

大型汽轮发电机端部电磁场数值分析*

吴永霞¹, 张 甲¹, 梁旭彪², 倪光正¹, 黄 磊², 咸哲龙², 杨仕友^{1*}

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 上海汽轮发电机有限公司, 上海 200240)

摘要: 为解决大型汽轮发电机在不同运行条件下端部绕组的动力响应问题, 基于全变量法, 首先建立了汽轮发电机动态性能计算机仿真的等效电路模型和计算方法, 以及端部涡流场、电磁力数值分析的三维有限元模型和计算方法; 然后应用前述的模型和计算方法, 采用有限元分析软件 ANSYS, 对某台大型汽轮发电机不同运行工况下的端部动态涡流场、电动力进行了数值分析和计算。研究表明, 该方法在大型汽轮发电机绕组工程设计方面具有一定的指导意义。

关键词: 汽轮发电机; 端部涡流场; 电磁力; 有限元方法

中图分类号: TM311; TM153

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)03-0249-04

Numerical calculation of transient eddy current fields and electromagnetic forces acting on end winding of large turbogenerators

WU Yong-xia¹, ZHANG Jia¹, LIANG Xu-biao², NI Guang-zheng¹,

HUANG Lei², XIAN Zhe-long², YANG Shi-you¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Shanghai Turbo-generator Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: To solve the force response of end windings of large turbo-generators, a circuit model and method based on full variable methods for transient performance simulations were established, a three dimensional finite element model and method for transient eddy current fields and electromagnetic forces acting on the end windings, of large turbo-generators, were proposed. Numerical results on a prototype large generator using the proposed model and method based on ANSYS commercial software were reported. The experiments results provide guidelines for engineering applications of large turbo-generators.

Key words: turbo-generator; eddy current field in the end region; electromagnetic force; finite element method

0 引言

大型汽轮发电机端部绕组为一组庞大的载流导体, 在运行过程中, 这些载流导体将承受很大的电动力, 运行过程中由电动力引发的机械振动时常导致绕组及引线的绝缘磨损和疲劳断裂破坏, 特别是在发生故障时, 作用在定子绕组的短时冲击力可能超过额定运行状态的 100 倍以上, 其危害相当严重^[1-2]。因此, 大型汽轮发电机端部绕组电动力及其动力响应是汽轮发电机设计必须考虑的主要内容之一, 它直接关系到

发电机组的运行性能和安全稳定性。因此, 准确的端部绕组电动力和动力响应计算不仅是制造厂追求的目标, 同时也是电机运行部门关注的重要问题之一。而不同运行工况下发电机动态性能和端部涡流场、电动力的分析和计算则是端部绕组动力分析的基础。

长期以来, 大型汽轮发电机动态性能和端部涡流场、电动力的研究, 同步于科学技术的发展进程, 方兴未艾^[3-6]。然而, 由于端部绕组及其固定结构件结构复杂, 定子线棒出槽后弯曲成空间曲线, 给计算模型的建立带来很大困难; 另一方面, 如何精确计算各种动态工况(包

收稿日期: 2011-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077114)

作者简介: 吴永霞(1984-), 女, 湖北十堰人, 主要从事电工理论与新技术方面的研究。E-mail: wuyongxia15@yahoo.com.cn

通信联系人: 杨仕友, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: shiyouyang@yahoo.com

括短路工况)下的端部绕组及其固定结构件的电磁力及其分布规律,也是目前国内外学术和工程界尚未完全解决的难点问题之一。近年来,随着电磁场数值计算理论和计算方法的不断发展和日益完善,以及计算机技术的飞速发展,特别是电磁场商业数值计算软件的丰富和完善,应用电磁场数值计算方法研究大型汽轮发电机中的三维端部涡流场、电动力已成为可能。

有鉴于此,本研究建立大型汽轮发电机动态特性数值仿真、端部涡流场、绕组电动力的三维有限元计算模型和计算方法,并应用 ANSYS 商用软件对某台大型汽轮发电机的端部涡流场和电动力进行分析和计算,以期获得不同运行工况下端部涡流场以及绕组的电磁力的分布规律,为大型汽轮机工程分析、设计提供参考。

