

基于磁流变弹性体基础隔振的 电力变压器可控减振研究

王文静¹, 鲁晓莉¹, 陆东¹, 刘忠喜¹, 于彬¹, 孔丹晖¹, 吴林颖^{2*}

¹江苏科能电力工程咨询有限公司, 江苏 南京

²南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京

Email: luxiaoli@jspdi.com.cn, *Wulinying@stu.njnu.edu.cn

收稿日期: 2020年11月24日; 录用日期: 2020年12月22日; 发布日期: 2020年12月29日

摘要

电力变压器运行时会产生振动, 不仅会产生噪声影响居民的日常生活, 严重的还会降低电力设备的使用寿命危害电网安全。本文采用新型减振材料磁流变弹性体作为电力变压器基础隔振, 利用磁流变弹性体刚度可调特性实现三段减振模式, 实现应用于电力变压器的可控减振系统, 进一步建立系统仿真模型, 分别在谐波、冲击性和随机激励三种激励下分析三段模式的减振效果, 结果表明通过调节磁流变弹性体刚度能有效改变电力变压器在不同外激励下的共振频率, 为进一步开展控制器设计奠定基础。

关键词

电力变压器, 磁流变弹性体, 可控减振系统, 三段减振

Research on Controllable Vibration Reduction of Power Transformer with Magnetorheological Elastic Foundation

Wenjing Wang¹, Xiaoli Lu¹, Dong Lu¹, Zhongxi Liu¹, Bin Yu¹, Danhui Kong¹, Linying Wu^{2*}

¹Jiangsu Keneng Electric Power Engineering Consulting Co. LTD, Nanjing Jiangsu

²School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

Email: luxiaoli@jspdi.com.cn, *Wulinying@stu.njnu.edu.cn

Received: Nov. 24th, 2020; accepted: Dec. 22nd, 2020; published: Dec. 29th, 2020

Abstract

The power transformer is sustained vibrating in operation, which will not only produce noise and

*通讯作者。

文章引用: 王文静, 鲁晓莉, 陆东, 刘忠喜, 于彬, 孔丹晖, 吴林颖. 基于磁流变弹性体基础隔振的电力变压器可控减振研究[J]. 电气工程, 2020, 8(4): 179-185. DOI: 10.12677/jee.2020.84020

affect the daily life of residents, but also seriously reduce the service life of power equipment and endanger the safety of the power grid. In this paper, a novel basic vibration isolation of magnetorheological elastomer is used for the power transformers, and the three-stage vibration reduction mode is realized by using the adjustable rigidity characteristics of magnetorheological elastomers to realize a controllable damping system applied to power transformers. The dynamic model of the system is further established. The comprehensive performance of the three-stage vibration reduction mode is analyzed under three excitations of harmonic, impact and random excitation. The results show that adjusting the stiffness of magnetorheological elastomer can effectively change the resonance frequency of power transformers under different external excitations. This work lays the foundation for further development of controller design.

Keywords

Power Transformer, Magnetorheological Elastomer, Controllable Vibration Reduction System, Three-Stage Vibration Reduction

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来通过积极合理化利用外资,运用多种电价和推举竞争等各项措施,电力建设得以高速发展,在发展规模,发展速度以及科技水平上不断地取得突破,不断地迈上新的阶梯[1],我国电力建设已经进入了高参数,大容量,超高压,高度自动化的新时期。与此同时,这也对国家的供电要求提出了更高的要求,研究如何减少电力设备安全事故,如何让电力建设快速安全发展是非常具有时代意义的[2]。

