

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.04.010

汽轮发电机稳态负序工况仿真模型 及其对负序损耗计算结果的影响

韩力¹, 李凌川¹, 周光厚^{1,2}

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;
2. 东方电机有限公司 研究试验中心, 四川 德阳 618000)

摘要: 稳态负序能力是大型汽轮发电机安全可靠运行的重要技术指标之一, 而稳态负序损耗的准确计算是确定稳态负序能力的关键和基础。介绍了模拟发电机稳态负序运行工况的传统模型, 针对其不足提出了一种新的不对称负载模型, 并对 2 种模型所反映的物理机理和优缺点进行了对比分析。在此基础上, 以一台 1 550 MW 的大型 4 极核能汽轮发电机为例, 采用场路耦合的二维非线性时步有限元方法, 结合 2 种仿真模型对其稳态负序损耗分别进行了计算, 并对计算结果进行了详细分析。结果表明: 相对于传统的负序模型, 笔者提出的不对称负载模型充分考虑了磁饱和与转子附加损耗的影响, 计算出的稳态负序损耗更接近实际情况, 为准确考核大型汽轮发电机的稳态负序能力奠定了基础。

关键词: 汽轮发电机; 负序; 损耗; 电磁场; 有限元

中图分类号: TM311; TM155 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2015)04-0067-08

Steady-state negative sequence simulation models and their influences on loss calculation results of turbogenerator

HAN Li¹, LI Lingchuan¹, ZHOU Guanghou^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China; 2.Research and Test Center, Dongfang Electric Machinery Company Limited, Deyang 618000, Sichuan, P.R.China)

Abstract: Steady-state negative sequence capacity is one of the important factors to evaluate the operation safety and reliability of large turbogenerators. The accurate calculation of steady-state negative sequence loss is the key and the foundation to determine the steady-state negative sequence capacity. This paper introduces the traditional model which simulates the negative sequence operating condition of turbogenerators. And then, a new type of asymmetric load model is proposed to simulate the negative sequence operating condition. The physical mechanism, the advantages and disadvantages of these two models are compared and discussed. Furthermore, based on these two models, the steady-state negative sequence loss of a large 4-pole 1 550 MW nuclear power turbogenerator is calculated by field-circuit coupling nonlinear time stepped 2D finite element method, and the results are analyzed in detail. The results show that, compared with the traditional model, the asymmetric load model presented in this paper

收稿日期: 2015-03-20

基金项目: 国家科技重大专项子课题(2012ZX06002-017-02)。

Supported by National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(2012ZX06002-017-02).

作者简介: 韩力(1963-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电机设计与控制研究,(E-mail)hanli@cqu.edu.cn。

takes into account the factors such as the magnetic saturation and the rotor additional loss, which makes the calculated steady-state negative sequence loss closer to the actual situation and establishes the foundation for the accurate assessment of turbogenerator's steady-state negative sequence capacity.

Key words: turbogenerator; negative sequence; loss; electromagnetic field; finite element

由于电网输电线路阻抗不对称或负荷不对称,大型汽轮发电机在运行中有时会处于长时间的不对称运行状态。根据对称分量法,这时发电机定子绕组中的电流含有正序、负序和零序电流分量^[1-3]。其中的负序电流分量称之为稳态负序电流,而发电机中性点通常不接地或者经高阻抗接地,零序电流很小,可以忽略。稳态负序电流在发电机中建立的负序旋转磁场将切割转子,使转子表面各部件感应出 2 倍工频电流,产生损耗和发热,降低转子构件机械性能,甚至导致转子结构遭到严重破坏^[3-5]。

为此,在大型汽轮发电机设计阶段,将对其在不同负序程度下转子各部件的稳态负序损耗及转子温升进行计算,确定发电机能承受的最大负序程度,即发电机的稳态负序能力。最终校核其稳态负序能力是否达到设计要求,为发电机安全可靠运行提供参考依据^[6-7]。稳态负序程度定义为稳态负序电流分量与额定电流有效值之比 I_-/I_N ,其大小直接反映负序程度的大小^[8-9]。综上所述,大型汽轮发电机稳态负序能力的校核是以稳态负序损耗为基础,负序损耗计算结果的准确性将直接影响到负序能力评估结果的准确性。

