

基于新型发电机定子模型的绝缘安全分析

崔东君¹, 刘念¹, 袁博², 张夔³

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 中国国土资源经济研究院, 北京 101149;
3. 中国成达工程有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 传统的定子绕组无源电路模型和电机实际运行工况不符, 存在误差。提出定子绕组有源电路模型, 考虑了定子绕组切割磁感线产生的电动势, 并将其按不同相角计入定子槽内, 并对各槽内电动势细分为电动势单元加入定子绕组模型中。利用有源模型进行场路综合分析, 可计算出定子槽内电场分布, 进而分析定子绝缘安全性。经过仿真计算说明利用有源模型计算电场分布较传统模型的计算精度更高, 绝缘故障点预测更加可靠。

关键词: 定子有源模型; 绝缘安全分析; 场路综合分析; 有限元法

Insulation safety analysis based on the novel generator stator model

CUI Dong-jun¹, LIU Nian¹, YUAN Bo², ZHANG Ai³

(1. School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Chinese Academy of Land and Resource Economics, Beijing 101149, China; 3. China Chengdu Engineering Co.LTD, Chengdu 610041, China)

Abstract: Traditional passive stator winding model can not represent electromotive force (EMF) when stator is in working condition. This paper proposes an active stator winding model, taking into account the EMF occurring when stator winding cuts magnetic induction lines. Every stator slot will produce EMF with different phase angles, dividing and putting the EMF unit into every sub-bar of the winding model. Field-circuit comprehensive analysis using active stator model can calculate the electric field distribution of stator slot, and predict safety of stator insulation. The over-voltage simulation results show that using active stator model to reckon electric field distribution is more accurate than using the traditional stator model, and has higher accuracy of predicting winding insulation fault.

Key words: active stator model; insulation safety analysis; field-circuit comprehensive analysis; finite element method

中图分类号: TM31 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0084-05

0 引言

运行中的大型发电机会受到来自电网的各种暂态过电压的冲击, 定子槽内场强突增, 造成定子线棒绝缘水平下降, 最终导致短路故障^[1-3]。随着电网电压等级提高, 过电压对电机定子绝缘的危害日益严重。分析过电压对定子绕组的危害程度显得尤为重要。可以根据场路综合的方法^[4]计算出过电压波侵入定子绕组后的电位分布, 再计算出其对应的暂态电场分布, 最终对发电机定子绕组绝缘进行预测评估, 完成过电压冲击下的安全分析。但以往的大型发电机电路模型忽略了电机在运行过程中定子线棒切割磁感线产生的电动势, 与实际的工况不符, 计算结果存在误差。

本文提出的大型发电机有源暂态电路模型将正常工况下定子线棒产生的电动势加入电机定子模型中。当过电压侵入发电机时, 线棒上感应电压和过

电压两种电压相互叠加, 与实际情况相符。由有源暂态电路模型分析绝缘安全性的步骤是以一定时间间隔采集过电压波数据并存入实时监测数据库中, 以过电压数据和电机运行参数为已知条件, 利用有源暂态网络模型计算各节点处电位, 而后由有限元法计算各电路节点所在处定子槽内的电场分布情况, 并将受过电压冲击各时刻的计算结果存入 FEM 数据库中。根据各有限单元电场强度大小分析定子槽内绝缘介质的安全性。最后仿真计算选取过电压侵入后的两个典型时刻比较无源、有源电路模型的计算结果, 说明有源电路模型计算过电压侵入情况下电路各节点电位结果更准确, 定子槽内电场分布计算精度更高。

1 建立大型发电机有源暂态电路模型

在大型发电机中, 定子三相绕组由单匝短距线圈构成且对称分布。根据大型同步发电机的结构特

点, 可只分析其中一相, 做出等效电路模型。过电压冲击电机定子绕组的过程与冲击波在输电线路的传播过程极为相似, 只是传播的线路被嵌入发电机定子铁心的槽内, 所以类似输电线路的电路模型, 也可将大型发电机定子线棒分段考虑。若不计正常工况下定子线棒切割磁场产生的电动势, 此时发电机暂态网络模型可由定子线棒单元长度导体电阻 R_1 、 R_2 , 自感 L_{1c} 、 L_{2c} , 对地电容 C_1 、 C_2 及上下层线棒间互感 M_{12} 、 M_{21} , 层间电容 C_{12} 、 C_{21} , 对地电阻 R_{g1} 、 R_{g2} , 这些集中参数组成的等值电路表示。图 1 所示为大型发电机定子槽内线棒单元的集中参数等值 π 型网络。

