

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.025

# 大型同步调相机转子故障温度场分析

陈湏斐<sup>1</sup>, 李呈营<sup>1</sup>, 马宏忠<sup>1</sup>, 赵帅<sup>1</sup>, 汤晓峰<sup>2</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**随着特高压交直流输电的发展,同步调相机以其快速动态响应能力受到广泛关注。文中以TTS-300-2型双水内冷同步调相机为研究对象,建立了调相机转子三维模型,计算并分析了转子不同负荷下、同一位置处不同水路堵塞程度时的转子三维温度场,转子匝间短路和水路堵塞同时存在时的温度场以及转子水路堵塞时的热应力情况,评估故障产生的影响和同步调相机带病运行能力。结果表明,不同负荷下转子温度场分布相似;转子出现故障会导致温度分布不平衡;单个槽内堵塞匝越多,转子温度场畸变越明显,且随着堵塞程度的增加,转子热应力也增加。

**关键词:**同步调相机;温度场;水路堵塞;堵塞程度;转子匝间短路;有限元分析

中图分类号:TM342

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)04-0192-07

## 0 引言

随着我国特高压直流输电系统的发展,电网的安全性和稳定性问题日益突出,换流站内的无功补偿需求越来越大<sup>[1-2]</sup>。新一代大容量同步调相机具有次暂态特性优、安全可靠、运行维护方便的特点,因此可在多回特高压直流工程的送端与受端换流站加装多台同步调相机,以提高系统稳定性<sup>[3-4]</sup>。温升作为同步调相机设计的关键指标,其大小直接关系电机的寿命及运行可靠性。

同步调相机投入运行时间不久,针对同步调相机的研究相对较少。虽然其结构与同步发电机相似,但两者在电力系统中的作用和负荷类型不同,一旦发生故障,变电站维护人员往往会因为缺少直接的理论依据而难以对其进行状态诊断和故障评估。转子内冷水系统堵塞是大型水内冷电机常见的故障,转子空心导线水路局部堵塞往往引起温度升高<sup>[5-7]</sup>、振动增大<sup>[8]</sup>等问题,严重时甚至造成绝缘损坏乃至影响转子铁芯,因此亟须开展转子冷却水堵塞的相关研究。转子匝间短路是电机运行过程中较为常见的故障<sup>[9]</sup>。当前,大量学者采用电信号<sup>[10-12]</sup>、振动信号<sup>[13-14]</sup>对转子匝间短路故障进行诊断,或者采用有限元计算的方法对电机温度场进行研究<sup>[15]</sup>。如文献[16]考虑极对数对电机励磁磁动势、定子空载电动势及定子绕组并联支路间环流的影响,从理论上完善了以定子分支环流为特征对

转子匝间短路故障进行诊断的方法,不仅实现了故障的诊断,而且一定程度上可对故障位置进行定位,完善了转子匝间短路故障诊断理论。文献[17]提取了转子匝间短路故障后励磁电流中的谐波用以诊断故障;文献[18]通过将采集到的定子电流信号和振动信号进行小波包变换、傅里叶变换,对同步电机短路故障进行诊断;文献[19]研究了转子匝间短路故障对定子绕组力学特性的影响;文献[20]将多源信息融合的理论应用于电机故障诊断,同时对无功功率、转子振动、定子振动信号进行分析,提高了同步电机转子匝间短路故障诊断的准确性。而关于水路堵塞、水路堵塞下发生转子匝间短路下的温度场以及水路堵塞下的热应力情况却鲜有涉及。

文中以一台300 Mvar的双水内冷同步调相机为温度场研究对象,采用有限元法,针对转子水路堵塞、转子水路堵塞并发转子匝间短路故障,对转子故障情况下的温度和热应力展开研究,以期为同步调相机的状态诊断和故障评估提供借鉴。

## 1 转子三维有限元模型

### 1.1 同步调相机转子三维模型

文中以一台江苏某换流站运行的TTS-300-2型300 Mvar同步调相机为研究对象进行分析,重点研究转子温度场在不同工况下的分布,该同步调相机的基本参数如表1所示,其模型如图1所示。同步调相机转子导线用水冷却,转子每个槽有两排导线,每排导线为一个水路,在底匝导线进水,顶匝导线出水。

收稿日期:2022-01-23;修回日期:2022-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907052);中国博士后科学基金面上资助项目(2017M21606)