稳态负序损耗包括以下关键部件及接触面的损耗:转子槽楔、转轴本体表层、阻尼条、转轴与护环接触面、转子槽楔与护环接触面、转子短槽楔间的接触面、护环本体。计算汽轮发电机稳态负序损耗主要有两大类方法:解析法^[10-11]和有限元法^[6-7,12-14]。为使计算结果更准确,现有的研究大多采用有限元法。

使用有限元法计算汽轮发电机的稳态负序损耗,关键在于如何对负序工况进行准确模拟。从现有文献来看,稳态负序工况模拟方法都参考了同步发电机负序电流承受能力试验方法^[15]:假设发电机定转子保持固定不动,在定子绕组中通入 2 倍工频负序电流来模拟负序工况^[6-7,12-13]。现有报道中少量对 4 极汽轮发电机稳态负序损耗的计算也沿用了以上模型^[14]。

然而,传统的稳态负序工况仿真模型忽略了一些重要因素:

1) 未考虑定转子铁芯的磁饱和。现有的仿真模型只考虑了负序磁场,因为加载的负序电流较小^[15],所以定转子铁芯磁密很低,与大型汽轮发电机实际运行时铁芯处于较高磁饱和的状态不相符。磁饱和程度不同带来的铁芯磁导率偏差将对负序磁场、负序感应电流的集肤效应产生较大影响,并最终影响负序损耗的大小和分布。

2) 忽略了发电机主极磁场和电枢正序磁场在转子表面产生的附加损耗。汽轮发电机定转子开槽引起的气隙磁导谐波磁场在转子铁芯中将产生较大的空载附加损耗;发电机带负载后,漏磁场及谐波磁场也将在转子铁芯及表面构件中引起较大的负载附加损耗^[16-17]。当发电机处于稳态负序工况时,附加损耗依然存在,而传统的模型未将其纳入考虑和计算范围。

目前,稳态负序损耗的研究大多针对 2 极汽轮发电机,国内 4 极核能汽轮发电机的自主设计研制尚处起步阶段,对其稳态负序损耗的研究还很少。然而,4 极与 2 极汽轮发电机的结构、材料有较大的差别,稳态负序损耗的大小和分布规律也发生了新的变化,需要进行深入研究。

综上所述,传统稳态负序工况仿真模型存在一定的缺陷,需要进一步改进以获得更准确的仿真模型。

为此,笔者提出了一种新的不对称负载模型来模拟大型汽轮发电机的稳态负序工况,并使用 2 种模型对一台 1 550 MW 的大型 4 极核能汽轮发电机的电磁场和稳态负序损耗进行了计算和分析比较,得出了一些有益的结论,为稳态负序损耗的精确计算提供了理论依据和支持。

1 稳态负序工况仿真模型

1.1 不对称负载模型

为了全面考虑多种不同因素对稳态负序损耗的影响,笔者针对传统的稳态负序工况模拟方法存在的问题,提出一种新的“不对称负载模型”。其基本思想为:保持发电机定子固定不动,转子以同步速旋转,并在励磁绕组中加入额定励磁电流,假设发电机定子三相对称绕组与三相不对称负载相连,通过调节负载的不对称程度来模拟发电机实际运行时的不同负序程度。

传统模型在定子绕组中直接加载定量的负序电流,负序电流大小以及负序程度可以直接控制。而不对称负载模型定子三相绕组中的电流与实际情况相近,包含有正序和负序分量,其中的负序电流分量需要使用对称分量法根据定子三相不对称电流进行计算才能得到,具体计算方法^[18]如下。

假设定子三相稳态电流有效值分别为 $I_A=a, I_B=b, I_C=c$, 则负序电流分量有效值为

$$I_- = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2}{6} - 2 \cdot \frac{s(s-a)(s-b)(s-c)}{3}}, \quad (1)$$

