

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.01.006

变阻抗节能变压器的动热稳定性能研究

樊益平¹, 张 军¹, 张海龙², 贺好艳³, 马 奎¹, 丁 培¹

(1. 国网宁夏电力公司, 银川 750001; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074;
3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要:以110/38.5/10.5 kV, 63 000 kVA三绕组变压器为例, 提出将限流电抗器与快速开关并联后串入变压器高压绕组的变阻抗变压器。建立Pscad短路仿真模型, 发生短路故障时通过快速开关控制限流电抗器的投切实现限流; 分析了变压器中压绕组出口三相对称短路时限流电抗器的限流效果。建立了变压器绕组轴向振动的“质量弹簧系统”, 用以分析变压器绕组在轴向短路力作用下的轴向动态过程, 可得绕组的动态位移、动态力、弯曲应力。基于二维轴对称磁—热—流耦合场有限元模型, 计算变压器绕组温升。对比分析限流电抗器投入与否2种情况下短路动、热性能, 结果表明: 投入限流电抗器变压器可降低短路电动力冲击和短路温升, 变阻抗变压器的动热性能均优于传统的变压器。

关键词: 限流电抗器; 短路电流; 动稳定; 短路温升; 位移; 应力

Study on Mechanical and Thermal Stability Performance of an Energy-saving Transformer with Variable Impedance

FAN Yiping¹, ZHANG Jun¹, ZHANG Hailong², HE Haoyan³, MA Kui¹, DING Pei¹

(1. State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China; 2. Wuhan NARI Limited Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Taking a transformer rated 110/38.5/10.5 kV and 63 000 kVA as an example, a reactor controlled by a paralleled high-speed switch is put forward to limit the short-circuit current. The reactor is in series with the high-voltage winding of transformer. A circuit model is established to analyze the transient short-circuit currents of the windings when the three-phase short-circuit fault occurs at the location of the termination of low-voltage winding. The dynamic force, displacement and bending stress of variable impedance transformer are analyzed based on the mass-spring system. A magnetic-thermal-fluid coupled model is applied to calculate the temperature rise of the transformer windings at the short-circuit operation. The research method is applied to energy-saving transformer and the short-circuit mechanical stability and the transient temperature distribution of current-limiting reactor inputting or not are calculated. The results show that the mechanical stability and transient temperature distribution of energy-saving transformers is superior to the traditional transformer.

Key words: current-limiting reactor; short-circuit current; mechanical stability; short-circuit temperature rise; displacement; stress

0 引言

电力变压器作为电网中的主要电气设备, 其安全可靠性是保障电力系统可靠运行的必备条件。变

压器的外部短路故障主要有三相短路、相间短路、两相接地短路和单相接地短路故障等, 其中变压器发生出口三相短路产生的短路电流最大^[1-2], 对变压器各部件的危害也最大。短路发生时绕组产生巨大

收稿日期: 2016-05-15; 修回日期: 2016-06-28

基金项目: 国家电网公司科技项目(5229DK150004); 国家自然科学基金项目(51577140)。

Project Supported by State Grid Corporation Projects(5229DK150004), National Natural Science Foundation of China(51577140).

的电动力是绕组变形、破坏的主要原因^[3-4]。目前在限制变压器短路电流方面的限流方式主要有超导故障限流技术、高阻抗变压器^[5]。超导故障限流器必须工作在低于约-200℃的低温环境下,目前尚不能经济方便地实现;而且超导元件失超后需要比较长的时间才能重新恢复到超导态,不能满足电力系统发生短路故障后尽快恢复供电方案的要求^[6-8]。高阻抗变压器的高阻抗特性在系统正常运行时,不利于节能,且经济性较差。同时变压器阻抗电压越高,变压器的尺寸也越大,制造成本越高^[9-12]。变阻抗节能变压器旨在取代高阻抗变压器,降低损耗和短路冲击。

基于此,文中提出将限流电抗器与快速开关并联之后串联于变压器高压绕组的变阻抗节能变压器,发生短路故障时通过快速开关控制限流电抗器的投切。以110/38.5/10.5 kV,63 000 kVA三绕组变压器为研究对象,建立Pscad电磁暂态仿真模型,分析中压绕组出口发生三相对称短路时,在高压绕组串入限流电抗器后的限流效果,建立电力变压器的二维轴对称模型,研究变阻抗节能变压器动态力^[13]、动态位移^[14]和弯曲应力以校验其动稳定性。建立二维轴对称磁—热—流耦合场分析的有限元模型,对变压器高、中、低压绕组在发生短路后2 s内的温升进行

研究以校验其热稳定性,并对未投入和投入限流电抗器2种情况的短路温升对比分析,体现投入限流电抗器的作用。

1 变阻抗变压器磁场分析

1.1 短路电流

为防止输、配电系统免受破坏,通常在系统特定位置引入电抗器。限流电抗器的引入无疑使电力损耗增加,为此,提出将限流电抗器与快速开关并联,通过开关控制电抗器投切。正常工作时,电抗器被快速开关短接,变压器损耗未增加;短路故障发生时,快速开关开断,电抗器接入系统,提高变压器阻抗,限制短路电流,实现阻抗的自主调节。