表1 同步调相机主要参数

Table 1 Main parameters of synchronous condenser

参数	数值	参数	数值
额定容量/Mvar	300	转子额定电流/A	1 835
定子额定电压/kV	20	转子本体长度/mm	5 950
转子槽数	32	转子外径/mm	1 100
极对数	2	额定频率/Hz	50

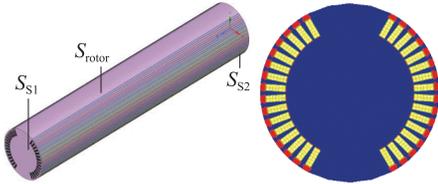


图1 转子模型

Fig.1 Model of rotor

图1中, $S_{rotor}$ 为转子与气隙换热面;在不考虑转子端部的影响下, $S_{S1}$ , $S_{S2}$ 面作为绝热面。

## 1.2 基本假设

由于大型同步调相机的转子尺寸较大,导致仿真计算时间较长。根据同步调相机的导热特性,为提高计算速度,在保证计算精度的基础上作出以下假设:

(1) 模型中 $S_{S1}$ 及其轴向对称面 $S_{S2}$ 和对称剖面视为绝热面,转子外表面 $S_{rotor}$ 的热量交换等效为由于转子高速旋转与气隙对流换热。

(2) 不考虑定子发热对转子温度场的影响,环境温度 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 认为转子励磁绕组铜耗为唯一热源并且均匀分布于所有导线。

(4) 假设槽内垫条与绝缘材料相同。

(5) 同步调相机发生转子轻微匝间短路时,励磁电压不变。

在以上假设的基础上,取转子周向二分之一,轴向 $200\text{ mm}$ 进行仿真。文中采用热力学三类边界条件,导热微分方程和边界条件如式(1)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = -q \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_{S1}} = 0 \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_{rotor}} = -\alpha(T - T_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$ 为固体待求温度; $\lambda_x$ , $\lambda_y$ , $\lambda_z$ 分别为材料在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向导热系数; $q$ 为热源密度; $n$ 为表面垂直方向; $\alpha$ 为换热面的散热系数; $T_f$ 为流体平均温度。