1 发电机动态性能的仿真计算模型

为计算不同运行工况下汽轮发电机的动态性能,本研究采用等效电路法建立整个系统的动态模型。计算对象为如图 1 所示的单机无限大系统。

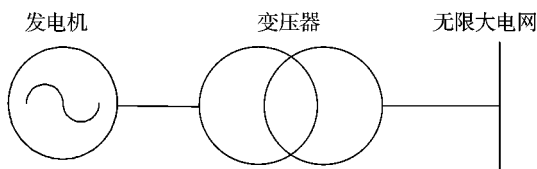


图 1 发电机动态性能仿真计算对象示意图

1.1 发电机模型

本研究采用直接相量法建立发电机模型。在该模型中,定子绕组为实际的 a 、 b 、 c 绕组,转子绕组为励磁绕组以及等效 D 、 Q 绕组。按一般发电机惯例规定的参考方向^[7],发电机的动态方程为:

$$\{U\}=[R]\{I\}+[L]p\{I\}+\omega[G]\{I\} \quad (1)$$

式中: $\{U\}=[u_a \ u_b \ u_c \ u_F \ u_D \ u_Q]^T$, $\{I\}=[i_a \ i_b \ i_c \ i_F \ i_D \ i_Q]^T$; $[R]$, $[L]$ —电阻和电感系数矩阵; $[G]=\partial L/\partial \theta$; ω —发电机转子的实际转速, $\omega=p\theta$, rad/s; p —微分算子。

1.2 变压器模型

假定:

- (1) 三相变压器相间互感为零;
- (2) 变压器没有铁耗;
- (3) 等效电路中忽略励磁支路。

本研究将二次侧绕组的电阻和漏抗折算到一次侧并和一次侧合并,用等效阻抗 R_T+jX_T 表示。采用实在值系统,在等效电路中增加只反映变比的理想变压器。由此,得到变压器的等效电路模型,如图 2 所示。由此可得,变压器电路的方程为:

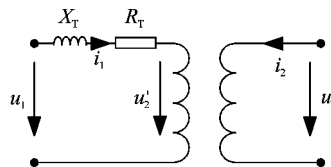


图 2 变压器模型示意图

$$\begin{cases} \{U_1\}=[L_T]p\{I_1\}+[R_T]\{I_1\}+\{U_2'\} \\ \{I_2\}=-[K]\{I_1\} \\ \{U_2'\}=[K]\{U_2\} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\{U_1\}=[u_{1A} \ u_{1B} \ u_{1C}]^T$, $\{I_1\}=[i_{1A} \ i_{1B} \ i_{1C}]^T$, $\{U_2\}=[u_{2a} \ u_{2b} \ u_{2c}]^T$, $\{U_2'\}=[u_{2'A} \ u_{2'B} \ u_{2'C}]^T$, $\{I_2\}=[i_{2a} \ i_{2b} \ i_{2c}]^T$, $[L_T]$ —电感系数矩阵, $[R_T]$ —电阻矩阵, $[K]$ —变比系数矩阵。

1.3 输电线方程

输电线方程用集中参数代表,忽略相与相及相与地之间的电容,其微分方程为:

$$\{U_L\}=[L_L]p\{I_L\}+[R_L]\{I_L\} \quad (3)$$

式中: $\{U_L\}=[u_{1a} \ u_{1b} \ u_{1c}]^T$, $\{I_L\}=[i_{1a} \ i_{1b} \ i_{1c}]^T$, $[L_L]$ —电感系数矩阵, $[R_L]$ —电阻矩阵。

1.4 故障线路(投切操作)的处理

故障模型是建立动态模型所要解决的比较困难的问题之一,而适合于各种非正常运行工况的通用故障模型的建立尤为困难。为此,通过引入全变量法,本研究提出了一种通用、适合于不同故障工况的故障模型处理方法,即将故障约束条件进行时间离散,作为离散故障条件与系统中其他方程联立求解,解决了这一问题。