对于升压变压器的低—中—高的结构形式,一般是高、低压绕组作为供电绕组,中压绕组作为负载时系统阻抗最小,短路电流最大,对绕组和器身的危害也越大,故笔者取这种情况进行研究。在Pscad软件中搭建110 kV系统—变压器—输电线路—负载模型^[15],见图1。模型主要包括110 kV系统、110/38.5/10.5 kV三绕组变压器、限流电抗器、快速开关BRKA (BRKB、BRKC)、38.5 kV输电线路及负载。

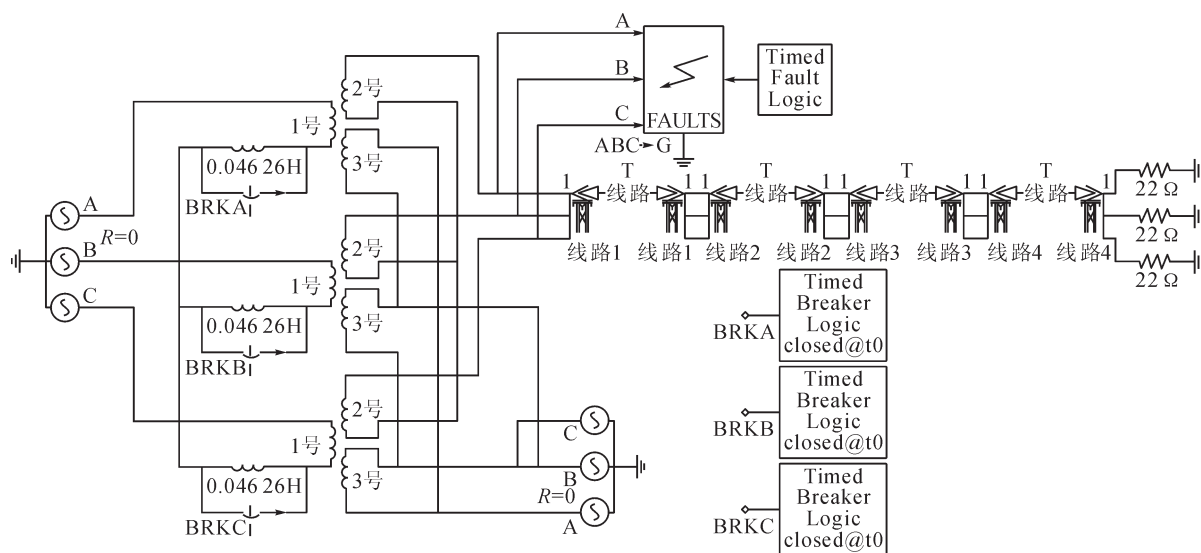


图1 110 kV系统—变压器—输电线路—负载

Fig. 1 110 kV system-transformer-transmission lines-load

以变压器中压绕组发生三相对称短路故障为例,当电源电压A相相位为0时发生短路,BRKA、BRKB、BRKC三相快速开关的动作时间分别在发生短路后各相短路电流过零点时刻,以A相为例,限流电抗器投入时刻为 $t=0.027\ 3\text{ s}$ 时,投入限流电抗器后流过高、中、低压绕组的短路电流,见图2。在限流电抗器作用下,中压侧的短路电流分别降低40.76%。

1.2 漏磁场

基于矢量磁位 A 的变压器磁场控制方程见式(1)–(2)。

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t}; \quad (1)$$

$$B = \mu H. \quad (2)$$

式(1)–(2)中: μ 为磁导率; σ 为电导率; A 为矢

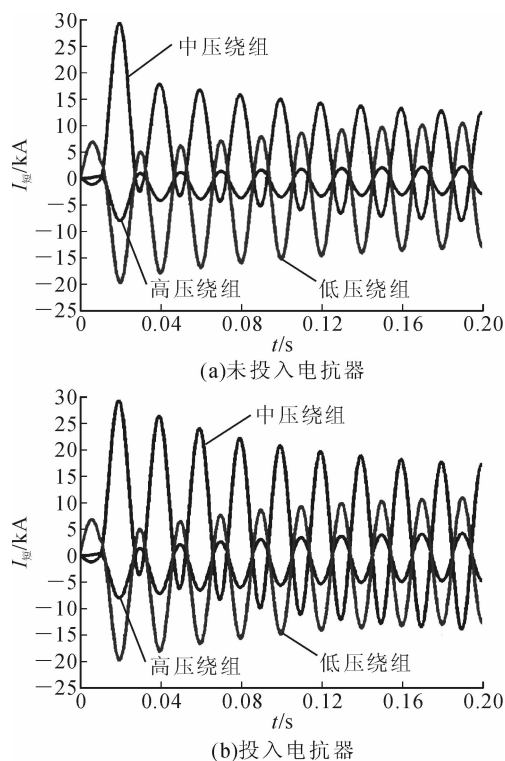


图2 短路电流
Fig. 2 Short-circuit current

量磁势; J_s 为源电流密度; B 为磁感应强度。

对变压器模型做如下处理^[16-18]:

