

大型同步发电机断股故障情况下电磁场和温度场的计算与分析

殷巧玉¹ 李伟力¹ 于海涛² 孙宏丽³

(1. 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院 哈尔滨 150080 2. 南车株洲电机有限公司 株洲 412001
3. 国营北京曙光电机厂 北京 100028)

摘要 以一台 150MW 空冷汽轮发电机为例, 建立电机二维电磁场计算分析模型, 利用有限元法, 对电机断股情况下的负载电磁场和参数进行了计算, 对断股情况下气隙、定子槽部和齿根部的磁通密度分布规律进行了研究, 对比分析了断股前后电机交直轴同步电抗变化; 通过合理的假设, 建立了电机一个齿槽范围内的三维温度场计算模型; 以电磁分析为基础, 得到不同断股情况下热源分布, 然后对计算域的定子三维温度场进行了计算分析; 探究了未断股和不同断股情况下定子的温度分布变化趋势, 分析了断股对电机最高温度值及位置的影响作用。研究得出一些结论, 对电机断股故障情况下的安全运行等问题提供了一定的理论依据。

关键词: 汽轮发电机 断股 电磁场 交直轴电抗 温度场

中图分类号: TM311

Calculation and Analysis of Electromagnetic Field and Temperature Field Under Broken Strands for a Large Synchronous Generator

Yin Qiaoyu¹ Li Weili¹ Yu Haitao² Sun Hongli³

(1. Harbin University of Science and Technology Harbin 150080 China 2. CSR Zhuzhou Electric Machinery Company Limited Zhuzhou 412001 China 3. State-Owned Beijing Shuguang Motor Factory Beijing 100028 China)

Abstract Taking a 150MW air-cooled turbine-generator as an example, the two-dimensional electromagnetic field analysis model is established. By using finite element method (FEM), the electromagnetic field and parameters of the generator operating under rated load with broken strands in windings are analyzed, by which the distribution laws of magnetic density in air-gap, stator slots and tooth bottom are studied. Then the variation of direct and quadrature axis synchronous reactance in generators with and without broken strands are comparatively researched. Based on some reasonable assumptions, three-dimensional temperature field calculation model of stator within tooth-space is established. From the electromagnetic analysis, heat sources distributions in generators with different broken strands are obtained, and stator three-dimensional temperature field are calculated. The change tendencies of temperature distribution in the stator without and with different broken strands are analyzed and the influence of broken strands on the maximum value of temperature and its appeared location are analyzed. From the studies some conclusions are obtained, which could provide some theory reference for some issues such as safe operation of generator with broken strands.

Keywords: Turbo-generator, broken strands, electromagnetic field, direct and quadrature axis reactance, temperature field

1 引言

随着大型同步发电机单机容量的增大和电压等级的提高, 发电机的安全运行直接影响电网的稳定。发电机因装配工艺、端部固有频率振动、油污等原因, 将造成定子线棒绝缘的磨损, 严重时会直接造成定子线棒损坏, 股线断股, 这些将危及发电机的安全可靠运行。关于大型发电机断股问题的研究, 相关文献对其进行了阐述, 文献 [1] 对大型全空冷汽轮发电机定子嵌线工艺进行了研究, 从工艺方面对定子下线方式进行了改进, 有效避免了下线造成的线棒断股现象的发生。文献 [2] 分析了电机在运行中由于线棒松动及电磁作用力的影响造成发电机断股事故的产生, 但是没有进一步分析断股对电机性能的影响。文献 [3] 和文献 [4] 采用等效电路法对发电机断股情况下定子绕组电阻差别进行了分析, 该方法可以有效地预测和诊断定子绕组开路和断股情况的发生。上述文献从工艺、监测诊断方面对发电机断股状态进行了研究, 但是对断股情况下发电机损耗及温度的改变没有进行深入的分析, 也没有对断股根数对电机电磁性能的影响进行对比分析 [1-4]。

本文以 150MW 全空冷汽轮发电机为例, 建立电机二维电磁场数学模型, 利用有限元方法对电机断股时的电磁场进行了计算和分析 [5-6], 在此基础上建立电机定子三维温度场模型, 对几种断股情况下定子的温度分布及定子各部分温升进行了计算和分析, 得到了一些有益的结论。

2 定子断股情况下的二维稳态电磁场

2.1 汽轮发电机参数计算求解域的物理模型和数学模型

该 150MW 空冷汽轮发电机定子上下层绕组采用不等股不等截面结构, 上层绕组在径向方向上由 50 根股线组成, 下层绕组在径向方向上由 34 根股线组成。为方便说明, 现将股线从槽口沿着槽底方向进行编号, 如图 1 所示。断股方案说明见表 1。