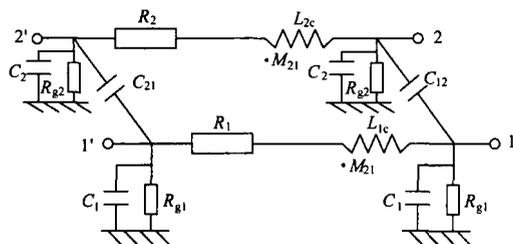


图 1 定子槽内线棒单元集中参数等值网络

Fig.1 Equivalent network of integrated parameters for winding element in the slot of stators

现将定子槽内线棒的电动势计入模型中。实际交流绕组处于旋转磁场中, 并切割旋转磁场, 产生发电机的感应电动势。由于高次谐波电动势对模型计算精度影响很小, 故本文只考虑基波电动势的作用。单相定子绕组中一根导体线棒切割磁场感应出的交流基波电动势为:

$$E(t) = 2.22f\Phi_1 \quad (1)$$

其中: Φ_1 为电机定子每极基波磁通; f 为基波频率, $f = Pn/60$, n 为发电机同步转速, P 为发电机磁极对数^[5]。发电机定子线棒导体中感应电动势 $e_x(t)$ 随时间变化的波形和发电机气隙磁感应强度 B_x 在空间的分布波形相一致。对于稳定运行的同步发电机, 长度为 l 的线棒导体中感应电动势为 $e_x(t) = B_x l v$, 正比于线棒导体所切割的气隙磁感应强度。

在大型发电机绕组中均匀分布着许多定子线棒导体, 这些导体中的感应电动势有效值、频率和波形均相同, 但这些感应电动势 $e_x(t)$ 在时间上存在相位差, 可由式 (2) 表示:

$$e_x(t) = \sqrt{2}E(t)\sin(\omega t - n^* \alpha) \quad (2)$$

其中: n^* 为定子槽号数; α 为槽距角; ω 为工频角频率。当第 n^* 号定子槽嵌入的绕组线棒被等分成 m 个单元, 进而得到发电机有源暂态网络模型中线棒导体单元中的感应电动势如式 (3)。

$$e(t) = 2.22\sqrt{2}f\Phi_1 \sin(\omega t - n^* \alpha)/m \quad (3)$$

根据大型发电机的电磁结构, 无源模型中的线棒对地电阻, 互感, 线棒间电容以及线棒的槽外部分对模型计算精度影响极小, 均可忽略不计。进而新型电机模型可用发电机定子线棒单元长度导体电阻 R , 电感 L , 对地电容 C , 接地电阻 R_0 , 线棒导体单元中的感应电动势 $e(t)$ 表示。将各单元模型按其拓扑结构集合起来, 构成发电机有源暂态网络模型, 如图 2 所示。

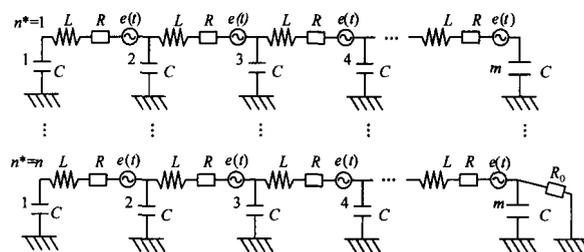


图 2 大型发电机有源暂态网络模型

Fig.2 Active transient network model of large generator

2 过电压的场路分析计算

2.1 过电压的电路分析计算

现场实时监测, 采集大型发电机入口端三相线路, 得到冲击电压波 $[U_a(t), U_b(t), U_c(t)]$:

$$U = [U_1(t), U_2(t), \dots, U_i(t), \dots, U_n(t)] =$$

$$\begin{bmatrix} U_{a1}(t) & U_{a2}(t) & \dots & U_{ai}(t) & \dots & U_{an}(t) \\ U_{b1}(t) & U_{b2}(t) & \dots & U_{bi}(t) & \dots & U_{bn}(t) \\ U_{c1}(t) & U_{c2}(t) & \dots & U_{ci}(t) & \dots & U_{cn}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $U_i(t)$ 为大型发电机定子三相 (A、B、C) 出线端的冲击电压集合, 将其作为发电机有源暂态电路的入口冲击电压源存入实时监测数据库中。在大型发电机有源暂态网络模型的基础上, 建立冲击过电压下的大型发电机暂态电路状态方程, 求解发电机绕组中的过电压分布。

