

变压器直流偏磁场路耦合计算中的磁化曲线拟合

潘超¹,王梦纯¹,蔡国伟¹,姜言金²,李铁峰²

(1. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132021;2. 吉林市供电公司,吉林 吉林 132001)

摘要: 采用基于分段函数拟合磁化曲线的改进方法,考虑不饱和励磁的非线性,求解三维棱边有限元磁场。采用时域场路耦合方法计算变压器直流偏磁时的瞬态电流和动态电感,分析其变化规律和对应关系。讨论不同磁化曲线拟合方法计算直流偏磁的效果,研究不饱和励磁非线性对耦合参数和伏安特性的影响。通过与实验数据对比,分析所提方法的误差,验证分段拟合方法具有更高的准确性。

关键词: 变压器; 直流偏磁; 磁化特性; 时域场路耦合; 棱边有限元; 计算

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.009

0 引言

近年来,高压直流(HVDC)与地磁感应电流 GIC (Geomagnetic Induced Current) 环境中变压器的直流偏磁问题备受关注^[1-2],包括变压器非线性磁场、电流畸变、涡流损耗等备受关注,其中,励磁非线性的研究分析是解决上述问题的关键^[3-5]。

利用 J-A 磁滞模型可以有效模拟变压器的励磁特性,但参数获取困难,计算复杂,且磁滞回线易受直流偏磁水平影响^[6]。文献[7]采用单段双曲正切函数拟合饱和段磁化曲线,简化计算,结果与实验相比误差较小,但未考虑磁化曲线不饱和段对变压器励磁的影响。文献[8]建立三相变压器模型分析铁芯损耗,考虑磁滞效应模拟变压器电磁场分布。文献[9-10]基于谐波有限元建立场路模型,计算变压器直流偏磁问题。上述方法均采用二维模型,具有较高的精度和效率,缺点是仅可作为局部场域的近似处理,只能用于特定运行方式或模型特性的分析。

另一方面,传统变压器磁场数值计算以稳态电磁场分析为基础,时域求解有限元微分方程,数据运算规模庞大、效率低^[11]。本文建立三维变压器磁场模型,采用时域场路耦合模型将变压器瞬态电磁场计算分解为场和路的耦合计算,利用场模型计算动态电感,利用路模型求解瞬态过程,从而降低求解难度,提高计算效率;在此基础上计算变压器直流偏磁,分段拟合饱和段与不饱和段磁化曲线;最后对比分析不同方法对变压器在正常运行和直流偏磁时耦合参数和伏安特性的影响,并总结其规律。

1 时域场路耦合方法

单相三柱式双绕组变压器直流偏磁的场路模型

收稿日期:2013-03-19;修回日期:2013-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177010);长江学者和创新团队发展计划(IRT114)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177010) and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT114)

见图 1。图中, Φ_a 、 Φ_b 和 Φ_0 分别为铁芯主磁通和绕组漏磁通; L_1 、 L_2 和 M 分别为自感和互感; U_{DC} 为直流电压源。

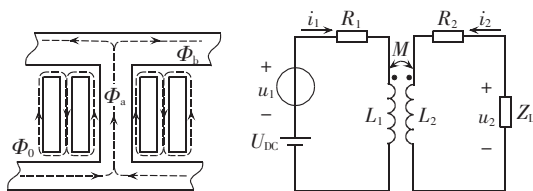


图 1 变压器基本电磁关系

Fig.1 Electromagnetic relation of transformer

利用时域场路耦合模型分析变压器直流偏磁问题时,动态电感和瞬态电流为关键耦合参数^[12]。棱边有限元法采用矢量磁位 A ,假设导磁介质各向同性,得到非线性磁场方程:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J \quad (1)$$

其中, ∇ 为哈密尔顿算子; μ 为导磁材料的磁导率; J 为励磁电流密度。

对式(1)应用格林定理,得伽辽金加权余量方程:

$$\iiint_V \frac{1}{\mu} (\nabla \times M_m) \cdot (\nabla \times M_n) A_n dV = \iiint_V M_m \cdot J dV \quad (2)$$

其中, $m, n \in N^+$; $\{M_m\}$ 、 $\{M_n\}$ 分别为基函数和权函数序列,且 $\{M_n\}$ 与 $\{M_m\}$ 相同; A_n 为单元的标量磁位; m, n 为单元编号; V 为体积分变量。把权函数代入式(2),针对全部权函数,将加权余量方程离散形成代数方程组,求解可得所有棱边上的 A ,进而计算其他场量。

