46(3): 34-38.
- [3] LIU J T, YING L M. Adaptive Active Noise Control of Amorphous Alloy Core Transformer[J]. IEEE Conference Publications, 2011: 1946-1949.

验是新投机组的必须试验,可以采用规程推荐的甩无功法及推算法,但上述2种方法均需要发电机在零有功工况下,对于大型机组很难实现这一工况,无功间接调整法不需要机组有功功率为零,很好地解决了这一问题,建议试验时采用无功间接调整法。无功间接调整法,在几个不同的电厂、不同容量的机组测试中均得到了非常准确的调差率数据,对于分析出现系统波动时,各台机组之间无功分配的合理性,有一定的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 王永利. 发电机励磁系统中调差特性分析[J]. 天津电力技术, 2007(4):32-33.
- [2] 孟凡超,吴 龙. 发电机励磁技术问答及事故分析[M]. 北京:中国电力出版社,2008:91.
- [3] DL/T 843—2010,大型汽轮发电机励磁系统技术条件[S].
- [4] DL/T 1166—2012,大型发电机励磁系统现场试验导则[S].

#### 作者简介:

- 周国平(1978),男,江苏常熟人,工程师,从事继电保护及励磁方面的工作;
- 单 华(1985),男,江苏宝应人,工程师,从事继电保护及励磁方面的工作;
- 喻 建(1987),男,江苏如东人,工程师,从事继电保护工作;
- 张 强(1987),男,安徽马鞍山人,工程师,从事继电保护工作。

## Voltage Adjusting Rate Calculation and Testing Method for Large-capacity Generator

ZHOU Guoping, SHAN Hua, YU Jian, ZHANG Qiang

(Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co.Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The reactive power must be reasonably allocated between the parallel operated generators. The natural adjustment by generators alone cannot meet the requirement. Appropriate reactive power allocation is for economic operation of generators and power systems' stable operation. In this paper, the effect of the reactive power compensation coefficient in excitation voltage regulation system, the principle of the reactive power compensation coefficient, the calculation of reactive power compensation coefficient and several testing methods are introduced. As one of the most important methods, reactive indirect adjustment method is highlighted.

**Key words:** reactive power; reactive power compensation coefficient; reactive indirect adjustment method

(上接第 47 页)

- [4] 马玺越,陈克安. 110 kV 变压器有源噪声控制实验研究[J]. 声学技术,2011,30(5):85-88.
- [5] XUN L. Physical System Design for the Active Control of Electrical Transformer Noise[D]. Ph.D Degree Thesis,The University of Adelaide,2000.
- [6] QIU X,HANSEN C H. An Algorithm for Active Control of Transformer Noise with On-line Cancellation Path Modelling Based on the Perturbation Method[J]. Journal of Sound and vibration,2001,240(4):647-665.
- [7] 吕敬友,黄 玉,池爱平. 变电站噪声对环境的影响与防治措施[J]. 电力与能源,2011,32(2):162-164.
- [8] 顾晓安,沈荣瀛,徐基泰.大型电力变压器振动和噪声控制方法研究[J]. 噪声与振动控制,2001(5):7-11.
- [9] 于春伟. 电气设备噪声主动控制的研究及输出电路设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2008.
- [10] 张 翔,李传光. 自适应有源降噪控制算法的研究与实现[J]. 北京理工大学学报,2002,22(1):53-55.

#### 作者简介:

- 陈涛涛(1989),男,江苏宿迁人,硕士研究生,从事变电站高压设备电气试验、电气设备状态监测与故障诊断工作;
- 华晓珠(1982),女,福建龙岩人,工程师,从事变电站高压设备电气试验及油务化验工作;
- 陆 金(1981),男,江苏宿迁人,助理工程师,从事变电站高压设备电气试验工作。

## Research on Active Noise Reduction Technology for Transformers

CHEN Taotao, HUA Xiaozhu, LU Jin

(Maintenance Branch of Jiangsu Electric Power Company, Suqian 223800, China)

**Abstract:** In recent years, low frequency noise produced by transformers has attracted many attention and became a hot research point in noise source control. In this paper, bubble sort is adopted to automatically identify the frequency components with most energy. Based on the identification and with the application of perturbation technique and merging algorithm, secondary sound source is automatically produced to neutralize the primary sound source made by transformers, in this way the noise from transformers can be eliminated. The noise data of an actual 110 kV substation is measured and analyzed theoretically. Simulation results show that the proposed method is effective and correct.

**Key words:** transformer; noise; adapted identification; waveform synthesis; secondary path; active control