电力变压器是电力系统中数量极多且地位十分重要的电气设备,其工作状态直接影响电力系统的稳定和安全,对变压器进行振动分析,及其相关减振技术的研究已经成为相关行业和电力部门的研究重点。变压器内部振动主要源于两个方面,硅钢片在交流磁场中产生磁致伸缩现象,从而引起的铁心振动以及漏磁场与电流共同作用产生电磁力,从而引起的绕组振动。这些振动通过变压器油及支撑结构传递给油箱外壳,从而对外产生辐射噪声[3]。变压器振动还有可能源于自然环境,自然环境通过地基等传递给油箱,从而引起油箱的振动,如图1所示。目前在变压器减振中,变压器本体振动噪声的减小多通过硅钢片以及线圈工艺的优化设计;传播路径振动噪声抑制多采用隔振垫、吸音层等,比如在变压器外壳安装降噪板,将单一的变压器外壳拓展为金属面板,多孔材料层及环氧玻璃布板的多层结构,消除变压器振动[4],比如通过增加橡胶减振垫片、金属弹簧等辅助设备,从而减小变压器噪声振动的影响[5];环境引起变压器振动噪声多采用减振器,通过吸收能量减小变压器的振动。

基于磁流变智能材料的可控减振器件具有刚度/阻尼可调、损耗低、反应快,可以通过外加磁场改变其模量及阻尼等性能进行调控。在很多领域中都有一定的研究,并得出减振技术效果显著的结论,比如运用磁流变阻尼器对密封流体激振起到显著的抑制作用[6];比如磁流变液隔振技术在军事领域和民用设备上的应用[7];比如军用越野汽车上磁流变减振器的运用,得出可以有效提高汽车的操纵稳定性[8]。

目前尚无采用磁流变弹性体(Magnetorheological Elastomer, MRE)的变压器主动减振系统,结合磁流变材料在其他领域减振效果显著,本文将MRE运用到电力变压器基础隔振中,通过建立系统动力学模型,在不同控制方式下观察电力变压器振动特性,分析减振性能,为验证变压器主动减振技术的有效合理性奠定理论基础。