其中

$$s = \frac{a + b + c}{2}. \quad (2)$$

在仿真时,通过调节三相负载的不平衡程度来实现对负序电流分量的调节,从而达到控制负序程度的目的。

与发电机对称稳态运行类似,在不对称负载模型中存在主极磁场和电枢反应磁场,因此,发电机内的磁饱和与转子表面的附加损耗都将被考虑在内。

为了与传统模型进行比较,现将2种模型的具体设置列出,如表1所示。

表1 2种模型的具体设置

Table 1 The specific settings of two models

模型名称	定子设置	转子设置
传统模型	加载2倍工频 负序电流	固定不动, 励磁绕组短接
不对称 负载模型	接不对 称三相负载	同步旋转,励磁绕 组通额定励磁电流

1.2 仿真模型方案设置说明

下面以一台1550 MW的大型4极核能汽轮发电机为例,使用不同仿真模型对其要求负序程度下的稳态负序电磁场和损耗进行计算和分析,发电机的基本参数如表2所示。

表2 大型核能汽轮发电机的基本参数

Table 2 Basic parameters of large nuclear power turbo generator

参数名称	数值	参数名称	数值
额定功率/MW	1 550	额定功率因数	0.9(滞后)
额定电压/kV	27	额定转速/(r · min ⁻¹)	1 500
额定电流/A	36 827	极数	4
额定励磁电流/A	7 140	定子槽数	96

根据中国国家标准和国际电工委员会制订的电机标准,这一容量级别的大型汽轮发电机稳态负序能力要求达到5%^[8-9],而用户对该汽轮发电机的稳态负序能力要求更为苛刻,为6%。下面以要求较高者为准,分析计算该发电机在6%负序程度下(即 $I_-/I_N=6\%$)的稳态负序损耗。

为了比较全面地研究不同因素对稳态负序损耗的影响,除了对使用传统模型和不对称负载模型对发电机负序电磁场和损耗进行计算外,还同时设置了另外2种仿真模型作为对照。为了便于今后的对比分析,现首先对4种仿真模型进行解释,如表3所示。

表 3 仿真模型方案设置

Table 3 Project settings of simulation model

模型编号	模型说明	负序程度/%
1	传统模型	6
2	不对称负载模型	6
3	对称额定运行模型	0
4	传统模型(加额定励磁电流)	6

通过模型 1、2 计算结果的对比,可研究 2 种基本模型对稳态负序损耗计算结果的不同影响。

设置模型 3 是为了分析对称额定运行工况下发电机转子表面各部件本身存在的附加损耗大小。

为了定性比较铁芯磁饱和对负序磁场和损耗的影响,人为设置模型 4。模型 4 是在模型 1 的基础上,励磁绕组中加入额定励磁电流,使发电机各部分达到一定的磁饱和程度,从而定性模拟发电机的磁饱和状态。

2 场路耦合时步有限元方法

4 极汽轮发电机取消了转子大齿表面的月牙槽结构,月牙槽两侧的负序感应电流挤流区^[5-6]在 4 极发电机中不再存在,如图 1 所示。

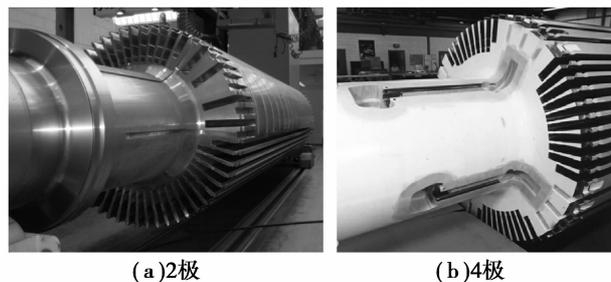


图 1 两种大型汽轮发电机转子转轴结构

Fig.1 The rotor shaft structure of two kinds of large turbo generator

2.1 电磁场定解问题

笔者采用场路耦合的二维非线性时步有限元方法对 1 550 MW 大型 4 极核能汽轮发电机的电磁场与损耗进行分析和计算。考虑到 4 极发电机的对称性,取四分之一电机作为求解区域,其二维有限元网格剖分如图 2 所示。为了使计算更加准确,将转轴表面负序涡流区、转子槽楔、阻尼条及气隙剖分进行了加密处理。