1) 根据变压器模型结构上的对称性, 取二维轴对称模型作为研究对象;

2) 变压器绕组采用绞线, 假设电流密度在绕组内均匀分布;

3) 铁心用硅钢片磁化特性为非线性特性, B - H 曲线见图3。

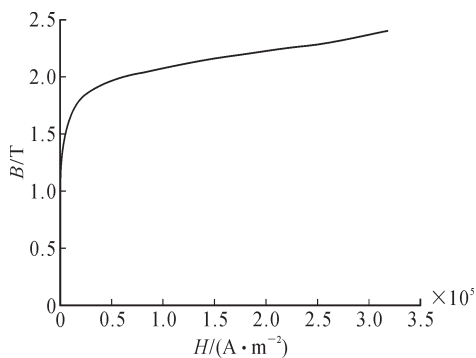


图3 铁心的 B - H 曲线
Fig. 3 B - H curve of iron core

4) 取单相进行研究, 忽略相与相之间的影响。

建立三绕组变压器绕组轴对称模型, 变压器发生三相对称短路, 取高、中、低压绕组的 A 相短路电流作为磁场有限元分析的电流激励, 有限元计算变压器磁力线分布见图4。由图4可知, 变压器漏磁场

主要分布在高、低压绕组之间。

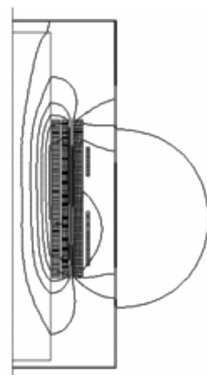


图4 漏磁通
Fig. 4 Leakage magnetic field

1.3 瞬态短路动态力

当短路故障发生时产生在绕组间的电磁力又和变压器短路电流的平方成正比, 巨大的短路电力作用可能使变压器绕组等许多构件遭到破坏。绕组电流密度和周围的漏磁场相互作用在变压器内产生瞬态电力, 其电磁力随时间变化取为^[19]

$$f(t) = \frac{1}{4} f_{im} \left(e^{-2\alpha t} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega t - 2e^{-\alpha t} \cos \omega t \right). \quad (3)$$

式(3)中: f_{im} 为短路电力最大值; α 是和变压器电抗及电阻有关的常数。

建模时, 绝缘垫块及端绝缘材料特性、力、变形关系为

$$F = \bar{a}\delta + \bar{b}\delta^3; \quad (4)$$

$$C = 0.000\ 25\bar{a}. \quad (5)$$

式(4)-(5)中: $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 为与面积、厚度有关的弹性系数; F 为弹性力; C 为阻尼系数。

以高压绕组第1饼(最上边1饼)、第78饼(最下边1饼)、中压绕组第1饼(最上边1饼)、第94饼(最下边1饼)为例, 变阻抗变压器动态力见图5、6。由图5、6分析可知, 短路故障发生后投入限流电抗器使短路动态力降低百分比是短路电流的平方, 与理论分析相符合。

2 变阻抗变压器力学特性

短路电流和漏磁场相互作用而产生的短路力, 实际上是动态力而不是静态力。动态力与各种绝缘材料的机械性能有关。变压器绕组的导体被绝缘材料所分隔, 可将线饼视为集中质量, 绝缘垫块、端圈及压板作为弹性元件, 建立变压器绕组轴向振动的“质量弹簧系统”, 用以分析变压器绕组在轴向短路力作用下的轴向动态过程。在计算轴向动态力时,