变压器实际运行时铁芯工作于接近饱和区,直流偏磁时处于饱和区,传统方法计算时通常采用双曲正弦函数对饱和段磁化曲线进行拟合^[7]。本文考虑到实际磁化曲线可分为不饱和段与饱和段,对磁化曲线进行分段处理,曲线拟合及误差公式分别为:

$$\begin{cases} B = f[\sinh(CH)] = C_1 e^{C_2 H} + C_3 e^{-C_2 H} \\ \varepsilon = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (B_j - B'_j)^2} \end{cases} \quad (3)$$

其中, B 、 H 分别为磁感应强度和磁场强度数值; C_1 、

$C_2、C_3、C_4$ 为拟合参数,根据实际变压器硅钢片材料确定; ε 为均方根误差; B_j 为实际磁感应强度; B_j' 为磁感应强度拟合值; K 为统计总数。

将拟合磁化曲线数据代入磁场方程中,即可进行磁场求解计算。

变压器磁链方程为:

$$\psi=L_s(t,i)i$$
$$i=[i_1\ i_2]^T$$
(4)

其中, ψ 为线圈磁链向量; L_s 为静态电感矩阵。

由 $u=d\psi/dt$, 推导电路系统的瞬态微分方程:

$$u=\left(\frac{dL_s}{di}i+L_s\right)\frac{di}{dt}=L_d(i)\frac{di}{dt}$$
(5)

$$u=[u_1\ u_2]^T$$

其中, L_d 为动态电感矩阵,需由磁场模型计算。

由式(5)推导存在直流源时变压器电路微分方程的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{DC1} \\ U_{DC2} \end{bmatrix}$$
(6)

其中, $U_{DC1}、U_{DC2}$ 分别为变压器两侧提供直流的电压源。

根据文献[13]中能量扰动的思想,当绕组线圈电流增量为 Δi ,引起的电路能量增量为:

$$\Delta W_1=\frac{1}{2}L_{Dpq}\Delta(i_p i_q)\quad p,q=1,2$$
(7)

由电流增量 Δi 引起的场矢量变化为 $\Delta H、\Delta B$, 计算线圈体电流分布磁场系统的能量增量:

$$\Delta W_2=\frac{1}{2}\int\Delta B\cdot\Delta HdV$$
(8)

能量方程式(7)、(8)相等,则可计算动态电感 L_D 。

采用四阶龙格库塔法对上式求解,由 t_k 时刻的线圈电流 $i(k)$ 计算 t_{k+1} 时刻的电流 $i(k+1)$:

$$i(k+1)=i(k)+\frac{h}{6}(s_1+2s_2+2s_3+s_4)$$
(9)

其中, h 为步长; s_1-s_4 为步长内的计算斜率。

2 直流偏磁计算与分析

采用时域场路耦合模型计算变压器非线性时变场问题,模型如图 2 所示,编译四阶龙格库塔法程序求解电路模型的瞬态响应方程,利用 ANSYS 软件

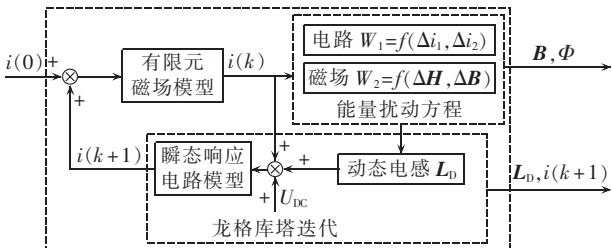


图 2 变压器直流偏磁的时域场路耦合模型

Fig.2 Time-domain field-circuit coupling model

建立三维有限元模型,基于棱边有限元法求解非线性磁场模型,场与路的耦合通过时域迭代实现。对实际单相变压器 BK300 进行直流偏磁实验和仿真计算,具体参数如表 1 所示。

表 1 实际变压器参数

Tab.1 Parameters of an actual transformer

参数	额定值	测量值
频率	50 Hz	—
额定容量	300 V·A	—
额定电压	220 V/60 V	—
空载电流	—	0.1 A
原/副匝数	—	375/105
一次绕组直流电阻	—	3.2 Ω
二次绕组直流电阻	—	0.2 Ω