首先, 建立暂态网络节点电压状态方程

$$Y_n V_n = J_n \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} Y_n &= AYA^T \\ J_n &= -AYV_g \end{aligned} \quad (6)$$

其中: 系数矩阵 Y_n 为暂态网络的节点导纳矩阵, 其矩阵元素以发电机有源暂态电路的电气参数 (R, L, C) 组成; A 为暂态网络拓扑关联矩阵, A^T 是 A 的转置矩阵; V_n 为发电机有源暂态电路的节点电压向量; J_n 为暂态网络节点电流源向量, 它由独立电压源的诺顿等效电流向量 AYV_g 表示, V_g 由发电机有

源暂态电路模型中的感应电动势 $e(t)$ 组成。

从图 2 中取出任意一个 π 型子单元, 如图 3 所示。由对地电容支路得 $i, i+1$ 节点电流为:

$$i_{(i,C_g)} = C_g \frac{du_i}{dt}, \quad i_{(i+1,C_g)} = C_g \frac{du_{i+1}}{dt} \quad (7)$$

在此单元中, 电压关系为:

$$u_i - u_{i+1} = Ri_{(i,i+1)} + L \frac{di_{(i,i+1)}}{dt} + e(t) \quad (8)$$

计算过程中, 用时间步长 Δt 对暂态网络节点电压状态方程进行离散处理, 采用计算机数值求解方法, 以提高计算速度。离散后电流关系式为:

$$\begin{aligned} i_{(i,C_g)}(t) &= \frac{C_g[u_i(t) - u_i(t - \Delta t)]}{\Delta t} \\ i_{(i+1,C_g)}(t) &= \frac{C_g[u_{i+1}(t) - u_{i+1}(t - \Delta t)]}{\Delta t} \\ i_{(i,i+1)}(t) &= \frac{\Delta t[u_i(t) - u_{i+1}(t)] + Li_{(i,i+1)}(t - \Delta t) - e(t)}{R\Delta t + L} \end{aligned} \quad (9)$$

图 3 所示的 π 型电路满足基尔霍夫电流关系。

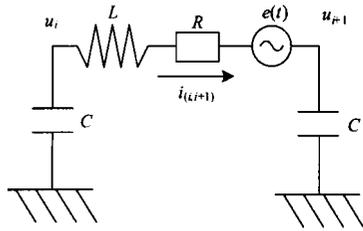


图 3 π 型子单元回路

Fig.3 Loop circuit of the basic element with the π shape

$$\begin{aligned} i_{(i,i+1)}(t) &= i_{(i-1,i)}(t) - i_{(i,C_g)}(t) \\ i_{(i,i+1)}(t) &= i_{(i+1,C_g)}(t) + i_{(i+1,i+2)}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (9), 可以获得离散形式的节点网络方程组:

$$A'u(t) = Bu(t - \Delta t) + Ci(t - \Delta t) \quad (11)$$

式 (10) 是一组离散化时间的线性代数方程组, 它可由 $(t - \Delta t)$ 时刻大型发电机有源暂态网络模型中的单元线棒支路电流和节点电压求出 t 时刻绕组的节点电位。式中 A' , B 矩阵中的元素与网络模型中的电阻、电容、电感参数有关, 而 C 矩阵中的元素只与电阻、电感参数有关^[6-7]。 $u(t)$ 为待求节点电压向量, $u(t - \Delta t)$ 和 $i(t - \Delta t)$ 分别为 $(t - \Delta t)$ 时刻的节点电压向量和电感支路电流。