图 1 股线沿槽口到槽底的编号

Fig.1 Numbers of strands from the rabbet to bottom in a slot

表 1 断股方案说明

Tab.1 Broken strand program description

断股数	3	10	15
断股位置 (以股线编号表示)	1, 25, 26	1-10, 85, 86, 97, 98, 110	1-10

为了方便且在能满足实际要求的情况下, 将三维问题转化成二维问题 [7], 对电机电磁场进行二维有限元分析。

汽轮发电机二维电磁场求解区域如图 2a 所示。以 150MW 空冷汽轮发电机为例建立电磁场数学模型, 把具体物理模型参数与有限元求解电磁场的方法相结合, 加上相应的边界条件, 采用矢量磁位求解。负载运行时整个场域 Ω 上, A_z 满足下列边值问题 [8]。

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \\ \Gamma_1: A_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 ν —— 磁阻率;

A_z —— 磁矢位, 只有 z 轴分量;

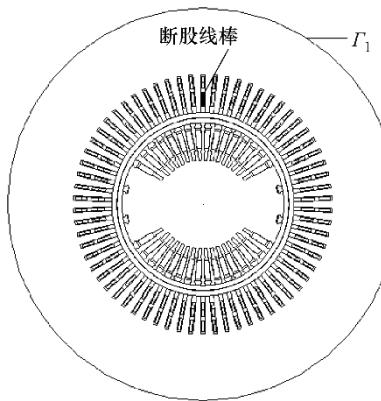
Γ_1 —— 第一类边界条件;

Ω —— 二维磁场求解区域;

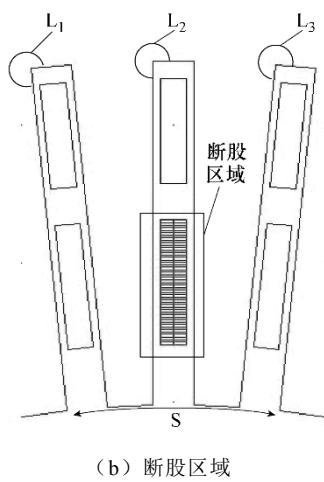
J_z —— 股线电流密度。

这里 J_z 既表示未断股的电流密度又表示断股时的电流密度, 只是在断股时比未断股位置所在线棒的电流密度值较大。根据文献 [3] 提供的断股后电阻的计算方法, 结合本文的断股方案可以得出, 断股所在相的电阻变化不大, 此外电压为额定值, 断股时的相电流与未断股状态下的相电流值相差很小, 近似认为相等, 断股后线棒横截面积变小, 所以断股位置所在线棒的电流密度大, 即断股数为 n , 该断股股线所在线棒为 N , 每根股线的面积为 S , 那么断股后的电流密度变为原来的 $N/(N-n)$ 。

图 2b 为断股二维电磁场求解区域断股位置局



(a) 二维求解区域计算模型



(b) 断股区域

图 2 二维求解区域及断股区域放大图

Fig.2 2D calculation model of solved region and detail region of broken strand

部放大图, 中间槽为断股发生位置, 两侧的两个槽为正常槽。为了分析断股对定子齿根及相邻槽齿根位置磁通密度的影响, 沿槽的齿根处取三条路径 L_1 、 L_2 、 L_3 , 对该三条路径处的磁通密度变化情况进行分析。

2.2 不同股线断股后电机内的电磁场

为了研究断股对电机内的电磁场的影响, 在考虑电压、功率因数为额定值的情况下, 对图 2a 所示区域进行求解, 经过一系列迭代得到断 3 股后的电磁场分布, 如图 3 所示。

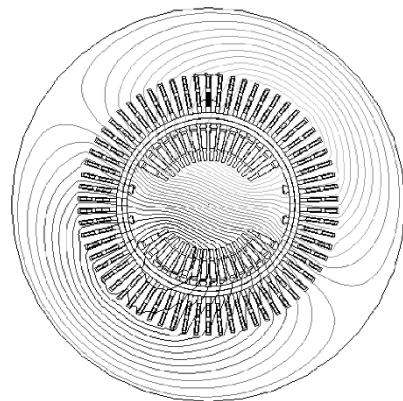


图 3 断 3 股时磁力线分布

Fig.3 Flux distribution of generator with three strands broken

本文还选择一个槽内上层线棒分别断 10 根和 15 根股两种方案, 计算了电机的电磁场, 并与电机断 3 股时的磁场进行比较。断 10 根和断 15 根得到的磁场分布与图 3 基本相同。同时分析了气隙中心位置的径向磁通密度分布图, 如图 4 所示, 取气隙中间半径处的磁通密度, 经过谐波分解能够得到断 3 股的基波幅值。通过计算得到, 断 10 根和断 15 根得到的气隙磁通密度最大值和基波磁通密度的幅值与断 3 根股线时得到的值分别近似相等, 故只列出了断 3 股和额定状态下的基波径向磁通密度值见表 2。

