

三维气隙偏心对同步发电机转子铁芯温度特性的影响

何玉灵,雷欢,张文,王晓龙,陶文强,白洁

(华北电力大学 机械工程系,河北 保定 071003)

摘要:对同步发电机正常运行、气隙径向偏心、气隙轴向偏心及气隙轴向-径向复合偏心故障前后转子铁芯的损耗和温度的变化进行分析。首先对正常运行以及3种气隙偏心故障下的磁滞损耗和涡流损耗进行了解析,推导得到了各工况对应的损耗表达式;然后建立了CS-5型发电机的三维有限元模型,计算得到了不同工况下转子铁芯的损耗和温度变化数据。研究发现:气隙径向偏心故障下,转子铁芯的温度高于正常情况,随着偏心量的增加,损耗与温度均呈现升高趋势;气隙轴向偏心故障下,转子铁芯的损耗和温度将低于正常情况,偏移量的增加会使损耗和温度均呈现下降趋势;气隙轴向-径向复合偏心故障下,转子铁芯的损耗和温度相对正常情况变化较小,但整体仍呈现升高趋势。最后对CS-5型故障模拟发电机进行仿真和实验,仿真和实验结果与理论分析结论基本一致。

关键词:同步发电机;三维气隙静偏心;损耗;转子铁芯温度

中图分类号:TM 31

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202103009

0 引言

由于制造、装配或运行等原因,发电机定、转子间的气隙会有一定程度的不均匀,导致一侧气隙较大,另一侧气隙较小,这种现象称为气隙偏心。这种气隙的不均匀不仅会出现在径向上,还可能出现在轴向上。例如水轮发电机转子在水头长期冲击作用下可能产生一定的轴向位移,从而导致定转子间的轴向气隙在一端小而在另一端大,形成气隙轴向静偏心。气隙偏心是常见的发电机故障,几乎所有电动机和发电机都或多或少地存在气隙偏心情况。发电机气隙偏心故障会导致气隙磁密的分布不均匀,加剧定转子振动,增加电机的损耗,降低能量转换效率。

目前,对发电机气隙偏心故障的研究成果多集中在气隙径向偏心故障^[1-8]。文献[1-2]分别对气隙偏心故障下定子、转子所受不平衡磁拉力进行了分析;文献[3-4]分析了气隙偏心故障下发电机的定子和转子的振动特性变化;文献[5-6]分析了气隙偏心故障下发电机电磁转矩的波动特性;文献[7]分析了气隙偏心与转子匝间短路复合故障下的绕组受力;文献[8]分析了发电机气隙偏心故障下定子并联支路

的环流特性。但以上文献均未考虑轴向气隙偏心和轴向-径向复合气隙故障偏心(即三维气隙偏心)对故障特性的影响,而由于这2种故障实际存在的可能性,仅分析径向气隙偏心故障的特性是不全面的。

在损耗和温度分析方面,已有诸多研究关注电机的定子铁芯损耗和绕组的铜耗,以及这2类损耗引发的电机内部的温度变化,针对转子铁芯损耗的研究相对较少。例如,文献[9]分析了大型汽轮发电机定子损耗以及温升特性;文献[10-11]则分别计算了永磁同步电机和汽轮发电机的端部损耗,并对电机内部的发热情况进行了分析;文献[12]分析了不同环境因素影响下气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)外壳和导体温度变化特征、外壳外表面的对流换热系数变化及不同负载GIL温升受环境因素影响的差异性;文献[13]通过分析发电机的冷却方式,对永磁发电机的内部温度场进行了研究;文献[14]分析了汽轮机的转子温度场;文献[15-16]分别分析了大型水轮发电机电磁场的不同模型^[15]和进相运行下涡流损耗^[16]对发电机内部温升的影响;文献[17-19]分别对超导电机的铜耗^[17-18]和铁耗^[19]进行了分析计算;文献[20]以减小损耗为目标,对永磁同步发电机的绕组设计及制造进行了优化。但以上文献大多针对电机在正常运行情况下的损耗和温度变化特性进行分析,并未考虑电机故障对铁芯损耗和温度的影响。

本文分析由同步发电机气隙径向静偏心、轴向静偏心和轴向-径向复合静偏心故障(下文分别简称为径向偏心、轴向偏心、复合偏心故障)导致的转子铁芯损耗变化,以及因此引发的转子温度变化,并进行有限元仿真计算和实验验证。

收稿日期:2020-04-24;**修回日期:**2021-01-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777074);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020MS114,2018YQ03);河北省自然科学基金资助项目(E2020502032);河北省第三批青年拔尖人才支持计划([2018]-27)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777074), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2020MS114,2018YQ03), the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2020502032) and the 3rd Top Youth Talent Support Program of Hebei Province([2018]-27)

1 气隙偏心故障前后磁密变化

同步发电机气隙磁密由气隙磁势和单位面积气隙磁导相乘得到,其中发电机单位面积磁导为空气磁导率与径向气隙长度倒数的乘积^[21]。径向偏心、轴向偏心故障分别主要通过改变单位面积磁导、气隙磁势对气隙磁密构成影响,复合偏心故障则是同时改变磁势和单位面积磁导影响气隙磁密。同步发电机正常状态及气隙偏心故障示意图如图 1 所示。

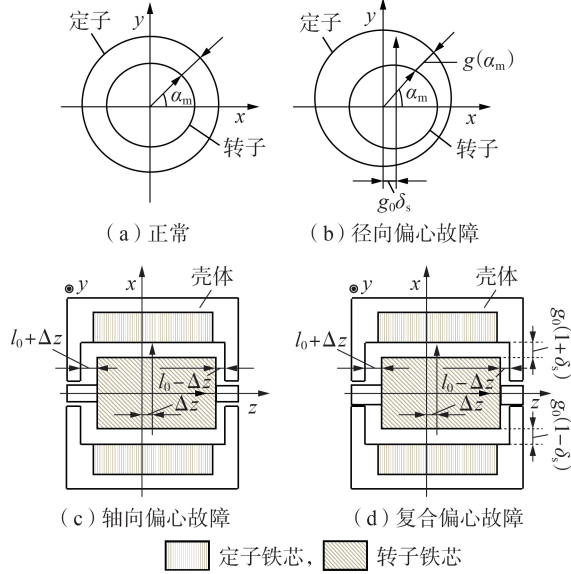


图 1 同步发电机正常运行及气隙偏心故障示意图
Fig.1 Schematic diagram of normal state and SAGE fault of synchronous generator