2.2 过电压的电场分析计算

为预测发电机在过电压冲击下绝缘的安全程度, 需以过电压和定子电动势作为定子绕组各离散电位的边值条件, 计算出定子槽内暂态电场的实时分布^[8]。在过电压冲击发电机的过程中, 定子槽内的暂态电磁场可由达朗贝尔方程表示:

$$\begin{aligned} \nabla^2 A_m - \mu\epsilon\partial^2 A_m / \partial t^2 &= -\mu\delta_c \\ \nabla^2 \varphi &= \mu\epsilon\partial^2 \varphi / \partial t^2 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: A_m 为槽内矢量磁位; φ 为槽内标量磁位; δ_c 为电流密度; μ 和 ϵ 分别为槽内介质的导磁率和介电常数。发电机定子齿槽内绝缘介质各点的电场强度值为如式 (13)。

$$E = \nabla\varphi + \partial A_m / \partial t \quad (13)$$

此处仍采用时间离散化的方法求解方程。此外, 定子槽长度远大于槽截面的长、宽, 进而三维电场可简化为二维电场处理, 提高分析计算速度。实时监测每个离散时刻 t_i 的过电压冲击波 $U_i(t)$, 为时长有限元分析提供了电场区域的边界条件。

在计算定子槽内电场时, 忽略发电机定子槽内介质位移电流, 边界效应, 集肤效应以及铁芯齿部涡流效应, t_i 时刻槽内电场满足如下偏微分方程:

$$\begin{aligned} \Omega: \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon \frac{\partial U_t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon \frac{\partial U_t}{\partial y}) &= -\rho_t \\ L_1: U_t|_{r=i} &= U_0 \\ L_2: \epsilon \frac{\partial U_t}{\partial n}|_{r=i} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

式中: Ω 为发电机定子某槽在轴向某位置处沿径向槽截面的电场区域; U_t 为槽内场域电位函数; ϵ 为槽内场域介电系数; ρ_t 为槽内场域中积累的电荷密度; L_1 和 L_2 围成场域边界并具有在时间 $t=t_i$ 瞬时的第一、二类边界条件。

将槽内场域 Ω 离散成亚参三角单元 Ω_i , 利用有限元法 (FEM) 分析槽内电场分布。则大型发电机定子槽内有限单元中任意时刻的场强大小为:

$$E_t = |\nabla U_t| = \sqrt{(\sum_{i=1}^6 \frac{\partial \alpha_i}{\partial x} U_{ii})^2 + (\sum_{i=1}^6 \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} U_{ii})^2} \quad (15)$$

定子某槽截面绝缘介质中任意一点 P 的暂态场强为:

$$E_p = \sqrt{(\sum_{i=1}^6 \frac{\partial \alpha_i}{\partial x} U_{ii})^2 + (\sum_{i=1}^6 \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} U_{ii})^2}|_{p(x,y)} \quad (16)$$

式中: $\alpha_i/x, \alpha_i/y$ 的值由 FEM 数据库提供 (从有限元数学模型的分析计算中获得^[9]); $U_{ii} (i=1, 2, \dots, n)$ 的值则由实时数据库提供。

3 过电压的电场仿真分析

以在厂站中发生次数最多的操作过电压为例, 分别利用传统无源和新型有源电路模型进行场路综合分析计算, 对有 6 台机组, 装机容量为 330×10^4 kW 的水电站中的 6 号发电机 A 相定子绕组 1 号槽内的

绝缘状态进行分析, 比较计算结果优劣。

首先构造出操作过电压波形, 其数学模型为:

$$OA: u_a = \frac{U_m}{2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (0 < t < 120 \mu s) \quad (17)$$

$$AMJ: u_a = \frac{U_m}{2} (e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (t > 120 \mu s)$$

其中: $\tau_1=3\ 571 \mu s$ 、 $\tau_2=83.3 \mu s$, 波形如图 4 所示。由于过电压过程极短, 通常为几百微秒, 取时间步长为 $\Delta t=50 \mu s$, 采集此过电压波数据, 存入实时监测的数据库中。