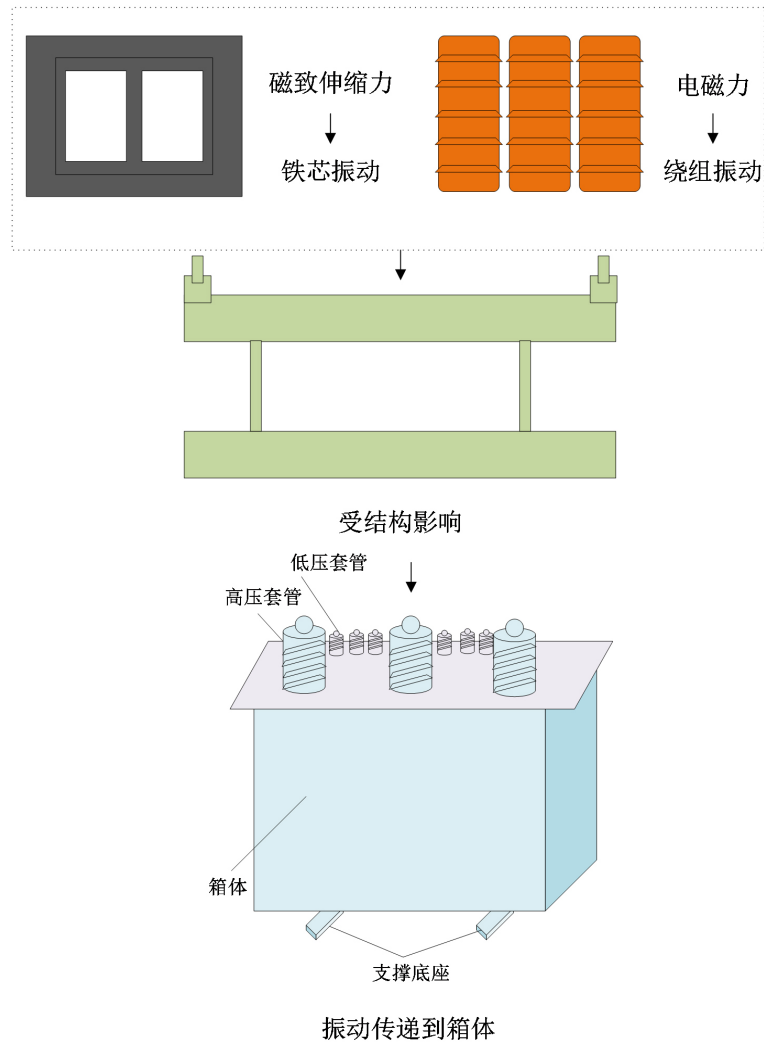


Figure 1. Schematic diagram of transformer vibration transfer
图 1. 变压器振动传递示意图

2. 基于 MRE 的电力变压器主动减振系统

图 2 所示为系统动力学模型，其中 m_1 表示变压器质量； m_2 表示基础隔振质量； k_1 和 c_1 表示 MRE 可变刚度和阻尼系数； k_2 和 c_2 表示基础隔振的等效刚度与阻尼； $F(t)$ 为变压器受到的外部振动激励； x_1 表示变压器底部的振动位移； x_2 表示基础振动位移。

系统动力学方程为

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 (x_1 - x_2) = F(t) \tag{1}$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1 (x_1 - x_2) + k_2 x_2 = 0 \tag{2}$$

其中 MRE 是一种典型的黏弹性材料，材料的复杂粘弹性力学行为可以通过弹簧和阻尼器两种基本元件通过各种组合而成的模型进行表征。考虑到后续仿真，本文采用最基本的 Kelvin 计算模型，如图 3 所示，该模型由一个弹簧与一个阻尼器并联而成。由于 MRE 隔振器的刚度与阻尼可以在外界磁场的作用下实时变化，因此 k_1 和 c_1 是变化的，该模型的应力应变关系为：

$$F = k_1 x + c_1 \dot{x} \tag{3}$$

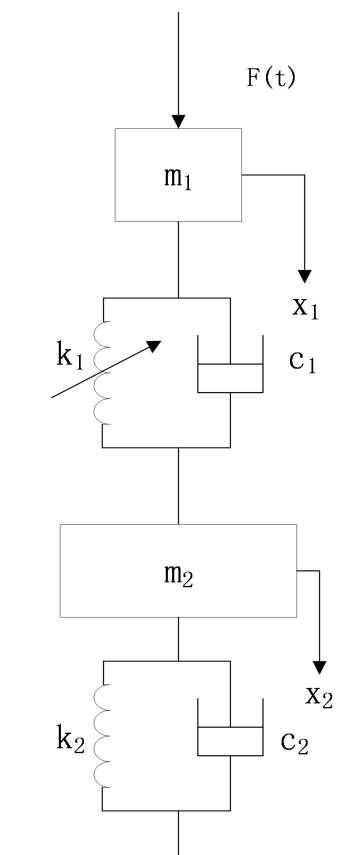


Figure 2. Dynamic model of active vibration reduction system
图 2. 主动减振系统动力学模型

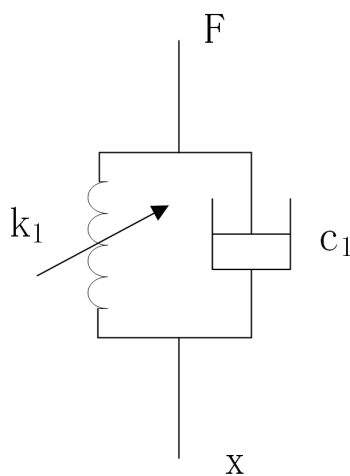


Figure 3. MRE dynamic model
图 3. MRE 动力学模型

3. 仿真分析

基于 *Matlab/Simulink* 建立系统仿真模型，系统参数为，变压器质量 m_1 为 $7.4 \times 10^4 \text{ Kg}$ ，MRE可调刚度 k_1 为 $3.063 \times 10^8 \sim 1.297 \times 10^{10} \text{ (N/m)}$ ，MRE阻尼 c_1 为 $8.2449 \times 10^6 \text{ Ns/m}$ ，基础隔振质量 m_2 为 $5.7 \times 10^4 \text{ Kg}$ ，

