

基于三维场-路耦合有限元的盘式无铁心局部退磁分析

由于盘式无铁心永磁无刷直流电动机漏磁系数较大,永磁体容易产生局部退磁,因此准确计算局部退磁是设计安全可靠的盘式无铁心永磁无刷直流电动机的前提。利用Ansoft分析软件,建立了一台六极盘式无铁心永磁无刷直流电动机的三维有限元模型,并搭建了三相六状态的驱动电路,实现了三维磁场与外电路的耦合仿真,能够准确计算动态过程中永磁体各个位置的工作点磁通密度。首先对盘式无铁心永磁无刷直流电动机的空载和带载起动过程进行了瞬态场计算,分析得到不同带载条件下起动过程转速、电磁转矩以及电枢电流等性能。然后计算分析了电动机起动过程中,电枢电流和永磁体单独及综合作用下永磁体工作点磁通密度、三维气隙磁场分布,研究了电枢电流的幅值和相位对永磁体局部退磁的影响。结果表明,带较大负载起动过程中,电枢电流较大,局部退磁较严重,研究结果对进一步优化设计永磁体结构以及预防局部退磁具有重要意义。

卢伟甫 赵海森/华北电力大学电气与电子工程学院



卢伟甫/博士后

关键词/Keywords

盘式无铁心永磁
无刷直流电动机·
三维磁场·
驱动电路·
局部退磁·

盘式无铁心永磁无刷直流电动机结构呈扁平状,由对等放置的盘形定子和转子组成,定子无铁心,导体以适当方式制成圆盘形,转子上粘有轴向磁化的高磁能积的永磁磁钢。无铁心和永磁体励磁的特殊结构使电动机具有较高的效率和功率密度;而轴向尺寸短、重量轻等特点,使电动机具有较强的过载能力和优异的动态性能。因此,盘式无铁心永磁无刷直流电动机在一些特殊场合(如高性能伺服电动机、大转矩直接驱动电动机中)得到广泛应用^[1-4]。

国家自然科学基金(51307050),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JB2014148),博士后基金(X09982)。

目前,国内外对盘式无铁心永磁无刷直流电动机进行的研究主要集中在电动机稳态性能分析和动态性能分析两方面。在电动机稳态性能分析方面,由于盘式无铁心永磁无刷直流电动机的气隙磁场为轴向磁场,呈三维开域分布,因此若像处理圆柱式电动机一样选取电动机横截面来建立其二维模型并进行分析将难以取得准确的性能计算结果。要准确计算盘式无铁心永磁无刷直流电动机性能,需借助三维有限元分析方法。目前,已有文献利用三维有限元模型进行了盘式无铁心永磁无刷直流电动机的稳态电磁参数计算,并对永磁体涡流损耗以及磁钢优化等方面进行了初步研究^[5-8]。文献[9]利用三维有限元重点分析了不同负载电流下的电枢去磁磁场对主磁场的影响,但未对动态过程中永磁体不同部位的退磁情况进行深入研究。由于起动过程中电枢电流较大,且永磁体轴向和周向漏磁系数也较大,因此很有可能产生局部退磁。若要准确研究盘式无铁心永磁无刷直流电动机起动过程中的局部退磁情况,需要建立动态系统模型,准确计及电动机起动过程中的动态性能与瞬态磁场的相互作用。

现有的盘式无铁心永磁无刷直流电动机控制仿真计算采用的主要方法是在动态系统仿真软件中,利用电动机参数建立电动机的等效数学模型,并搭建控制系统,实现电动机的控制仿真。其中,电动机的参数主要是通过等效磁路解析法或者电磁场数值计算法得到^[10-11]。

为了充分考虑电动机饱和、涡流对驱动控制系统的影响,文献[12]利用了将瞬态电磁场与外电路耦合求解的方法,但该文献中电动机的三维磁场分布是通过两次二维场分析计算得出,并非真正意义上的三维场。

为更加准确地分析盘式无铁心永磁无刷直流电动机起动过程中局部退磁特点,本文进一步采用Ansoft软件,通过建立三维有限元模型和驱动控制电路,进行盘式无铁心永磁无刷直流电动机三维瞬态电磁场与外电路的耦合求解。基于该模型,对电动机不同带载条件下的起动过程性能和电枢反应对永磁体局部退磁的影响进行仿真研究,研究成果可为进一步深入开展盘式无铁心永磁无刷直流电动机动态性能研究提供必要的参考。

