

DOI: 10.7652/xjtuxb201304008

使用磁流变阻尼器的大型汽轮发电机 定子端部绕组振动控制

刘石¹, 仲继泽², 冯永新¹, 徐自力²

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 510080, 广州; 2. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为控制大型二极汽轮发电机定子端部绕组产生的强迫振动,提出了基于磁流变阻尼器端部绕组的减振方法。将端部绕组及支撑结构简化为等效均质连续的三维板壳组合模型,采用 Sigmoid 力学模型计算阻尼器的阻尼力,建立了加装磁流变阻尼器的端部绕组的振动控制方程,通过直接积分法计算了电磁力作用下某大型汽轮发电机定子端部绕组加装磁流变阻尼器前后的振动响应。计算结果表明,磁流变阻尼器使端部绕组中径向、轴向动应力幅值分别降低了 17.3%、55.9%,采用磁流变阻尼器是控制发电机端部绕组振动的一种有效方法。

关键词: 大型汽轮发电机;端部绕组;振动;磁流变阻尼器

中图分类号: TM311;O327 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)04-0039-05

Magneto Rheological Technology of Vibration Isolation for Stator End-Winding of Large Generators

LIU Shi¹, ZHONG Jize², FENG Yongxin¹, XU Zili²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. State Key Lab for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To control the forced vibration of the stator end winding of large generators, a vibration isolation strategy based on magneto rheological damper is proposed. The stator end winding is simplified as a 3-D continuous homogeneous model of plates and shells, and the damping force produced by magneto rheological dampers is calculated adopting Sigmoid model. The governing equations of the stator end winding with magneto rheological dampers are discretized by finite element method. Forced responses of a stator end winding with and without magneto rheological dampers caused by electromagnetic forces are evaluated by numerical integration. The results show that dampers enable to reduce peaks of radial and axial stresses by 17.3% and 55.9% respectively.

Keywords: large generator; end winding; vibration; magneto rheological damper

大型汽轮发电机组运行时,定子端部绕组会受到端部漏磁场强大的磁拉力作用而产生强迫振动。端部绕组的振动会引起端部绕组绝缘层磨损、鼻端引线振裂漏水、压板松动,进而导致线圈短路。线圈短路会严重影响汽轮发电机的正常运行,甚至会引

发安全事故,例如 1997 年沙角电厂 2 号 660 MW 机组的发电机,端部绕组振动造成 C 相出线环形导线绝缘磨损,导致 1 m 的环形导线烧熔事故^[1]。为了预防定子端部绕组的振动事故,文献[2-3]采用数值方法给出了端部绕组在电磁力作用下振动幅值的变

收稿日期: 2012-09-11。 作者简介: 刘石(1974—),男,教授级高级工程师;徐自力(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家“973 计划”资助项目(2011CB706505)。

网络出版时间: 2012-11-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121116.1739.005.html>

化规律,文献[4-6]通过实验测试得到了端部绕组的固有模式。目前,主要通过对发生振动事故的电机端部进行加固处理来降低端部绕组的振动水平。端部绕组经固定之后,整体刚度虽有所提高,但端部绕组整体的散热性能降低,维修困难^[7],而且由强迫振动引发的电机故障仍然时有发生。因此,有必要对端部绕组强迫振动的控制进行研究,以期找到抑制端部绕组振动的有效方法和措施。

磁流变阻尼器^[8]结构简单、响应快(毫秒级)、出力大且耐久性好,在很多领域得到应用。端部绕组的漏磁场不仅对端部绕组产生磁拉力,引起定子端部的强迫振动,而且会对环境产生磁污染。利用电机端部漏磁场使磁流变阻尼器中的磁流变液产生磁流变效应而固化,以使磁流变阻尼器产生阻尼力,达到抑制端部绕组振动的目的。在漏磁场强度较强的区域,端部绕组受到较大的磁拉力作用,磁流变液的固化程度也较大。也就是说,端部绕组受到的磁拉力越大,磁流变阻尼器所能产生的阻尼力也就越大。因此,本文提出了采用磁流变阻尼器来控制电机端部绕组振动的方法,建立了带磁流变阻尼器的端部绕组振动控制方程,研究了磁流变阻尼器对端部绕组的减振效果。

1 端部绕组的简化模型及磁拉力分析

1.1 模型简化

大型汽轮发电机端部绕组由端部线棒和支撑结构组成,见图 1。线棒由铜线和铜线表面包络的绝缘层组成,各个线棒之间由绝缘的树脂材料填充。端部绕组的固定和支撑结构使端部绕组具有很好的整体性,根据这一结构特点,可以将端部绕组简化为等效的均质连续三维圆锥壳面,将支撑结构简化为等效均质连续的板,得到端部绕组的简化模型,即三维板壳组合模型,见图 2。