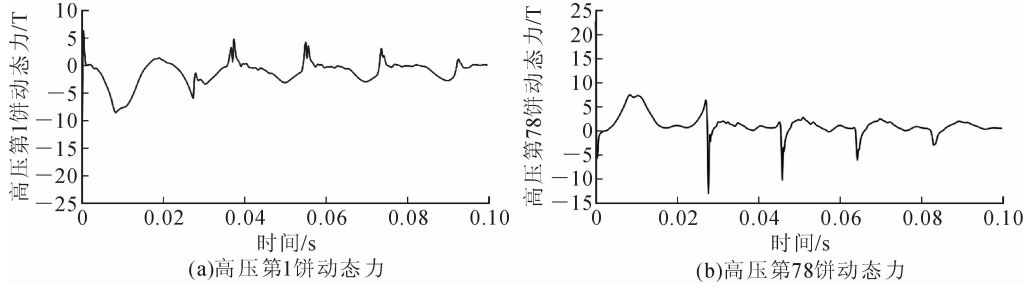


图5 高压绕组动态力

Fig. 5 High-voltage winding dynamic force

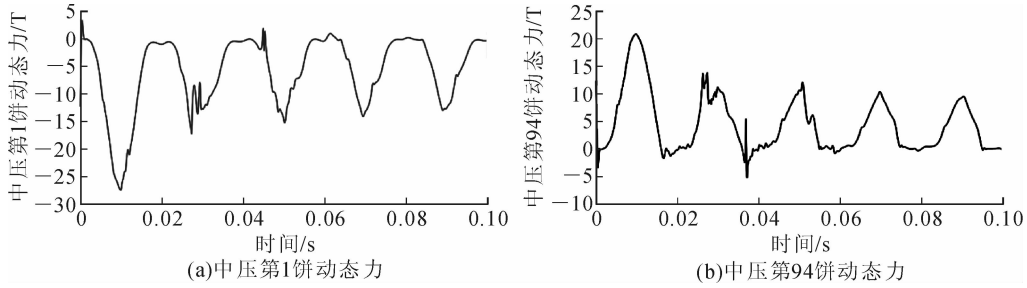


图6 中压绕组动态力

Fig. 6 High-voltage winding dynamic force

通常假设绕组是由绝缘垫块隔开的线饼组成的,并被压紧在铁扼夹件的支板之间。

文中研究变压器绕组轴向动态力和位移问题,将绕组线饼等效为质量单元,将绕组端部绝缘和线饼间的垫块等效为弹簧,建立变压器绕组轴向振动的“质量弹簧系统”模型,考虑预压缩量,用动力学定律得出系统方程为

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + c_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + K_B x_1 + \bar{a}_1 (x_1 - x_2 - \delta_1) + \bar{b}_1 (x_1 - x_2 - \delta_1)^3 = f_1(t) \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c_1 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + c_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + \bar{a}_1 (x_2 - x_1 - \delta_1) + \bar{b}_1 (x_2 - x_1 - \delta_1)^3 + \bar{a}_2 (x_2 - x_3 - \delta_2) + \bar{b}_2 (x_2 - x_3 - \delta_2)^3 = f_2(t) \\ \vdots \\ m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} + c_{i-1} \left(\frac{dx_i}{dt} - \frac{dx_{i-1}}{dt} \right) + c_i \left(\frac{dx_i}{dt} - \frac{dx_{i+1}}{dt} \right) + \bar{a}_{i-1} (x_i - x_{i-1} - \delta_{i-1}) + \bar{b}_{i-1} (x_i - x_{i-1} - \delta_{i-1})^3 + \bar{a}_i (x_i - x_{i+1} - \delta_i) + \bar{b}_i (x_i - x_{i+1} - \delta_i)^3 = f_i(t) \\ m_N \frac{d^2 x_N}{dt^2} + c_{N-1} \left(\frac{dx_N}{dt} - \frac{dx_{N-1}}{dt} \right) + K_H x_N + \bar{a}_{N-1} (x_N - x_{N-1} + \delta_{N-1}) + \bar{b}_{N-1} (x_N - x_{N-1} + \delta_{N-1})^3 = f_N(t) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: $m_i (i=1 \sim N)$ 为线饼单元*i*的质量; K_B 和 K_H 分别为绕组端部、绝缘垫块的弹性系数; x_i 为第*i*单元相对于本身原先位置的位移; c_i 为摩擦系数; $m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2}$ 为第*i*个质量单元的惯性力; $c_{i-1} \left(\frac{dx_i}{dt} - \frac{dx_{i-1}}{dt} \right) + c_i \left(\frac{dx_i}{dt} - \frac{dx_{i+1}}{dt} \right)$ 为第*i*个质量单元在油或者空气中的

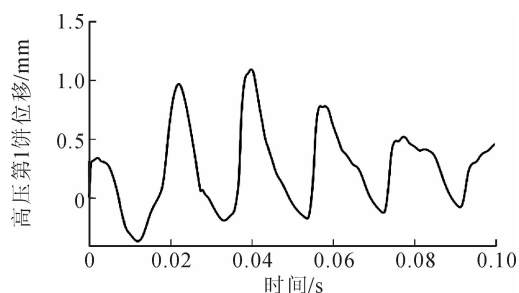
摩擦力; $\bar{a}_{i-1} (x_i - x_{i-1} + \delta_{i-1}) + \bar{b}_{i-1} (x_i - x_{i-1} + \delta_{i-1})^3 + \bar{a}_i (x_i - x_{i+1} - \delta_i) + \bar{b}_i (x_i - x_{i+1} - \delta_i)^3$ 为第*i*的线饼单元的弹性力; $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 跟前面所提到的一样;第一个饼紧挨上压板,最后一个饼紧挨下压板,压板摩擦力可忽略,所以它们仅受另一端垫块作用的摩擦力; $f_i(t)$ 为作用在第*i*个单元上的轴向电磁力。线饼重量约是电磁力大小的1%,故可以忽略。

