

电抗器减振系统计算分析

韩江桂, 金 晶, 吴新跃

(海军工程大学 船舶与动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:为了解决某变电站电抗器设备振动噪声过大的问题,采用有限元数值仿真方法,建立了电抗器设备的有限元分析模型,应用 ANSYS 软件对其进行了模态和谐响应分析,得到了设备产生振动噪声的主要原因,即电抗器基础未能隔振产生并且由低频噪声引起。由此提出了在基座和设备之间增加橡胶隔振器的改进方法,通过与原设备对比分析可以证明,改进的隔振结构减振降噪效果明显。

关键词:电抗器;振动;噪声;有限元方法;ANSYS;隔振结构

中图分类号:TH113.1;TM47

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)08-0924-04

Analysis on system of vibration reduction in reactor

HAN Jiang-gui, JIN Jing, WU Xin-yue

(Dynamical Engineering Institute, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to solve the problem of the equipment noise and vibration in a substation reactor, finite element analysis model of the reactor was established by numerical simulation method. The modal and harmonic response analysis also were completed using ANSYS software. It was concluded that the main reason causing vibration and noise is the basis of the reactor failed to isolating vibration that producing low-frequency noise. Therefore the improved method increasing rubber vibration isolator between the base and equipment was proposed. Comparing with the original equipment, the improved structure shows that reduction effect of vibration and noise is obvious.

Key words: preactor; vibration; noise; finite element method; ANSYS; vibration isolation structure

0 引 言

随着近代各种机械的功率、速度不断增加,振动造成的有害噪声也随之增长。有害的振动导致材料疲劳,并降低机械部件的工作可靠性。噪声在造成严重的环境污染的同时还恶化劳动条件,刺激人体中枢神经和血管系统。目前各发达国家对噪声引起的环境污染问题十分重视,如法国在 20 世纪 70 年代就对机场的噪声污染进行课税^[1]。由于城市建设的发展,越来越多的变电站处于城市中心,一些偏远变电站也正被新建的住宅区或开发区所包围,变电站环境噪声污染的防治工作也迫在眉睫^[2-5]。变电站在运行过程中产生的噪声主要来自于变压器、电抗器和轴流风机。变压器和电抗器本体发出的铁磁噪声为低频噪声,可以

传得很远并难以消除。对城市的噪声控制可参照 GB 12348-90《工业企业厂界噪声标准》与 GB/T14623-93《城市区域环境噪声标准》^[6]。对于变电站噪声治理主要从声源上和传播途径上两个方面考虑,前者主要是针对变压器、电抗器本体结构进行治理,如选用低声变压器,减小极板间的间隙,增大浸渍剂的粘滞性等对振动有明显抑制效果的措施^[7-8],不过降低设备的声源噪声势必会增加设备制造成本。从传播途径上可以采用隔振、消声、吸声以及综合控制等措施。张林等^[9]为电抗器设计了局部隔声罩及消声器,局部隔声罩的隔声效果约为 7~9 dB。上下都装消声器后整体降噪效果约为 13~15 dB。文献^[10]的作者应用一种噪声预测评估软件进行变电站的噪声计算,该软件对新建变电站的方案选择以及已建变电站的工程改造有指导作用。文献^[11]的作者应用有限元分析软件

收稿日期:2011-02-21

作者简介:韩江桂(1976-),女,新疆乌鲁木齐人,讲师,博士研究生,主要从事机械振动、动态设计方面的研究. E-mail:hanjiangui@hotmail.com

ANSYS 建立了核电站环形吊车结构的三维计算模型,进行了模态和响应分析计算。陈斗^[12]利用 I-Deas 软件对电抗器静结构强度和振动模态进行了有限元仿真分析,证明了有限元方法可在产品设计阶段提供非常有价值的数 据,使技术人员能及时调整设计方案,避免产品制造完成却未通过昂贵的振动冲击与试验而造成的巨大损失。