三维板壳组合模型中的圆锥壳面由端部绕组线棒简化得到,因此其材料成分主要为树脂和金属铜,

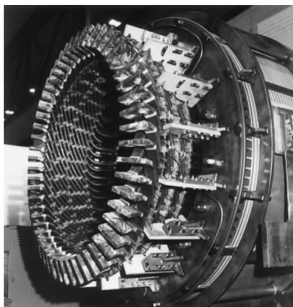


图 1 大型汽轮发电机端部绕组及支撑结构

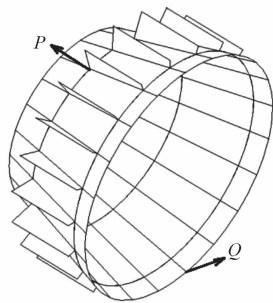


图 2 端部绕组简化模型

其分布见图 3。树脂是横观各向同性的,铜是各向同性的,记 E_1 、 E_2 分别为树脂和铜的弹性模量。



图 3 端部绕组线棒材料成分分布

采用材料力学方法^[9]对绕组线棒的等效弹性常数进行计算。在 x 方向上,对线棒两端施加单位位移,根据模型端部所产生的力等于各个材料层所产生的力之和这一条件,可得圆锥壳面在 x 方向(实际的周向)的等效弹性模量为

$$E_x = \varphi_1 E_1 + \varphi_2 E_2 \quad (1)$$

式中: φ_1 、 φ_2 分别为圆锥壳面中树脂和铜的体积分数。

在 y 方向上,对线棒的两端施加单位均布力,由线棒在 y 方向上的总伸长为各个材料层伸长量的总和,可以求得圆锥壳面在 y 方向的等效弹性模量 E_y 。对线棒的端面施加单位剪切应力,由线棒在各个材料层中具有相同的剪应力可以得到圆锥壳面的剪切模量 G_{xy} 。

1.2 磁拉力

大型发电机主要由转子和定子两大部分组成,转子在定子中间,转子与定子之间是气隙。定子由定子铁心和定子绕组组成,定子绕组固定于定子铁心槽内。转子上安装有励磁绕组,当绕组中通入直流电流时,励磁绕组周围就会形成感应磁场,该感应磁场会随转子一起转动。当转子转动时,定子绕组切割磁力线产生交变的感应电动势,发电机接入负载后,定子绕组与外电路形成回路,在回路中产生交变电流。

定子绕组中的交变电流同样会产生一个旋转的感应磁场。二极汽轮发电机定子线圈节距较大,每个相带线圈数量多,导致定子绕组端部很长,这样就会在端部绕组附近产生旋转的感应磁场。汽轮发电

机转子多采用了隐极式,这样转子的感应磁场会在转子的端部(即定子的绕组端部附近)产生旋转磁场。转子和定子端部绕组附近产生的两个磁场叠加成一个合成的旋转磁场,但这部分磁场对发电没有作用,因此又称为漏磁场。

当发电机工作时,端部绕组中有电流通过,电流和旋转的漏磁场相互作用,使端部绕组受到旋转的磁拉力作用。定子端部绕组受到的磁拉力呈空间分布,且含有径向、周向和轴向3个方向的分量。由于端部绕组周向和轴向的刚度都比径向刚度大得多,所以相对于磁拉力径向分量引起的振动而言,磁拉力周向和轴向的分量引起的振动可以忽略,因此文中忽略了磁拉力沿周向和轴向的分量。文献[10]认为发电机磁拉力沿周向分布近似为正弦分布,磁拉力的径向分量表达式为

$$F_r = F_0 \sin(\omega t + 2\phi) \quad (2)$$

式中: F_0 是磁拉力的最大值; ω 是转子转动的角频率; ϕ 是端部绕组在极坐标系下的周向坐标值,取值范围为 $0 \sim 360^\circ$ 。

根据式(2)绘制出某二极发电机磁拉力的径向分量沿周向分布,见图4。图4中所示的磁拉力整体随着转子转动,从图中也可以看出,磁拉力径向分量在周向的分布具有循环对称性。当转子以 $3\,000\text{ r/min}$ 的速度转动(即转动频率为 50 Hz)时,定子端部绕组受到的磁拉力的频率将会是转速的2倍,即为 100 Hz 。