## 1.3 损耗与边界条件计算

根据1.2节的假设,由于同步调相机的电枢磁

场与转子同步旋转,其转子铁耗很小,可忽略不计,励磁绕组产生的铜耗即为转子热源。不同负荷下的转子铜耗 $p_{Cu}$ 可由式(2)计算得到。

$$p_{Cu} = \frac{I^2}{I_N^2} p_{CuN} \quad (2)$$

式中: $p_{CuN}$ 为额定转子励磁铜耗; $I$ 为励磁电流; $I_N$ 为额定励磁电流。

文中针对同步调相机转子的稳态温度场进行分析,需要对换热面的换热系数进行计算。转子外表面与气隙的换热系数如式(3)所示。

$$\alpha_\delta = 28(1 + v^{0.5}) \quad (3)$$

式中: $v$ 为转子表面合成速度,可由式(4)计算得到。

$$v = \sqrt{(0.5\omega)^2 + c^2} \quad (4)$$

式中: $\omega$ 为转子圆周速度; $c$ 为轴向风速。

由于转子圆周转速远大于气隙内轴向风速,因此式(3)可简化为式(5)。

$$\alpha_\delta = 28(1 + \omega^{0.5}) \quad (5)$$

冷却水与转子空心导线之间属于强迫对流换热,转子空心导线与冷却水之间换热面的换热系数如式(6)所示。

$$\alpha_w = \frac{Nu\lambda_f}{d} \quad (6)$$

式中: $Nu$ 为流体的努塞尔系数; $\lambda_f$ 为流体的导热系数; $d$ 为冷却水管道的直径。

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (7)$$

$$Re = \frac{v_{water}\rho d}{\mu} \quad (8)$$

式中: $Pr$ 为普朗特数; $Re$ 为雷诺数; $\rho$ 为流体密度, $v_{water}$ 为冷却水流速; $\mu$ 为黏性系数。

正常情况下,近似认为每根空心导线的几何结构与尺寸相同,每条水路的流量也相同。在已知总进水流量的情况下,根据总进水孔的截面积,根据式(9)即可求得进水流速。

$$v_{water} = \frac{Q}{S} \quad (9)$$

式中: $Q$ 为冷却水总流量; $S$ 为总进水孔的截面积。

当空心导线发生部分堵塞时,总进水流量不变,各空心导线水流量发生变化,空心导线发生部分堵塞时各空心导线水流量可由式(10)确定。

$$\begin{cases} V_{w2} = \frac{Q}{1 + (n_w - 1) \sqrt{\frac{\lambda_2 L + \zeta_2 d (S_2/S_{2x})^2}{\lambda_1 L}}} \\ V_{w1} = \frac{V_w - V_{w2}}{n_w - 1} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $V_w$ 为总进水流量； $V_{w2}$ 为堵塞空心导线水流量； $V_{w1}$ 为正常空心导线的水流量； $n_w$ 为空心导线数； $\lambda_2$ 为堵塞空心导线内水的沿程阻力系数； $\zeta_2$ 为堵塞空心导线内水的局部阻力系数； $\lambda_1$ 为正常空心导线内水的沿程阻力系数； $L$ 为导线轴向长度； $S_2$ 为堵塞空心导线未堵部位通流截面积； $S_{2x}$ 为堵塞空心导线部位通流管路截面积。

## 2 转子温度场分析

### 2.1 额定负荷下转子温度场

已知同步调相机在额定条件下的励磁损耗为 796 kW,此外,转子铜耗为唯一热源。根据式(2)可以得到在额定条件下转子导线的生热率为  $1.38 \text{ MW/m}^3$ ,此时转子的温度场仿真结果如图 2 所示。

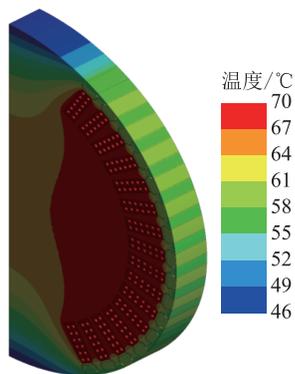


图 2 额定工况转子温度场分布  
Fig.2 Rotor temperature field distribution in rated condition

由图 2 可知,同步调相机水冷效果显著,转子空心导线最高温度为  $69.07 \text{ }^\circ\text{C}$ ,平均温度为  $68.78 \text{ }^\circ\text{C}$ ,转子铁芯最高温度为  $69.61 \text{ }^\circ\text{C}$ ,平均温度为  $64.76 \text{ }^\circ\text{C}$ 。可见绕组最高温度与转子铁芯最高温度基本相等,转子铁芯区域的温度梯度较转子空心导线的温度梯度大。转子温度最低点出现在大齿区,转子的热量基本上依靠冷却水带走。受槽内绝缘材料的影响,空心导线与转子铁芯之间热阻远大于空心导线与冷却水之间的热阻,因此热量难以由转子槽内向转子铁芯传递。

### 2.2 不同负荷下转子温度场分布

文中选取 0.5 倍励磁电流、1.5 倍励磁电流、2 倍励磁电流、2.5 倍励磁电流模拟同步调相机带不同负荷,并分析同步调相机不同负荷下的稳态温度场,如图 3 所示。