本研究阐明了电抗器隔振的基本原理,采用有限元分析方法对一个已建成的 220 kV 变电站内的电抗器进行仿真分析,找到其振动噪声产生的主要原因,并在原设备基础上提出改进措施以达到减振的目的。

1 电抗器振动分析



图 1 电抗器外形图

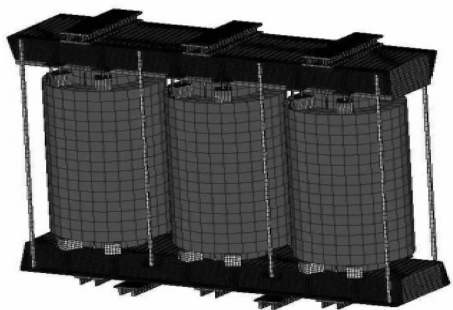


图 2 电抗器有限元模型

1.1 计算模型

该变电站在楼内安装了 4 台 10 kV 干式铁芯并联电抗器,主要由铁芯、垫块、拉紧杆、支撑底座和支撑钢梁组成。整个电抗器通过带有螺纹的连接杆垂向压紧铁芯,横向压紧支撑底座和支撑钢梁,设备整体依靠重力放置在地面上的 π 型钢梁上,在铁芯的垫块上敷设了一层厚度较薄的橡胶减振。本研究建立的电抗器结构三维实体模型和有限元仿真模型如图 1、图 2 所示。楼内的振动噪音测试结果为:变压器室内声级最高为 77 dB,无论是振动幅度还是传播噪音都已经超过标准要求,必须分析其振动噪声产生原因并采取减振措施。

1.2 电抗器模态分析与谐响应分析

本研究应用 ANSYS 软件对其施加了拉杆预紧力、重力和基座约束边界条件,进行了前 100 阶振动模态的仿真计算。

50 Hz 与 100 Hz 模态振型图如图 3、图 4 所示:50 Hz 时电抗器的振动主要集中在拉紧连杆的一阶扭曲振动变形上,100 Hz 时振动则表现为拉紧连杆的二阶扭曲变形。由于连杆与支撑钢梁为刚性连接,振动可以直接传递到地板,因而橡胶垫块没有起到应有的减振效果。

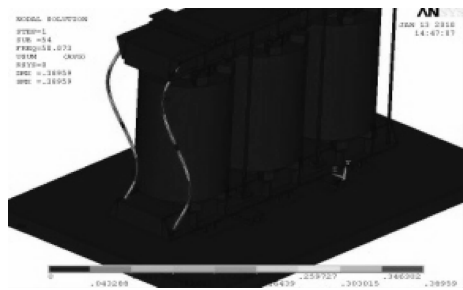


图 3 50 Hz 模态振型图

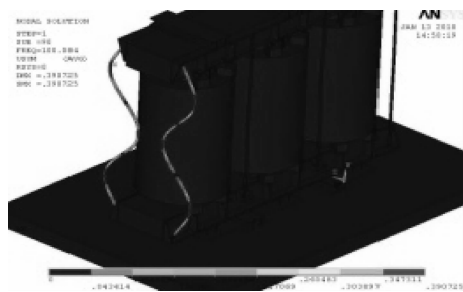


图 4 100 Hz 模态振型图

在模态分析基础上,本研究对电抗器进行了 0 ~ 250 Hz 的谐响应分析,即在电抗器铁芯中间施加单位简谐载荷,分析不同频率下的结构响应情况。电抗器靠近地板不同位置处谐响应计算结果如图 5 所示,设备结构在 35 Hz、100 Hz、155 Hz 和 185 Hz 左右响应较大,尤其是在低频时振幅最大,由此说明设备振动主要集中在低频段。