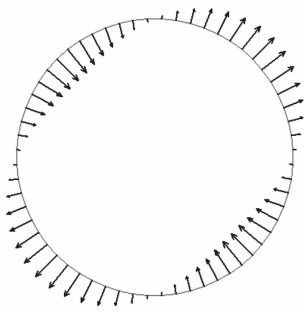


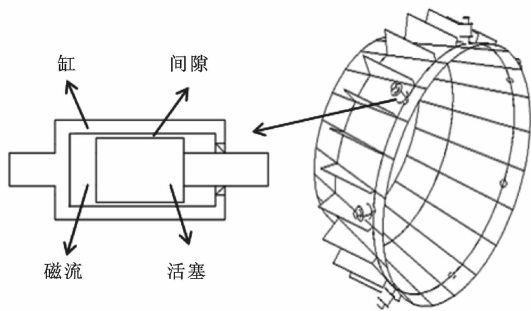
图4 端部绕组磁拉力径向分量沿周向分布

2 基于磁流变阻尼器的端部绕组振动控制方程

一般情况下,磁流变阻尼器需要通过外部电源对线圈供电,以建立产生磁流变效应所需的磁场,使磁流变阻尼器输出较大的阻尼力。大型汽轮发电机工作时,在端部绕组的附近有定子及转子产生磁场泄漏。随转子转动的漏磁场产生的磁拉力会引起发电机端部绕组的强迫振动。磁流变阻尼器正好可以利用该漏磁场,避免了对外部电源和内部线圈的依

赖,因此在发电机端部采用磁流变阻尼器来控制发电机端部振动是方便易行的。为此,提出了采用输出阻尼力大的剪切阀式磁流变阻尼器对端部绕组进行减振。

将7个剪切阀式磁流变阻尼器垂直于圆锥壳均匀布置,见图5,磁流变阻尼器的活塞与圆锥壳相连,缸体与电机机座相连。当端部绕组在磁拉力的作用下发生强迫振动时,安装点沿径向和轴向的振动使磁流变阻尼器的活塞与缸体产生相对运动,阻尼器缸体内的磁流变液就会受到挤压而被迫通过间隙产生流动,磁流变液在间隙中流动时与活塞、缸体内壁产生相对运动,同时会产生剪切作用。磁流变阻尼器产生的阻尼力是挤压和剪切两部分阻尼力之和^[11]。



(a) 磁流变阻尼器

(b) 磁流变阻尼器的分布

图5 磁流变阻尼器及其在模型中的布置示意图

对于图5b中安装点周向坐标为 ϕ 的磁流变阻尼器而言,设其所处磁场的磁场强度为 B 。端部漏磁场的空间分布与磁拉力的空间分布类似,而且端部漏磁场是随着电机转子转动而转动的,因此 B 是周向坐标和时间的函数,记为 $B(\phi, t)$ 。在 t 时刻,若阻尼器安装点的径向和轴向振动速度分别为 $\dot{r}$ 、 $\dot{z}$,则磁流变阻尼器活塞和缸体之间的相对运动速度 $v = (\dot{r}^2 + \dot{z}^2)^{1/2}$ 。采用磁流变阻尼器的 Sigmoid 力学模型^[12]计算阻尼力的表达式为

$$F_z(\phi, t) = \frac{F_m(\phi, t)(1 - e^{-\beta(\phi, t)v})}{1 + e^{-\beta(\phi, t)v}} + C_0 v \quad (3)$$

式中: $F_m(\phi, t)$ 是磁场强度为 $B(\phi, t)$ 时的磁流变液产生的阻尼力;式(3)右端第1项为库仑阻尼力,第2项为黏滞阻尼力。

将磁流变阻尼器产生的阻尼力分解为径向和轴向分量,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} F_{rx}(\phi, t) = & -\text{sign}(\dot{r}) \left(\frac{F_m(\phi, t)(1 - e^{-\beta(\phi, t)v})}{1 + e^{-\beta(\phi, t)v}} + C_0 v \right) \cos\theta \\ F_{zx}(\phi, t) = & -\text{sign}(\dot{z}) \left(\frac{F_m(\phi, t)(1 - e^{-\beta(\phi, t)v})}{1 + e^{-\beta(\phi, t)v}} + C_0 v \right) \sin\theta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: θ 为圆锥壳面与轴向的夹角。

采用 8 节点壳单元对图 2 所示的模型进行网格划分,得到端部绕组的有限元模型。加装磁流变阻尼器后的定子端部绕组振动的有限元方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_z \quad (5)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{F}$ 为电动力张量; $\mathbf{F}_z$ 为磁流变阻尼力张量。

