

三相变压器直流偏磁仿真分析

董 霞, 刘志珍

(山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 建立一种新的直流偏磁下三相三柱和三相五柱变压器的电路-磁路耦合模型, 磁路模型中考虑了变压器的涡流损耗、铁芯拓扑结构及材料的饱和特性。将涡流产生的磁动势列入磁路方程, 磁路方程与电路方程进行耦合, 并结合铁芯的非线性特征曲线形成非线性方程组, 通过求解该方程组, 实现对三相三柱和三相五柱变压器直流偏磁特性的仿真分析。仿真结果证明所提模型能够准确地分析三相变压器的直流偏磁现象。

关键词: 变压器; 直流偏磁; 饱和特性; 涡流; 损耗; 模型

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.021

0 引言

直流偏磁现象是电力变压器的一种非正常工作状态, 引起直流偏磁的原因有 2 种: 一是在高压直流输电系统采用单极大地回路方式或双极不平衡方式运行时^[1-3], 大地中回流的直流电流会通过接地中性点流入变电站的变压器绕组; 二是太阳等离子风的动态变化与地磁场的相互作用产生地磁风暴^[4], 地磁场的变化在地球表面产生电位梯度, 从而在变压器绕组中产生低频感应电流, 由于其频率非常低, 可近似认为是直流电流。变压器在直流偏磁下, 其铁芯迅速进入饱和状态, 变压器工作点偏移, 严重影响其正常工作, 因此, 变压器直流偏磁现象备受关注。

国内外对直流偏磁现象进行了一些计算和实验研究, 主要研究内容有: 变压器直流偏磁时, 变压器振动、噪声及局部过热现象的实验研究^[5]; 激磁电流的谐波分析^[6-7]; 铁磁材料磁特性的测量^[8]; 抑制直流偏磁的措施^[9-11]等。在上述的几个方面, 国内外的研究学者取得了一定的成果与进展。

直流偏磁下的三相变压器, 需要充分考虑变压器铁芯的拓扑结构及其材料的饱和特性、涡流损耗等因素。本文在充分考虑这些因素的前提下, 建立了一种新的直流偏磁下三相三柱和三相五柱变压器的电路-磁路模型, 磁路模型中, 将涡流产生的磁动势列入磁路方程, 并与电路方程进行耦合, 形成非线性方程组, 通过求解实现对直流偏磁下三相变压器的仿真分析。

1 变压器的电路-磁路耦合模型

1.1 电路方程

空载条件下三相变压器的直流偏磁等效电路如图 1 所示。图中, u_1 、 u_2 和 u_3 为三相电源, R_{1a} 、 R_{2b} 、 R_{3c}

和 R_{1A} 、 R_{2B} 、 R_{3C} 分别为一、二次侧绕组电阻, e_{1a} 、 e_{2b} 、 e_{3c} 和 e_{1A} 、 e_{2B} 、 e_{3C} 分别为一、二次绕组的感应电动势, i_1 、 i_2 和 i_3 为一次侧电流, L_{1a} 、 L_{2b} 和 L_{3c} 为仅交链一次绕组的等效漏磁感, L_{1A} 、 L_{2B} 和 L_{3C} 为仅交链二次绕组的等效漏磁感, U_0 为直流电压。一次绕组中的三相和中性线构成的回路满足如下电路方程:

$$u_j + U_0 - R_{jp} i_j - L_{jp} \frac{di_j}{dt} = -e_{jp} = N \frac{d\phi_j}{dt} \quad j=1, 2, 3 \quad (1)$$

其中, p 表示一次绕组, ϕ_j 为变压器三相柱磁通。

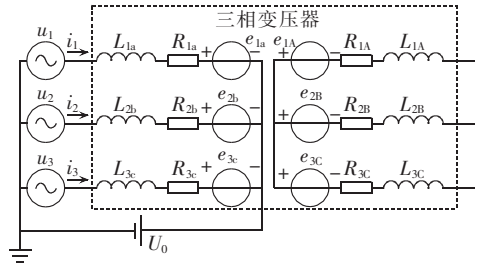


图 1 三相变压器直流偏磁下的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of three-phase transformer with DC bias

