

# 水轮发电机励磁绕组匝间短路转子热应力 计算与分析\*

李俊卿<sup>1</sup>, 王 罗<sup>1</sup>, 李永刚<sup>1</sup>, 沈 超<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071000;

2. 国网河北省电力公司检修分公司, 河北 石家庄 050000)

**摘 要:** 以三峡 700 MW 水轮发电机为例, 基于传热学和热应力理论, 建立转子磁极三维求解模型, 并给出相关的基本假设与边界条件, 最后采用有限元方法对热应力进行求解, 得到在转子绕组匝间短路情况下的磁极热应力分布。在此计算的基础上, 进一步研究了短路匝数变化与匝间短路位置变化对磁极热应力的影响。通过计算研究得出了很多有意义的结论, 为匝间短路更深层次的研究奠定了基础, 也为电机设计者以及相关研究工作提供一定的参考。

**关键词:** 水轮发电机; 励磁绕组; 匝间短路; 有限元; 热应力

**中图分类号:** TM 307 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)08-0116-08

## Calculation and Analysis of Rotor Thermal Stress for Inter-turn Short Circuit of Hydro generator Excitation Winding\*

LI Junqing<sup>1</sup>, WANG Luo<sup>1</sup>, LI Yonggang<sup>1</sup>, SHEN Chao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;

2. State Grid Hebei Maintenance Branch, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** The Three Gorges 700 MW hydro-generator was used as an example to establish a model of rotor magnetic pole. The thermal stress was solved by finite element method based on the theory of heat transfer and heat stress. Based on the relative basic assumptions and boundary conditions, the distribution of magnetic heat stress in case of winding inter-turn short-circuit was given. On the basis of this calculation, the influence of the change of short-circuit turns and the change of short-circuit position on the magnetic heat stress was studied. Many meaningful conclusions have been obtained through computational research. The results lay the foundation for further study of the inter-turn short-circuit, and provide some reference for the motor designers and related research work.

**Key words:** hydro generator; excitation winding; inter-turn short circuit; finite element; thermal stress

## 0 引 言

转子绕组匝间短路故障是水轮发电机中一种较为常见的故障。大多数水轮发电机都发生过或者存在转子匝间短路故障<sup>[1]</sup>。随着水轮发电机的单机容量逐步增加, 其内部的热应力变化也引起

重视。当大型水轮发电机转子绕组发生匝间短路时, 励磁绕组有效匝数减小, 短路匝温度下降, 使转子磁极等部分的温度分布发生改变, 进而影响转子磁极的应力分布<sup>[2-3]</sup>。磁极受到的热应力不均衡, 可能使匝间短路故障进一步扩大, 严重时甚至会威胁到机组安全运行。因此分析大型水轮发电机励

\* 基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2014502015)

作者简介: 李俊卿(1967—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电机及其系统分析、电机状态监测与故障诊断。

王 罗(1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为同步发电机故障诊断与分析。

李永刚(1967—), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为电机与电器故障诊断技术、同步发电机控制运行。

磁绕组匝间短路故障的热应力具有重要意义。

我国在电机热应力方面的研究起步相对较晚,相关工作也较少,而且大部分是针对电机正常运行状态热应力进行的分析研究。王艳武等<sup>[4-5]</sup>研究了异步电机转子和定子三维温度场及热应力场。刘娅娟等<sup>[6]</sup>研究了水轮发电机转子磁极悬挂结构动应力。李伟力等<sup>[7-8]</sup>在发电机温度场与应力场方面做了很多工作,计算了水轮发电机转子旋转状态下磁极间流体温度场以及相关有限元分析等。胡田等<sup>[9]</sup>对永磁风力发电机三维温度场进行了计算及分析。杜灿勋等<sup>[10]</sup>对大型全空冷水轮发电机定子线棒损耗和温度场综合进行了计算。

以上学者在温度场与热应力方面做了许多贡献。通过对相关工作研究的总结分析发现,热应力的研究主要针对发电机正常运行状态,对于电机某些故障,尤其是匝间短路故障对水轮发电机热应力影响的研究还相对较少。本文采用 ANSYS 软件对水轮发电机在励磁绕组匝间短路情况下的磁极热应力进行了详细研究,以三峡水电站右岸 700 MW 水轮发电机为例,建立转子磁极计算模型。本文以有限元理论和热应力理论为基础,分析了绕组匝间短路不同位置、不同短路匝数时对磁极热应力影响,得出了转子绕组发生一匝短路时短路匝热应力增大,距离短路匝较远的绕组热应力增大等有意义的结论。因此研究水轮发电机励磁绕组匝间短路故障的热应力不仅可协助设计人员预测大型水轮发电机匝间短路热应力变化对磁极的影响,为设计方案优化奠定基础,还可为水轮发电机相关故障检测和处理提供理论依据。