气隙径向长度 $g(\alpha_m)$ 可写为:

$$g(\alpha_m) = \begin{cases} g_0 & \text{正常状态或轴向偏心故障} \\ g_0(1 - \delta_s \cos \alpha_m) & \text{径向偏心或复合偏心故障} \end{cases} \quad (1)$$

其中, g_0 为平均气隙长度; δ_s 为气隙相对静偏值; α_m 为用于表征气隙周向位置的机械角度。进一步求取单位面积磁导并采用幂级数展开, 结果为:

$$\Lambda(\alpha_m) = \mu_0 / g(\alpha_m) = \begin{cases} \Lambda_0 & \text{正常状态或轴向偏心故障} \\ \Lambda_0(1 + \delta_s \cos \alpha_m + \delta_s^2 \cos^2 \alpha_m + \dots) \approx \Lambda_0[1 + 0.5\delta_s^2 + \delta_s \cos \alpha_m + 0.5 \cos(2\alpha_m)] & \text{径向偏心或复合偏心故障} \end{cases} \quad (2)$$

其中, μ_0 为空气磁导率; Λ_0 为气隙磁导常量。

正常运行、气隙偏心故障工况的定子绕组磁势(以 A 相为例)见图 2。图中, t 表示时间轴; E_0 为空载电动势; I 、 I_1 分别为正常和故障情况下 A 相电流; ΔI 为电流变化量; F_s 为定子绕组产生的电枢反应基波磁势; F_r 为转子励磁绕组产生的基波主磁势; F_c 为合成磁势; β 、 β_1 分别为轴向偏心故障前、后波主磁势与电枢反应基波磁势间的夹角; ψ 为发电机内功角; F_{s1}

为轴向偏心故障后定子绕组产生的电枢反应基波磁势; F_{c1} 为轴向偏心故障后的合成磁势; F_{r1} 为转子励磁绕组轴向偏心故障后产生的基波主磁势。如图 2(a) 所示, 正常状态及径向偏心故障下, 同步发电机中气隙磁势可由转子磁势和定子磁势按照平行四边形法则矢量合成。由图 1(c) 可知, 同步发电机发生轴向气隙偏心故障时, 转子的有效作用长度减小, 导致气隙间产生能量转换的气隙主磁势和电枢反应磁势均减小, 如图 2(b) 所示。各工况下的气隙磁势为:

$$f(\alpha_m, t) = \begin{cases} F_s \cos(\omega t - p\alpha_m) + F_r \cos(\omega t - p\alpha_m + \psi + 0.5\pi) = \\ F_c \cos(\omega t - p\alpha_m - \beta) & \text{正常状态或径向偏心故障} \\ F_{s1} \cos(\omega t - p\alpha_m) + F_{r1} \cos(\omega t - p\alpha_m + \psi + 0.5\pi) = \\ F_{c1} \cos(\omega t - p\alpha_m - \beta_1) & \text{轴向偏心或复合偏心故障} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_c = \sqrt{F_s^2 \cos^2 \psi + (F_r - F_s \sin \psi)^2} \\ \beta = \arctan \frac{F_s \cos \psi}{F_r - F_s \sin \psi} \\ F_{c1} = \sqrt{F_{s1}^2 \cos^2 \psi + (F_{r1} - F_{s1} \sin \psi)^2} \\ \beta_1 = \arctan \frac{F_{s1} \cos \psi}{F_{r1} - F_{s1} \sin \psi} \end{cases} \quad (4)$$

其中, ω 为电角频率; p 为发电机极对数。

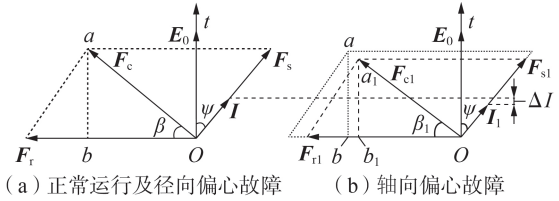


图 2 正常运行、气隙偏心故障下的定子磁势

Fig.2 Magnetomotive force of rotor and stator under normal state and SAGE fault

忽略高频成分, 不同工况下同步发电机的气隙磁密及其幅值分别见式(5)和表 1。表中, 趋势指各工况下的气隙磁密幅值相对正常运行时的变化趋势。

$$B(\alpha_m, t) = f(\alpha_m, t) \Lambda(\alpha_m) = \begin{cases} F_c \cos(\omega t - p\alpha_m - \beta) \Lambda_0 & \text{正常状态} \\ F_c \cos(\omega t - p\alpha_m - \beta) \Lambda_0 [1 + 0.5\delta_s^2 + \delta_s \cos \alpha_m + 0.5\delta_s^2 \cos(2\alpha_m)] & \text{径向偏心故障} \\ F_{c1} \cos(\omega t - p\alpha_m - \beta) \Lambda_0 & \text{轴向偏心故障} \\ F_{c1} \cos(\omega t - p\alpha_m - \beta) \Lambda_0 [1 + 0.5\delta_s^2 + \delta_s \cos \alpha_m + 0.5\delta_s^2 \cos(2\alpha_m)] & \text{复合偏心故障} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)和表 1 可见: 径向偏心故障下, 因为气隙磁密的直流常值分量相比正常运行时增加了 $0.5\Lambda_0\delta_s^2$, 所以该工况下磁密幅值将会增加; 轴向偏心故障下, 由于各磁势幅值对应的关系为 $F_{r1} < F_r$ 和 $F_{s1} < F_s$, 气隙磁密相较于正常运行时呈扁平状且幅