3 计算结果及分析

对某一大型汽轮发电机端部绕组进行简化,得到三维板壳组合模型的结构尺寸,见图 6。

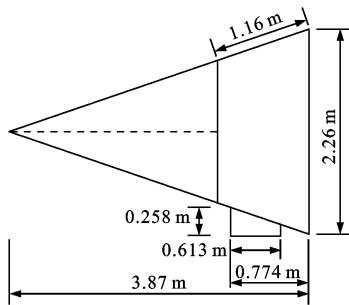
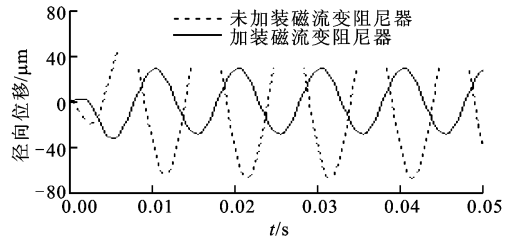


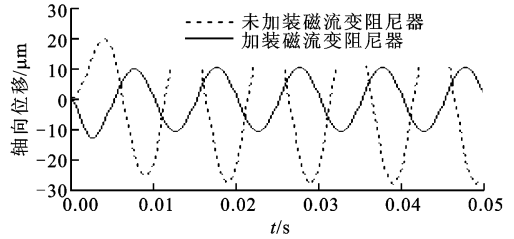
图 6 三维板壳组合模型的结构参数

采用直接积分法求解端部绕组的振动响应。由于式(5)是一个弱非线性方程,而数值积分 Newmark 方法是一种隐式积分法,比显示积分法精度更高,对一般的非线性方程都具有较好的精度,因此本文采用 Newmark 方法,计算出了端部绕组在磁拉力作用下的强迫振动响应。计算结果表明,端部绕组鼻端振动位移幅值最大。选取鼻端某一点为观察点,如图 2 中的 Q 点,其振动位移与时间的关系曲线见图 7。模型的主体结构为圆锥壳面,当圆锥壳面沿径向发生变形时,除了产生径向位移还会引起沿周向和轴向的位移。未加装磁流变阻尼器时,振动位移径向、周向、轴向最大值分别为 68.5、27.9、29.2 μm ;加装了磁流变阻尼器之后,振动位移径向、周向、轴向最大值分别为 31.1、11.6、17.3 μm 。加装磁流变阻尼器使 Q 点径向振动的振幅减小了 54.60%、轴向振幅减小了 58.42%、周向振幅减小了 40.75%。

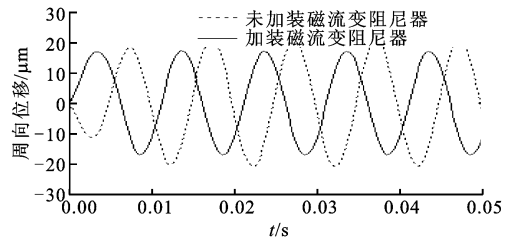
由强迫振动响应可以计算得到端部绕组的应力分布,最大应力点处(图 2 所示的 P 点)的应力时间历程见图 8。未加装磁流变阻尼器时,P 点处径向应力最大值为 10.4 MPa、轴向应力最大值为 18.6 MPa;加装了磁流变阻尼器之后,径向应力最大值降低到 8.6 MPa、轴向应力最大值降低到