变压器铁芯硅钢片型号为 DW360-50,叠片系数 α 取 0.95^[13],磁化曲线拟合结果如图 3 所示,虚线框中为不饱和区。

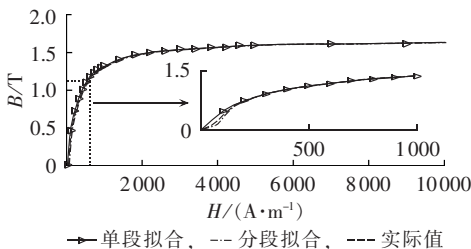


图 3 磁化曲线拟合

Fig.3 Magnetization curve fitting

变压器运行时工作于饱和状态或不饱和状态,通过图 3 对比,说明采用分段拟合法分段拟合励磁曲线,能更准确地反映出实际励磁的变化情况。结合表 2 参数,应用时域场路耦合方法计算分析变压器空载直流偏磁。

表 2 曲线拟合参数

Tab.2 Parameters of curve fitting

参数	不饱和区	饱和区
C_1	-5 548.000	1.39600
C_2	24.390	0.00024
C_3	5 548.000	-1.39600
C_4	24.480	-0.00690
ε	0.008	0.01000

2.1 计算方法 1

采用单段双曲正弦函数拟合磁化曲线的饱和段,变压器空载运行时引入直流源,计算直流电流 I_{DC} 分别为 0、50% I_0 、100% I_0 、200% I_0 时的偏磁情况 (I_0 为空载电流有效值)。

分析变压器交流励磁受到直流扰动 I_{DC} 的影响,结果如图 4(a)所示,空载运行时原边电流 i_1 即为励磁电流 i_e ,由 $u \rightarrow d\psi/dt \rightarrow d\Phi/dt \rightarrow B \sim H \rightarrow i_e$ 的电磁耦合关系可知, i_e 为对称波。当注入直流时, i_e 发生畸变,并且随着 I_{DC} 的升高而增大, i_e 波形畸变情况

一致;无直流时,动态电感 L_1 在励磁的正负半周为对称波形,其变化规律与 i_e 对应, i_e 增大时励磁饱和程度加深,电感减小, i_e 减小时励磁趋于不饱和,电感增大。存在直流时, L_1 受直流偏磁水平影响,正负半周不对称。由图 4(b)可以确定动态电感变化与励磁非线性的对应关系, L_1 的波峰区与波谷区分别表示铁芯励磁处于非饱和区与饱和区。 i_e 接近零时,铁芯励磁处于非饱和区, L_1 数值趋于最大;当 i_e 达到各半周内极值时,励磁饱和程度最深, L_1 数值最小。分析结果表明,随着直流电流增大,变压器励磁饱和程度加深, i_e 波形畸变, L_1 在正负半周不对称。

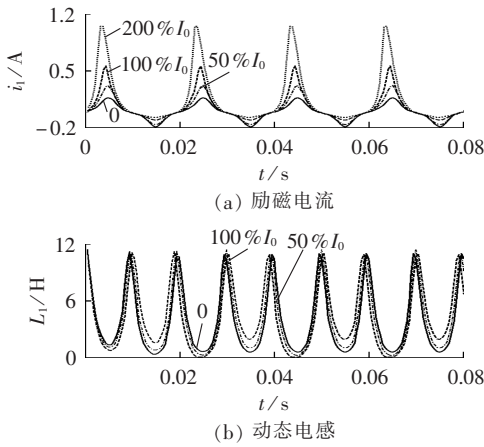


图 4 方法 1 的计算结果

Fig.4 Calculative results of method 1

2.2 计算方法 2

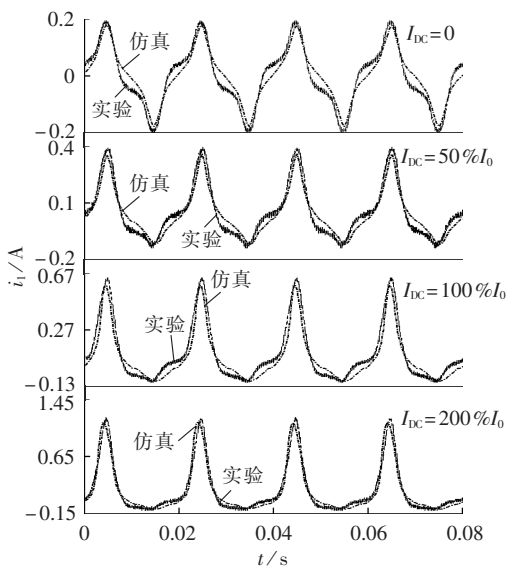
采用双段函数分别拟合磁化曲线的饱和区与非饱和区,直流偏磁实验与计算结果对比如下。