## 1 求解模型的建立

### 1.1 热应力理论

根据目前热应力理论,单元体的总应变量为两部分变化叠加而成。一部分是由温度变化引起的,另一部分是由应力引起的<sup>[11]</sup>。进而推广弹性力学中的虎克定律到包含热应变及热应力的公式中:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z) + \alpha t] \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z) + \alpha t] \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x) + \alpha t] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \end{cases} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3)$$

$$\Theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \frac{E}{1 - 2\mu}(e - 3\alpha t) \quad (4)$$

- 式中:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ —— $x, y, z$  方向上的应变;
- $E$ ——物体弹性模量;
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ —— $x, y, z$  方向上的正应力;
- $\mu$ ——泊松系数比;
- $\alpha$ ——线性膨胀系数;
- $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ —— $xy, yz, xz$  面的剪应变;
- $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ —— $xy, yz, xz$  面的剪应力;
- $G$ ——剪切弹性模量;
- $\Theta$ ——体积应力;
- $e$ ——体积应变。

将式(3)、式(4)代入式(1)、式(2),整理可得应变、温差表示应力的广义公式为

$$\begin{cases} \sigma_x = 2G\varepsilon_x + \lambda e - \beta t & \begin{cases} \tau_{xy} = G\gamma_{xy} \\ \tau_{yz} = G\gamma_{yz} \end{cases} \\ \sigma_y = 2G\varepsilon_y + \lambda e - \beta t & \\ \sigma_z = 2G\varepsilon_z + \lambda e - \beta t & \begin{cases} \tau_{xz} = G\gamma_{xz} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\alpha E}{1 - 2\mu} = \alpha(3\lambda + 2G) \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{E\mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (7)$$

以上公式未知量较方程数多,为了得出唯一解,还需要表示应力应变内在关系的协调方程与消除位移分量的位移方程:

$$\begin{cases} (\lambda + 2G) \frac{\partial e}{\partial x} - 2G \left( \frac{\partial \omega_z}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right) - \beta \frac{\partial t}{\partial x} + X = 0 \\ (\lambda + 2G) \frac{\partial e}{\partial y} - 2G \left( \frac{\partial \omega_x}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial x} \right) - \beta \frac{\partial t}{\partial y} + Y = 0 \\ (\lambda + 2G) \frac{\partial e}{\partial z} - 2G \left( \frac{\partial \omega_y}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial y} \right) - \beta \frac{\partial t}{\partial z} + Z = 0 \end{cases} \quad (8)$$

协调方程为

$$\nabla^2 \sigma_i + \frac{1}{1 + \mu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial i^2} = -\alpha E \left( \frac{1}{1 - \mu} \nabla^2 t + \frac{1}{1 + \mu} \frac{\partial^2 t}{\partial i^2} \right) -$$

$$\left[ \frac{\mu}{1-\mu} \left( \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right) + 2 \frac{\partial I}{\partial i} \right]$$

$$i = x, y, z; I = X, Y, Z \quad (9)$$

$$\begin{cases} \nabla^2 \tau_{xy} + \frac{1}{1+\mu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x \partial y} = -\frac{\alpha E}{1+\mu} \frac{\partial^2 t}{\partial x \partial y} - \left( \frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{\partial X}{\partial y} \right) \\ \nabla^2 \tau_{yz} + \frac{1}{1+\mu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y \partial z} = -\frac{\alpha E}{1+\mu} \frac{\partial^2 t}{\partial y \partial z} - \left( \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{\partial Z}{\partial y} \right) \\ \nabla^2 \tau_{xz} + \frac{1}{1+\mu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x \partial z} = -\frac{\alpha E}{1+\mu} \frac{\partial^2 t}{\partial x \partial z} - \left( \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial X}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (10)$$