表1 不同运行状态下的磁密幅值
Table 1 MFD amplitude formulas under different conditions

工况	磁密幅值	趋势
正常运行	$\sqrt{F_s^2 \cos^2 \psi + (F_r - F_s \sin \psi)^2} \Lambda_0$	—
径向偏心故障	$\sqrt{F_s^2 \cos^2 \psi + (F_r - F_s \sin \psi)^2} \times \Lambda_0 [1 + 0.5 \delta_s^2 + \delta_s \cos \alpha_m + 0.5 \delta_s^2 \cos(2\alpha_m)]$	上升
轴向偏心故障	$\sqrt{F_{s1}^2 \cos^2 \psi + (F_{r1} - F_{s1} \sin \psi)^2} \Lambda_0$	下降
复合偏心故障	$\sqrt{F_{s1}^2 \cos^2 \psi + (F_{r1} - F_{s1} \sin \psi)^2} \times \Lambda_0 [1 + 0.5 \delta_s^2 + \delta_s \cos \alpha_m + 0.5 \delta_s^2 \cos(2\alpha_m)]$	取决于轴向、径向偏心程度

值下降;复合偏心故障下,气隙磁密幅值的变化取决于轴向、径向偏心程度。

2 转子铁芯温度场计算

2.1 求解模型和基本假设

本文以新能源电力系统国家重点实验室的CS-5型故障模拟同步发电机(下文简称实验电机)为例,建立其瞬态温度场计算三维有限元模型如图3所示。实验电机采用双层短距绕组,基本参数如表2所示。为便于分析,作以下假设:电机中磁场沿轴向均匀分布;同步发电机气隙较大且气隙中有轴向气流等原因,定、转子之间的热阻比定、转子其他散热途径的热阻大得多,因此忽略定转子间的热交换^[22];转子铁芯端部循环空气各点温度相同;铁芯内部的磁导率各向同性。

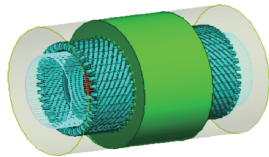


图3 温度场计算三维有限元模型

Fig.3 Three-dimensional finite element model for temperature calculation

表2 实验电机基本参数

Table 2 Primary parameters of experiment generator

参数	参数值	参数	参数值
额定容量 / (kV·A)	5	定子外径 / mm	250.5
额定电压 / V	380	定子内径 / mm	145
额定转速 / (r·min ⁻¹)	3000	定子铁芯长度 / mm	130
功率因数	0.8	转子外径 / mm	142.6
径向气隙 / mm	1.2	极对数	1
定子槽数	36	每相并联支路	2

电机的三维瞬态温度场的热传导方程及边界条件如式(6)所示^[23]。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \\ -S_n \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_i) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, S_n$ 分别为物体在 x, y, z, n 方向上的导热系数,单位均为 $W / (m \cdot ^\circ C)$; ρ 为物质密度,单位为 kg / m^3 ; T 为物体温度,单位为 $^\circ C$; T_i 为周围介质温度,单位为 $^\circ C$; c 为物体比热容,单位为 $J / (kg \cdot ^\circ C)$; α 为散热系数,单位为 $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$; q_v 为热源密度,单位为 $J / (m^2 \cdot s)$; t 的单位为 s 。

2.2 转子铁芯热源

电机中的损耗主要包括绕组的铜耗、铁芯的铁耗及机械摩擦损耗。转子铁芯发热主要来自于铁耗^[19],一般可采用Bertotti提出的经典三项式铁耗模型^[20],如式(7)所示。

$$P_{Fe} = K_h f B_m^2 + K_e f^2 B_m^2 + K_a f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (7)$$

其中, P_{Fe} 为铁耗,单位为 W ; K_h 为磁滞损耗系数; K_e 为涡流损耗系数; K_a 为附加损耗系数; B_m 为磁密幅值,单位为 T ; f 为磁场频率,单位为 Hz 。普通小型电机的转子铁芯一般采用硅钢片,而本文实验电机的转子铁芯采用铁氧体材料,其引发温度变化的主导因素为涡流损耗,磁滞损耗和附加损耗相对较小,附加损耗的数值相对更小可忽略不计。

由表1和式(7)可知:与正常运行工况相比,径向偏心故障下的涡流损耗和磁滞损耗呈增长趋势,轴向偏心故障下的涡流损耗和磁滞损耗呈减小趋势,复合偏心故障下的磁滞损耗和涡流损耗变化趋势取决于轴向偏心与径向偏心的程度。

2.3 转子表面散热系数确定

同步发电机运行过程中,转子旋转将引起定、转子间的气隙空气流动,增强了流固表面的对流换热。转子铁芯表面产生了复杂的对流换热过程,可通过有效导热系数 λ_g 来描述气隙中流动空气的热交换能力,并在仿真中在铁芯表面添加散热系数^[23],如式(8)所示。

$$\begin{cases} \lambda_g = 0.069 \eta^{-2.908} \lambda_{Reg}^{0.461 \ln(3.33361\eta)} \\ \lambda_{Reg} = \pi D_2 g \frac{n_g}{60\gamma} \\ \eta = \frac{D_2}{D_{i1}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, λ_{Reg} 为气隙雷诺数; D_2 为转子外径; g 为气隙长度; n_g 为电机转速; γ 为空气运动粘度系数; D_{i1} 为定子铁芯内径; η 为转子外径与定子铁芯内径之比。

转子铁芯端部表面散热系数 a_r 为^[24]:

$$a_r = \frac{2\lambda_{Nur}\lambda}{D_2} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \lambda_{Nur} = 1.67 \lambda_{Rer}^{0.385} \\ \lambda_{Rer} = \frac{\pi D_2^2 n_g}{120\gamma} \end{cases} \quad (10)$$