图 3 为不同工况下的温度分布,不同工况下的转子温度分布情况与额定工况下的转子温度分布梯度相似,转子铁芯区域的温度梯度较转子空心导

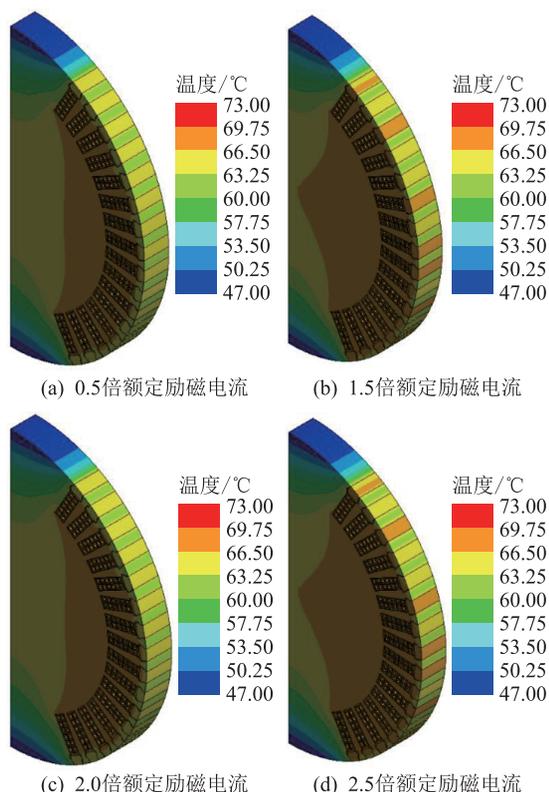


图 3 不同负荷下温度场分布  
Fig.3 Temperature field distribution under different loads

线的温度梯度大。转子温度最低点出现在大齿区,仅有最高温度数值上的差异。转子的整体温度随励磁电流的增加而增加,与实际运行相符。

为便于分析,对转子二分之一模型的 16 个槽进行编号,如图 4 所示,并根据空心导线排列方式,以槽 1 位置为起点,以转子圆心为原点,共取  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$  六条路径。为方便下文对转子空心导线堵塞情况下的温度场、热应力进行分析,对槽 16 内 12 个空心导线进行编号,依次取为 a、b、c、d、e、f、g、h、i、j、k、l。

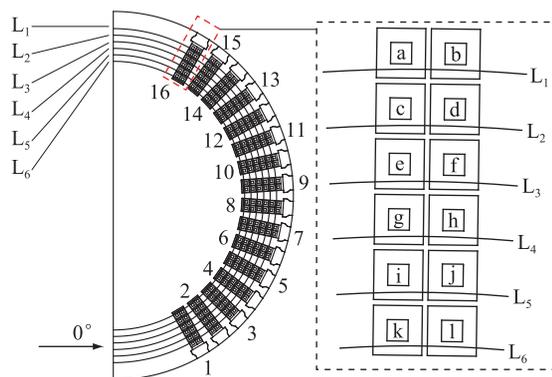


图 4 转子截面  
Fig.4 The rotor section

图 5 为额定工况下不同路径的温度分布,由图

中可知不同路径下温度分布相似,不同路径下的最高温度几乎相同,最低温度按  $L_1$  (59 °C)、 $L_2$  (64 °C)、 $L_3$  (66 °C)、 $L_4$  (67 °C)、 $L_5$  (68 °C)、 $L_6$  (69 °C) 排列依次升高。这是由于靠近转子外表面的位置,励磁绕组容易通过绝缘—铁芯—空气、绝缘—槽楔—空气两种路径与气隙中的冷却空气换热,而且路径  $L_1$  所穿过转子铁芯较长,因此不同槽之间的温度区分较为明显,最外侧  $L_1$  温度变化较大。

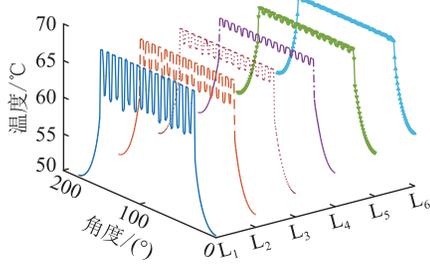


图5 额定工况下不同路径温度  
Fig.5 Different path temperatures under rated conditions

由于路径  $L_1$  较其他路径有较为明显的温度区分度,因此选择路径  $L_1$  比较不同工况下的温度分布差异。如图6所示,0.5倍励磁电流下路径  $L_1$  最低温度为58 °C;额定励磁电流下路径  $L_1$  最低温度为59 °C;1.5倍励磁电流下路径  $L_1$  最低温度为62 °C;2倍励磁电流下路径  $L_1$  最低温度为65 °C;2.5倍励磁电流下路径  $L_1$  最低温度为70 °C。路径  $L_1$  不同工况下的温度随励磁电流的增大而增大,与实际情况相符。

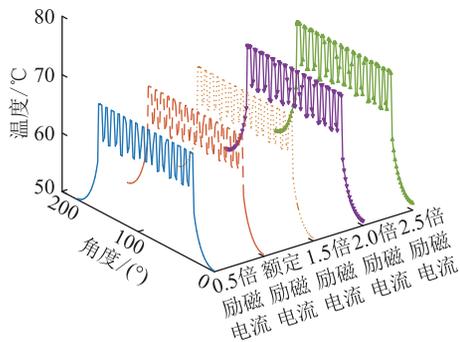


图6 不同工况下路径  $L_1$  温度  
Fig.6 The temperature of path  $L_1$  under different working conditions