如图 5 所示,方法 2 与方法 1 的励磁变化情况相似,铁芯饱和程度受直流影响, I_{DC} 增大, i_1 与 L_1 波形在正负半周不对称程度加剧。与实验结果对比发现,测量的结果为非对称波形,而仿真计算的电流为对称波形,其原因可能是未考虑磁滞效应。分析结果表明,发生直流偏磁时,计算结果与实测数据误差较小。说明利用本文所采用的磁化曲线拟合方法可以有效计算变压器直流偏磁问题,结果较为准确。

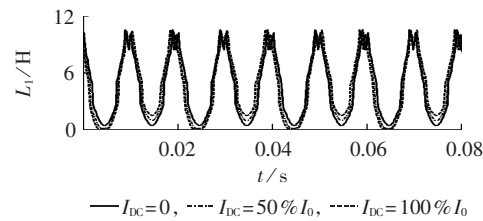
2.3 方法比较

对比 2 种方法的计算结果,方法 1 的动态电感在半个周期内的波形为单峰波,方法 2 则为鞍形波,这与磁化曲线的拟合情况有关。方法 1 采用单段曲线拟合,磁化曲线在励磁不饱和区单调变化,当励磁电流接近为零时,动态电感达到最大值,然后随着电流增大,动态电感逐渐减小。方法 2 采用分段曲线拟合,考虑了磁化曲线在不饱和区的实际特性,因此在励磁电流过零时存在增大→减小→增大的情况。

2 种方法计算的励磁电流对比 ($I_{DC}=200\% I_0$) 如图 6 所示,相同直流扰动下 2 种方法的计算电流基本相同,在电流过零时波形略有区别。



(a) 励磁电流对比



(b) 动态电感

图 5 方法 2 的计算结果

Fig.5 Calculative results of method 2

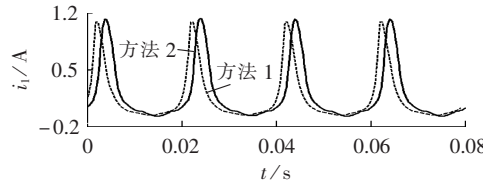


图 6 励磁电流对比

Fig.6 Comparison of exciting currents

分析变压器空载运行时的伏安特性。首先通过实验调节电压激励,其有效值范围为 $[0.5U_N, 1.5U_N]$ (U_N 为额定电压有效值),测量励磁电流有效值 I 。然后根据本文方法计算电流,并与实验测量数据进行对比,结果如图 7 所示。

不同方法的结果均符合实际变压器的非线性电耦合关系。不考虑叠压系数 α ,伏安特性与实际情

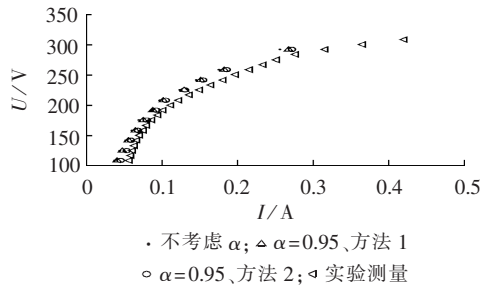


图 7 不同拟合方法的 $U-I$ 比较

Fig.7 Comparison of $U-I$ among different fitting methods

况有较大误差。计及 α 时,采用不同方法拟合磁化曲线,由于不饱和区的励磁非线性,方法2的计算准确性高于方法1,这与前面的分析结果一致。综上所述,2种拟合方法都能模拟变压器的 $U-I$ 特性,但方法2考虑不饱和区的励磁特性,结果更为准确。

研究表明,分段模拟磁化曲线的方法可以充分反映出变压器励磁的变化情况。若采用多段拟合的方法可能在模拟励磁非线性的准确性方面有所提高,这类方法拟合不饱和区磁化曲线时精度较高,但对应的动态电感数值较大,因此对计算电流的结果影响并不明显。

文中在改进磁化曲线拟合方法的基础上建立变压器三维时域场路耦合模型,对其不同励磁特性下的直流偏磁问题进行了仿真计算,并与实验结果对比,总结其规律。针对实际变压器,根据其相关信息,如铭牌数据、线圈与铁芯参数、励磁非线性等,就可以对直流偏磁问题进行瞬时场路的计算分析。