(a) 径向位移

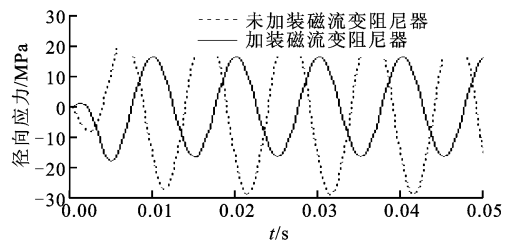


(b) 轴向位移

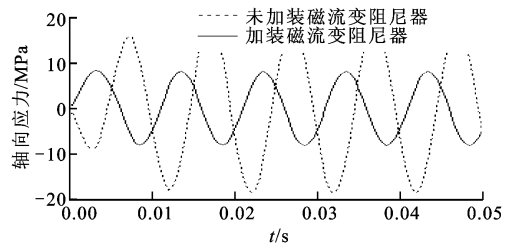


(c) 周向位移

图 7 点 Q 的位移-时间曲线图



(a) 径向应力



(b) 轴向应力

图 8 点 P 的应力-时间曲线图

8.2 MPa。加装磁流变阻尼器使 P 点径向应力幅值减小了 17.3%、轴向应力幅值减小了 55.9%。

4 结 论

本文将磁流变阻尼器用于大型汽轮发电机定子端部绕组的振动控制,有效地利用了发电机端部漏磁场使阻尼器中的磁流变液产生磁流变效应,降低了端部绕组的振动,减少了漏磁场产生的危害。将端部绕组简化为三维板壳组合模型,考虑磁拉力,采用磁流变阻尼器的 Sigmoid 模型,建立了基于磁流变阻尼的发电机端部绕组的振动控制方程。研究了磁流变阻尼器对某大型汽轮发电机定子端部绕组的减振效果。研究表明,采用磁流变阻尼器能够大幅度地降低端部绕组的振动水平,有效地抑制端部绕组的振动。本文研究为控制大型汽轮发电机定子端部绕组的振动提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] 周尚礼,杨楚明,陈强,等. 大型汽轮发电机定子绕组端部振动特性测试技术的应用与分析[J]. 广东电力, 2000, 13(5): 35-37.
ZHOU Shangli, YANG Chuming, CHEN Qiang, et al. Application and analysis of vibration test technology of large turbo-generator end-winding [J]. Guangdong Electric Power, 2000, 13(5): 35-37.
- [2] 王玉田,袁晓红. 大型汽轮发电机定子绕组端部固定方法[J]. 大电机技术, 2011(2): 15-16.
WANG Yutian, YUAN Xiaohong. Discussion on fixing methods of large turbogenerator stator endings overhang [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2011(2): 15-16.
- [3] 邱家俊,胡宇达,卿光辉. 电磁力激发下汽轮发电机定子端部绕组的磁固耦合振动[J]. 振动工程学报, 2002, 15(3): 267-273.
QIU Jiajun, HU Yuda, QING Guanghui. Magnetism and solid coupling vibration of turbogenerator stator end windings under electromagnetic force [J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(3): 267-273.
- [4] 胡宇达,邱家俊. 电磁力作用下发电机定子端部绕组的两自由度主共振[J]. 固体力学学报, 2004, 25(4): 439-445.
HU Yuda, QIU Jiajun. Two-degree-of-freedom principle resonance and bifurcation of generator end winding under electromagnetic force and friction force [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2004, 25(4): 439-445.

- [5] 姚大坤,曲大庄,李虹,等. 大型汽轮发电机定子端部绕组动态特性研究[J]. 大电机技术, 2002(2): 1-4.
YAO Dakun, QU Dazhuang, LI Hong, et al. Study on end winding dynamic character of large turbogenerator [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2002(2): 1-4.
- [6] 成中均,黄立民,李晓霞. 大型汽轮发电机定子端部绕组固有频率测试与分析[J]. 大电机技术, 1999(4): 1-8.
CHENG Zhongyun, HUANG Limin, LI Xiaoxia. Measurement and analysis of the natural frequency of the end winding on large turbogenerator stator [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 1999(4): 1-8.
- [7] 姚大坤,沈梁伟. 发电机定子端部绕组动态特性标准探讨[J]. 电力设备, 2002, 3(3): 61-64.
YAO Dakun, SHEN Liangwei. Dynamic characteristic standards discussion on of stator end windings of large turbo-generator [J]. Electrical Equipment, 2002, 3(3): 61-64.
- [8] 关新春,欧进萍. 磁流变减振驱动器的响应时间试验与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 96-102.
GUAN Xinchun, OU Jinping. Response time experiment and analysis of magnetorheological fluid actuator [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(6): 96-102.
- [9] 王震鸣. 复合材料力学和复合材料结构力学[M]. 北京:机械工业出版社, 1991:71-81.
- [10] DRUBEL O, KULIG S, SENSKE K. End winding deformations in different turbo generators during 3-phase short circuit and full load operation [J]. Electrical Engineering, 2000(82): 145-152.
- [11] 徐赵东,沈亚鹏. 磁流变阻尼器的计算模型及仿真分析[J]. 建筑结构, 2003, 33(1): 68-71.
XU Zhaodong, SHEN Yapeng. Calculating models and Simulink analysis about magnetorheological damper [J]. Building Structure, 2003, 33(1): 68-71.
- [12] 汪建晓,孟光. 磁流变液阻尼器用于振动控制的理论及实验研究[J]. 振动与冲击, 2001, 20(2): 39-46.
WANG Jianxia, MENG Guan. Theoretical and experimental study on the vibration control by magneto-rheological fluid dampers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(2): 39-46.

(编辑 杜秀杰)