基础隔振刚度 k_2 为 3.09×10^9 N/m，基础隔振阻尼 c_2 为 6.6705×10^6 Ns/m。

首先假设变压器产生的简谐激振力 $F = F_0 \sin \omega t = 1800 \sin \omega t$ 的作用(其中 F_0 为简谐激振力的幅值)， $\omega = 2\pi ft$ ($f = 100\text{Hz}$)。如图 4 所示，从频域分析中可以看出，随着 MRE 刚度的增大，共振频率逐渐增大，会直接影响振源固有频率与隔振系统频率之比，从而直接关系隔振效果，说明在其他因素不变的条件下，设置不同的刚度会对隔振系统隔振频率以及隔振效率产生影响。同时容易看出共振频率大致为 100 rad/s 左右，与变压器的基频振动频率一致，相位在共振峰频率前后转了近 90° 。

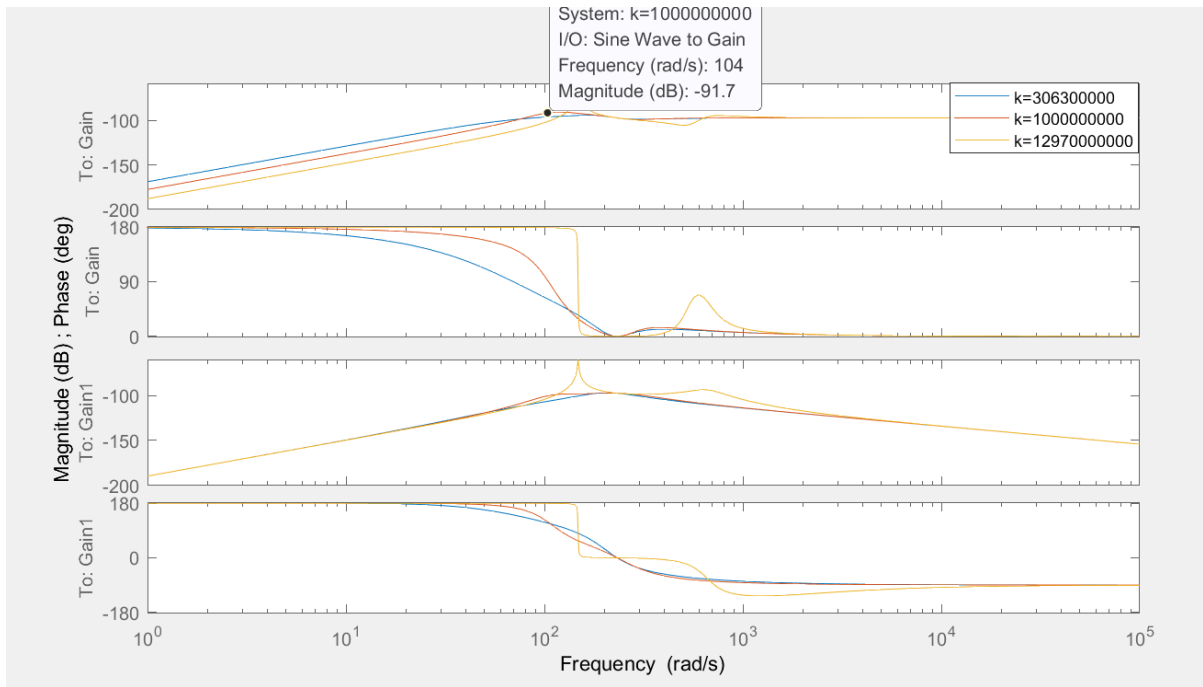


Figure 4. The transmission rate of system vibration under harmonic excitation

图 4. 谐波激励下系统振动传输率

假设受到冲击性外部激励时，观察不同减振模式下的减振性能。采用平滑脉冲激励，应用提出的式(4)产生的平滑脉冲信号作为激励输入。

$$\begin{cases} x_{i1,2} = 0.25a_m e^2 (\mu\omega_0 t)^2 e^{-\mu\omega_0 t} \\ x_{i3,4} = 0.25a_m e^2 [\mu\omega_0 (t-t_0)]^2 e^{-\mu\omega_0 (t-t_0)} u(t-t_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中， a_m 为平滑脉冲信号幅值， ω_0 为基波频率， μ 为刚度参数， $u(t-t_0)$ 表示阶跃信号。取 $a_m = 1800\text{N}$ ；根据前面频域分析减振系统共动频率主要集中在 100 HZ 左右，故取 $\omega_0 = 200 * \pi \text{rad/s}$ ； $\mu = 3$ ； $t_0 = 0.17\text{s}$ 。

如图 5 所示，结果表明刚度越大减振效果越差，当刚度取最大临界值时，减振系统无法正常工作。

假设外部激励为随机响应，在实际运行时变压器受到的激励信号一般是随机信号，应用随机数据作为变压器激励输入对减振系统的性能进行分析，更能贴近变压器运行的实际情况。根据傅里叶变换定理，任何复杂信号都可以分解为若干单品信号的叠加，因此选择单频信号作为随机输入：

$$x_i = A \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

其中 f 为随机激励频率，在这里使其在 50~400 Hz 变化； A 为随机激励最大幅值，这里选取 A 为 250 N。如图 6 所示，结果表明刚度越大减振效果越差，当刚度取最大临界值时，减振系统几乎没有减振效果。

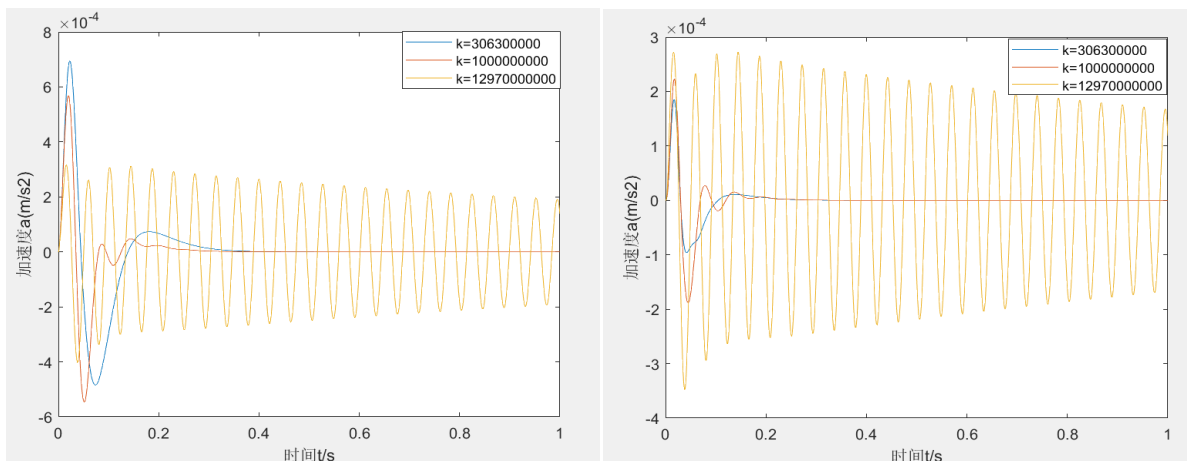


Figure 5. Contrast diagram of acceleration under shock excitation
图 5. 冲击性激励下加速度对比图