3 结论

通过对单相三柱式变压器直流偏磁的研究分析,得出以下结论。

a. 利用时域场路耦合模型计算变压器直流偏磁时的动态电感和瞬态电流,能够反映出变压器磁场与电路等效参数在直流扰动下的变化规律,实验结果证明用该方法计算变压器直流偏磁是正确可行的。

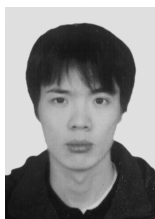
b. 拟合磁化曲线的方法可以简化磁场模型求解,提高计算效率。不同分段拟合方法都能有效模拟变压器的电压电流特性与直流偏磁时的饱和励磁特性,两者的计算结果一致。由于本文方法考虑了不饱和和励磁的非线性,与实际情况更为接近,结果更为准确。

参考文献:

- [1] 文俊,刘连光,项颂,等. 地磁感应电流对电网安全稳定运行的影响[J]. 电网技术,2010,34(11):24-30.
WEN Jun,LIU Lianguang,XIANG Song,et al. Influences of geomagnetic induced currents on security and stability of power systems[J]. Power System Technology,2010,34(11):24-30.
- [2] 李新年,蒋卫平,李涛. 交直流线路同塔输电对换流变压器直流偏磁的影响[J]. 电力系统自动化,2011,35(11):87-92.
LI Xinnian,JIANG Weiping,LI Tao. Influence of same-tower AC/DC hybrid transmission lines on DC bias of converter transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(11):87-92.
- [3] 郭满生,梅桂华,张喜乐,等. 直流偏磁条件下单相三柱式电力变压器的损耗计算[J]. 电工技术学报,2010,25(7):67-71.
GUO Mansheng,MEI Guihua,ZHANG Xile,et al. Calculation of losses in single phase three limb transformer under DC-biasing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(7):67-71.
- [4] 赵志刚,刘福贵,张俊杰,等. 直流偏磁条件下变压器励磁电流的实验与分析[J]. 电工技术学报,2010,25(4):71-76.

- ZHAO Zhigang,LIU Fugui,ZHANG Junjie,et al. Measurement and analysis of magnetizing current in DC-biased transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(4):71-76.
- [5] 赵小军,李琳,程志光,等. 基于直流偏磁实验的叠片铁芯磁化特性分析[J]. 电工技术学报,2011,26(1):7-13.
ZHAO Xiaojun,LI Lin,CHENG Zhiguang,et al. Analysis of magnetizing characteristic of laminated core based on the DC-biasing experiment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(1):7-13.
- [6] 张冰. 大型电力变压器的GIC影响效应研究[D]. 北京:华北电力大学,2010.
ZHANG Bing. Research on effects of GIC on large power transformers[D]. Beijing:North China Electric Power University,2010.
- [7] EMANUEL A E,PILEGGI D J,LEVITSKY F J. Direct current generation in single-phase residential systems—DC effects and permissible levels[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1984,PER-4(8):2051-2058.
- [8] da LUZ M V F,LEITE J V,BENABOU A,et al. Three-phase transformer modeling using a vector hysteresis model and including the eddy current and the anomalous losses[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2010,46(8):3201-3204.
- [9] ZHAO Xiaojun,LU Junwei,LI Lin,et al. Analysis of DC bias phenomenon by the harmonic balance finite-element method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(1):475-485.
- [10] ZHAO Xiaojun,LI Lin,LU Junwei,et al. Characteristic analysis of the square laminated core under DC-biased magnetization by the fixed-point harmonic-balanced FEM[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2012,48(2):747-750.
- [11] 程志光,高桥则雄,博扎尼·弗甘尼,等. 电气工程电磁场模拟与应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [12] 潘超,王泽忠,杨敬瑛,等. 变压器直流偏磁瞬态场路耦合计算的稳定性分析[J]. 电工技术学报,2013,27(12):226-232.
PAN Chao,WANG Zezhong,YANG Jingyu,et al. Stability analysis based on transient magnetic-circuit coupled method for DC-biased transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,27(12):226-232.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T2521—2008 冷轧取向和无取向电工钢带(片)[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T2521—1996 冷轧晶粒取向、无取向磁性钢带(片)[S]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [15] HO S L,NIU S X,FU W N,et al. A power-balanced time-stepping finite element method for transient magnetic field computation[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2012,48(2):291-294.
- [16] 李晓萍,文习山. 三相五柱变压器直流偏磁计算研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):127-131.
LI Xiaoping,WEN Xishan. DC bias computation study on three-phase five-limb transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(1):127-131.