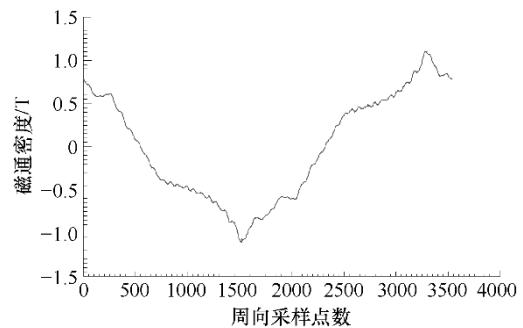


图 4 断 3 股时气隙的径向磁通密度

Fig.4 Radial magnetic density in air gap with three strands broken

表 2 不断股与断股情况下的磁通密度

Tab.2 Flux under different conditions

	气隙磁通密度 /T	
	最大值	基波幅值
断 3 股	1.1036	0.8567
额定状态	1.1145	0.897

通常情况下, 进入槽口的径向磁通密度对上层线棒顶部股线的影响可以不计。但是, 对于大容量

同步发电机，径向磁通密度在上层线棒的顶部股线产生的损耗不可忽略，它会明显地影响这些股线的局部温升。因此，本文对进入定子齿槽的径向磁通密度进行计算与分析。

图 5 为断 3 股时，进入断股区域的两个齿和相邻的三个槽的径向磁通密度的分布图。从图中可以清晰地显示出进入齿部的磁力线多于进入槽部的磁力线。因为从气隙进入定子齿槽的磁力线，有向着磁导率相对较大的齿部方向偏的趋势。

气隙磁场对沿图 2b 所示的位置 S 按照顺时针方向的各个位置得到的径向磁通密度大小如图 6 所示，横坐标为定转子气隙处的采样点个数。从图中可以看出，进入槽部的磁通不可忽略。

断 10 根和断 15 根股线两种方案与断 3 根股线得到的径向磁通密度变化和相应的磁通大小基本相同。

如图 2b 所示的 L_1 、 L_2 和 L_3 为沿槽的齿根处取的三个路径，该三处的磁通密度变化情况如图 7 所示。

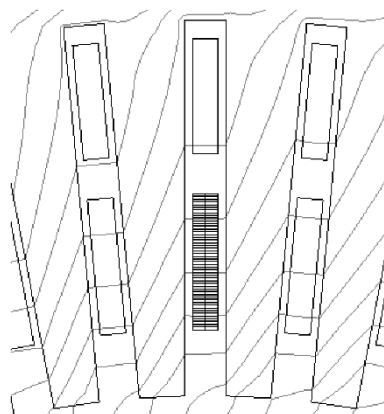


图 5 断 3 股时进入不同齿槽的磁力线放大图

Fig.5 Distribution of flux in different tooth-spaces with three strands broken

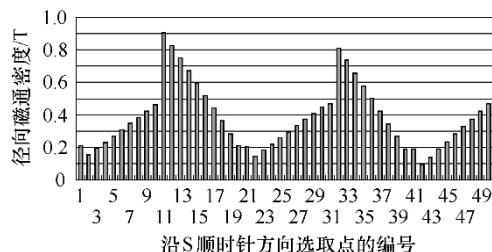


图 6 断 3 股时进入不同齿槽的径向磁通密度

Fig.6 Radial magnetic density in different tooth-spaces with three strands broken

断 3 股时，图 2b 所示的 L_1 、 L_2 和 L_3 的 3 个位置的磁通密度与不断股情况下相应位置的磁通密

度相等。由图 7 可知，在齿根的径向磁通密度变化趋势是由负值变为正值，即由穿入到穿出。断 10 股和断 15 股的情况与图 7 所示情况相同，即磁通密度在齿根的分布情况没有受到断股的影响。