### 3 转子故障下温度场分析

#### 3.1 转子水路堵塞温度场分析

选取图4中16号槽的a号空心导线,取堵塞系数  $k_d$  (空心导线中被堵的截面积与正常空心导线流通截面积的比值) 分别为0.2、0.4和0.6的情况下分析转子不同工况下的温度分布,得到不同堵塞系数

下路径  $L_1$  的仿真结果,如图7所示。

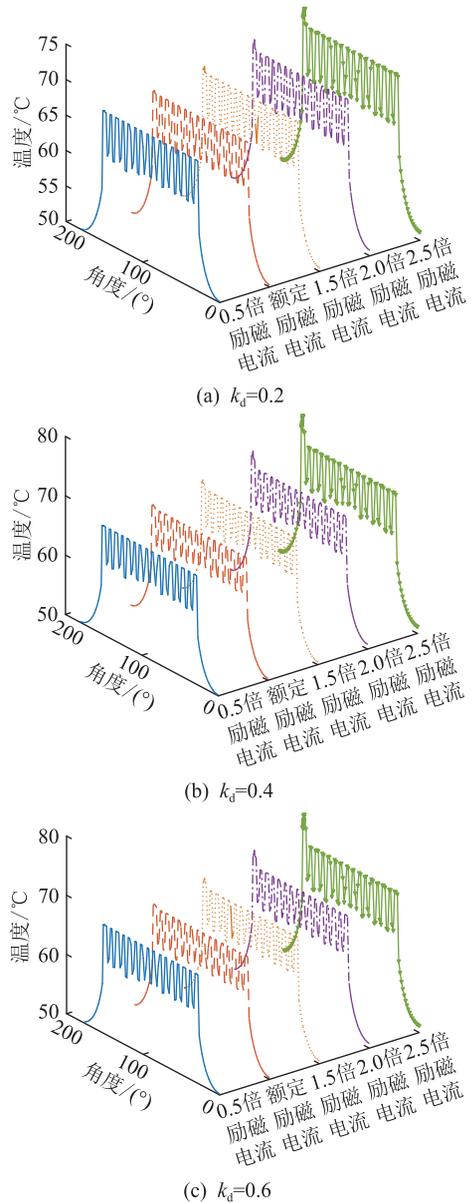


图7 不同堵塞程度下路径  $L_1$  温度分布

Fig.7 The temperature distribution of path  $L_1$  under different degrees of blockage

由图7可知,堵塞系数为0.2时,不同励磁电流下最大温差为8 °C;堵塞系数为0.4时,不同励磁电流下最大温差为12 °C;堵塞系数为0.6时,不同励磁电流下最大温差为14 °C。随着堵塞程度增加,堵塞位置处温度发生了明显的畸变,且温度畸变程度与励磁电流的大小呈正相关。因此,在同步调相机运行于过励磁条件下时,同步调相机转子容易因水道局部堵塞或者有异物引起局部温度升高,此时对绝缘耐热有较高的要求。

#### 3.2 转子匝间短路及水路堵塞温度场分析

由3.1节分析可知,同步调相机运行于过励磁条件下发生水路堵塞时局部温升最高,易引起转子

匝间短路,此外 3.2 节进一步分析了转子发生水路堵塞且匝间短路时的温度场。图 8 为 2.5 倍励磁电流正常情况、 $k_d$ 为 0.6、 $k_a$ 为 0.6 且 a 处短路 3 种情况下的温度分布。图 9 为不同槽发生 5 匝短路且 a 号空心导线  $k_d$ 为 0.6 时路径  $L_1$  的温度分布。

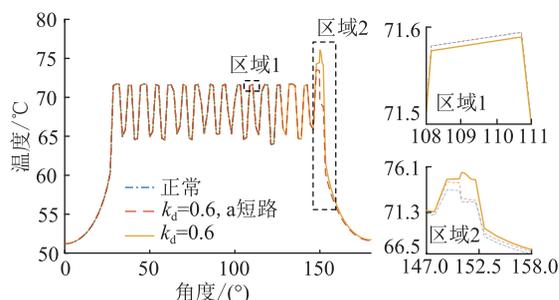


图 8 转子正常与故障情况温度分布  
Fig.8 Rotor normal and fault condition temperature distribution