采用矢量磁位进行求解,假设定子铁芯外圆边界 AB 处无漏磁,磁力线与之平行,矢量磁位为 0。在沿径向两条的边界 AC 、 BC 上,各对应点之间的矢量磁位满足半周期条件。在二维情况下,发电机电磁场的定解问题可表述为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \dot{\mathbf{A}}_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \dot{\mathbf{A}}_z}{\partial y} \right) = -\dot{\mathbf{J}}_z + j\omega\sigma \dot{\mathbf{A}}_z, \\ \dot{\mathbf{A}}_z|_{AB} = 0, \\ \dot{\mathbf{A}}_z|_{AC} = -\dot{\mathbf{A}}_z|_{BC}; \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\dot{\mathbf{A}}_z$ 为矢量磁位; $\dot{\mathbf{J}}_z$ 为源电流密度矢量; ν 为磁阻率; ω 为角频率; σ 为电导率。

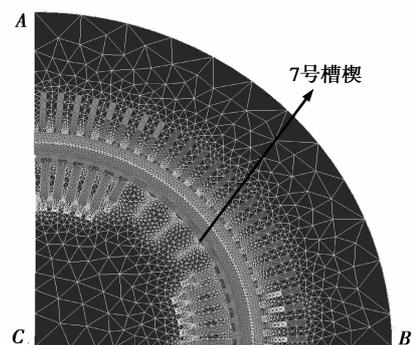


图 2 求解区域及其有限元网格剖分

Fig.2 Solution region and its finite element mesh

2.2 耦合电路

耦合电路主要由感应耦合元件、定转子绕组耦合元件、关键接触面等效电阻、护环等效电阻组成。

在表3中,模型1、4的耦合电路中定子三相对称绕组通过直接加载负序电流;在模型2、3的耦合电路中,定子三相对称绕组与等效负载相连,并通过式(1)、(2)控制负序程度,如图3(a)所示。

对于转子阻尼系统,耦合电路中的阻尼条耦合元件(OD_1, OD_2, \dots, OD_m)与有限元模型中相应的阻尼条对应耦合,计算时二者进行数据交换求解。而阻尼系统两端的阻尼环被等效为电路元件(R_1, L_1)组成的电网络,如图3(b)所示。转子表层的槽楔和转轴涡流区以及护环所组成一个复杂负序感应电流通路,耦合电路中槽楔及转轴涡流区耦合元件(OR_1, OR_2, \dots, OR_n)与有限元模型中相应的槽楔及转轴涡流区对应耦合,护环和关键接触面等效为电路元件(R_2, R_3)组成的电网络来进行模拟和计算求解,如图3(c)所示。