1.2 磁路方程

空载时, 三相五柱变压器的等效磁路模型如图 2 所示。图中, F_a 、 F_b 和 F_c 为一次电流产生的磁动势, R_k 和 ϕ_k ($k=1 \sim 7$) 为铁芯芯柱、磁轭及旁柱磁阻和磁通, R_8 和 ϕ_8 为漏磁阻和漏磁通, F_{ek} ($k=1 \sim 7$) 为涡流产生的磁动势。三柱变压器的磁路模型中没有 F_{e6} 和 F_{e7} , 且 R_6 、 R_7 和 ϕ_6 、 ϕ_7 分别为漏磁阻和漏磁通。

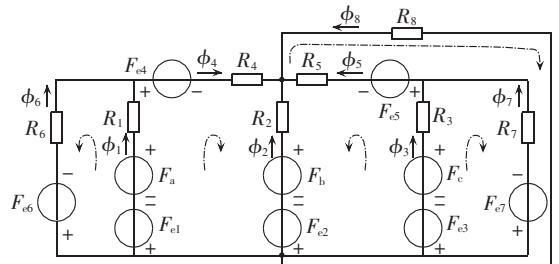


图 2 三相五柱变压器等效磁路

Fig.2 Equivalent magnetic circuit of three-phase five-legged transformer

收稿日期: 2012-07-09; 修回日期: 2013-05-09

基金项目: 山东省高等学校科技计划项目 (J09LG64)

Project supported by Higher Educational Science and Technology Program of Shandong Province (J09LG64)

磁路模型中考虑了涡流的影响。对于横截面积为 A 、长度为 l 、磁通为 ϕ 的磁路分支,由涡流产生的磁动势可表示为^[12-15]:

$$F_e = k_e \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

$$k_e = \frac{\sigma d^2 l}{12A} + \left(\frac{G d \tau H_0 \sigma l^2}{A} \right)^{1/2} \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^{-1/2} \quad (3)$$

其中, σ 为电导率, d 为硅钢片厚度, τ 为硅钢片宽度, $G=0.1356$, H_0 为由磁畴产生的内部磁场。

变压器铁芯的非线性方程采用单值曲线^[16-17]:

$$B=f(H) \quad (4)$$

其中, B 为磁通密度, H 为磁场强度。

则磁路中的非线性磁阻为:

$$R_k = \frac{l}{A\mu} = \frac{l}{A} \frac{H}{B} \quad (5)$$

其中, μ 为磁导率。对于三相三柱变压器, $k=1\sim 5$; 对于三相五柱变压器, $k=1\sim 7$ 。

根据图 2 列出三相五柱变压器磁路方程得到式(6), 将式(2)、(5)代入式(6), 并对其进行变换、整理, 得到矩阵形式(7)。

$$\begin{cases} R_1\phi_1 - R_6\phi_6 = F_a + F_{e6} - F_{e1} \\ R_1\phi_1 + R_4\phi_4 - R_2\phi_2 = F_a + F_{e2} - F_b - F_{e1} - F_{e4} \\ R_3\phi_3 + R_5\phi_5 - R_2\phi_2 = F_c + F_{e2} - F_b - F_{e3} - F_{e5} \\ R_3\phi_3 - R_7\phi_7 = F_c + F_{e7} - F_{e3} \\ R_2\phi_2 - R_8\phi_8 = F_b - F_{e2} \\ \phi_1 + \phi_6 = \phi_4 \\ \phi_3 + \phi_7 = \phi_5 \\ \phi_2 + \phi_4 + \phi_5 + \phi_8 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$R\phi = F \quad (7)$$