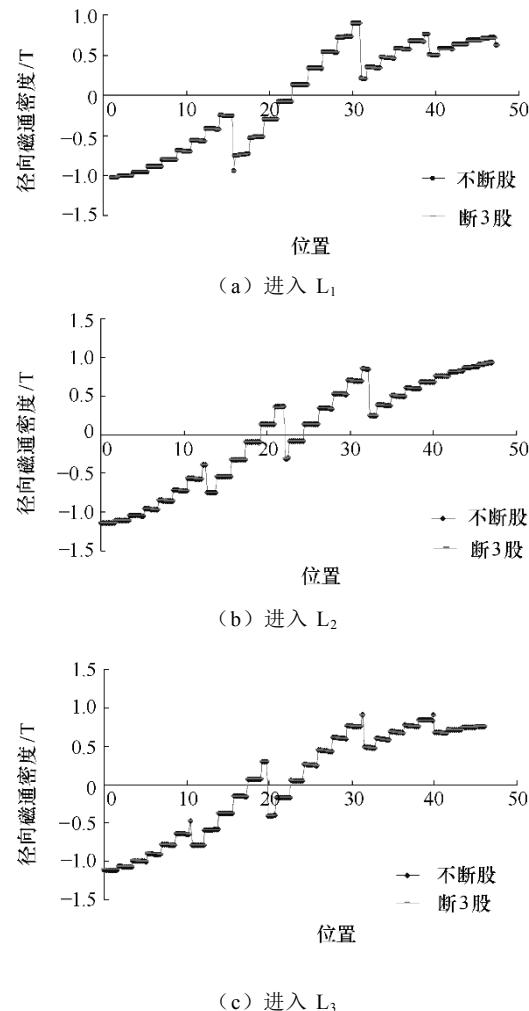


图 7 断 3 股时进入齿根部分的磁通密度

Fig.7 Flux density through root of tooth with three strands broken

2.3 断股后直交轴同步电抗的计算

在求给出给定磁场的基础上，得到各单元的磁阻率 ν_e ，保持所有单元的 ν_e 值不变，定子依次加上直轴和交轴磁动势，分别求出对应的直轴、交轴磁场和相应的电抗，再加上定子端部漏抗，即可得到该工况下的 x_d 和 x_q ^[7]。

图 8 和图 9 为断 3 股时的直、交轴磁力线分布图，与不断股情况下得到的直、交轴磁力线分布图分布趋势相同。

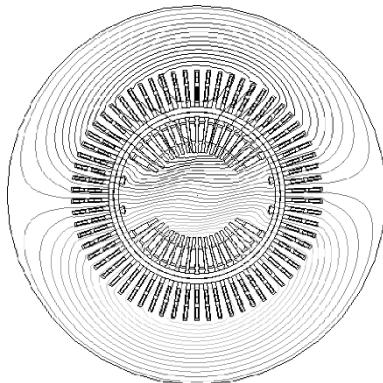


图 8 断 3 股时直轴磁场分布

Fig.8 Direct axis flux with three strands broken

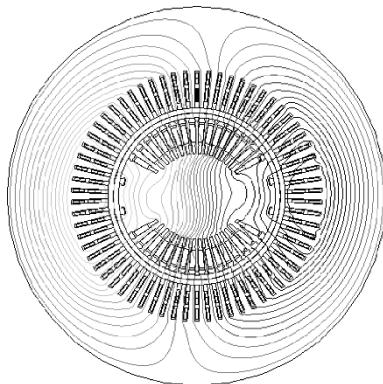


图 9 断 3 股时交轴磁场分布

Fig.9 Quadrature axis flux with three strands broken

根据文献[7]所述,电机工作时各相的饱和程度不同,进而各相的电抗值会有所差异。计算得到定子绕组断 3 根股线时的直、交轴电抗值,交轴电抗的标幺值为 1.61, A, B, C 三相直轴电抗标幺值见表 3。

表 3 断 3 股三相直轴同步电抗

Tab.3 Direct axis synchronous reactance of three phases

	各相			三相平均值
	A	B	C	
直轴电抗 (pu)	1.729	1.766	2.091	1.862

表 4 给出了断 3 股、10 股、15 股和不断股情况下的直交轴同步电抗。从表 4 中可以看出,断股时直轴同步电抗相等,交轴同步电抗相等,且和额定状态下的直交轴同步电抗近似相等。这种现象是由于定、转子的电流值也基本不变,即磁路饱和程度基本不变,而电抗是与磁路结构有关系的量,所以电抗值基本不变。