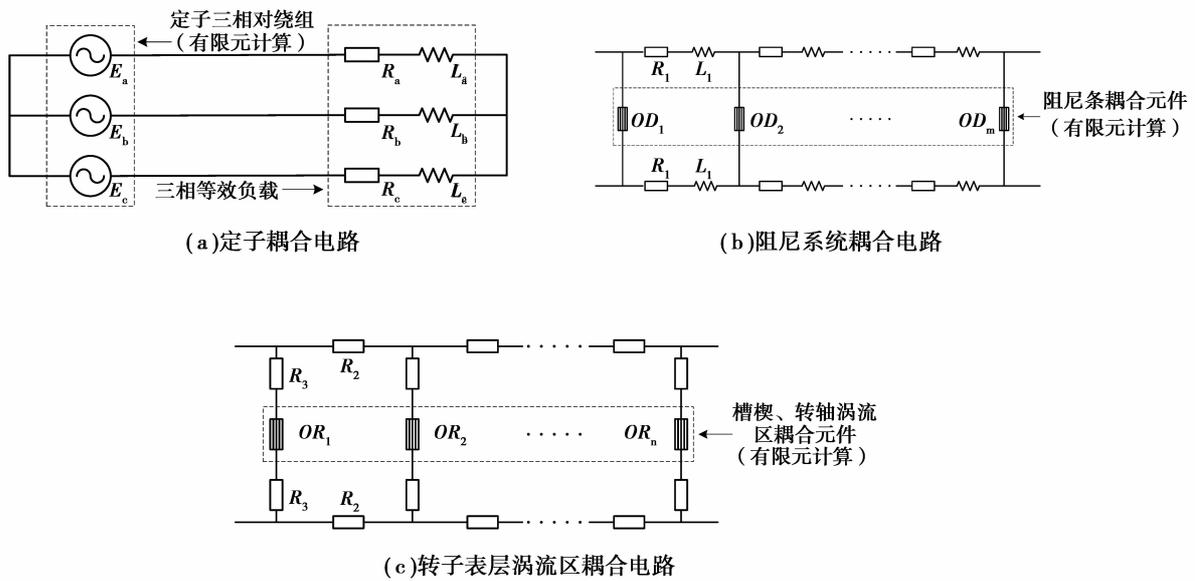


图3 耦合电路模型
Fig.3 Coupled circuit model

以上两部分组成了稳态负序损耗计算的场路耦合模型。接下来,基于该模型对发电机稳态负序电磁场进行求解,进而得出磁场分布、负序感应电势、感应电流以及稳态负序损耗,并对计算结果进行对比分析。

2.3 负序损耗计算方法

负序损耗主要分布于转子表层各部件内部,包括转子槽楔、阻尼系统、转轴表层和护环。此外,一些关键接触面存在较大的接触电阻,负序感应电流流经这些接触面时也会产生较大损耗,这些接触面包括转轴-护环接触面、槽楔-护环接触面、短槽楔(一条长转子槽楔由若干短槽楔拼接成)间接触面。

不同部件及关键部位的损耗计算,根据计算的方法不同分为两大类。

第一类,采用有限元方法计算的部件,即各耦合元件对应的涡流区域,这些部件包括槽楔、转子转轴涡流区、阻尼条。

涡流区的涡流密度为

$$J = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + \sigma \frac{u}{L}, \tag{5}$$

式中: σ 为涡流区材料的电导率; L 为涡流区域的轴向长度; u 为涡流区域对应耦合元件的电压。

涡流区的一个剖分单元的电和损耗^[19]为

$$I_e = \iint_{\Delta_e} J dx dy, \tag{6}$$

$$p_e = I_e^2 \frac{L}{\sigma \Delta_e}; \tag{7}$$

式中： I_e 为一个剖分单元的电流； p_e 为一个剖分单元的损耗； Δ_e 为一个剖分单元的面积。

因此，一个涡流区域内的总损耗为

$$p_1 = \sum_{e=1}^k p_e, \tag{8}$$

式中： k 为涡流区内剖分单元总数。

第二类，在耦合电路中计算的部件和关键部位，即耦合电路中的各等效电阻和接触电阻对应的各部件或关键接触面，这些部件和关键接触面包括护环、转轴-护环接触面、槽楔-护环接触面、短槽楔间接触面。