最后, 将式(1)与式(7)联立, 可得到非线性微分-代数方程组。对于三相三柱变压器, 方程组中不含 F_{e6} 和 F_{e7} , 且 R_6 和 R_7 为线性漏磁阻。

利用牛顿-拉夫逊法对上述方程组迭代求解。通过选择合适的步长, 保证求解稳定性和计算精度。

通过计算可以证明, 随着直流偏磁程度的加深, 漏磁增加。以三相五柱变压器为例, 式(6)中, $\phi_2 + \phi_4 + \phi_5 + \phi_8 = 0$, 当偏磁增加, 在每个时间步, 式(5)的非线性磁阻 R_k 随着曲线 $B=f(H)$ 的变化而增大, 而铁芯及铁轭磁通 ϕ_2, ϕ_4 与 ϕ_5 随着 R_k 的增大而减小, 从而使漏磁通 ϕ_8 增大。

2 计算结果

2.1 三相三柱变压器

根据第 1 节建立的模型及提出的计算方法, 首先对双绕组三相三柱变压器进行了计算, 变压器的主要参数为: 变压器额定容量为 $1600 \text{ kV}\cdot\text{A}$, 额定变比为 $10 \text{ kV}/1 \text{ kV}$, 铁芯和磁轭截面积为 0.2536 m^2 , 铁芯长度为 2.8 m , 磁轭长度为 1.8 m 。

计算的励磁电流及谐波分布如图 3、4 所示(0 次谐波表示直流, I_{DC} 为直流电流)。结果表明: 直流入侵三相三柱变压器时, 励磁电流并没有发生畸变, 除了增加了直流分量以外, 其他次谐波的分布基本保持不变。因此, 直流入侵三相三柱变压器会使铜耗增加, 但对系统的运行不会有太大影响。从图 5 可

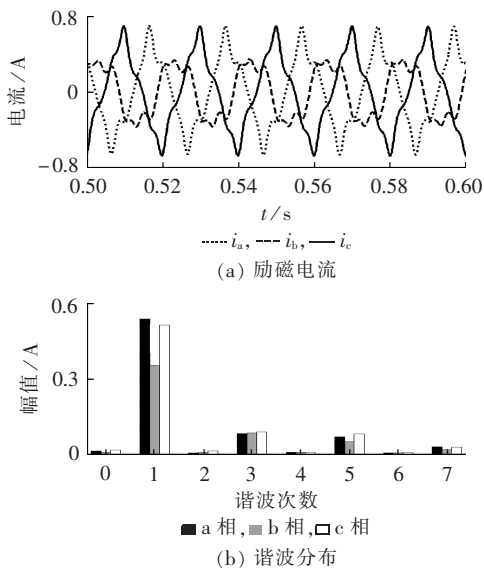


图 3 无直流入侵的励磁电流及谐波
Fig.3 Exciting current without DC bias and harmonic distribution

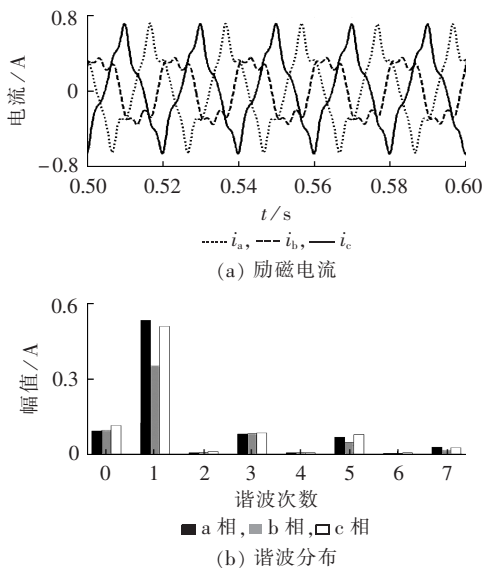
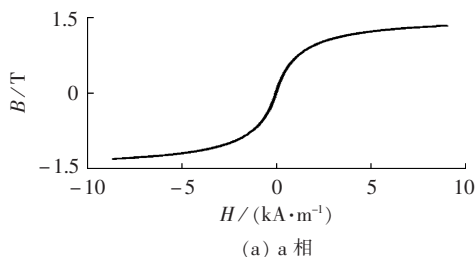