其中, λ_{Nur} 为转子铁芯端面努塞尔特常数; λ_{Rer} 为转子铁芯端面气流雷诺数; λ 为空气导热系数。

3 三维瞬态温度场仿真及实验结果

3.1 实验与仿真设置

传统的同步发电机定转子间气隙无法改变,本文通过安装在底板固定支架上的调整螺钉实现径向偏心、轴向偏心和复合偏心故障的模拟,电机实验平台见附录中图 A1。通过轴承座使转子保持相对静止,定子可以通过前视面和后视面的 4 个调节螺钉沿水平径向移动,如附录中图 A2(a)和(b)所示;同时,定子也可以通过从动端上的 2 个调节螺钉沿水平轴向移动,如附录中图 A2(c)和(d)所示;2 个方向上的偏移量可以分别通过 2 个千分表进行控制,如附录中图 A2(a)—(d)所示。

在实验和仿真期间,激励电流设置为 2.5 A,每相负载为 100 Ω 的电阻和 0.2 H 的电感(功率因数为 0.8),见附录中图 A3。设置以下 5 种实验和仿真工况:

- (1)同步发电机正常运行;
- (2)0.1、0.2 和 0.3 mm 的径向偏心故障,如附录中图 A4(a)所示;
- (3)3、5 和 7 mm 的轴向偏心故障,如附录中图 A4(b)所示;
- (4)复合偏心故障的轴向偏心程度增大,包括径向 0.2 mm+轴向 3 mm、径向 0.2 mm+轴向 5 mm、径向 0.2 mm+轴向 7 mm;
- (5)复合偏心故障的径向偏心程度增大,包括径向 0.1 mm+轴向 5 mm、径向 0.2 mm+轴向 5 mm、径向 0.3 mm+轴向 5 mm。

实验电机在上述 5 种工况下分别稳定运行 5 min,然后采用手持测温热像仪测量实验发电机的转子温度,如附录中图 A5 所示。

实验电机中各个部位材料均不相同,如表 3 所示。包括定转子铁芯和绕组等电机主要热源在内的元件通过热传导和空气之间的对流换热向外界传递热量。

表 3 实验电机中各元件材料属性

Table 3 Material properties of experiment generator

电机部位	材料	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容 / [$\text{J}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$]	导热系数 / [$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$]
定子	D23_50	7820	450	42.5
转子	Steel_1008	7850	480	43.53
绕组	铜	8933	386	385
转轴	20CrMnTi	7850	480	50.2
空气域	空气	1.293	1005	0.023

本文以实际电机模型尺寸建立仿真模型,定子铁芯由硅钢片叠压而成,转子铁芯由铁氧体材料构成,硅钢片之间的间隙对铁芯轴向导热系数的影响主要体现在定子铁芯上,因此转子铁芯在电磁场和温度场的仿真模型具有等效性。ANSYS Workbench

中的磁热耦合如附录中图 A6 所示。在 ANSYS Workbench 平台中将 ANSYS Electromagnetic 中转子铁芯损耗计算结果和模型导入 Transient Thermal 模块,其中网格剖分类型选择尺寸为 2 mm、节点数为 203 081、单元数为 136 432 的四面体结构,如附录中图 A7 所示。仿真与实验环境温度均为 22 $^\circ\text{C}$,转子铁芯热载荷和边界条件如附录中图 A8 所示。

3.2 磁密变化

不同工况下磁密变化曲线如图 4 所示。由图可见:轴向偏心故障下的磁密幅值相对小于正常运行时减小,相当于对正常气隙磁密曲线进行压缩;径向偏心故障下的磁密幅值相对正常运行时增大,相当于对正常气隙磁密曲线进行抬升;复合偏心故障的轴向偏心程度增大时,气隙磁密幅值呈下降趋势。图 4 反映的气隙磁密仿真计算结果与理论分析一致。

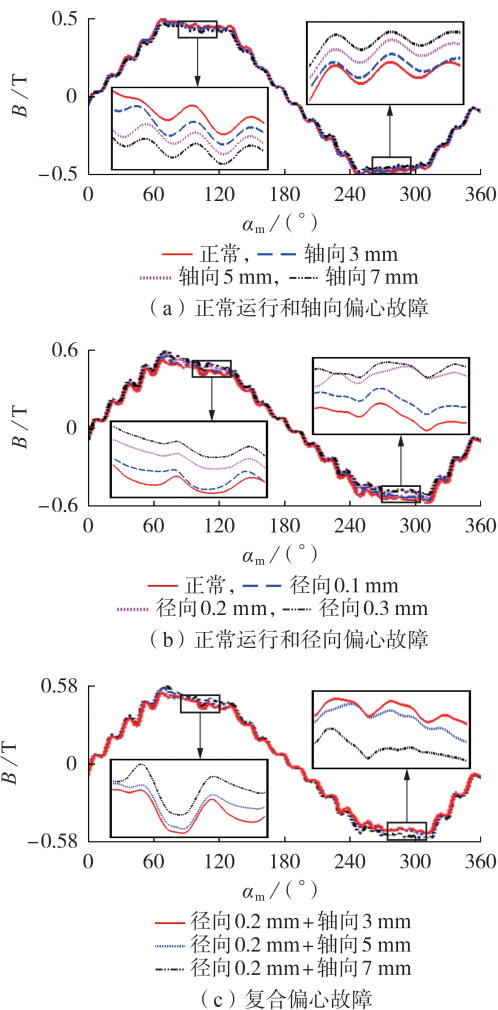


图 4 不同运行工况下的磁密变化曲线

Fig.4 Magnetic flux density curves under different conditions

3.3 损耗变化

转子的涡流损耗和磁滞损耗曲线见图 5。由图

可见:径向偏心故障下,转子铁芯的涡流损耗和磁滞损耗相对正常运行时呈上升趋势,且上升程度随偏心程度的加深而增大;轴向偏心故障下,转子铁芯的涡流损耗和磁滞损耗随着偏心程度的加深呈减小趋势;复合偏心故障下,当径向偏心程度一定时,转子铁芯的磁滞和涡流损耗随着轴向偏心程度的加深而减少,而当轴向偏心程度一定时,转子铁芯的磁滞和涡流损耗随着径向偏心程度的增加而增加,与理论分析一致。