表 4 不断股和断股情况的直、交轴同步电抗

Tab.4 Direct and quadrature axis synchronous

reactance under different conditions

电抗	状 态			
	断 3 股	断 10 股	断 15 股	正常状态
直轴 (pu)	1.862	1.862	1.862	1.87
交轴 (pu)	1.604	1.604	1.604	1.61

3 定子绕组断股状态下定子温度场的计算与分析

3.1 基本假设和定子温度场求解域的确定

本文以 150MW 空冷汽轮发电机为例,该电机采用轴径向通风冷却方式,其通风系统在结构上沿轴向和周向分别对称,把该空冷汽轮发电机定子三维温度场的求解域确定为轴向半个铁心段,周向整个齿距的范围,求解区域如图 10 所示^[9]。

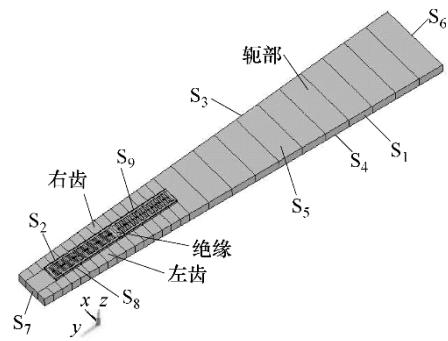


图 10 定子三维温度场的求解域

Fig.10 Model of the stator temperature field

基本假设如下^[10-11]:

- (1) 位于同一定子槽中的上、下层绕组是同相的,在同一时间内流过相同的电流。
- (2) 槽楔近似当作与槽同宽,槽内的所有绝缘(股线绝缘、层间绝缘)为热性能与主绝缘相同。
- (3) 通风沟中齿和轭的表面、槽绝缘的外表面及轭背部与空气接触面的散热系数分别取其分区域平均值。
- (4) 定子径向通风沟内流体的物性参数变化对定子温度场的影响较小,忽略不计。通风沟内的风温沿径向呈线性分布。

3.2 三维稳态热传导方程及等价变分

在直角坐标下,电机某一计算区域内的稳态温度场求解可归结为如下的边值问题^[12-13]:

$$\begin{cases} \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -q \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 & S_p \text{ 上} \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_f) & S_Q \text{ 上} \end{cases} \quad (2)$$

式中 S_p —由各绝热断面 S_1, S_2, S_3, S_4 构成;

S_0 ——由各散热面 S_5 , S_6 , S_7 , S_8 , S_9 构成;

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ —— x, y, z 方向的导热系数;

q ——热源密度，它是定子侧各项损耗密度之和：

α —散热系数:

T ——求解区域任意位置外的温度;

T_f ——流体的温度。

根据变分原理，上述混合边值问题可转化为条件变分形式，对变分作离散化处理后，可得到三维温度场有限元方程，进而可以得到求解域内全部节点温度。

3.3 断股状态定子温度场的数值计算与分析

在考虑断股后基本铁耗和空载时铁心中附加损耗不变的情况下，参考 150MW 汽轮发电机电磁计算公式及文献 [14]，确定变化后的涡流损耗和环流损耗，对电机定子温度场进行计算与分析。

根据文献[15]进行入风口风速计算，计算出的入风口风速为 15.8m/s，将通风沟内流体的流速按线性变化处理，求出每段齿部和轭部的平均风速，根据文献[16-17]确定电机各部分的散热系数。

把上述散热系数代入相关温度场方程中，通过求解即可确定电机定子温度的分布 [18]。计算了额定电流下的温度，并与试验点温度进行比较，见表 5。

表 5 额定情况下试验点温度与计算温度比较

Tab.5 Test temperatures compared with the calculated temperatures under rated condition

	测量点		
	1	2	3
试验值/℃	131.1	114.3	106.3
计算值/℃	124.5	126.7	114.6
误差值(%)	5.03	10.8	7.8

图 11 为定子温度场求解域通风沟处绕组局部放大图, 由于对电机定子温度进行了测量, 图中标示

了测温元件埋设位置。图中 1、2、3 号测温元件分别被埋设在定子上层绕组的不同位置。从表 5 可以看出上述的计算误差满足工程实际的要求，证明了该方法计算的正确性。其中第 2 个测温点与实验值之间的误差比较大，原因可能是在该处的损耗计算过程中产生误差较大，也可能是测温元件在埋置过程中位置有所改变所致。