图 4 有直流入侵的励磁电流及谐波 ($I_{DC}=0.298 \text{ A}$)
Fig.4 Exciting current with DC bias ($I_{DC}=0.298 \text{ A}$) and harmonic distribution



(a) a 相

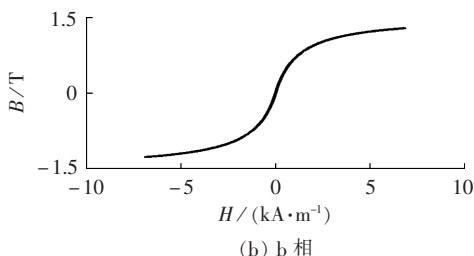


图 5 无和有直流入侵的非线性特性曲线

Fig.5 Nonlinear characteristic curves without and with DC bias

以看出,直流入侵并没有对非线性特性曲线产生影响(c相特性曲线同a相)。

2.2 三相五柱变压器

双绕组三相五柱变压器主要参数为:变压器额定容量 112.5 MV·A,额定变比为 110 kV/16 kV,铁芯及磁轭截面积为 0.453 6 m²,铁芯长度为 3.59 m,磁轭长度为 2.656 m,旁柱截面积为 0.181 4 m²,旁柱长度为 7 m。

计算的励磁电流、谐波分布及非线性特性曲线如图 6—9 所示。结果表明:无直流入侵时,励磁电流正负半轴对称,没有发生畸变现象;励磁电流中以 1、3 奇次谐波为主;非线性特性曲线也没有发生偏移。

当有直流入侵时,励磁电流波形发生偏移与畸变,正负半轴不再对称,出现了以 2、4 次谐波为主的偶次谐波。而且非线性特性曲线正负半轴明显不再对称,a 相、b 相(c 相同 a 相)的正半轴曲线趋向饱和,磁轭与旁柱的特性曲线发生了偏移,但并没有达到饱和状态。随着直流电流的增大,励磁电流畸变程度、非线性特性曲线的饱和及偏移程度越来越严重。

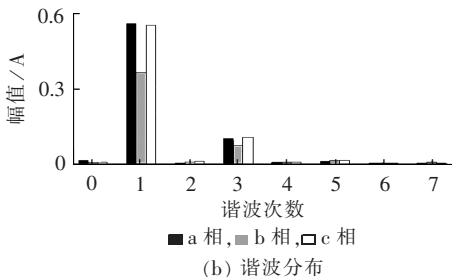
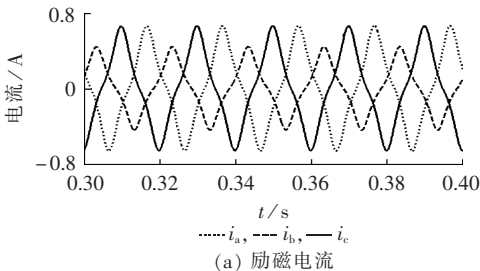