根据初值条件 $x|_{t=0}=0$ 和 $\frac{dx}{dt}|_{t=0}=0$, 采用变步长

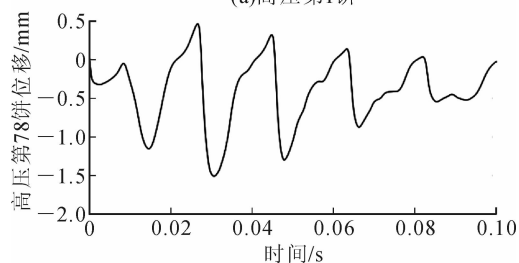
四阶五级龙格—库塔法求解此微分方程,可以得到绕组位移随时间的变化,然后再求得瞬变过程中作用于绕组上任意点的力,此力等于弹性力。

文中对变压器绕组在图5、6示出的动态力作用下进行力学分析,以变压器高压第1饼和78饼,中压第1饼和94饼为例,得变压器动态位移分布,见图7、8。变压器高压和中压弯曲应力见图9。发生短路时变阻抗变压器绕组的应力最大值为94 MPa,小于铜绕组的容许应力156 MPa^[18]。高压和中压的动态位移最大值分别为1.48 mm和3.2 mm,小于变压器动稳定性能所要求的25 mm^[13],所以变阻抗节能变压器满足动稳定性能的要求。

为体现普通变压器与变阻抗变压器的区别,以中压绕组的第94饼为例,未投入限流电抗器的动态力和位移见图10(a)、(b),分别与图6(b)和图8(b)比较,投入限流电抗器短路动态力降低45.81%,动态位移降低46.74%。充分体现变阻抗变压器动稳定性能的优越性。



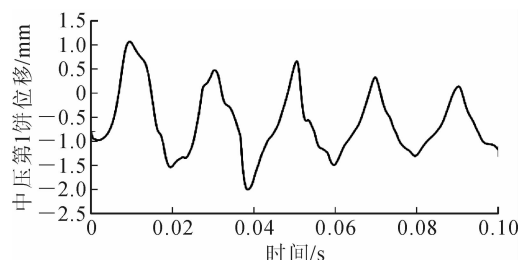
(a)高压第1饼



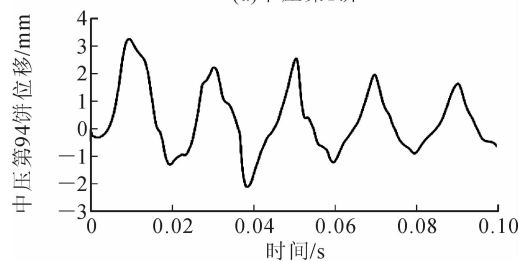
(b)高压第78饼

图7 高压绕组动态位移

Fig. 7 High-voltage winding dynamic displacement



(a)中压第1饼



(b)中压第94饼

图8 中压绕组动态位移

Fig. 8 Medium-voltage winding dynamic displacement

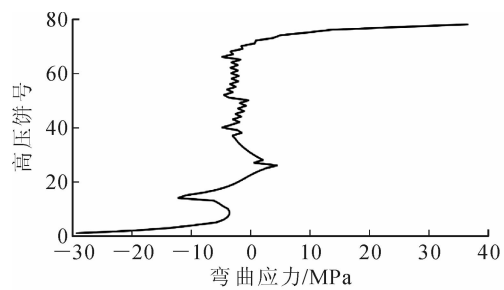
3 变阻抗变压器磁—热—流耦合

变阻抗变压器损耗主要来自于铁心和绕组的损耗,即将铁心、绕组、油箱的电磁损耗作为热源进行变压器热场分析。变压器主要的传热方式是传导和对流,忽略辐射作用^[20],其热传导控制方程^[21]

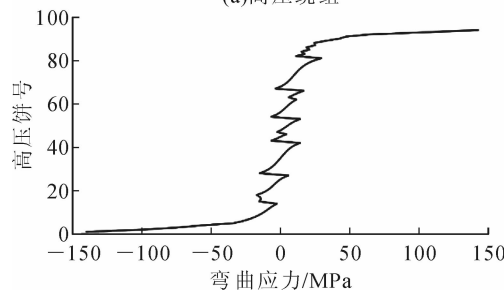
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q. \quad (7)$$