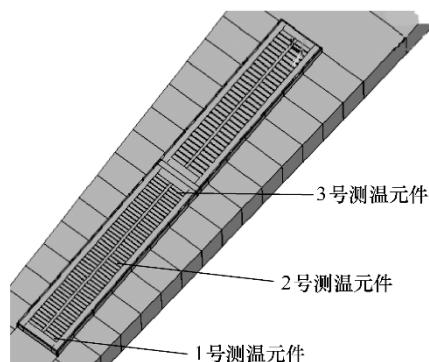


图 11 主绝缘局部放大图和测温元件的埋设
 Fig.11 Local enlarge drawing of insulate in the
 ventilating ducts and location of temperature
 measuring equipment

本文分别计算了定子线圈上层线棒股线断 3 股、10 股以及 15 股的定子温度场，并与未断股时的温度场进行了比较。对求解域最热面（即图 10 面 S_4 ）上股线及股线绝缘位置的温度分布进行了分析和比较。

从图 12~图 15 可以看出, 额定情况下, 线棒内排间绝缘两侧温度对称分布, 断股状态下温度分布与额定时温度分布相比有一定的变化。断股数越多, 断股状态下线棒内温度分布较额定时温度分布变化更为明显。上述现象主要是由于断股后股线的铜耗和涡流损耗均发生了变化, 且排间绝缘的导热

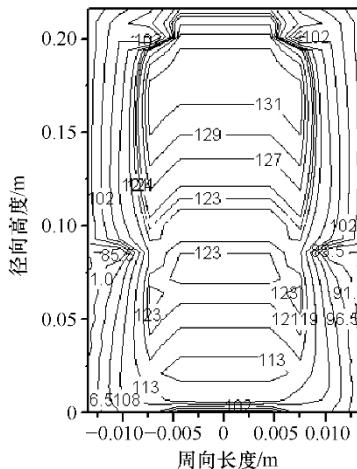


图 12 额定时定子线棒股线及股线绝缘温度分布图

Fig.12 Temperature of the adiabatic surface of the strands and insulation under rated

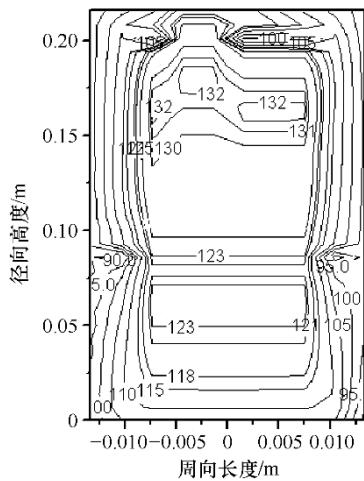


图 13 断 3 股时定子线棒股线及股线绝缘温度分布图

Fig.13 Temperature of the adiabatic surface of the strands and insulation with three strands broken

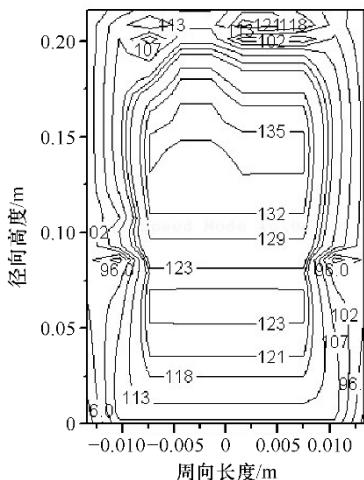


图 14 断 10 股时定子线棒股线及股线绝缘温度分布图

Fig.14 Temperature of the adiabatic surface of the strands and insulation with ten strands broken

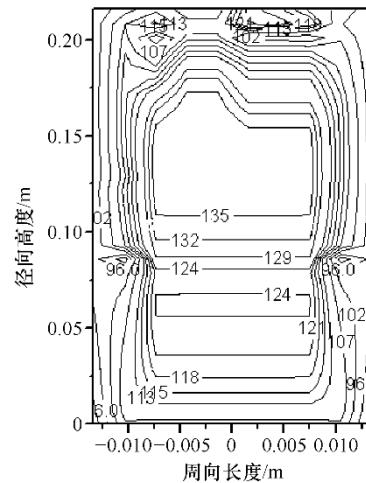


图 15 断 15 股时定子线棒股线及股线绝缘温度分布图

Fig.15 Temperature of the adiabatic surface of the strands and insulation with fifteen strands broken

性不强，使断股区域的股线沿周向方向的温度出现了明显变化。

表 6 未断股时定子温度计算结果

Tab.6 Temperature computed results of the stator

(单位：℃)

	全部股线	上层股线	下层股线	定子齿部	定子轭部
最高温度	132	132	123	95.2	83.9
最低温度	103	118	103	78.2	76.2
平均温度	123.5	127.2	118.2	88.3	79.2