故障线路示意图如图 3 所示,其中 B 点发生三相短路故障,有:

$$\begin{cases} U_{1p}=0 \\ \sum I_{1p}-\sum I_{1p}=0 \\ (P=A, B, C; p=a, b, c) \end{cases} \quad (4)$$

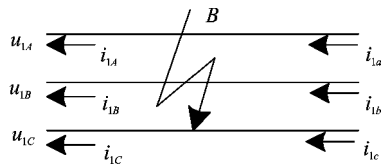


图 3 故障线路示意图

1.5 不同模型的接口

本研究采用直接相量法建立了发电机模型,应用全变量法求解整个电磁暂态过程,因此不同电路模型接口非常方便。在选择数值离散方法时,不仅要考虑到方法本身的误差和数值稳定性,同时还要有利于数学模型间的接口和故障处理。为此,本研究采用全变量法求解整个电机的动态过程,提出了新的数模接口方法和故障处理模型。利用数值稳定性和精度都比较好的 Crank-Nicolson 方法对微分方程组进行时间离

散。具体原理如下:

本研究设描述整个系统的微分方程组(包括故障和接口条件)为:

$$\frac{dY}{dt} = f_1(Y, Z, X, t) \quad (5)$$

$$f_2(Y, Z, X) \quad (6)$$

式中: Y —状态变量, Z —非状态变量, X —输入量。

利用 Crank-Nicolson 公式将式(5)对时间差分,有:

$$Y_{n+1} = Y_n + \frac{h}{2} [f_1(Y_{n+1}, Z_{n+1}, X_{n+1}, t_{n+1}) + f_1(Y_n, Z_n, X_n, t_n)] \quad (7)$$

再将式(6)在 $n+1$ 时刻离散,有:

$$f_2(Y_{n+1}, Z_{n+1}, X_{n+1}) = 0 \quad (8)$$

联立式(7)和式(8),便可得到动态过程的时间离散方程组。编制相应的计算机仿真软件,即可进行大型汽轮发电机不同故障运行工况下动态电磁性能的仿真研究。

2 端部涡流场、电动力的三维有限元模型

大型汽轮发电机定子端部结构非常复杂,包括定子铁芯、绕组、压圈、压指、磁屏蔽等。由于本研究主要目的是计算定子端部绕组所受电动力,端部涡流场、电动力的三维有限元计算模型如图4所示。

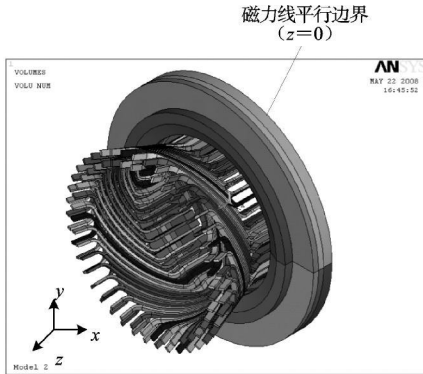


图4 汽轮发电机端部的计算模型

根据图4的计算模型,整个计算区域可划分为3种不同类型的子区域,如图5所示。本研究采用矢量磁位 A 和标量电位组成的位函数对,则其控制方程为^[8]:

$$B = \nabla \times A \quad (9)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \mu \quad (10)$$

$$\nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \cdot A) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \varphi = J_s \quad V_1 \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \left(-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \varphi \right) = 0 \quad V_1 \quad (12)$$

$$\nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \cdot A) = 0 \quad V_2 \quad (13)$$

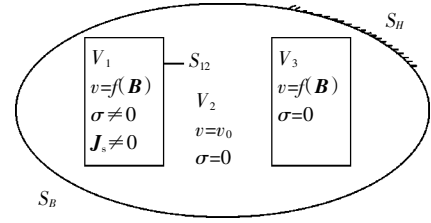


图5 有限元计算模型的求解区域划分

$$\nabla \times (v_0 \nabla \times A) - \nabla (v_0 \nabla \cdot A) = 0 \quad V_3 \quad (14)$$