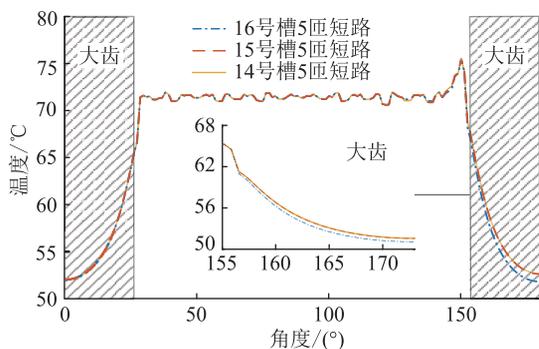


图 9 不同槽 5 匝短路的 a 空心导线堵塞下路径  $L_1$  温度分布

Fig.9 The temperature distribution of path  $L_1$  under the plugging of 5-turn short circuit for a hollow conductor with different slots

由图 8 可知,空心导线堵塞会导致空心导线局部温度升高,堵塞系数为 0.6 时,温度升高 2.5 °C;若此时该堵塞位置发生转子匝间短路故障,温度升高 1 °C。考虑到同步调相机转子发生轻微匝间短路时,短路匝电流降低为 0,其他导线电流相应增加。这将导致转子水路堵塞、转子水路堵塞且转子匝间短路时,故障位置和非故障位置的温度均高于转子无故障的情况,且故障位置温度畸变最为明显。相对于正常情况下的转子温度分布,在水路出现堵塞时温度畸变仍略高于水路堵塞且转子匝间短路的情况,说明当转子某处空心导线发生水路堵塞时,若此时该空心导线发生匝间短路,则发生匝间短路后的温升低于只发生匝间短路前的温升。这是由于转子励磁电流为直流电,当发生转子匝间短路故障时,短路匝电流降低,导致被短路位置发热量减少。因此,水路堵塞时的温升大于水路堵塞且转子

匝间短路时的温升。

由图 9 可知,转子匝间短路故障会引起转子温度畸变,且不同短路位置对转子温度分布影响不同,16 号槽短路时转子大齿温度较 14 号、15 号槽短路时温度低 1 °C。同步调相机转子不同槽发生短路程度相同的匝间短路时,由于正常导线在发生匝间短路后承受励磁电流高于故障前,因此路径  $L_1$  故障后温度高于故障前温度且温度梯度变小,如图 9 所示,整体温度被“拉平”。当匝间短路发生在与转子大齿最近的位置时,大齿温度最低。因此,不同位置的匝间短路对大齿温度影响不同,距大齿较近时大齿温度最低,随匝间短路所在槽与转子距离的增加,大齿温度缓慢升高。

### 3.3 转子水路堵塞热应力分析

根据以上温度场分析,仅考虑温度场对转子应力的影响,对转子正常以及发生不同堵塞系数下的转子应力进行计算,正常情况下转子的热应力分布如图 10 所示,不同堵塞情况下的路径  $L_1$  的热应力如图 11 所示。

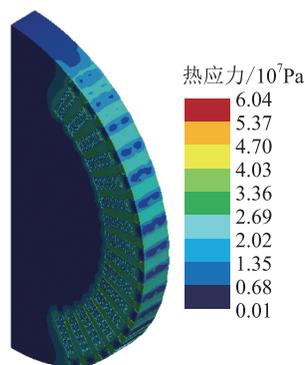


图 10 2.5 倍励磁电流转子范式等效应力分布  
Fig.10 2.5 times excitation current rotor normal form von Mises distribution

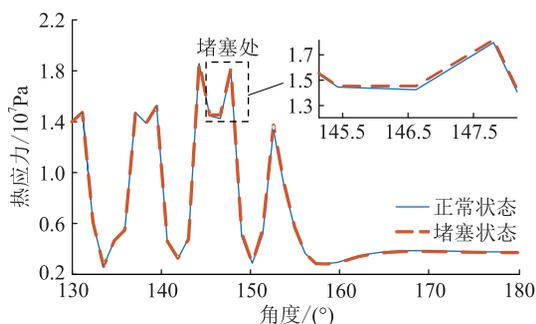


图 11 不同堵塞程度下路径  $L_1$  热应力分布  
Fig.11 The thermal stress distribution of route  $L_1$  under different plugging degrees

由图 10 可知,2.5 倍励磁电流下,转子的最大热应力为 53.8 MPa,小于一般转子的屈服度 440 MPa,说明正常情况下同步调相机热应力不会导致转子

发生不可恢复性形变。转子大齿由于温度梯度较大,其热应力总体上大于小齿、铁芯。由图 11 可知,转子在发生水路堵塞时,由于局部的温度升高,转子大齿及其他位置的热应力增加 0.2 MPa。