盘式无铁心永磁无刷直流电动机三维有限元模型的建立

本文以一台六极盘式无铁心永磁直流电动机为例进行分析,其结构如图1所示。电动机由背铁、盘形绕组、永磁体和转子铁心组成,各部分结构材料属性如下表所示。其中定子无铁心,导体以适当方式制成圆盘形,盘形绕组按制造方法的不同分为印制绕组和绕线型绕组。图1的电动机中实际采用的是薄铜片冲制而成的印制绕组,且为有刷装置。为方便研究盘式无铁心永磁无刷直流电动机,在图1样机结构参数基础上,采用绕线型绕组等效模拟印制绕组,并采用三相电源无刷驱动代替有刷换向。



图1 样机结构

1—背铁 2—盘形绕组 3—永磁体 4—转子铁心

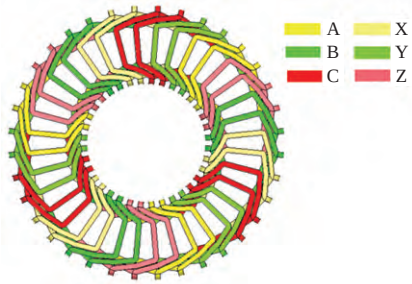
表 样机结构材料属性

结构	材料属性
背铁, 转子铁心	硅钢片
盘形绕组	黄铜
永磁体	NdFeB35, 矫顽力为890 kA/m

根据已知的电动机结构尺寸和材料属性,采用Ansoft软件建立盘式无铁心永磁无刷直流电动机的三维有限元模型,如图2a所示。其中,序号1~4代表的部件结构同图1。绕组绕线方式采用三相双层绕组星形连接,如图2b所示。由于所研究的盘式永磁无刷直流电动机不具有铁心,故不存在齿槽,所以可以将每个线圈边近似看成置放在相应的虚槽中。总虚槽数为36,每个虚槽内上下各放一个线圈边,节距为4,AZBXCXY六相带顺时针排列。6块圆柱形永磁体轴向磁化,以N、S极性交替粘在转子上。



(a) 三维有限元模型



(b) 定子三相双层绕组

图2 盘式无铁心永磁无刷直流电动机三维有限元模型

盘式无铁心永磁无刷直流电动机驱动电路的搭建

盘式无铁心永磁无刷直流电动机的工作原理为驱动电路借助电动机转子位置的输出信号控制电枢绕组的通电状态,在定子绕组上产生跳跃式的旋转磁场,从而带动永磁转子旋转。

在Ansoft软件中搭建如图3所示的盘式无铁心永磁无刷直流电动机的控制系统,主要包括主驱动电路模块Ⅰ、三维瞬态场分析模块Ⅱ和控制电压模块Ⅲ。

主驱动电路Ⅰ与三维瞬态场分析模块Ⅱ相连实现场路耦合,电压控制模块Ⅲ根据三维瞬态场分析模块反馈的转子位置信号控制主驱动电路。图中,VT₁~VT₆为压控功率晶体管,VT₁、VT₃和

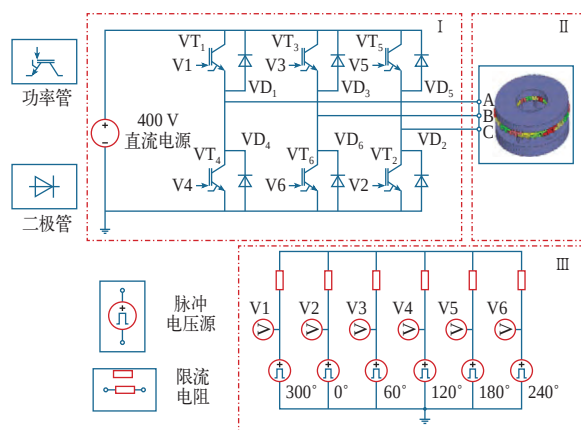


图3 盘式无铁心永磁无刷直流电动机控制系统

VT₅分别控制盘式电动机A、B和C三相定子绕组正向电压；VT₄、VT₆和VT₂分别控制A、B和C三相绕组的负向电压；并联在每个晶体管旁的二极管VD₁~VD₆为晶体管关断时提供续流通路；V1~V6为控制功率晶体管导通的电压脉冲信号，与电动机转子位置有关。