作者简介:



潘超

潘超(1981—),男,河南南阳人,副教授,博士研究生,研究方向为电磁场数值计算、电力系统电磁兼容(E-mail:31563018@qq.com);

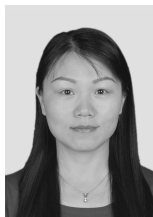
王梦纯(1989—),女,吉林松原人,硕士研究生,研究方向为电力系统电磁兼容。

(下转第58页 continued on page 58)

出版社,2007:69-101.

- [16] 铁道部电气化工程局电气化勘测设计院. 电气化铁道设计手册——牵引供电系统[M]. 北京:中国铁道出版社,1987:25-34.
- [17] 李欣然,张广东,朱湘有,等. 牵引供电系统综合负荷模型结构[J]. 电力系统自动化,2009,33(16):71-75,95.
- LI Xinran,ZHANG Guangdong,ZHU Xiangyou,et al. A load model of traction power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(16):71-75,95.
- [18] SANTOS FILHO R M,SEIXAS P F,CORTIZO P C,et al. Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008,55(8):2923-2932.
- [19] 谢孟. 单相400 Hz中频电压源逆变器的输出控制及其并联运行控制[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006.
- XIE Meng. Output control and parallel operation control of single-phase 400 Hz medium frequency voltage-source inverters [D]. Beijing:Graduate University of Chinese Academy of Science, 2006.

作者简介:



何晓琼

何晓琼(1974-),女,重庆人,副教授,博士研究生,主要从事电力电子技术及应用、电能变换与控制、轨道交通电气化与自动化等研究工作(E-mail:jony8668@163.com);

彭旭(1987-),男,四川成都人,硕士研究生,研究方向为轨道交通电气化与自动化;

周瑛英(1989-),女,浙江台州人,硕士研究生,研究方向为电力电子控制技术;

王远(1987-),男,山西太原人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动;

舒泽亮(1979-),男,四川德阳人,副教授,博士,主要从事电力电子技术及应用研究,包括APF、STATCOM、PWM整流器及电力电子应用中的控制与数字信号处理;

肖建(1950-),男,湖南衡阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电气工程和电气工程等相关领域研究。

Current-sharing performance of advanced co-phase traction power supply system

HE Xiaoqiong,PENG Xu,ZHOU Yingying,WANG Yuan,SHU Zeliang,XIAO Jian

(School of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China)

Abstract: The current-sharing performance of an ideal co-phase traction power supply system is studied, which,based on the three-phase to single-phase converter,transfers directly the active power between power grid and traction network to completely cancel the neutral-section device and greatly improve the quality of electric energy. Its dual-substation model and traction network impedance model are established and its circulation and droop characteristics are analyzed,which shows that,with the droop external characteristic,the parallel operation of multiple converters can be implemented by the droop control to achieve the current sharing. The method of grid-connection control is given and the simulative results demonstrate the correctness of theoretical analysis.

Key words: three-phase to single-phase converter; co-phase traction power supply system; circulation characteristic; droop characteristic; droop control

(上接第52页 continued from page 52)

Magnetization curve fitting in field-circuit coupling computation for DC-biased transformer

PAN Chao¹,WANG Mengchun¹,CAI Guowei¹,JIANG Yanjin²,LI Tiefeng²

(1. School of Electrical Engineering,Northeast Dianli University,Jilin 132021,China;

2. Jilin Electric Power Supply Company,Jilin 132001,China)

Abstract: An improved method of saturated magnetization curve fitting based on piecewise function is proposed to solve three-dimensional magnetic field with edge finite element,which considers the nonlinearity of unsaturated magnetization. The transient current and the dynamic inductance of single-phase transformer with DC-bias are computed based on the time-domain field-circuit coupling model,and their variation rule and corresponding relationship are analyzed. Different fitting methods for DC-bias computation are discussed and the impact of the nonlinearity of unsaturated magnetization on the coupling parameters and volt-ampere characteristics is analyzed. The accuracy and validity of the proposed method are verified by the comparison with the experimental data.

Key words: electric transformers; DC bias; magnetizing characteristics; time-domain field-circuit coupling; edge finite element; calculations