热力弹性方程的解在物体表面还应满足以下边界条件:

$$\begin{cases} \bar{X} = \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n \\ \bar{Y} = \sigma_y m + \tau_{yz} n + \tau_{xy} l \\ \bar{Z} = \sigma_z n + \tau_{xz} l + \tau_{yz} m \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ ——单元体的表面  $xyz$  上的分量;  
 $l, m, n$ ——边界表面的法线方向余弦。

根据以上公式可以计算单元体所受到的应力。

### 1.2 物理模型

本文以三峡水电厂右岸 700 MW 水轮发电机转子磁极为例建立基本物理模型,水轮发电机冷却方式为全空冷。水轮发电机参数如表 1 所示<sup>[12-14]</sup>。

表 1 水轮发电机及转子主要参数

参数名称	参数值
型号	SF700-80/19760
额定容量/MVA	777.8
额定功率/MW	700
额定电压/kV	20
额定电流/A	22 453
额定转速/(r · min <sup>-1</sup> )	75
铁心长度/mm	2 920
转子外径/mm	18 742
每极绕组匝数	14
每极阻尼条数	4
阻尼条直径/mm	25

本文研究内容为水轮发电机转子绕组匝间短路对磁极的热应力的影响。由于三峡水轮发电机有 80 个磁极,且转子磁极结构相对复杂,限于仿

真设备计算能力,在保证对磁极热应力精确计算的前提下,需要对转子求解区域进行合理简化,并建立单个磁极计算模型,如图 1 所示。

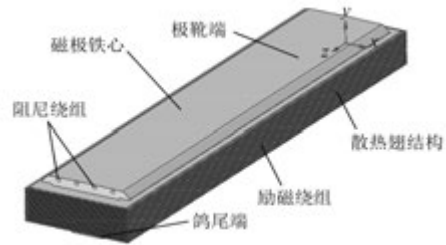


图 1 转子磁极仿真模型

假设如下<sup>[15-17]</sup>:

- (1) 假设水轮发电机的所有转子磁极结构和风路对称,因此只需建立水轮发电机一个转子磁极的计算模型。
- (2) 励磁绕组迎风背风面,空气及冷却风温度取其平均值。
- (3) 实际励磁线圈如图 2 所示,线圈接口处较为复杂,搭建模型时将其简化成直角连接。

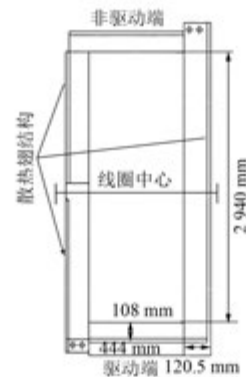


图 2 实际磁极线圈

(4) 将实际中励磁绕组匝间绝缘的 Nomex 纸等效为绝缘接触面,接触面参数设置与绝缘纸保持一致。

(5) 在磁极模型所涉及的结构中,载荷作用产生的应力、应变、位移等都是连续函数。

(6) 磁极各部分为均匀介质且各向同性,即物体内部各点在所有方向上的物理性质相同。

(7) 磁极各部分是完全弹性的,即物体在外加载荷作用下引起形变,卸载后完全恢复,没有残余形变<sup>[18]</sup>。

基于以上模型假设,建立转子磁极模型并剖分。在剖分过程中,由于针对磁极励磁绕组匝间短路故障计算,所以需要磁极绕组区域进行密集剖分。求解域剖分情况如图 3 所示。

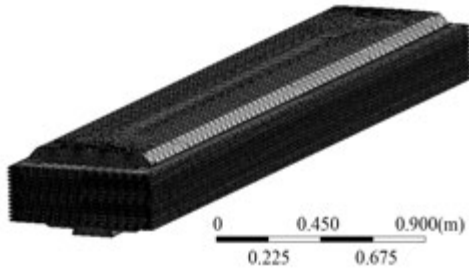


图 3 转子磁极求解域剖分图

## 2 边界条件及相关参数确定

### 2.1 温度场条件

(1) 磁极下方的边界面为绝热面。

(2) 励磁绕组和极靴表面以及其迎风面和背风面的边界面均为散热面。

(3) 图 1 中磁极的左侧为旋转迎风面,正前方为轴向通风迎风面,其对侧均为背风面。

### 2.2 热应力条件

本文热应力的计算采用热-结构耦合分析。磁极材料需要定义弹性模量、泊松比、热膨胀系数、比热容、导热系数等<sup>[19-22]</sup>。材料属性中单位均使用国际单位制。