驱动电路一般采用两相导通的星形三相六状态控制模式。其中，两相导通方式是指每一瞬间有两个晶体管导通，每隔1/6周期（60°电角度）换向一次，每次只换向一个晶体管，每个晶体管导通120°电角度。根据三相变量的对称性，一个完整的周期可以划分为六个不同的状态区间，每60°电角度为一个区间，如图4所示。首先初始时刻，功率晶体管VT₁和VT₆同时导通，电流由A组线圈进B组线圈出，使转子磁极轴线与A、B两个线圈形成的合成磁场方向重合，规定此时的磁场方向和转子初始位置电角度为0°。为了使转子转动，关断VT₆，触发电压脉冲信号V2，使功率晶体管VT₂导通，此时电流由A组线圈进C组线圈出，形成的磁场方向顺时针转到60°，转子在正向电磁转矩的驱动下也随之转动，直到转子位置电角度为60°。为保持定子绕组作用在转子永磁体上的电磁转矩方向始终不变，从而使电动机不停地转动起来。此时关断VT₁，触发电压脉冲信号V3，使功率晶体管VT₃导通，电流由B组线圈进C组线圈出，形成的磁场方向顺时针转到120°，随后转子也转到120°。然后根据转子位置电角度信号120°、180°、

240°和300°依次触发VT₄~VT₆和VT₁，使转子在定子电枢绕组中产生的步进旋转磁场带动下转动。

通过反馈的转子位置信号，各功率晶体管按顺序依次导通，六种状态AB、AC、BC、BA、CA和CB周而复始，从而实现转子的起动和稳定运行。

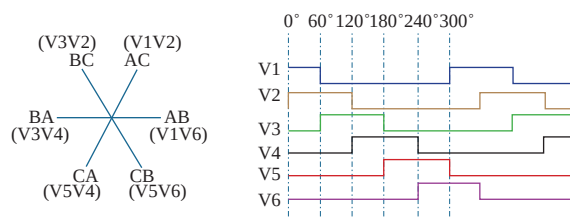


图4 三相六状态导通模式

空载起动和带载起动性能分析

1. 空载起动过程仿真

利用前述搭建的场-路耦合三维有限元瞬态模型，分析不同带载条件下电枢反应对永磁体退磁的影响。首先，以空载起动为例，空载感应电动势和谐波分析结果如图5所示。由图5可见，空载电动势波形较接近于正弦，从而有利于提高电动机性能。

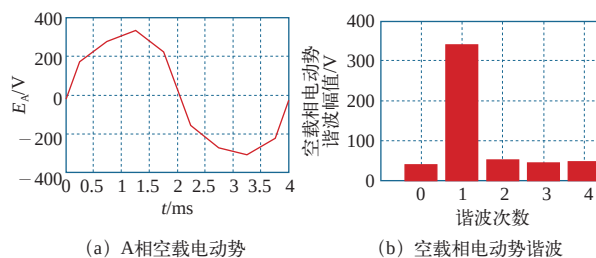


图5 空载感应电动势

空载起动稳定后电动机各部分的网格剖分及三维磁通密度矢量分布如图6所示，在永磁体和电枢绕组部分主要是轴向磁场，背铁和转子部分主要是轴向磁场和周向磁场，可见盘式电动机三维瞬态磁场分布较为复杂。位于永磁体和电枢绕组之间气隙的三维磁通密度分布如图7所示，不同半径处气隙磁通密度分布情况如图8所示。由图7和图8可见，位于永磁体中心处上方磁通密度较大，由于受周向漏磁的影响，永磁体内、外边缘对应的上方气隙位置处磁通密度幅值较小，谐波较大。