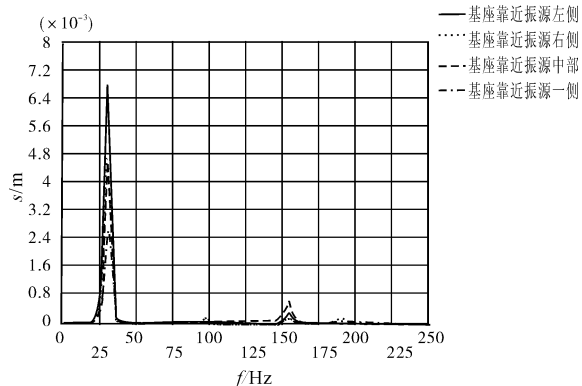


图 5 电抗器谐响应结果

1.3 结果分析

电抗器的铁芯磁路由气隙分隔成若干段,各段分别产生磁极,各个气隙间磁极吸引力的变化是主要振动激励源。由铁芯块、垫块组成的系统固有频率如果与激励频率相近,将引起系统共振,在运行过程中将产生较大的振动和噪音。由上述计算可以看出,该电抗器振动噪声超标的主要原因为:电磁力的变化导致电抗器机械振动,由于采用了不恰当的隔振措施导致振动大部分通过刚性连接的基座直接传递到地面,从而导致地面振动偏大;电抗器放置在 π 型支撑钢梁上,钢梁与地板接触面积很小,导致设备基座整体刚度偏小,容易引起振动。本研究在原设备基础上进行改进设计以达到减振目的。

2 电抗器隔振改进方案

2.1 基本原理

减振器的减振性能评估指标一般为以分贝计的减振器两端振动过程的强度比,即振级落差:

$$ST = 10 \lg \frac{J_{11}}{J_{22}} \quad (1)$$

式中: ST —振级落差, J_{11} —振源一边的振动过程强度的平均值, J_{22} —被保护结构一边的振动过程强度的平均值。

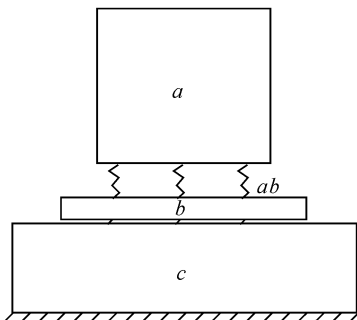


图 6 隔振系统简图

a —设备; b —中间钢结构; c —基座; ab, bc —各个设备的弹性连接。

电抗器加隔振器结构可以简化为如图 6 所示系统,系统振动方程的矩阵形式为:

$$[M]\{\ddot{q}\} + ([K] + j[H])\{q\} = \{Q\} \quad (2)$$

式中: $[M]$ —惯性, $[K]$ —刚度, $[H]$ —损失矩阵, $\{q\}$ —系统位移矢量, $\{Q\}$ —扰动力总矢量。

式(2)展开如下:

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & M_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & M_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_a \\ \ddot{q}_b \\ \ddot{q}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} & 0 \\ K_{ba} & K_{bb} & K_{bc} \\ 0 & K_{cb} & K_{cc} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ab} & 0 \\ K_{ba} & H_{bb} & H_{bc} \\ 0 & H_{cb} & H_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_a \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中考虑了相邻之间的弹性反作用力和耗散反作用力,未考虑 a, b, c 之间的惯性耦合。

复杂系统的振动方程通常用机械阻抗矩阵表示,图 6 所示双层隔振系统方程具有下面的形式:

$$\begin{aligned} Z_{aa}\dot{q}_a + Z_{ab}\dot{q}_b &= Q_a \\ Z_{ba}\dot{q}_a + Z_{bb}\dot{q}_b + Z_{bc}\dot{q}_c &= 0 \\ Z_{cb}\dot{q}_b + Z_{cc}\dot{q}_c &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Z —阻抗;下标 a —设备;下标 b —中间钢结构;下标 c —基座;下标 ab, bc —各个设备的弹性连接。