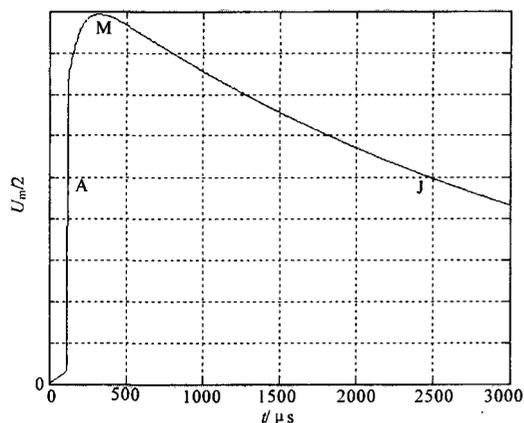


图 4 标准操作过电压波

Fig.4 Standard operating over-voltage waves

在过电压数据存入相应数据库后, 以采集到离散化的过电压数据和发电机运行参数为已知条件, 分别由传统的无源电路模型和新型的有源电路模型计算模型各节点电位, 得到电场第一、二类边界条件, 进而计算出定子槽内的暂态电场分布, 并将过电压各时刻电场分布计算结果存入 FEM 数据库中。以暂态电场分布情况作为判断绝缘介质是否存在安全隐患的依据。

本文仿真计算使用 Matlab 计算暂态电场的第一、二类边界条件^[10], ANSYS 有限元分析软件^[11]对数据进行电场分析。图 5 为定子槽内 FEM 网格剖分图。

在过电压侵入后, 选择两个典型时刻分析: 机端电压第一次过零点; 机端电压为过零点后第一个峰值时, 计算定子槽内的电场分布情况, 如图 6、7 所示。图 6 (a), 6 (b) 分别代表过电压波侵入后机端电压第一次过零点时, 由定子无源、有源电路模型计算出电场边界条件所绘制出的电场分布图 (场强大小由不同颜色表示)。图 7 (a)、7 (b) 表示在机端电压过零点后第一个峰值时依据两种电路模型计算出电场边界条件而绘制出的电场分布图。图 7 (c) 为电场强度所对应的色谱图。

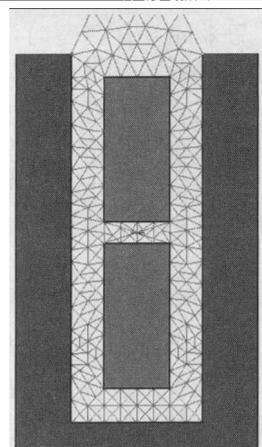


图 5 定子 1 号槽内耦合 FEM 网格剖分图

Fig.5 The net subdivision of the coupled finite elements inside the first stator slot

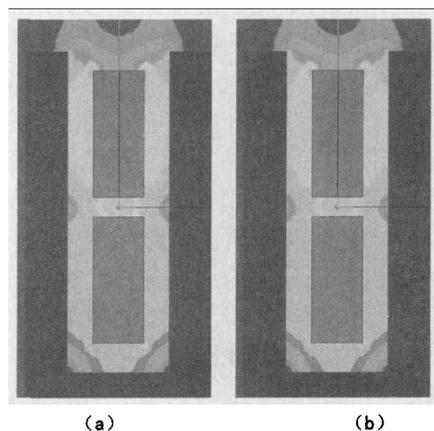


图 6 过电压在机端电压为零时侵入电路模型计算出的电场强度分布

Fig.6 Electric-field intensity distribution when stator terminal voltage is zero

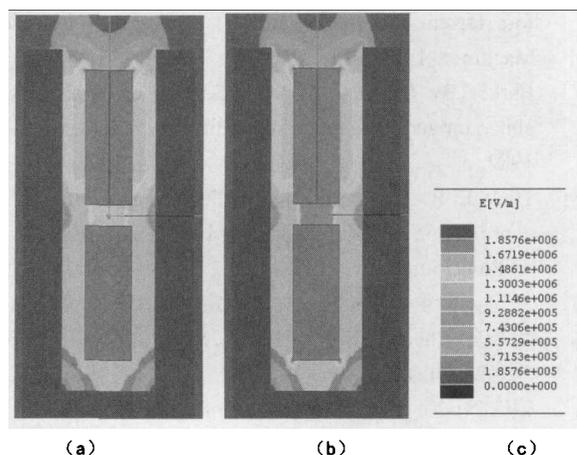


图 7 过电压在机端电压为峰值时侵入电路模型计算出的电场强度分布

Fig.7 Electric-field intensity distribution when stator terminal voltage is at peak