#### 4 结语

根据有限元仿真对新一代大容量同步调相机转子正常情况下不同负载、同一空心导线不同堵塞程度、转子轻微匝间短路下空心导线堵塞、不同堵塞程度下热应力进行分析,得到以下结论:

(1) 正常情况下同步调相机转子温度场对称分布,转子大齿温度最低,转子槽周围温度最高。转子温度随负载增加而增加。

(2) 转子空心导线堵塞时,随堵塞系数增加,堵塞处空心导线温度畸变严重,畸变程度随负载的增加而增加。

(3) 转子空心导线堵塞时,随着局部温度的升高,转子所受热应力增加。因此,温度的升高应该作为转子运行时应力计算的考虑因素之一。

#### 参考文献:

- [1] 苟晓毅,肖岚,兰强,等. 特高压交直流混合电网无功电压特性与电压控制协调系统设计[J]. 电力科学与技术学报, 2012,27(4):81-86.  
GOU Xiaoyi, XIAO Lan, LAN Qiang, et al. Design on var/voltage characteristics and coordinated automatic voltage control system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012,27(4):81-86.
- [2] LI C H, LI K, MA C H, et al. Flexible control strategy for HVDC transmission system adapted to intermittent new energy delivery[J]. Global Energy Interconnection, 2021,4(4):425-433.
- [3] 程明,田伟杰,王伟,等. 新型同步调相机的关键技术及研究进展[J]. 电力工程技术, 2020,39(2):2-9.  
CHENG Ming, TIAN Weijie, WANG Wei, et al. Review on key technologies and latest development of new synchronous condenser[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2):2-9.
- [4] 洪权,李辉,宋军英,等.  $\pm 800$  kV 湘潭换流站调相机与特高压直流输电无功电压协调控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020,41(5):35-39.  
HONG Quan, LI Hui, SONG Junying, et al. Study on reactive voltage coordinate control strategy for synchronous condenser of  $\pm 800$  kV Xiangtan converter station and UHVDC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5):35-39.
- [5] 马明晗,武玉才,李永刚. 核电四极汽轮发电机转子典型故障温度场分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(5):1018-1023.  
MA Minghan, WU Yucai, LI Yonggang. Temperature field analysis of the typical faults of nuclear four-pole turbo-generator rotor[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(5):1018-1023.
- [6] 李俊卿,王丽慧. 汽轮发电机空心股线堵塞时定子温度场的数值仿真[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12):70-74.  
LI Junqing, WANG Lihui. Numerical simulation of temperature field in turbo-generators stator on cooling water blockage[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12):70-74.
- [7] MA M H, LI Y G, WU Y C, et al. Multifield calculation and analysis of excitation winding interturn short circuit fault in turbo-generator[J]. Energies, 2018, 11(10):2626.
- [8] 王云峰,冀顺林. 一起发电机转子绕组动态匝间短路故障的诊断与分析[J]. 电工技术, 2021(17):170-172.  
WANG Yunfeng, JI Shunlin. Diagnosis and analysis of a generator rotor winding dynamic inter-turn short circuit fault[J]. Electric Engineering, 2021(17):170-172.
- [9] 马明晗,姜猛,李永刚,等. 大型双水内冷调相机转子绕组匝间短路故障诊断方法研究[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2):19-27.  
MA Minghan, JIANG Meng, LI Yonggang, et al. Research on fault diagnosis method of turn to turn short circuit in rotor winding of large-scale dual water internal cooling condenser[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(2):19-27.
- [10] 魏书荣,任子旭,符杨,等. 基于双侧磁链观测差的海上双馈风力发电机转子绕组匝间短路早期故障辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5):1470-1479.  
WEI Shurong, REN Zixu, FU Yang, et al. Early stage inter-turn faults detection technique for the rotor windings of offshore wind DFIGs based on the differential value of two-side linkage's observation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5):1470-1479.
- [11] 武玉才,马倩倩,蔡波冲,等. 水轮发电机转子绕组匝间短路故障的新型在线诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(11):19-25.  
WU Yucai, MA Qianqian, CAI Bochong, et al. A new on-line fault diagnosis method of inter-turn short circuit fault in rotor winding of hydro-generator[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(11):19-25.
- [12] 范舒婷,孟大伟,艾萌萌. 不同定子绕组结构五相感应电机开路故障时性能对比分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7):1679-1688.  
FAN Shuting, MENG Dawei, AI Mengmeng. Comparison and analysis of the performance of five-phase induction motors with different stator winding connections under open-circuit conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7):1679-1688.
- [13] 戈宝军,芦浩. 定子绕组匝间短路时转子不平衡径向磁拉力[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(2):112-120.  
GE Baojun, LU Hao. Unbalanced radial electromagnetic force on rotor under inter-turn short circuit faults of stator winding[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(2):112-120.
- [14] 李俊卿,陈雅婷,李斯璇. 基于深度置信网络的同步发电机励磁绕组匝间短路故障预警[J]. 电力自动化设备, 2021,