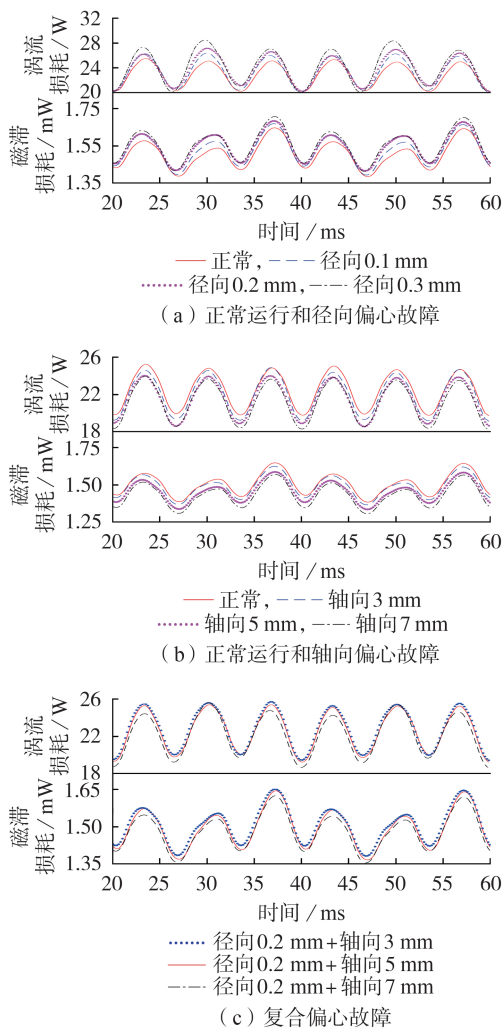


图 5 不同运行工况下的转子铁芯损耗

Fig.5 Rotor core losses under different conditions

3.4 转子铁芯温度计算与测量

通过将转子铁芯的热载荷和边界条件施加到铁芯本体上(见附录中图 A8),计算不同工况下铁芯温度随时间的变化,结果如图 6 所示。由图可见,铁芯温度在 0~100 s 内迅速上升,200 s 后逐渐稳定,曲线呈水平状,因此计算结果收敛,具有可靠性。

实验电机在正常运行、0.2 mm 径向偏心故障、5 mm 轴向偏心故障、0.2 mm 径向偏心+3 mm 轴向故障这 4 种工况下稳定运行时,其转子铁芯温度场分

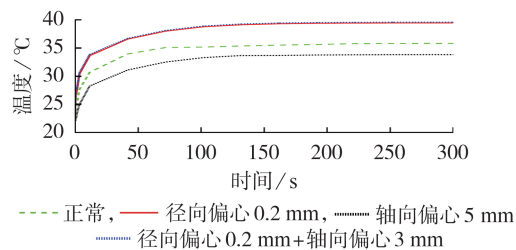


图 6 不同工况下转子铁芯温度随时间变化的曲线

Fig.6 Curves of rotor core temperature under different conditions

布云图和实验测量转子铁芯温度分布分别如附录中图 A9 和 A10 所示。为了便于进一步对比分析,将多种工况下转子铁芯温度的仿真和实验结果展示在图 7 和表 4 中。表中,括号中数据为各工况下的最高温度相对正常运行时上升或下降的百分比。

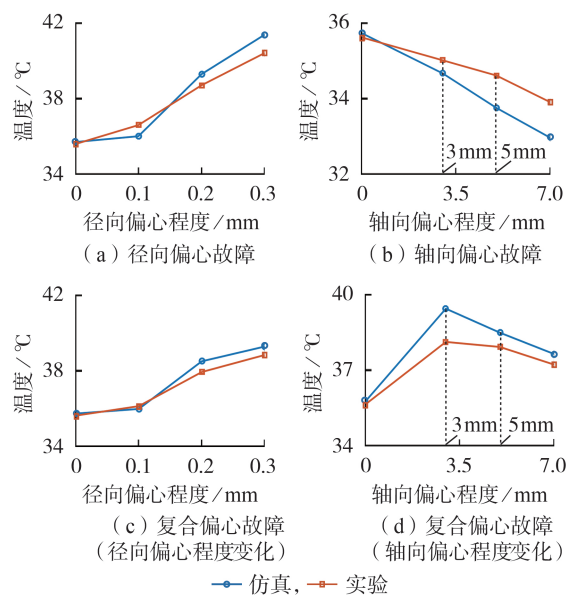


图 7 不同运行工况下的转子铁芯温度仿真和实验结果

Fig.7 Simulative and experimental results of rotor core temperatures under different conditions

表 4 不同运行工况下转子铁芯的最高温度

Table 4 Highest temperature of rotor core under different conditions

运行工况	仿真最高温度 / °C	实验最高温度 / °C
正常	35.709	35.6
径向 0.1 mm	36.015(0.85%)	36.6(2.80%)
径向 0.2 mm	39.285(10.0%)	38.7(8.71%)
径向 0.3 mm	41.367(15.8%)	40.4(13.5%)
轴向 3 mm	34.656(-2.95%)	35.0(-1.43%)
轴向 5 mm	33.749(-5.49%)	34.6(-2.80%)
轴向 7 mm	32.866(-7.96%)	33.9(-4.77%)
径向 0.1 mm + 轴向 5 mm	35.951(0.68%)	36.1(1.40%)
径向 0.2 mm + 轴向 5 mm	38.466(7.72%)	37.9(6.47%)
径向 0.3 mm + 轴向 5 mm	39.245(9.90%)	38.8(8.98%)
径向 0.2 mm + 轴向 3 mm	39.419(10.39%)	38.1(7.02%)
径向 0.2 mm + 轴向 7 mm	37.621(5.35%)	37.2(4.49%)