在耦合电路中计算的部件和接触面的损耗计算方法为

$$p_2 = I_R^2 R, \tag{9}$$

式中： I_R 为流经等效电阻或接触面电阻电流的有效值； R 为对应的等效电阻或接触面电阻。

3 计算结果及对比分析

3.1 计算结果

模型 1~4 得到的发电机磁密云图如图 4 所示。

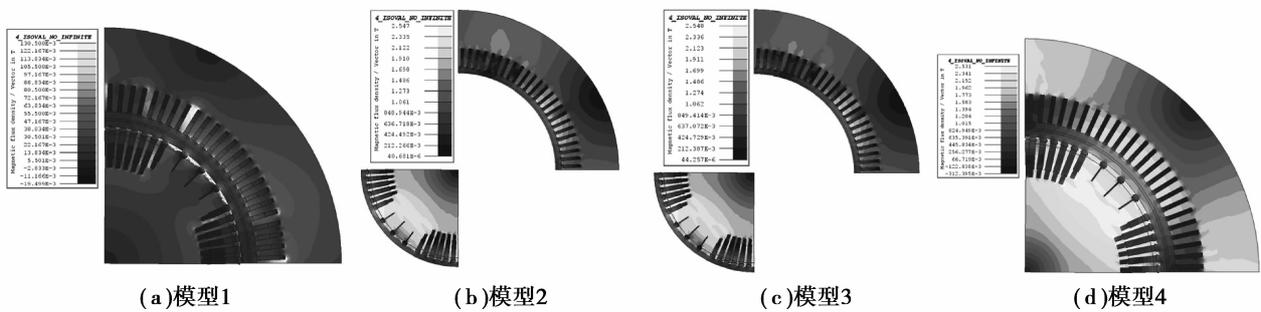


图 4 模型 1~4 计算出的磁密云图

Fig.4 The magnetic cloud diagram of model from one to four

各模型关键部位及总稳态负序损耗计算结果如表 4 所示。

表 4 各模型损耗计算结果

kW

Table 4 Calculation results of different models

模型编号	1	2	3	4
槽楔损耗	29.0	27.2	9.7	14.0
转子转轴损耗	10.0	21.4	11.5	9.1
阻尼条损耗	0.40	0.50	0.01	0.40
转轴-护环接触面损耗	0.2	1.6	0.6	1.0
槽楔-护环接触面损耗	3.1	2.9	0.6	1.7
短槽楔间接触面总损耗	12.1	11.1	2.4	6.7
护环损耗	4.9	4.8	1.1	2.9
总损耗	59.7	69.5	25.91	35.8

为了更好地分析 2 种不同基本模型对计算结果带来的影响，取转子大齿上的 7 号槽楔(如图 2 所示)作为样本，研究分析其一个周期(0.01 s)内负序感应电势、电流以及损耗的波形。模型 1、2 计算出的 7 号槽楔负序感应电势、电流、损耗波形对比图如图 5 所示。