图 6 无直流入侵的励磁电流及谐波

Fig.6 Exciting current without DC bias and harmonic distribution

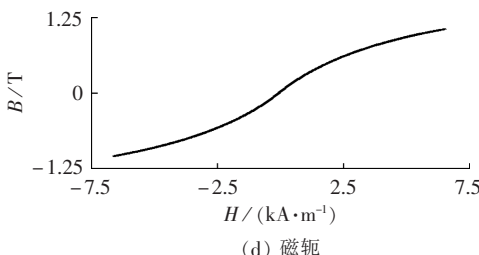
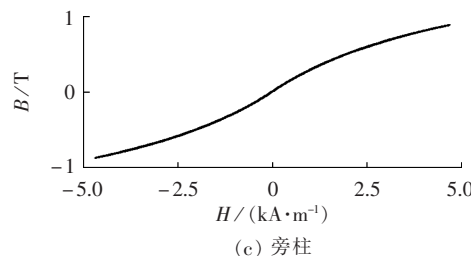
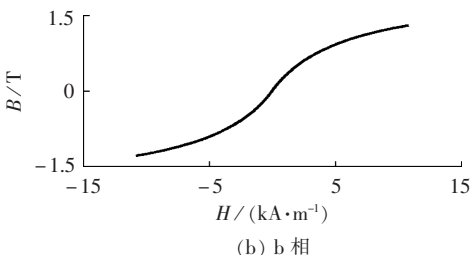
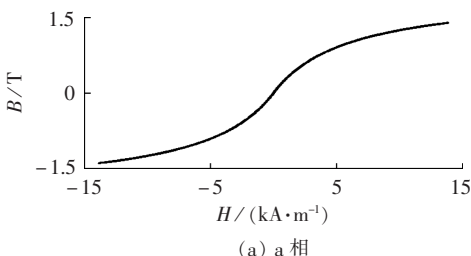


图 7 无直流入侵的非线性特性曲线

Fig.7 Nonlinear characteristic curve without DC bias

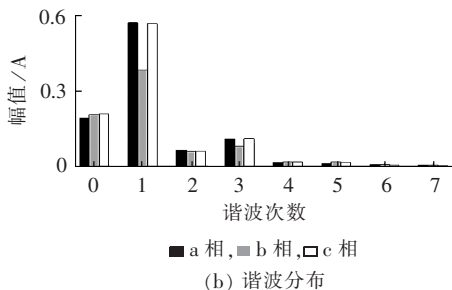
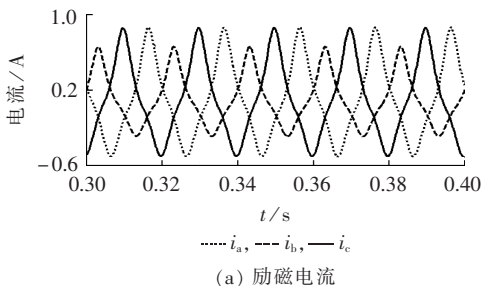


图 8 有直流入侵的励磁电流及谐波 ($I_{DC}=0.593\text{ A}$)

Fig.8 Exciting current with DC bias ($I_{DC}=0.593\text{ A}$) and harmonic distribution