方程组求解:

$$\begin{aligned} \dot{q}_a &= \frac{1 - \frac{Z_{bc}^2}{(Z_{bb}Z_{cc})}}{Z_{aa}(1 - \frac{Z_{ab}^2}{(Z_{aa}Z_{bb})} - \frac{Z_{bc}^2}{Z_{bb}})} Q_a \\ \dot{q}_b &= \frac{Z_b Q_a}{Z_{aa}Z_{bb}(1 - \frac{Z_{ab}^2}{(Z_{aa}Z_{bb})} - \frac{Z_{bc}^2}{(Z_{bb}Z_{cc})})} \\ \dot{q}_c &= \frac{Z_{ab}Z_{bc}Q_a}{Z_{aa}Z_{bb}Z_{cc}(1 - \frac{Z_{ab}^2}{(Z_{aa}Z_{bb})} - \frac{Z_{bc}^2}{(Z_{bb}Z_{cc})})} \end{aligned} \quad (5)$$

联立式(2~5)求解可得到双层隔振系统各级之间的振级落差为:

$$\begin{aligned} ST_{ab} &= \frac{\dot{q}_a}{\dot{q}_b} \frac{1}{Z_{ba}} (\frac{Z_{bc}^2}{Z_{cc}} - Z_{bb}) \\ ST_{bc} &= \frac{\dot{q}_b}{\dot{q}_c} = -\frac{Z_{cc}}{Z_{cb}} \\ ST_{ac} &= \frac{\dot{q}_a}{\dot{q}_c} \frac{Z_{cc}}{Z_{ab}Z_{bc}} (Z_{bb} - \frac{Z_{bc}^2}{Z_{cc}}) = ST_{ab}ST_{bc} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)表明:基座的机械阻抗 Z_c 越大,弹性连接件的机械阻抗 Z_{ab}, Z_{bc} 越小,则振动速度级落差 ST_{ac} 越大。因而如果要减振,需要增加基座的刚度,同时必须减小弹性联接的刚度。

2.2 改进方案

基于上述分析,本研究通过改进基座结构,在基座

和设备之间增加橡胶隔振器的办法隔离振动的传递。具体措施为:设备原有的 π 型支撑钢梁改为带阻尼的组合型材结构,以增加基座刚度和阻尼,减小传递振动引起的共振,如图 7、图 8 所示。改进后的基座与墙壁相连,中间用工字钢支撑,保证基座有足够的刚度。