对比以上几种情况下定子各部件的温度，可以得出，断股时股线的最高温度和最低温度均比未断股时的要高，随着断股数的增多最低温度也有可能出现在上层线棒，如断 15 股的情况，而齿部和轭部的温度变化不是很明显。

表 7 线棒断 3 股时定子温度计算结果

Tab.7 Temperature computed results of the stator

with three strands broken

(单位：℃)

	全部股线	上层股线	下层股线	定子齿部	定子轭部
最高温度	132.1	132.1	123.3	98.4	88.2
最低温度	104.6	118.5	104.6	79	78.6
平均温度	124.2	128	118.6	91.3	81.6

由上述分析可知，断股最高温度出现在上层线棒未断股侧，为确定最高温度的位置，在上层线棒未断股侧取一条路径如图 16 中 AB 所示，得到了绕组的温度分布曲线。

表 8 线棒断 10 股时定子温度计算结果

Tab.8 Temperature computed results of the stator
with ten strands broken

(单位: °C)

全部股线	上层股线	下层股线	定子齿部	定子轭部
最高温度	135	135	123.6	98.7
最低温度	104.7	106.8	104.7	78.7
平均温度	124.7	128.7	118.8	91.3

表 9 线棒断 15 股时定子各部件的具体温度

Tab.9 Temperature computed results of the stator
with fifteen strands broken

(单位: °C)

全部股线	上层股线	下层股线	定子齿部	定子轭部
最高温度	136.8	136.8	123.8	98.9
最低温度	104.2	104.2	104.7	79
平均温度	125.2	129.5	119	91.4

图 16 可以显示出不同断股状态下最高温度出现的位置发生了变化, 额定情况和断 3 股时的最高温度都是在距离槽口 15 根的上层股线, 断 10 股和断 15 股情况下, 最高温度分别在距离槽口 24 根和 28 根的上层股线。上述现象可能是由于断股数量和位置不同, 损耗分布发生了变化, 对相邻的股线影响不同。断 3 股时虽然最高温度值出现的位置没有发生变化, 但断 3 股时上层线棒的平均温升高于额定时上层线棒的平均温升, 这是由于断股后上层线棒的涡流损耗和环流损耗均变化不大, 而总的线棒上的绕组损耗增大, 导致温度分布如图 13 所示。断 10 股和断 15 股时, 上层线棒最高温度和最低温度较未断股时均有明显的变化, 这是因为特定的断股

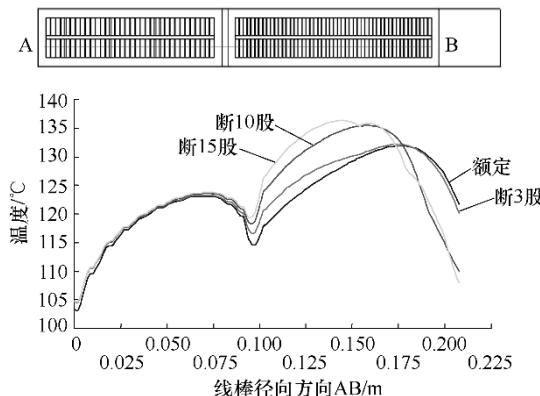


图 16 定子不同断股状态下温度分布图

Fig.16 Temperature under different broken

strands conditions

位置, 使线棒中的损耗(即基本铜耗和涡流损耗)集中分布, 且热量明显沿槽口方向下移。由此可见, 断股对电机定子线棒的温升及温度分布有很大的影响, 断股过多, 引起局部温升过高, 对电机的正常运行和寿命均有很大的影响。