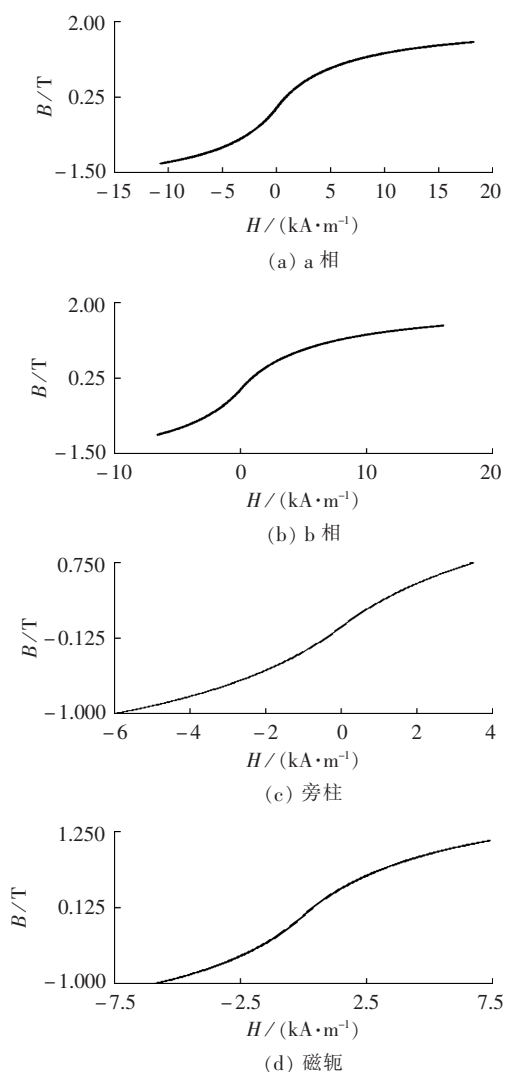


图9 有直流入侵的非线性特性曲线

Fig.9 Nonlinear characteristic curve with DC bias

3 结论

a. 三相多芯柱变压器各相磁通相互联系,互有影响。在建立数学模型时,充分考虑了三相变压器铁芯的拓扑结构、材料的饱和特性及涡流影响。

b. 对于三相三柱变压器,直流入侵没有使励磁电流发生畸变,电流中除了直流分量外,仍以1、3、5奇次谐波为主。非线性特性曲线也没有发生偏移现象,表明直流电流对三相三柱变压器的影响不大。

c. 对三相五柱变压器,直流入侵时,励磁电流发生畸变,电流中出现了以2、4次谐波为主的偶次谐波。而且,非线性特性曲线发生了饱和(a、b、c三相)和偏移(旁柱与磁轭)现象。随着入侵直流的增大,励磁电流的畸变程度、特性曲线的饱和与偏移程度将趋于严重。这表明直流电流对三相五柱变压器的影响较大。

参考文献:

[1] 张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机

工程学报,2007,27(22):1-7.

ZHANG Wenliang,YU Yongqing,LI Guangfan,et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(22):1-7.

[2] 王明新,张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析[J]. 电网技术,2005,29(3):9-14.

WANG Mingxin,ZHANG Qiang. Analysis on influence of ground electrode current in HVDC on AC power network[J]. Power System Technology,2005,29(3):9-14.

[3] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(31):3-8.

SHU Yinbiao,ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(31):3-8.

[4] MOLINSKI T S,FEERO W E,DAMSKY B L. Shielding grids from solar storms[J]. IEEE Spectrum,2000,37(11):55-60.

[5] 李春来,汤晓宇,黄业安,等. 计量用TA在直流偏磁条件下传变特性的实验与分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):143-145.

LI Chunlai,TANG Xiaoyu,HUANG Yean,et al. Measurement and analysis of transfer characteristic for metering CT with DC magnetic bias[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(7):143-145.

[6] 李晓萍,文习山,蓝磊,等. 单相变压器直流偏磁试验与仿真[J]. 中国电机工程学报,2007,27(9):33-40.

LI Xiaoping,WEN Xishan,LAN Lei,et al. Test and simulation for single-phase transformer under DC bias[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(9):33-40.

[7] 李长云,李庆民,李贞,等. 基于双重保护拓扑的变压器直流偏磁抑制措施[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):71-75.

LI Changyun,LI Qingmin,LI Zhen,et al. Measures of transformer DC bias suppression based on dual protection topology[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):71-75.

[8] MIYAGI D,YOSHIDA T,NAKANO M,et al. Development of measuring equipment of DC-biased magnetic properties using open-type single-sheet tester[J]. IEEE Trans on Magnetics,2006,42(10):2846-2848.

[9] 李兴源,陈凌云,颜泉,等. 多馈入高压直流输电系统非线性附加控制器的设计[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15):16-19.

LI Xingyuan,CHEN Lingyun,YAN Quan,et al. Design of nonlinear complementary controllers for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(15):16-19.

[10] 朱艺颖,蒋卫平,曾昭华,等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(13):1-7.

ZHU Yiyang,JIANG Weiping,ZENG Zhaohua,et al. Studying on measures of restraining DC current through transformer neutrals[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(13):1-7.

[11] 马玉龙,肖湘宁,姜旭,等. 用于抑制大型电力变压器直流偏磁的接地电阻优化配置[J]. 电网技术,2006,30(3):62-65.