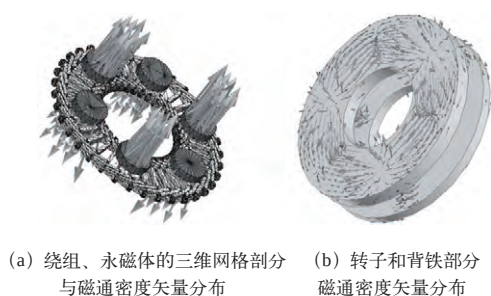


图6 三维磁通密度矢量分布

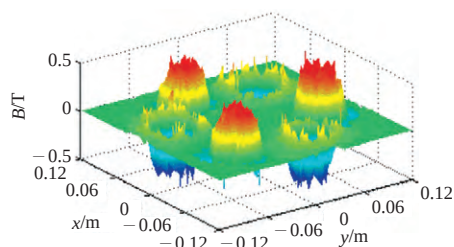


图7 气隙磁通密度分布

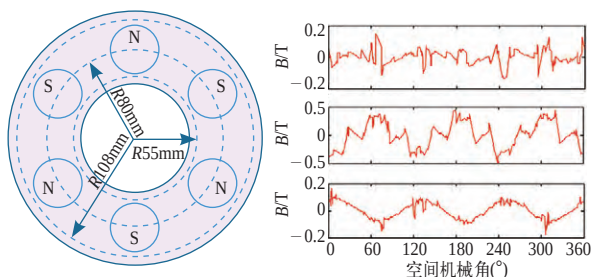


图8 不同半径处气隙磁通密度分布

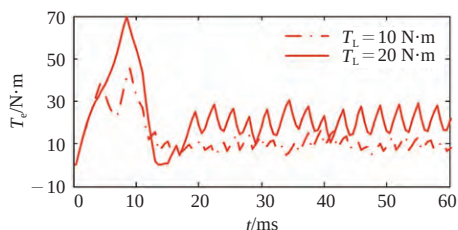
2. 带载起动性能分析

(1) 起动过程性能

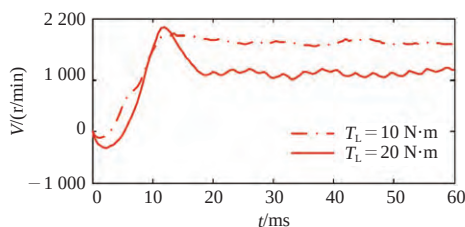
当盘式电动机带负载运行(如带 $10\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $20\text{ N}\cdot\text{m}$)时,电动机转速、电磁转矩和电枢电流曲线如图9所示。由图9可见,当外加电压一定时,负载转矩越大,转子转速越低,电枢电流越大。

(2) 永磁体工作点磁通密度

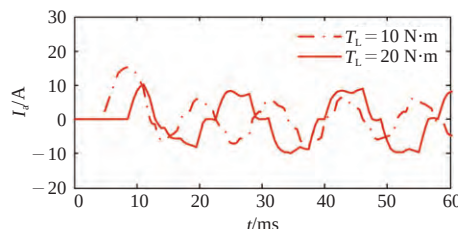
电枢绕组电流产生轴向磁场会影响永磁体的工作状态。当无电枢磁场仅永磁体磁场作用时,永磁体磁通密度分布如图10所示。由图10可见,采用三维有限元计算得到的永磁体各单元磁通密度不等,永磁体体内单元磁通密度明显低于体表面位置磁通密度。某一运行时刻,永磁体所有单元磁通密度的平均值(即平均工作点磁通密度 B_{mean})用来表明整体退磁情况;所有永磁体单元中最低点磁通密度 B_{min} 用以表明局部退磁情况。



(a) 电磁转矩



(b) 转子转速



(c) 电枢电流

图9 带载起动性能

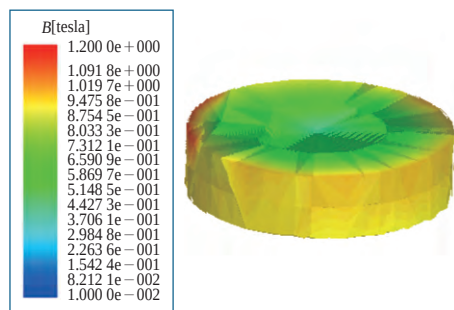


图10 某永磁体磁通密度分布

不同带载条件下,起动过程中的永磁体平均工作点磁通密度和最低点磁通密度分别如图11a、b所示。由图11可见,带载起动过程中电枢反应电流较大,电枢磁场对永磁体工作点磁通密度影响较大,如带 $20\text{ N}\cdot\text{m}$ 较大负载起动时,会产生严重局部退磁,使永磁体平均工作点磁通密度较低。