从图7和表4可以看出:径向偏心故障下,转子铁芯的温度将会上升,且上升程度随着径向偏心程度的加深而增加;轴向偏心故障下,转子铁芯的温度将会下降,且呈现出轴向偏心程度越大则温度下降越明显的趋势;复合偏心故障下,转子铁芯的温度取决于径向和轴向偏心的程度。实验和仿真结果证实了本文理论分析的正确性,且仿真结果与实验结果误差较小,验证了温度场计算模型的准确性。

4 结论

本文对同步发电机在正常运行、径向偏心故障、轴向偏心故障以及复合偏心故障下转子铁芯的温度进行了分析,主要结论如下。

(1)径向偏心故障下,转子铁芯的涡流损耗和磁滞损耗相比正常运行时均呈现增长趋势;随着偏心程度的增加,铁芯损耗增加,从而使转子铁芯温度升高。

(2)轴向偏心故障下,转子铁芯的涡流损耗和磁滞损耗相比正常运行时均呈现降低趋势;随着偏心程度的增加,铁芯损耗降低,从而使转子铁芯温度降低。

(3)复合偏心故障下,转子铁芯的涡流损耗、磁滞损耗和温度变化取决于轴向、径向偏心的相对程度。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 何玉灵,张伯麟,仲昊,等. 汽轮发电机气隙偏心故障下的定子受力分析[J]. 大电机技术,2017(5):11-17,34.
HE Yuling, ZHANG Bolin, ZHONG Hao, et al. Turbo-generator stator force analysis under air-gap eccentricity fault[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2017(5):11-17,34.
- [2] 邓玮琪. 发电机在不同气隙偏心故障下的转子多向受力分析[D]. 保定:华北电力大学,2017.
DENG Weiqi. Analysis on rotor's multi direction force under different air gap eccentric faults of generator[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [3] 柯孟强. 发电机气隙偏心与转子短路复合故障下磁拉力特性分析[D]. 保定:华北电力大学,2016.
KE Mengqiang. Analysis on magnetic pull characteristics of coupling faults composed by eccentricity and rotor inter-turn short circuit of generator[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.
- [4] 万书亭,李和明,李永刚. 气隙偏心对汽轮发电机定子振动特性的影响[J]. 振动与冲击,2005,24(6):21-23.
Wan Shuting, Li Heming, Li Yonggang. Analysis on vibration characteristics of generator with the fault of eccentric air-gap[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(6):21-23.
- [5] 何玉灵,王发林,唐贵基,等. 考虑气隙偏心时发电机定子匝间短路位置对电磁转矩波动特性的影响[J]. 电工技术学报,2017,32(7):11-19.
HE Yuling, WANG Falin, TANG Guiji, et al. Effect of stator inter-turn short circuit position on electromagnetic torque of generator with consideration of air-gap eccentricity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7):11-19.
- [6] 王发林. 发电机气隙偏心与定子短路复合故障的转矩特性分析[D]. 保定:华北电力大学,2016.
WANG Falin. Analysis on torque characteristics of generator under air-gap eccentricity and stator short circuit composite faults[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.
- [7] 仲昊. 气隙偏心与匝间短路复合故障下的绕组受力分析[D]. 保定:华北电力大学,2017.
ZHONG Hao. Analysis on winding electromagnetic force characteristics under air-gap eccentricity and interturn short circuit compound fault[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [8] 万书亭,何玉灵,唐贵基,等. 发电机气隙偏心时定子并联支路的环流特性分析[J]. 高电压技术,2010,36(6):1547-1553.
WAN Shuting, HE Yuling, TANG Guiji, et al. Analysis on stator circulating current characteristics under eccentricity faults of turbo-generator[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(6):1547-1553.
- [9] 刘奇. 大型汽轮发电机定子损耗及流固耦合场分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2012.
LIU Qi. Analysis of large turbogenerator stator losses and fluid-solid coupled field[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.
- [10] 戚哲龙,钟后鸿,刘明慧,等. 600 MW 发电机端部损耗与发热研究[J]. 大电机技术,2008(5):12-15,58.
XIAN Zhelong, ZHONG Houhong, LIU Minghui, et al. Magnetic-thermal analysis of the end region of 600 MW turbogenerator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2008(5):12-15,58.
- [11] 赵旺初. 1000 MW 汽轮发电机端部的损耗和温度[J]. 发电设备,2006(3):199-204.
ZHANG Wangchu. End losses and temperature of a 1000 MW turbine generator[J]. Power Equipment, 2006(3):199-204.
- [12] 周利军,张训培,王朋成,等. 环境因素影响下 GIL 温升特性的仿真计算分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):211-218.
ZHOU Lijun, ZHANG Jipei, WANG Pengcheng, et al. Simulation and analysis of GIL temperature rise characteristics under effects of environmental factors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):211-218.
- [13] 闫羽佳,赵锦成. 盘式无铁心永磁发电机温度场分析和冷却方式研究[J]. 微特电机,2018,46(8):45-48.
YAN Yujia, ZHAO Jincheng. Thermal analysis and cooling approach design of disc type coreless permanent magnet generator[J]. Small & Special Electrical Machines, 2018, 46(8):45-48.
- [14] 吕向平. 大型汽轮发电机转子温度场计算[J]. 防爆电机,2012,47(5):23-26.
LÜ Xiangping. Temperature field calculation for rotor of large turbine generator[J]. Explosion-proof Electric Machine, 2012, 47(5):23-26.
- [15] 韩力,范镇南,周光厚,等. 大型水轮发电机电磁场模型及其对温度场的影响[J]. 重庆大学学报,2010,33(9):47-55.
HAN Li, FAN Zhennan, ZHOU Guanghou, et al. Electromagnetic field models and their influences on the temperature field of large hydro-generator[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(9):47-55.
- [16] WANG Ning, WANG Huifang, YANG Shiyu. 3D eddy current and temperature field analysis of large hydro-generators in leading phase operations[J]. Transactions on Electrical Machines and Systems, 2019, 3(2):210-215.
- [17] SONG Xiaowei, MIJATOVIC N, ZHOU Shengnan, et al. Losses and their thermal effect in high-temperature superconducting