由图可知,在机端电压为零时,无源、有源电路模型计算出的电场边界条件相差无几,得到的电场分布图相似,这是由于有源电路模型中的电动势单元电压值为零,该电路模型与无源模型等价。但在机端电压为峰值时,有源电路模型由于有表征线棒切割磁感线的电动势单元作用,电场分布不同于无源电路模型。可以看到上下层线棒之间,下层线棒圆角处电场强度较无源模型计算结果大,与运行中的大型发电机实际情况更吻合。据此推断在过电压冲击下线棒圆角处和上层线棒侧表面与定子槽之间,尤其是上下层线棒之间场强过大,存在绝缘隐患。

4 结论

本文提出的大型发电机有源暂态电路模型,结合发电机场路综合分析,可在线监测发电机定子槽内电场分布情况,预测绝缘安全隐患。该模型考虑了正常工况下定子绕组产生的电动势,在定子绕组模型中加入了感应电动势单元,并将其按不同相角分布在不同定子槽内。此电路模型更符合发电机实际工作特点。通过有源暂态电路模型得到的计算结果可作为电机电场分析的边界条件,进而计算得到的电场分布更接近实际情况。实时监测并存储大型发电机出线端的过电压冲击波,利用 FEM 分析计算结合图像技术,对处于强电场下的绝缘发出预警信号,实现在线绝缘安全分析。

参考文献

[1] 李连贵,付岚贵.水轮发电机绝缘事故分析[J].东方电机,1992(1):29-31.
LI Lian-gui, FU Lan-gui. Analysis of insulation failures for turbine-generator units[J]. Dongfang Electrical Machine, 1992(1): 29-31.

[2] Barker B, Hodge J M. A decade of experience with generator and large motor reliability[C]. //CIGRE. Paris: 1982.

[3] Dick E P, Gupta B K. Review of generator surge coordination including generator breakers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(2): 599-605.

[4] 刘念,谢驰,滕福生.发电机定子绕组绝缘介质暂态电场分布的场路分析法[J].电力自动化设备,2006,26(2):1-4.
LIU Nian, XIE Chi, TENG Fu-sheng. Field-circuit analysis method of transient electric field in stator

winding insulation of generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(2): 1-4.

[5] 谢应璞.电机学[M].成都:四川大学出版社,1994.
XIE Ying-pu. Electrical machines[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1994.

[6] Guardado J L, Comick K J. Calculation of machine winding electrical parameters at high frequencies for switching transient studies[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996(1): 33-40.

[7] Guardado J L, Comick K J. A three-shape model for surge distribution studies in electric machines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1997(1): 24-31.

[8] 刘念,谢驰,滕福生.基于FEM的大型发电机快速暂态过电压分析[J].高电压技术,2003,29(4):21-23.
LIU Nian, XIE Chi, TENG Fu-sheng. Analysis of large generators under fast transient overvoltage based on finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(4): 21-23.

[9] Silvester P P, Ferrari R L. 电工中的有限元法[M].北京:科学出版社,1988.
Silvester P P, Ferrari R L. Finite elements for electrical engineers[M]. Beijing: Science Press, 1988.

[10] 飞思科技产品研发中心. Matlab7 基础与提高[M].北京:电子工业出版社,2005.
Fei Si Product R&D Center. Matlab7 basement and improvement[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

[11] 龚曙光,谢贵兰. ANSYS 操作命令与参数化编程[M].北京:机械工业出版社,2004.
GONG Shu-guang, XIE Gui-lan. ANSYS operation commands and parameters programming[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[12] 胡之光. 电机电磁场的分析与计算[M].北京:机械工业出版社,1982.
HU Zhi-guang. Electromagnetic field analysis and calculation[M]. Beijing: China Machine Press, 1982.

收稿日期:2009-10-13; 修回日期:2009-11-22

作者简介:

崔东君(1984-),男,硕士研究生,从事高压电气设备的故障诊断技术研究; E-mail: cdj1122@126.com

刘念(1956-),男,教授,博士,主要从事电力设备故障诊断方面的研究;

袁博(1984-),男,研究实习员,从事资源经济管理工作。