- 41(2):153-158.
- LI Junqing, CHEN Yating, LI Sixuan. Early warning of inter-turn short circuit fault in excitation windings of synchronous generator based on deep belief network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2):153-158.
- [15] CAO Z B, LI W L, LI J Y, et al. Research on the temperature field of high-voltage high power line start permanent magnet synchronous machines with different rotor cage structure [J]. Energies, 2017, 10(11):1829.
- [16] 辛鹏, 戈宝军, 陶大军, 等. 多极隐极发电机励磁绕组匝间短路时的定子分支环流谐波特性 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(7):67-76.
- XIN Peng, GE Baojun, TAO Dajun, et al. Stator branch circulating current harmonic characteristics of multipole non-salient-pole generator with field winding inter-turn short circuits [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7):67-76.
- [17] AYDIN I, KARAKOSE M, AKIN E. A new method for early fault detection and diagnosis of broken rotor bars [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(4):1790-1799.
- [18] 陈勇, 梁洪, 王成栋, 等. 基于改进小波包变换和信号融合的永磁同步电机匝间短路故障检测 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1):228-234.
- CHEN Yong, LIANG Hong, WANG Chengdong, et al. Detection of stator inter-turn short-circuit fault in PMSM based on improved wavelet packet transform and signal fusion [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1):228-234.
- [19] TANG G J, JIANG H C, HE Y L, et al. Electromagnetic forces and mechanical responses of stator windings before and after rotor interturn short circuit in synchronous generators [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020:5892312.
- [20] 李永刚, 王罗, 李俊卿, 等. 基于多源信息融合的同步发电机转子绕组匝间短路故障识别 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16):162-167, 191.
- LI Yonggang, WANG Luo, LI Junqing, et al. Identification of inter-turn short-circuit fault in rotor windings of synchronous generator based on multi-source information fusion [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16):162-167, 191.

作者简介:



陈贞斐

陈贞斐(1987),女,博士,副教授,研究方向为电机系统设计与控制、电气设备电磁分析计算(E-mail:chenzhenfei@hhu.edu.cn);

李呈营(1997),男,硕士在读,研究方向为同步调相机多物理场仿真与故障诊断;

马宏忠(1962),男,博士,教授,研究方向为电气设备故障诊断技术。

### Temperature field analysis of rotor fault in large synchronous condenser

CHEN Zhenfei<sup>1</sup>, LI Chengying<sup>1</sup>, MA Hongzhong<sup>1</sup>, ZHAO Shuai<sup>1</sup>, TANG Xiaozheng<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, HoHai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Extra-high Voltage Branch Company, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** With the development of UHV AC/DC transmission, synchronous condenser has been paid more and more attention because of its fast dynamic response ability. The safe operation of synchronous condenser is related to the stability of power grid. Taking TTS-300-2 dual water cooled synchronous condenser as the research object, and a three-dimensional model of its rotor is established. The three-dimensional temperature field of the rotor is calculated and analyzed under different loads and degrees of water blockage at the same position. The temperature field of the rotor with interturn short circuit fault and water blockage fault are calculated and analyzed. The thermal stress of the rotor with water blockage fault is also studied. Based on the analysis, the impacts of these faults and the ability of the synchronous condenser to operate are evaluated. The results show that the distribution of rotor temperature field is similar under different loads. Rotor fault leads to unbalanced temperature distribution. The more turns of blockage in a single slot, the more obvious temperature distortion of the rotor. The thermal stress of rotor increases with blockage degree.

**Keywords:** synchronous condenser; temperature field; waterway blockage; degree of clogging; inter-turn short circuits; finite element analysis

(编辑 李栋)