式(7)中: ρ 为材料密度; C_p 为比热容; T 为温度; k 为热传导系数; Q 为热源。

油浸式变压器温度分布受铁心、绕组、油箱、变压器油及空气对流影响,对流散热控制方程



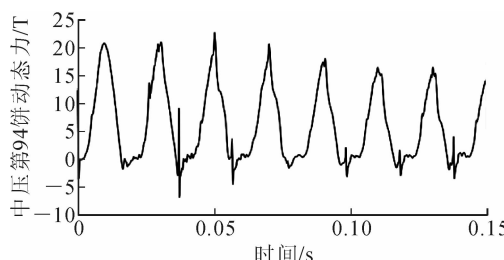
(a)高压绕组



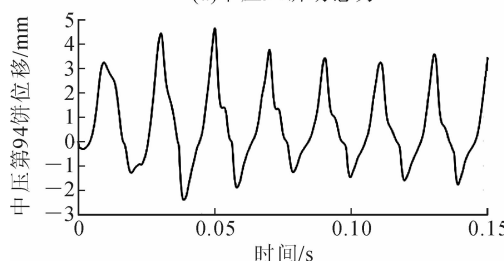
(b)中压绕组

图9 变压器绕组弯曲应力

Fig. 9 Transformer winding bending stress



(a)中压94饼动态力



(b)中压94饼位移

图10 未投入限流电抗器

Fig. 10 No input current-limiting reactor

$$q = hS(T_s - T_l). \quad (8)$$

变压器油具有流速慢和粘度大等特性,采用层流模型计算。油浸式变压器油箱内油流受质量守恒方程(连续性方程)、动量守恒方程和能量守恒三大方程控制

$$\begin{cases} \nabla \cdot \rho \mathbf{w} = 0 \\ \rho \cdot \nabla \mathbf{w} = \mathbf{F} - \nabla p + u \nabla^2 \mathbf{w} \\ \rho c \mathbf{w} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: ρ 为流体密度; $\mathbf{w}$ 为流速; $\mathbf{F}$ 为外部体积力; p 为压力; u 为动力黏度; C 为比热容; T 为温度; k 为热导率; Q 为体积热源。

边界条件设置如下:

1)初始温度设置为环境最高温度 40 ℃;

2)变压器油流入口速度设置为 0.05 m/s,指定出口相对压强为 0;

3)变压器油箱的对流换热系数设为 5 W/(m²·K)。

由于变压器三相绕组对称,变压器绕组温度沿周向变化不大,所以取单相建立二维轴对称模型,见图 11。进行的变压器磁—热—流耦合分析,极大地降低了计算量,同时对计算精度不会有太大的影响。将正常工作电流作为稳态激励得变压器热平衡状态温度场,见图 12。热平衡状态是指变压器正常工作一段时间后,绕组和铁心温度最终达到稳定状态,而不再升高,这时绕组和铁心继续产生的热量将全部散到周围介质中去。

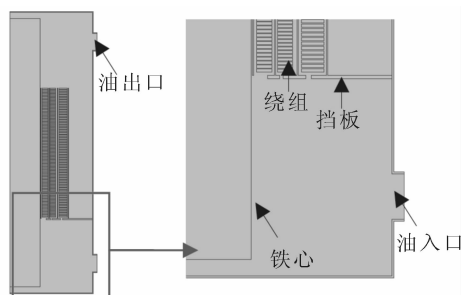


图 11 2 维温度场有限元模型

Fig. 11 2D temperature field finite-element model

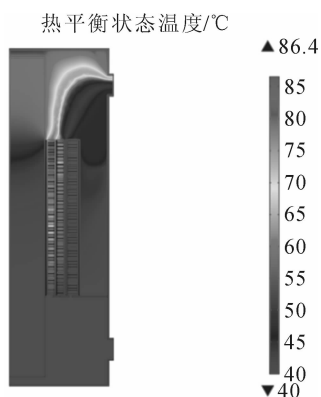


图 12 热平衡状态温度场

Fig. 12 Temperature field of thermal equilibrium

热平衡状态温度场作为变压器暂态温度初值,当发生短路后 2 s 时,变压器温度场分布见图 13;当 $t=0.02$ s 变压器油流速度场见图 14。由图 13-14 可知,变压器底部油流入口处温度较低,整体温度分布随着位置升高呈现增大的趋势。与原变压器相比,变阻抗节能变压器短路最大暂态温度降低约 35.26%,体现变阻抗节能变压器在降低短路热稳定性方面的优越性。油浸式变压器发生短路后铜绕组温度最高限值为 250 ℃,在发生短路故障 2 s 后,变

阻抗变压器绕组暂态温度为 134.32 ℃ < 250 ℃,满足热稳定性要求。

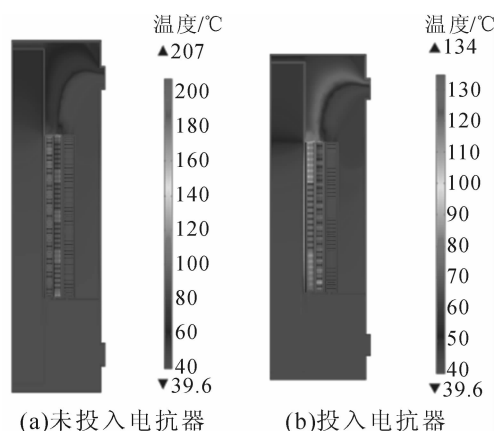


图 13 变压器温度场分布

Fig. 13 Transformer temperature field distribution

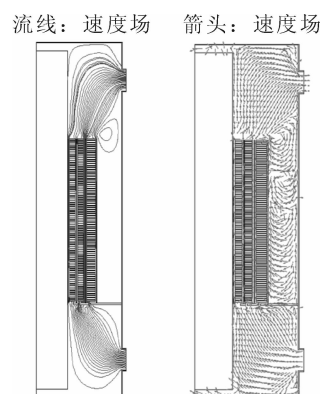


图 14 油流速度场

Fig. 14 Velocity field of oil flow

4 结论

文中以 110/38.5/10.5 kV, 63 000 kVA 三绕组变压器为例,分析变阻抗变压器的动、热稳定性能。得出以下结论:

1)投入限流电抗器使变压器的三相对称短路电流降低 40.76%;

2)变压器三相对称短路电流的限制,使漏磁场分布值降低,从而使变阻抗变压器绕组承受的动态力减小,降低变压器短路动态力的冲击。

3)基于质量—弹簧系统,采用变步长四阶五级龙格—库塔法求解此微分方程,可得绕组动态位移、动态力和弯曲应力,得出限流电抗器之后绕组的应力和位移降低,且变阻抗变压器的应力和动态位移均满足动稳定性的要求。

4)基于磁—热—流耦合场分析限流电抗器投入与否 2 种情况下变阻抗节能变压器的温度场分布,可知投入电抗器后短路 2 s 后绕组暂态温升降低 35.26%,均满足热稳定的要求。

参考文献:

- [1] 郭 蓉. 电力变压器绕组短路电动力计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
GUO Rong. Calculation of electrodynamic force of winding short-circuit in power transformer[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [2] 张明丽. 大型变压器抗短路能力校核研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
ZHANG Mingli. Research on the calibration of the anti-short circuit ability in power transformers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [3] 王丽君, 刘 勋. 一起电力变压器绕组变形的综合分析[J]. 变压器, 2011, 48(6): 68-70.
WANG Lijun, LIU Xun. Comprehensive analysis of winding deformation of power transformer[J]. Transformer, 2011, 48(6): 68-70.
- [4] 刘 军, 张安红. 电力变压器绕组短路动稳定能力的仿真和评估[J]. 变压器, 2012, 49(6): 14-25
LIU Jun, ZHANG Anhong. Simulation and evaluation of short circuit dynamic stability of windings in power transformer[J]. Transformer, 2012, 49(6): 14-25.
- [5] 李洪春. 220 kV 三绕组有载调压高阻抗变压器设计[J]. 变压器, 2009, 46(5): 1-7.
LI Hongchun. Design of 220 kV on-load-tap-changing high impedance transformer with three windings[J]. Transformer, 2009, 46(5): 1-7.
- [6] 肖 霞, 李敬东, 叶妙元, 等. 超导限流器研究与开发的最新进展[J]. 电力系统自动化, 2001(10): 64-68.
XIAO Xia, LI Jingdong, YE Miaoyuan, et al. Development of superconducting fault current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001(10): 64-68.
- [7] 叶 莺, 肖立业. 超导故障限流器的应用研究新进展[J]. 电力系统自动化, 2005(13): 92-96.
YE Ying, XIAO Liye. New development of high temperature superconducting fault current limiter system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005(13): 92-96.
- [8] 邹立峰, 周 海, 熊志全, 等. 35 kV 超导限流器的电网三相短路试验及其限流效果分析[J]. 南方电网技术, 2010, 4(s1): 46-49.
ZHOU Lifeng, ZHOU Hai, XIONG Zhiqian, et al. 3-phase short circuit tests of 35 kV SFCL in network and its limitation effect analysis[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(s1): 46-49.
- [9] 刘 军, 张安红. 150 MVA/220 kV 高阻抗变压器漏磁场分析[J]. 变压器, 2005, 42(9): 1-8.
LIU Jun, ZHANG Anhong. Leakage field analysis of 150 MVA/220 kV high impedance transformer[J]. Transformer, 2005, 42(9): 1-8.
- [10] 董宏林, 王 勇, 张立国, 等. 高阻抗变压器两种方案比较分析[J]. 变压器, 2008, 45(9): 29-31.
DONG Honglin, WANG Yong, ZHANG Liguang, et al. Comparison and analysis of two projects for high impedance transformer[J]. Transformer, 2008, 45(9): 29-31.
- [11] 张亚杰, 刘洪文, 周连发, 等. 高阻抗变压器中内置式串联电抗器的仿真研究[J]. 变压器, 2014, 51(12): 19-22.
ZHANG Yajie, LIU Hongwen, ZHOU Lianfa, et al. Simulation study on built-in series reactor in high impedance transformer[J]. Transformer, 2014, 51(12): 19-22.
- [12] 周 雨. 一种 220 kV 高阻抗变压器工程设计新方法[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
ZHOU Yu. A new engineering design method of 220 kV high-impedance transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [13] 闫振华, 马 波, 马飞越, 等. 220 kV 电力变压器短路动力学性能分析[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 79-83.
YAN Zhenhua, MA Bo, MA Feiyue, et al. Dynamic performance analysis of winding for 220 kV power transformer with short circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 79-83.
- [14] ZHANG H J, YANG B, XU W J, et al. Dynamic deformation analysis of power transformer windings in short-circuit fault by FEM[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 1-4.
- [15] 李 谦, 张 波, 蒋愉宽, 等. 变电站内短路电流暂态过程及其影响因素[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1986-1993.
LI Qian, ZHANG Bo, JIANG Yukuan, et al. Transient process of short-circuit current in substations and its influential factors[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1986-1993.
- [16] 张 博, 李 岩, 颜 宁. 基于强耦合方式的电力变压器绕组短路强度计算[J]. 变压器, 2015, 52(9): 6-9.
ZHANG Bo, LI Yan, YAN Ning. Calculation of short-circuit strength of windings in power transformer based on strong coupling[J]. Transformer, 2015, 52(9): 6-9.
- [17] 韩芳旭, 李 岩, 孙 昕. 电力变压器漏磁场和短路阻抗计算[J]. 变压器, 2010, 47(10): 9-12.
HAN Fangxu, LI Yan, SUN Xin. Calculation of leakage magnetic field and short circuit impedance of power transformer[J]. Transformer, 2010, 47(10): 9-12.
- [18] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
YIN Kening. Transformer design principle[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [19] 陈振茂, 徐建学. 大型电力变压器线圈轴向非线性振动研究[J]. 应用力学学报, 1990, 7(1): 21-29.
CHEN Zhenmao, XU Jianxue. The nonlinear vibration of large transformer windings[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1990, 7(1): 21-29.