电枢反应退磁分析

电枢反应对局部退磁的影响程度主要与电枢电流大小、电枢反应磁动势和永磁体的相对空间位置有关,本节主要针对两因素对永磁体局部退

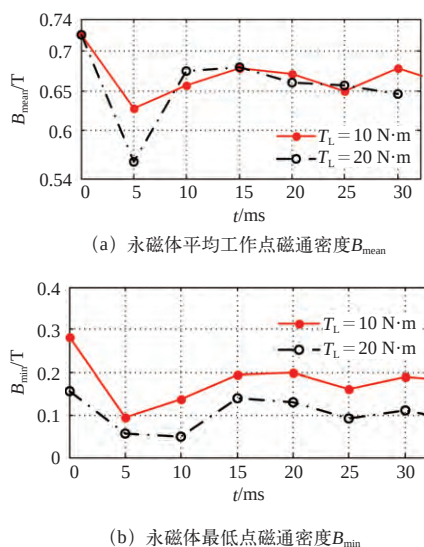


图11 不同负载条件下起动过程中永磁体工作点磁通密度

磁的影响分别进行分析。首先,保持电枢电流幅值10 A不变,分析当电枢磁动势和永磁磁动势处于增磁和去磁相对位置时的永磁体单元磁通密度。如图12所示,列出了增磁和去磁相对位置永磁体磁通密度情况。由图12可见,增磁时刻永磁体体内较低磁通密度约为0.7 T,而去磁时刻较低磁通密度约为0.03 T。以NdFeB永磁体为例,工作温度为100 ℃时退磁曲线的拐点约为0.5 T,当永磁体某位置磁通密度低于该点时,就会产生局部不可逆退磁。

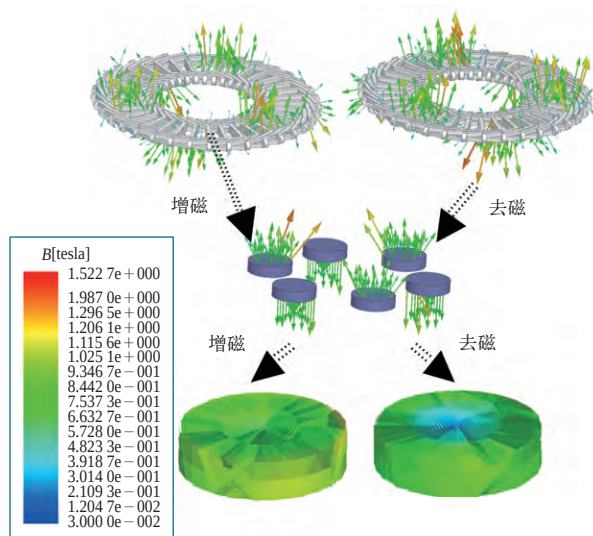


图12 增磁和去磁相对位置永磁体磁通密度

保持去磁相对位置不变,通过改变电枢电流

改变去磁磁场大小。为定量表明永磁体的退磁程度,定义低于退磁曲线拐点的单元数与永磁体单元总数的比值 s_r 为退磁率。如图13所示,列出了不同电枢去磁电流作用下永磁体工作点磁通密度及退磁率情况。由图13可见,当去磁电流约低于10 A时,退磁率较小,电枢磁场对永磁体平均工作点磁通密度(即永磁体整体性能)影响不大。当永磁体电流大到一定程度时,永磁体局部不可逆退磁面积增大,电动机性能下降。

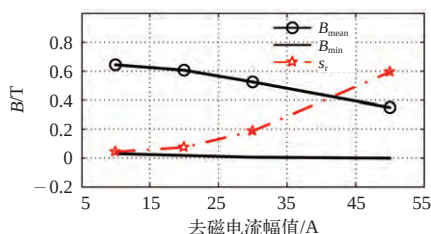


图13 不同去磁电流下永磁体工作点磁通密度和退磁率

结束语

本文主要基于三维有限元分析方法,对盘式无铁心永磁无刷直流电动机起动过程中局部退磁情况进行了分析,主要结论如下:

1) 建立了盘式无铁心永磁无刷直流电动机三维瞬态场-路耦合模型,计及了电动机饱和、涡流与驱动控制系统谐波的相互影响,仿真模型与实际情况更接近,计算更准确。

2) 基于三维场-路耦合模型分析得到不同带载条件下起动过程中电枢反应对永磁体局部退磁的影响。当外加电压一定时,负载转矩越大,电枢电流越大,永磁体局部不可逆退磁越严重,影响电动机性能。

研究成果可为进一步深入开展防止盘式无铁心永磁无刷直流电动机局部退磁措施的研究提供必要的技术参考。

参考文献

- [1] Gu C, Wu W, Shao K. Magnetic field analysis and optimal design of DC permanent magnet coreless disk machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30 (5): 3668-3671.

- [2] 孙亦詮. 国外盘式电动机的进展 [J]. 电工电能新技术, 1983: 9-14.
- [3] Kohari Z, Nadudvari Z, Szlama L, et al. Test results of a compact disk-type motor/generator unit with superconducting bearings for flywheel energy storage systems with ultra-low idling losses [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21 (3): 1497-1501.
- [4] F Giulii Capponi, G De Donato, F Caricchi. Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (6): 2190-2205.
- [5] 宫晓, 徐衍亮, 冯开杰. 新型盘式横向磁通永磁电动机及其空载电动势波形的解析计算 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (7): 77-82.
- [6] 王晓远, 李娟, 齐立晓, 等. 盘式永磁同步电动机永磁体内涡流的有限元分析 [J]. 微电机, 2007, 40 (1): 5-9.
- [7] 杜静娟. 基于 Halbach 阵列楔形气隙盘式无铁心永磁同步电动机的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [8] Guo-Jhih Yan, Liang-Yi Hsu, Jing-Hui Wang, et al. Axial-flux permanent magnet brushless motor for slim vortex pumps [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (10): 4732-4735.
- [9] 郭雨. 盘式无铁心永磁同步电动机负载情况下的磁场分析及计算 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [10] 王晓远, 宋鹏, 田亮, 等. 基于DSP的盘式无铁心永磁同步电动机调速系统 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (17): 138-142.
- [11] 朱熙, 范瑜, 吕刚, 等. 单边盘式感应电动机的数学模型与转矩分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (24): 69-74.
- [12] 白凤仙, 孙建中, 路秀芬, 等. 盘式无刷直流电动机动态性能仿真的场路耦合法 [J]. 太原理工大学学报, 1999, 30 (1): 50-53.
- (收稿日期: 2015-01-20) EA

(上接第87页)

- 压器, 2006, 43 (9): 66-72.
- [7] 梁湘湘, 许加柱, 姚新丽. 大功率牵引主变压器油箱壁的三维涡流场与温度场的分析与计算 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34 (6): 38-44.
- [8] 朱占新, 谢德馨, 张艳丽. 大型电力变压器三维漏磁场与结构件损耗的时域分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (9): 156-160.
- [9] 李琳, 崔翔, 张元禄, 等. 电力变压器三维漏磁场及铁心拉板涡流损耗的计算 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (6): 33-36.
- [10] 李龙女, 李岩, 井永腾, 等. 电力变压器漏磁场与杂散损耗计算的研究 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (2): 122-127.
- [11] 刘传彝. 电力变压器设计计算方法与实践 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [12] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 151-152.
- [13] 张俊杰, 李琳, 等. 进入硅钢叠片内的漏磁通和附加损耗的模拟实验与仿真 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (5): 148-153.
- [14] 尹克宁. 变压器设计原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [15] 阎照文. ANSYS10.0工程电磁分析技术与实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [16] 博弈创作室. APDL参数化有限元分析技术及其应用实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [17] 张志文, 李高龙, 许加柱, 等. 特种电抗器磁场分布与电感的有限元分析计算 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (5): 307-310.
- [18] 李高龙. 10 kV配电网单相短路电流计算及跨步电压的有限元分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- (收稿日期: 2015-01-30) EA