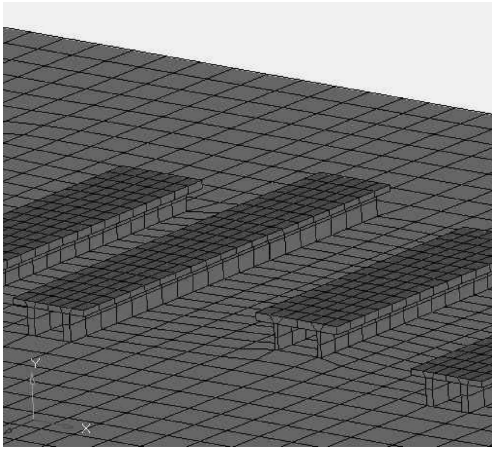


图 7 改进前基座结构

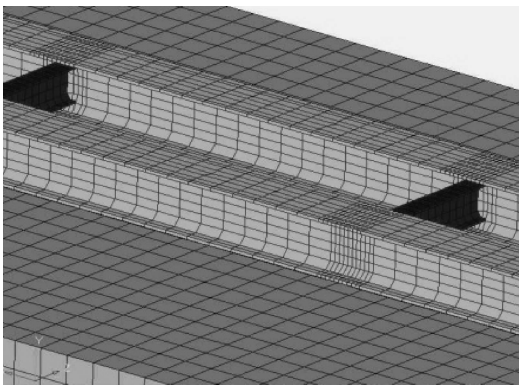


图 8 改进后基座结构

2.3 减振效果对比

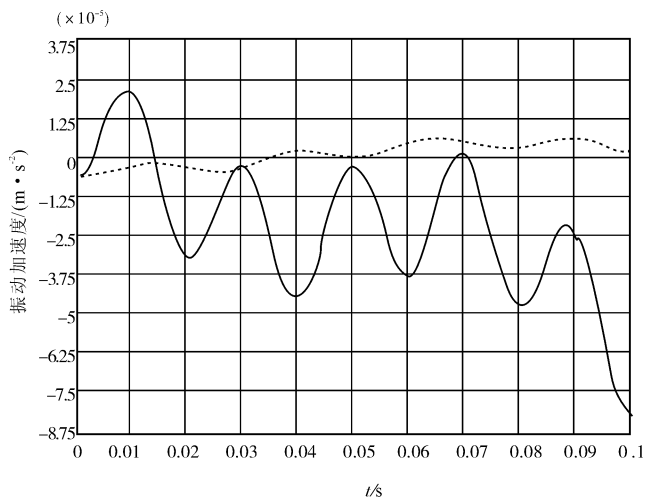


图 9 减振效果评估曲线

本研究将改进前后电抗器进行模态分析,如图 7、

图 8 所示,两者振动模态明显不同,改进前,当设备振动时会影响到地板共振;改进后设备振动基本是独立的,不会影响到基座一起振动,由此说明改进措施能够明显减小设备振动的传递,达到减振的效果。

本研究对改进后的电抗器结构施加激励载荷进行瞬态振动分析,计算结果如图 9 所示:实线为振源一边平均振幅,虚线为隔振器下方基座一侧平均振幅,从图上可以看出,经过隔振器减振后,地板振动将有明显减小,根据式(1)计算可得,振级落差 ST 为 7.7 dB。

3 结束语

本研究对电抗器进行了模态和谐响应分析,找到其振动的主要原因是:低频噪声由电抗器基础未能隔振造成,该结果与设备实际测量一致。针对上述原因,本研究提出了改进方法,在原设备上进行了改进,并对比分析发现减振效果明显。对于电抗器产生的噪声,还可应用其他消声方法。本研究对原设备减振采用的改进措施经济、实用;有限元分析计算方法精确、可靠,对于工程实践具有理论指导意义。

参考文献(References):

- [1] 张骥华. 功能材料及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [2] 陈泽萍,李 强. 变电站环境噪声评价与防治[J]. 电力环境保护, 2008, 24(1):61-62.
- [3] 叶建斌,陈 雁. 变电站环境噪声现场测试分析讨论[J]. 广东电力, 2005, 18(10):53-56.
- [4] 钟佩莲,李 拓,干式变压器噪声分析及控制[J]. 机电工程技术, 2010, 39(8):166-168.
- [5] 樊建平. 树脂绝缘干式电力变压器的噪声与降低措施[J]. 机电工程技术, 2009, 38(8):185-187.
- [6] 秦建新. 建设环保型变电站是城市电网发展的必然趋势[J]. 华北电力技术, 2005(7):36-39.
- [7] 欧阳玲,李铁楠,李 毅,等. 城区变电站噪声分析与治理[J]. 湖南电力, 2009, 29(6):44-45.
- [8] 武立锋,曹晓珑. 电力电容器噪声问题研究进展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(2):32-40.
- [9] 张 林,孙 刚,沈加曙,等. 电抗器隔声罩设计和试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(12):1352-1355.
- [10] 汪 箐. 噪声计算软件在变电站设计中的尝试[J]. 上海电力, 2005(2):161-162.
- [11] 李增光,王 炯,吴天行. 核电站环形吊车抗震计算分析[J]. 核动力工程, 2008, 29(1):150-153.
- [12] 陈 斗. 线路电抗器静结构强度及振动模态有限元分析[J]. 变压器, 2010, 47(4):41-44. [编辑:张 翔]