- machines[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4):1-5.
- [18] LI Yufan, FENG Feng, LI Yi, et al. Numerical study on AC loss characteristics of REBCO armature windings in a 15 kW class fully HTS generator[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4):1-6.
- [19] SHAANIKA E, MOTOHIRO M, BOCQUEL C, et al. Core loss of a bulk HTS synchronous machine at 2 and 3t rotor magnetisation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(1):1-6.
- [20] WROBEL R, STATON D, LOCK R, et al. Winding design for minimum power loss and low-cost manufacture in application to fixed-speed PM generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 51(5):3773-3782.
- [21] HE Yuling, KE Mengqiang, WANG Faling, et al. Effect of static eccentricity and stator inter-turn short circuit composite fault on rotor vibration characteristics of generator[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2015, 39(4):767-781.
- [22] 孔晓光, 王凤翔, 林爱军. 高速永磁电机定子温度场的计算与分析[J]. 大电机技术, 2012(6):5-8.
KONG Xiaoguang, WANG Fengxiang, LIN Aijun. Calculation and analysis of high speed permanent magnet machine stator temperature fields[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2012(6):5-8.
- [23] 邵永, 刘赵森. 感应电机全域三维瞬态温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30):114-120.
TAI Yong, LIU Zhaomiao. Analysis on three-dimensional transient temperature field of induction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30):114-120.
- [24] 谢颖, 郭金鹏, 单雪婷, 等. 油田抽油机用感应电动机三维瞬态温度场计算分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(10):59-67.
XIE Ying, GUO Jinpeng, SHAN Xueting, et al. Three-dimensional transient temperature field calculation and analysis of induction motor for oilfield pumping unit[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(10):59-67.
- [25] 马宏忠, 张艳, 魏海增, 等. 基于转子平均瞬时功率的双馈异步发电机定子绕组匝间短路故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4):151-156.
MA Hongzhong, ZHANG Yan, WEI Haizeng, et al. Diagnosis of stator winding inter-turn short circuit in DFIG based on instantaneous average power in rotor side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4):151-156.

作者简介:



何玉灵

何玉灵(1984—),男,福建龙岩人,副教授,博士,主要研究方向为电站设备状态监测、故障诊断与控制(E-mail: heyuling1@163.com);

雷欢(1995—),男,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向为电站设备状态监测、故障诊断与控制(E-mail: h13571390144@163.com);

张文(1994—),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主要研究方向为电站设备状态监测、故障诊断与控制(E-mail: zhangwenzwz@126.com);

王晓龙(1989—),男,黑龙江大庆人,讲师,博士,通信作者,研究方向为电站设备状态监测与故障诊断(E-mail: wangxiaolong0312@126.com)。

(编辑 任思思)

Impact of three-dimensional air gap eccentricity on rotor core temperature of synchronous generator

HE Yuling, LEI Huan, ZHANG Wen, WANG Xiaolong, TAO Wenqiang, BAI Jie

(Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The variations of temperature and loss of the rotor core before and after the radial air gap eccentricity, the axial air gap eccentricity, and the axial-radial hybrid air gap eccentricity of synchronous generator are analyzed. Firstly, the hysteresis loss and the eddy current loss under normal condition and three kinds of air gap eccentricity fault are analyzed, and the detailed expressions corresponding to each working condition are derived. Then the three-dimensional finite element model of CS-5 generator is established. The magnetic field and temperature field distribution of rotor core under different working conditions are calculated. It is shown that the temperature of the rotor core under air gap radial eccentricity fault is higher than that under normal conditions. With the increase of the radial eccentricity degree, both of the temperature and loss of the rotor core increase. The temperature and loss of the rotor core under air gap axial eccentricity fault is lower than those under normal conditions, and the severer the air gap axial eccentricity fault is, the more the temperature and loss decrease. Under the axial-radial hybrid eccentricity fault, the temperature and loss of the rotor core change little compared with the normal situation, but the overall trend is still increasing. Finally, experiment and simulation are carried out on the CS-5 prototype generator, the simulative and experimental results are basically the same as the theoretical analysis.

Key words: synchronous generators; three-dimensional static air gap eccentricity; loss; temperature of rotor core