(下转第 44 页)

- and specification of DC side voltage in parallel active power filter regarding compensation characteristics of generators [C]/IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 3495-3499.
- [11] HUANG Xinming, LIU Jinjun, ZHANG Hui. A simplified shunt APF model based on instantaneous energy equilibrium and its application in DC voltage control [C]/IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 2235-2241.
- [12] 丁祖军, 刘保连, 张宇林. 基于自抗扰控制技术的有源电力滤波器直流侧电压优化控制[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2031-2034.
- DING Zujun, LIU Baolian, ZHANG Yulin. Optimal control for DC side voltage of active power filter based on auto-disturbance rejection control[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2031-2034.
- [13] 王立峰, 郑建勇, 梅 军, 等. 有源滤波装置直流侧电压控制瞬时能量平衡建模[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 229-237.
- WANG Lifeng, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. Instantaneous energy equilibrium modeling of DC side voltage control for active power filter device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 229-237.
- [14] 谢 斌, 戴 珂, 张树全, 等. 并联型有源电力滤波器直流侧电压优化控制[J]. 中国电机与工程学报, 2011, 31(9): 23-28.
- XIE Bin, DAI Ke, ZHANG Shuquan, et al. Optimization control of DC link voltage for shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 23-28.
- [15] 孙孝峰, 杨雅麟, 赵 巍, 等. 微电网逆变器自适应下垂控制策略[J]. 电网技术, 2015, 38(9): 2287-2391.
- SUN Xiaofeng, YANG Yalin, ZHAO Wei, et al. An adaptive droop control method for inverters in microgrid[J]. Power System Technology, 2015, 38(9): 2287-2391.
- [16] 张 东, 卓 放, 师洪涛, 等. 基于下垂系数步长自适应的下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 20-25.
- ZHANG Dong, ZUO Fang, SHI Hongtao, et al. A droop control strategy based on drooping coefficient with adaptively changing steps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 20-25.
- [17] 王永富, 柴天佑. 自适应模糊控制理论的研究综述[J]. 控制工程, 2006, 13(2): 193-198.
- WANG Yongfu, CHAI Tianyou. Present status and future developments of adaptive fuzzy control[J]. Control Engineering of China, 2006, 13(2): 193-198.
- [18] 陈家伟, 陈 杰, 陈 冉, 等. 变速风力发电机组自适应模糊控制技术[J]. 中国电机控制工程学报, 2011, 31(11): 93-100.
- CHEN Jiawei, CHEN Jie, CHEN Ran, et al. Adaptive fuzzy logic control technique for variable-speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(11): 93-100.
- [19] 邱晓初, 肖 建, 刘小建. 一种 APF 模糊自适应可变环流滞环控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 73-77.
- QIU Xiaochu, XIAO Jian, LIU Xiaojian. A novel fuzzy adaptive hysteresis band current controller for active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 73-77.
- 汪玉凤(1962—), 女, 硕士, 教授, 主要从事电网电能质量调节与控制, 电力系统调度自动化、矿山自动化与信息化等方面研发。
- 王 旭(1989—), 男, 硕士研究生, 从事谐波抑制和无功补偿方面研究。

(上接第 38 页)

- [20] 廖才波, 阮江军, 逯怀东, 等. 油浸式变压器二维电磁-流体-温度场耦合分析方法研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 10(36): 67-71.
- LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LU Huaidong, et al. 2-D coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis of oil-immersed transformer[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 10(36): 67-71.
- [21] 杨士铭, 陶文栓. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenshuan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- 樊益平(1963—), 男, 高级工程师, 研究方向为高电压技术。