对应的边界条件为:

(1) 远场边界条件(端盖和电机外壳处):

$$A = 0 \quad (15)$$

(2) 平行对称边界条件($z=0$ 表面):

$$B_n = 0, (n=z), J_1 = 0, (t=x, y) \Rightarrow A_x = A_y = 0, \varphi = 0 \quad (16)$$

本研究计算出发电机端部三维涡流场后,载流线圈在磁场中所受的电动力可根据下式计算:

$$dF = idl \times B \quad (17)$$

式中: i —线圈中通过的电流, B —线圈所在处的磁感应强度, dF —作用于元长度 dl 上的电磁力。

一般而言,在有限元分析中,每一单元的磁感应强度 B 和电流密度 J 确定后,单元的力密度可由下式确定:

$$f_e = J_e \times B_e \quad (18)$$

3 计算实例

根据前述的计算模型和方法,本研究以上海汽轮发电机有限公司设计、制造的某台汽轮发电机为计算对象,对其不同运行工况下动态性能和端部涡流场、电动力进行了分析和计算。限于篇幅,这里仅给出了空载二相短路运行工况下的分析、计算结果。在空载条件下定子 b 相和 c 相发生突然相间短路后7个周期内的电流变化曲线如图6所示,这里电流值以标么值给出。显然,发生突然两相短路后,经过半个周期时

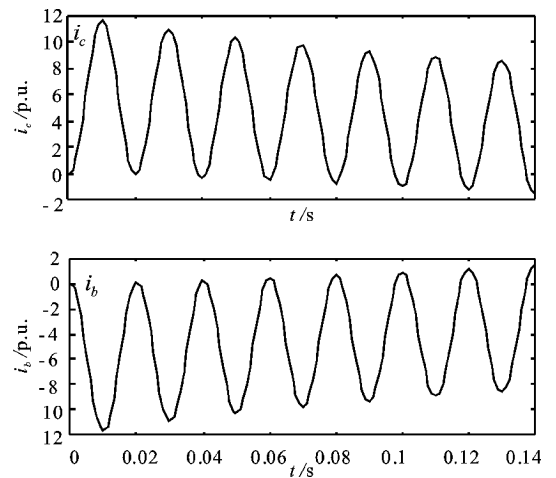


图6 二相突然短路后定子 b 、 c 相电流变化情况

间后 b 相和 c 相电流达到最大值。

本研究将前述的电流值作为已知条件代入三维涡流场和电动力有限元模型和方法, 利用 ANSYS 商用软件^[9-10], 可进一步分析两相突然短路条件下端部的涡流场和电力的分布规律。由于计算机资源的限制, 本研究取 3 个典型时刻进行分析:

(1) $t=0.001$ s。此时, 发电机端部 B 相单根绕组上的磁感应强度分布和电磁力分布分别如图 7、图 8 所示。

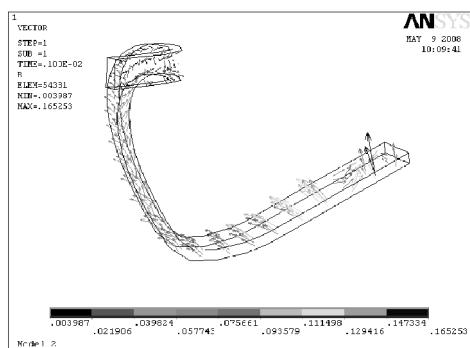


图 7 0.001 s 时刻 B 相单根绕组的磁感应强度分布

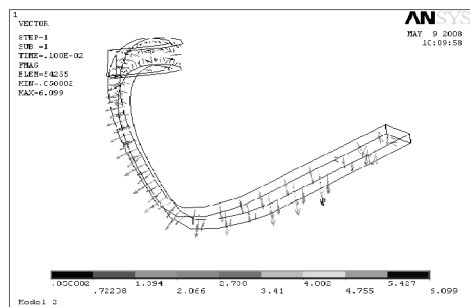


图 8 0.001 s 时刻 B 相单根绕组的电磁力分布

(2) $t=0.01$ s。这一时刻 B 相单根绕组上电磁力分布如图 9 所示。

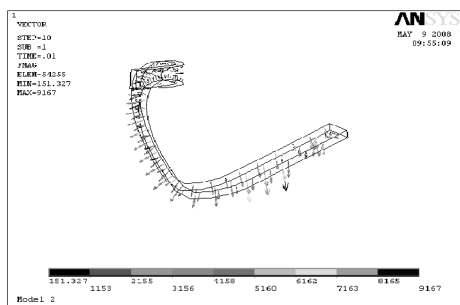


图 9 0.01 s 时刻 B 相单根绕组的电磁力分布

(3) $t=0.02$ s。该时刻 B 相单根绕组上的电磁力分布如图 10 所示。

由于大型汽轮发电机突然两相短路为不对称运行, 对比上述结果可以看出, 汽轮发电机端部绕组区域的电磁力方向与轴向成一定夹角, 即端部绕组受到的电磁力包含径向力和轴向力; 由于 A 相绕组中电流为零, 发电机端部绕组中 A 相导条上没有电磁力作

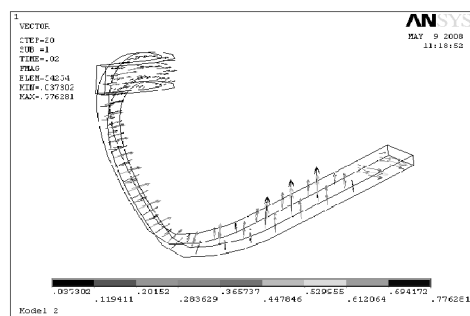


图 10 0.02 s 时刻 B 相单根绕组的电磁力分布

用; 且汽轮发电机突然两相短路后, 发电机端部绕组区域的磁感应强度和电磁力略大于汽轮发电机三相负载突然短路后的值, 并随着短路电流的增大, 在大约 0.01 s 时达到最大值。

4 结束语

本研究通过对大型汽轮发电机动态性能仿真、端部动态涡流场和电动力数值分析和计算, 得出了发电机端部绕组在负载两相突然短路等不同工况下的磁通密度和电动力分布规律, 这为汽轮发电机绕组结构的优化设计以及端部绕组的动力响应分析奠定了基础, 在实际工程应用中具有一定的指导意义。

参考文献 (References):

- [1] 胡宇达, 邱家俊. 大型汽轮发电机定子端部绕组整体结构的电磁振动[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 93-98.
- [2] NOAH S T, SUNDARARAJAN P. Significance of considering nonlinear effects in predicting the dynamic behavior of rotating machinery[J]. *Journal of Vibration and Control*, 1995, 1(4): 431-458.
- [3] 王鸿鹄, 梁艳萍, 张建涛, 等. 空冷汽轮发电机定子端部电磁场和温度场耦合计算[J]. 大电机技术, 2010(4): 5-8, 19.
- [4] SENSKE K. Vibration form of stator end winding when electric fault occurs in turbogenerator[J]. *Foreign Large Generator*, 1998(2): 25-33.
- [5] KOMETANI H. 电磁场数值分析在大型间接氢冷汽轮发电机上的应用[J]. 国外大电机, 2009(3): 28-33.
- [6] 胡宇达, 邱家俊. 大型汽轮发电机定子端部绕组整体结构的电磁振动[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 93-98.
- [7] 高景德, 张麟征. 电机过渡过程的基本理论及分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [8] 谢德馨, 杨仕友. 工程电磁场数值分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] 沈萌红, 钱孝华. ANSYS 在超声波电机设计中的应用[J]. 机电工程, 2009, 26(3): 85-87.
- [10] 何雪法, 蒋彦收, 孙志礼. 基于 ANSYS/PDS 模块的高速电主轴刚度可靠性分析[J]. 机电工程, 2011, 28(6): 645-647, 692.

[编辑: 罗向阳]