4 结论

(1) 断股后得到的气隙磁场分布与额定状态时的磁场分布和幅值大小没有大的变化。断股区域较额定状态时该区域的饱和程度要低些; 电抗大小基本不变。

(2) 温度分布由原来的对称分布变为不对称分布, 且上层线棒的最高温度值变大, 断股数越多最高温度值越大, 且最高温度出现的位置越偏向槽底方向。

参考文献

- [1] 刘书学, 魏景生, 蒋卫东. 220MW 空冷汽轮发电机定子嵌线工艺研究 [J]. 大电机技术, 2006(4): 24-26.
Liu Shuxue, Wei Jingsheng, Jiang Weidong. Study on stator winding installation technology for 220MW air-cooled turbo-generator[J]. Large Electric Machine, 2006(4): 24-26.
- [2] 周怀理. 发电机定子线棒漏水和断股的原因分析 [J]. 大电机技术, 1999(2): 18-19.
Zhou Huaili. Analysis on the reason of leaking-water and strand-breaking in stator bar of generators[J]. Large Electric Machine, 1999(2): 18-19.
- [3] 初国清. 发电机定子绕组开路隐患的诊断 [J]. 华北电力技术, 1995(1): 28-36.
Chu Guoqing. Potential diagnostic of generator stator winding open-circuit[J]. North China Electric Power, 1995(1): 28-36.
- [4] 乔彦利, 刘聚辰, 张岩. 汽轮发电机定子绕组直流电阻不平衡故障诊断方法 [J]. 河北电力技术, 2005, 1(24): 8-10.
Qiao Yanli, Liu Juchen, Zhang Yan. Diagnosing method against unbalanced DC resistance of stator winding of a turbo generator[J]. Hebei Electric Power Technology, 2005, 1(24): 8-10.
- [5] 汤蕴璆, 梁艳萍. 汽轮发电机的三阶模型和超一超瞬态电抗 [J]. 电工技术学报, 2000, 15(7): 7-11.

- Tang Yunqiu, Liang Yanping. The 3rd order model and sub-subtransient reactances of turbogenerator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(7): 7-11.
- [6] 刘晓芳, 蒙亮, 罗应立, 等. 同步发电机 d-q 轴饱和特性曲线族 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 68-72.
- Liu Xiaofang, Meng Liang, Luo Yingli, et al. The saturation curve series of synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 68-72.
- [7] 汤蕴璆. 电机内的电磁场 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1998.
- [8] 陈世元. 交流电机磁场的有限元分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1998.
- [9] 王红宇, 李和明, 罗应立, 等. 耦合网络模型和有限元模型计算巨型水轮发电机定子温度场的比较研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 136-142.
- Wang Hongyu, Li Heming, Luo Yingli, et al. Research on the nonlinear thermal-liquid coupled network model of whole stator of three-gorge generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 136-142.
- [10] 李伟力, 丁树业, 靳慧勇. 基于耦合场的大型同步发电机定子温度场的数值计算 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 129-134.
- Li Weili, Ding Shuye, Jin Huiyong. Numerical calculation of large synchronous generator stator temperature fields based on coupled fields[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 129-134.
- [11] 温志伟, 傅德平, 顾国彪. 浸润式混合强迫内冷的蒸发冷却汽轮发电机定子三维温度场的仿真分析 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(3): 13-17.
- Wen Zhiwei, Fu Deping, Gu Guobiao. Simulation of 3D temperature distribution of immersion evaporative cooling turbo-generator combined with forced inner cooling system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(3): 13-17.
- [12] 丁树业, 李伟力, 马贤好, 等. 特殊绕组结构的空冷汽轮发电机定子三维温度场计算与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 140-145.
- Ding Shuye, Li Weili, Ma Xianhao, et al. Calculation and analysis of 3D stator temperature field for air cooled turbo-generator with special wingdings structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 140-145.
- [13] 程树康, 李伟力, 侯云鹏. 基于耦合边界条件的发电机定子非线性温度场计算 [J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 1-6.
- Cheng Shukang, Li Weili, Hou Yunpeng. Calculation of nonlinear stator temperature field for generator based on hybird boundary conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 1-6.
- [14] Li Weili, Chai Feng, Zhao Fen. Study on eddy current loss and heat-transfer character of stator windings in synchronous generator[C]. IEEE ICEMS, 2008: 17-20.
- [15] 李伟力, 周封, 侯云鹏, 等. 基于流体相似理论和三维有限元法计算大中型异步电动机的定子三维温度场 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 14-17.
- Li Weili, Zhou Feng, Hou Yunpeng, et al. Calculation of 3D stator temperature field of large and medium scale synchronous motor on the basis of fluid similarity and 3D FEM[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 14-17.
- [16] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [17] 李俊卿, 李和明. 汽轮发电机定子铁心端部温度模型中参数的确定 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 29(3): 69-72.
- Li Junqing, Li Heming. Research on the nonlinear thermal-liquid coupled network model of whole stator of three-gorge generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 29(3): 69-72.
- [18] 姚若萍, 饶芳权. 蒸发冷却水轮发电机定子温度场研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 87-90.
- Yao Ruoping, Rao Fangquan. Research on stator thermal field of evaporation cooling hydro-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 87-90.

作者简介: 殷巧玉 女, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事电机优化算法和电机优化设计理论研究工作。李伟力 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事大型电机综合物理场和特种电机理论研究工作。