MA Yulong,XIAO Xiangning,JIANG Xu,et al. Optimized grounding resistance configuration against DC magnetic bias of large capacity power transformer[J]. Power System Technology,2006,30(3):62-65.

[12] THEOCHARIS A D,MILLAS-ARGITIS J,ZACHARIAS T. Single-phase transformer model including magnetic hysteresis and eddy currents[J]. Elect Eng,2008,90(2):229-241.

[13] 郝文斌,李群湛. 三相五芯柱变压器内部故障仿真模型研究[J].

电力自动化设备,2007,27(8):43-46.

HAO Wenbin,LI Qunzhan. Simulation of internal fault of three-phase five-leg transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(8):43-46.

[14] BARBISIO E,FIORILLO F,RAGUSA C. Predicting loss in magnetic steels under arbitrary induction waveform and with minor hysteresis loops[J]. IEEE Trans on Magnetics,2004,40(4): 1810-1819.

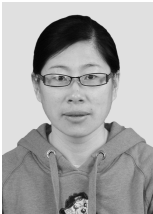
[15] 陈伟根,苏小平,孙才新,等. 基于有限体积分法的油浸式变压器绕组温度分布计算[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):23-27.

CHEN Weigen,SU Xiaoping,SUN Caixin,et al. Temperature distribution calculation based on FVM for oil-immersed power transformer windings[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):23-27.

[16] MORK B A,ISHCHENKO D,GONZALEZ F,et al. Parameter estimation methods for five-limb magnetic core model[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2008,23(4):2025-2032.

[17] MARK B A,GONZALEZ F,ISHCHENKO D,et al. Hybrid transformer model for transient simulation-part I:development and parameters[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2007,22(1): 248-255.

作者简介:



董 霞(1974-),女,山东济南人,博士研究生,从事变压器直流偏磁的研究(E-mail: dongxia6078@163.com);

刘志珍(1967-),男,山东济南人,教授,博士研究生导师,从事电机、变压器等的电磁场数值计算及优化设计方面的研究。

董 霞

Simulative analysis of three-phase transformer with DC bias

DONG Xia,LIU Zhizhen

(School of Electrical Engineering,Shandong University,Ji'nan 250061,China)

Abstract: An electric circuit-magnetic circuit coupling model is built for three-phase three/five-legged transformer with DC bias. The magnetic circuit model considers the eddy current loss of transformer,the topology of magnetic core and the saturation characteristic of core material. The magnetic circuit equations considering the magnetomotive force caused by eddy current are coupled with the electrical circuit equations and the nonlinear characteristic curve of core is combined to form the nonlinear equations,which are then solved for the simulative analysis of DC bias characteristics for three-phase three/five-legged transformer. Simulative results verify that,the proposed model can correctly analyze the DC bias phenomenon of three-phase transformer.

Key words: electric transformers; DC bias; saturation characteristic; eddy currents; losses; models

(上接第 120 页 continued from page 120)

Small signal stability analysis based on second order perturbation theory for uncertain power system

MA Jing,PENG Mingfa,WANG Tong,YANG Qixun

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: When multiple operating parameters of power system vary severely,it is difficult to continuously describe the damping ratio of oscillation mode and system operational states by interval model,for which,a method of small signal stability analysis based on second order perturbation theory is proposed. The complex second order perturbation model of oscillation modes under uncertainties is built,based on which, the variation trajectory of damping ratio is continuously described when the operational state locates in the uncertainty interval. Simulative results for IEEE 16-generator 68-bus system show that,different operating parameters have different impacts on the damping ratio of a particular oscillation mode when they vary in the interval,while a particular operating parameter has different impacts on the damping ratio of different oscillation modes when it varies in the interval. The proposed method can accurately evaluate the small signal stability when multiple operating parameters fluctuate greatly.

Key words: low-frequency oscillation; second order perturbation; interval distribution; damping ratio; electric power systems; stability