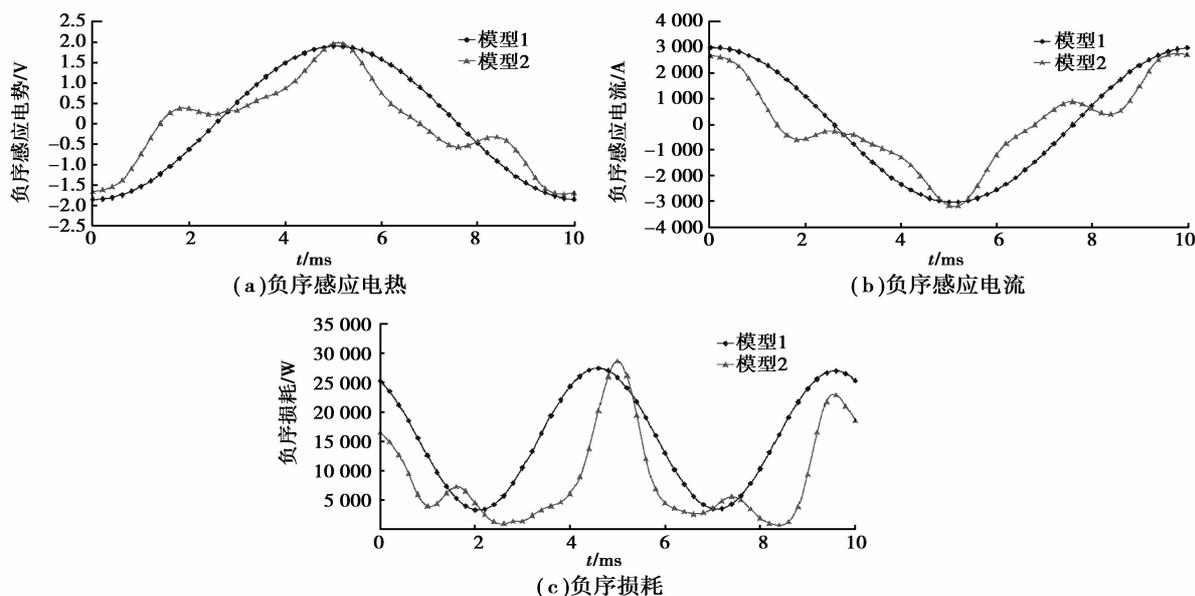


图5 转子7号槽楔负序感应电势、电流、损耗波形

Fig.5 Induced electric potential, current and loss waveform of rotor 7 slot wedge negative sequence

由图5可见,模型1的7号槽楔负序感应电势、电流、损耗波形都接近于正弦波形,而模型2对应的3种波形都出现畸变,与正弦波有较大差异。

3.2 磁饱和对负序损耗的影响

通过图4(a)、(d)的对比可以明显看出,模型1中电机内部大部分地方的磁密都低于0.13T,模型4中电机各处的磁密明显远高于模型1,结合表4中模型1、4损耗计算结果,说明在铁芯饱和程度较高的情况下得出的负序损耗明显比低饱和程度下的小。这一现象主要是因为模型4中存在转子主极磁场,定转子铁芯饱和使其导率减小,负序磁场对应的磁阻增大,导致负序磁场强度明显减小,所以产生的负序感应电势、电流、损耗都相应减小。这也是导致图5中模型2负序感应电势和电流曲线发生畸变的主要原因。

此外,而由于集肤效应,转子转轴表层恰好也是负序感应电流集中区域,磁导率直接影响感应电流的透入深度和流经路径的等效电阻,导致负序损耗相比于低磁饱和条件下变小。这是图5中模型2负序损耗曲线发生畸变的一个重要原因。

将表4中模型2、3计算出的负序损耗结果相减,结果可近似作为考虑磁饱和情况下单由负序磁场在转子中引起的损耗。得到的近似负序损耗远小于模型1计算出的负序损耗,说明上述磁饱和对负序磁场和损耗的影响分析是正确的。

综上所述,负序工况模型是否考虑主极磁场和正序电枢反应磁场带来的铁芯饱和现象,将直接影响计算出负序损耗的大小和分布的准确性。通过图4中模型1、2与模型3对比可知,本文提出的模型2对于磁饱和的考虑和模拟更加接近实际,更加合理。

3.3 转子附加损耗的影响

通过对比表4中模型2、3的损耗计算结果可知,即使发电机运行在对称稳态工况,不存在负序磁场和负序损耗,但大型汽轮发电机转子表层各部件中仍会有较大的附加损耗。在稳态负序工况下,转子表层的附加损耗也一定存在,这是图5中模型2负序损耗曲线发生畸变的另一个重要原因。在6%负序程度下,转子本身的附加损耗约为转子表面负序总损耗的37%。计算稳态负序损耗的目的在于计算稳态负序温度场,只要是转子表面部件的损耗发热都将对转子温度场产生影响,因此计算稳态负序损耗时应将转子表层的附加损耗也纳入考虑范围。

根据以上分析,转子表面负序总损耗应包括两部分:由负序磁场引起的损耗、由转子主极磁场和正序磁场引起的附加损耗。不对称负载模型得出的转子负序总损耗全面涵盖了以上2个部分,相比之下,传统模型仅仅考虑和计算了由负序磁场引起的损耗,这明显与实际情况有较大的差别。

4 结 论

1) 电机铁芯饱和程度会对稳态负序损耗的大小和分布产生较大影响, 在建立稳态负序工况仿真模型时, 应考虑电机定转子铁芯的磁饱和现象。

2) 正序磁场在转子表面引起的附加损耗在负序总损耗中占有较大比例, 计算稳态负序总损耗时应将其考虑在内, 而不能只考虑由负序磁场单独引起的损耗。

3) 与传统仿真模型相比, 笔者提出的不对称负载模型能较为全面的磁饱和以及附加损耗等因素的影响, 计算出的稳态负序损耗更为合理。

参考文献:

- [1] Jack A G, Stoll R L. Negative-sequence currents and losses in the solid rotor of a turbogenerator[J]. Generation Transmission and Distribution Iee Proceedings C, 1980, 127(2):53-64.
- [2] Bach T, W02hner, D, Takahashi K, et al. Determining negative sequence currents of turbine generator rotors[C]// Electrical Machines and Systems. ICEMS 2009. [s.n.] IEEE, 2009:1-6.
- [3] 王作民. 汽轮发电机承受负序电流负荷能力的探讨[J]. 上海大中型电机, 2004(4):3.
WANG Zuomin. Discussion on negative sequence current load capacity of turbo generator[J]. Shanghai Medium and Large Electrical Machines, 2004, 4: 3.(in Chinese)
- [4] Takahashi N, Kawamura T, Nishi M. Improvement of unbalanced current capability of large turbine generators[J]. Power Apparatus and Systems IEEE Transactions on, 1975, 94(4):1390-1400.
- [5] 沈波, 董建洋. 负序电流对发电机转子的危害分析及防范措施[J]. 浙江电力, 2008, 26(5):35-38.
SHEN Bo, DONG Jianyang. Analysis of negative sequence current harm to rotor and preventive measures [J]. Zhejiang Electric Power, 2008, 26(5): 35-38.(in Chinese)
- [6] 周光厚, 侯小全. 东方 600 MW 汽轮发电机负序能力研究[J]. 东方电气评论, 2004, 18(1):20-23.
ZHOU Guanghou, HOU Xiaoquan. Research on negative sequence capacity of dongfang 600 MW turbogenerator[J]. Dongfang Electric Review, 2004, 18(1): 20-23.(in Chinese)
- [7] 刘明慧, 咸哲龙, 赵继敏. QFSN 型 800 MW 级两极汽轮发电机稳态负序能力分析[J]. 上海大中型电机, 2011(1):17-19.
LIU Minghui, XIAN Zhelong, ZHAO Jimin. Steady-state negative sequence capacity analysis of QFSN type 800 MW turbogenerator. Shanghai Medium and Large Electrical Machines[J]. 2011 (1): 17-19.(in Chinese)
- [8] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7064—2008 隐极同步发电机技术要求[S]. 中国标准出版社, 2009.
China national standardization management committee. GB/T 7064—2008 non salient pole synchronous generator technical requirements [S]. Standards Press of China ,2009.(in Chinese)
- [9] International Electrotechnical Commission. Rotating Electrical Machines-Part 1: Rating and Performance [S]. IEC Standard 60034-1, 2010.
- [10] 赵茜. 发电机转子负序涡流场二维分析与计算[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(6):19-22.
ZHAO Qian. Two dimensions analysis and calculation of generator negative sequence eddy current field[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2006, 11(6): 19-22.(in Chinese)
- [11] 朱跃杰, 赵伟, 刘明慧. 大型汽轮发电机负序电流的危害与计算方法分析[J]. 上海电气技术, 2012, 5(3):37-39, 58.
ZHU Yaojie, ZHAO Wei, LIU Minghui. The harms and calculation method analysis of large turbine generator negative sequence current[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2012, 5(3): 37-39, 58.(in Chinese)
- [12] 温志伟, 顾国彪. 蒸发冷却汽轮发电机负序能力的改进计算[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(4):34-37.
WEN Zhiwei, GU Guobiao. Improving calculating of the negative sequence capability of the evaporative cooling turbo generator[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(4): 34-37.(in Chinese)
- [13] 李伟力, 孙佳慧, 孙宏丽. 汽轮发电机稳态与负序工况下转子涡流损耗计算和温度场分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 174-182.
LI Weili, SUN Jiahui, SUN Hongli. Calculation and analysis of eddy loss and temperature field in rotor of synchronous generator under steady state and negative sequence[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 174-182.(in Chinese)