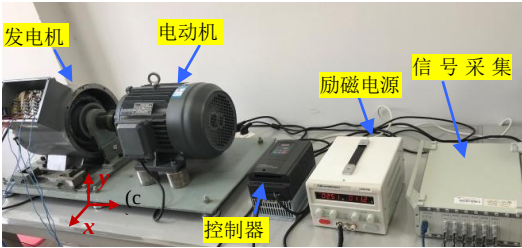


图 A1 CS-5 同步发电机实验平台

Fig.A1 CS-5 prototype generator experimental test rig

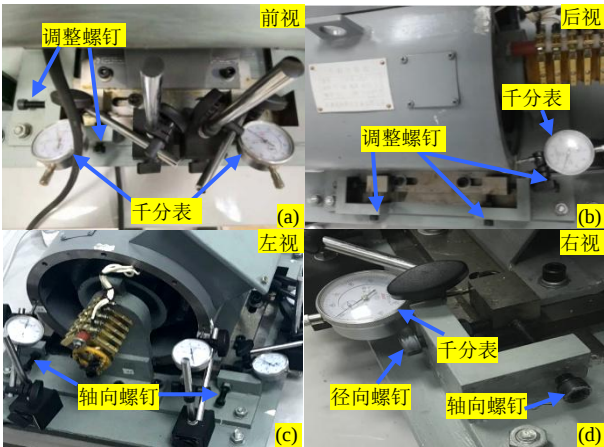


图 A2 径向偏心和轴向偏心实验设置

Fig.A2 Radial SAGE and Axial SAGE set up in experiment

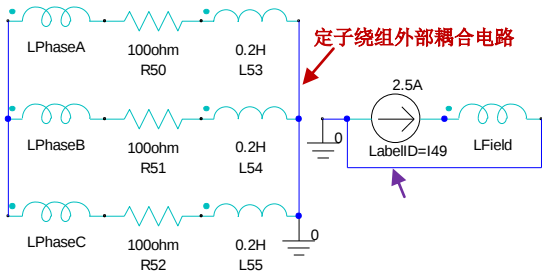


图 A3 外部耦合电路

Fig.A3 External coupling circuit

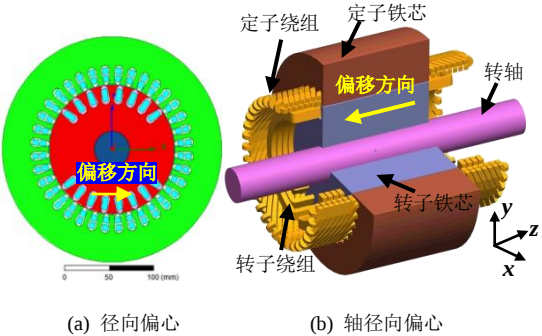


图 A4 轴向偏心与径向偏心故障设置

Fig.A4 Settings of radial SAGE and axial SAGE



图 A5 手持测温热像仪

Fig.A5 Hand-held thermal camera

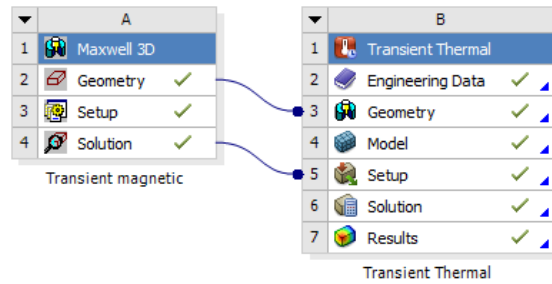


图 A6 ANSYS Workbench 中磁热耦合

Fig.A6 Magnetic-thermal coupling in ANSYS Workbench

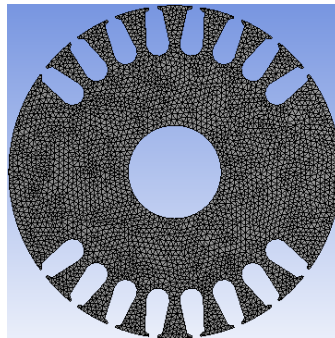


图 A7 转子铁芯网格划分

Fig.A7 Grid division of rotor core

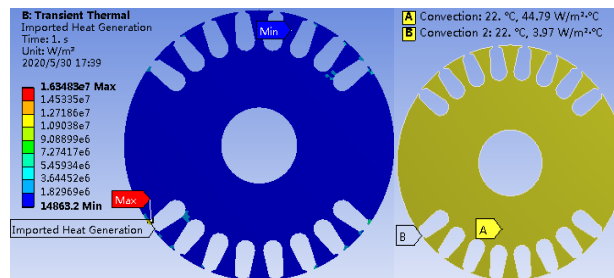


图 A8 热载荷和边界条件

Fig.A8 FE model of thermal load and boundary conditions

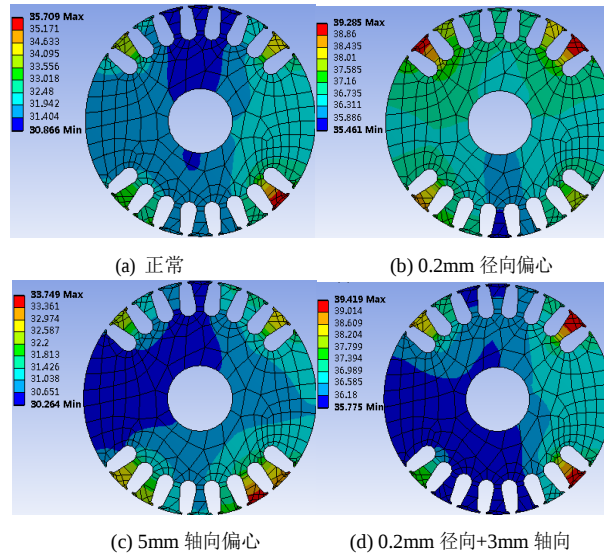
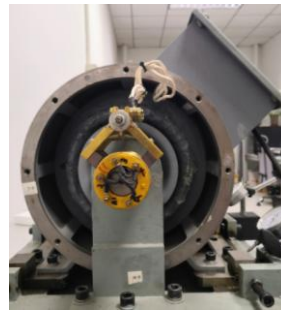


图 A9 不同运行状态下转子铁芯温度分布云图

Fig.A9 Temperature of rotor core under different conditions



(a) 参考轮廓

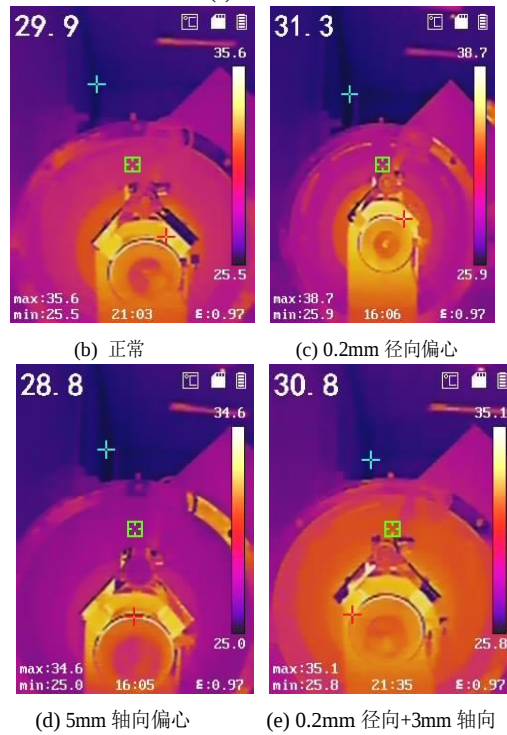


图 A10 实验中不同工况下转子铁芯温度

Fig.A10 Rotor core temperature in varied conditions by experiment