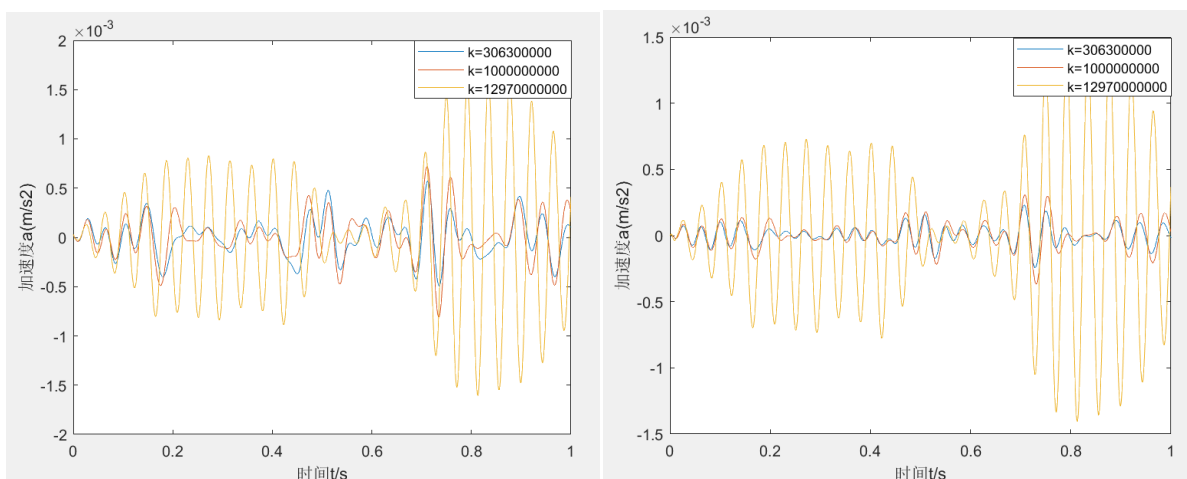


Figure 6. Comparison diagram of acceleration under random excitation
图 6. 随机激励下加速度对比图

4. 结论

本文针对电力变压器受到外部激励强迫振动问题, 提出采用 MRE 作为基础隔振材料, 利用其刚度可调特性实现三段减振模式, 建立仿真模型并分别在谐波、冲击性和随机激励下对比分析三段模式的减振性能, 结果表明, 不同激励下振动系统振动加速度响应在减小, 基础位移加速度和惯性质量块位移加速度过渡时间(即系统达到稳态)基本接近, 一方面验证了刚度调节有利于系统隔振性能提升, 另一方面也表明利用 MRE 实现电力变压器可控减振具有可行性。

基金项目

本文研究获得江苏省研究生实践创新项目“整车磁流变悬架非线性动力学分析与控制关键技术研究, SJCX20_0441”、企业横向项目“大型电力设备振动分析与主动减振技术, 科技开发 20-015”资助。

参考文献

[1] 胡行森. 浅谈电力工程发展现状与未来趋势[J]. 建材与装饰, 2018(34): 231.

-
- [2] 王中煜, 姚雁南. 试析电力技术与电力生产安全[J]. 中外企业家, 2018(18): 125.
 - [3] 侯东, 段炼, 曹春诚, 邴龙, 马超群, 陈鹤. 35 kV 油浸式配电变压器噪声与振动测试[J]. 应用声学, 2020, 39(6): 964-968.
 - [4] 李诚理. 配电房干式变压器噪声分析及减振降噪处理[J]. 机电信息, 2020(2): 70-71.
 - [5] 顾鸣伟, 仝旭, 何守磊, 成果, 殷振. 变压器弹簧减振降噪装置的设计研究[J]. 机械工程与自动化, 2018(5): 116-118.
 - [6] 郭咏雪, 何立东, 李宽. 基于磁流变阻尼器的密封减振技术实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(22): 144-148.
 - [7] 袁杰, 陈磊. 磁流变液减振技术现状及方法研究[J]. 机械研究与应用, 2013(6): 195-198.
 - [8] 侯锁军, 黄一鸣, 史文库. 磁流变减振器对军用越野车平顺性及操稳性的影响[J]. 机械设计与制造, 2020(6): 146-152.