转子磁极靠近极靴端有 4 块绝缘托板,磁极靠近鸽尾端只在线圈的 4 个角上有绝缘小托板和钢支撑板。这些可通过在其位置上施加压力来等效。

### 2.3 水轮发电机转子损耗

大型水轮发电机转子热源有很多种,主要有励磁绕组铜耗、阻尼绕组杂散损耗等。为了保证模型精确以及计算量的问题,本文考虑了如下损耗<sup>[23]</sup>:

(1) 定子绕组磁动势谐波在阻尼绕组中引起的杂散损耗。

$$P_{ph} = \frac{3.7pn_B l_B C_B k_{I300}}{A_B} \left( \frac{\tau}{\delta k_\delta} \right)^2 \left[ \frac{k_\delta X_{ad} \frac{F_\delta}{2000}}{\lambda_\delta} + 2\lambda_s \right] \times 10^{-4} \quad (12)$$

其中:

$$k_{I300} = 1.96d_B \sqrt{\frac{1}{C_B}}; \lambda_\delta = \frac{t_2 - b_{n2}}{k_\delta \delta'}$$

$$\lambda_s = \frac{0.66}{k_{I300}} + \frac{h_{n2}}{b_{n2}} + 0.2; \delta_B = \frac{6t_2}{\tau} 180^\circ$$

式中:  $p$ ——发电机电极对数;

$n_B$ ——阻尼条个数;

$l_B$ ——阻尼条长度;

$C_B$ ——阻尼条电阻系数与铜电阻系数之比;

$A_B$ ——阻尼条截面积;

$d_B$ ——阻尼条直径;

$\delta$ ——气隙长度;

$\tau$ ——极距;

$k_\delta$ ——总气隙系数;

$F_\delta$ ——气隙磁位降;

$t_2$ ——转子阻尼条节距;

$h_{n2}$ ——阻尼槽槽口高度;

$b_{n2}$ ——阻尼槽槽口宽度;

$\delta'$ ——计算气隙长度;

$x_{ad}$ ——纵轴电枢反应电抗。

(2) 空载额定电压时的极靴表面损耗。

$$P_{p0} = \Delta \left[ \frac{(k_{\delta 1} - 1) B_\delta t_1}{10000} \right]^2 \left( \frac{Zn_N}{10000} \right)^{1.5} \frac{2pA'_p}{1000} \times 10^{-5} \quad (13)$$

式中:  $\Delta$ ——磁极冲片厚;

$k_{\delta 1}$ ——定子开槽气隙系数;

$B_\delta$ ——极靴范围内气隙的平均磁密;

$t_1$ ——定子齿距;

$A_p$ ——极靴表面计算面积。

## 3 转子绕组匝间短路热应力计算结果

一般情况下,由于以下条件物体会产生热应力<sup>[11]</sup>:(1) 构件内部的温度分布不均匀。构件内部的温度分布不同导致与其相邻的部分受到影响,互相之间不能自由地收缩膨胀,在其内部产生热应力。(2) 构件之间的热膨胀系数不同。不同的结构件组合成部件,由于各个构件材料的热膨胀系数不同,热形变量不同,同样也会导致热应力的产生。对于本文的研究对象,这 2 种热应力产生的情况都存在。

### 3.1 短路匝数对热应力分布影响

转子磁极正常时的应力分布如图 4 所示。应

力分布较为均衡,磁极两端应力较小,磁极中部应力较大,最大热应力出现在极靴端励磁绕组转角内连接处。

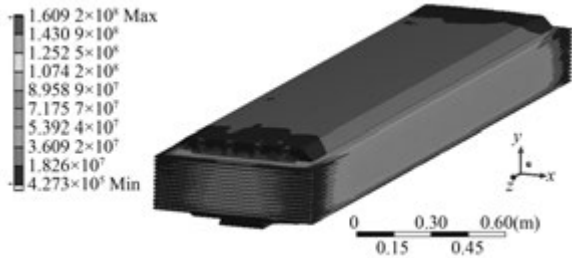


图4 正常磁极热应力分布

定义励磁绕组编号从极靴端到鸽尾端依次为1~14。以第7匝励磁绕组为中心计算了不同短路匝数对磁极热应力分布的影响。图5所示为绕组短路时磁极热应力分布中部截面图。表2所示为短路匝数变化时第7匝绕组热应力数值。其中励磁线圈分为2部分:散热翅和线圈中部区域。

短路匝数对热应力分布影响计算结果如下:

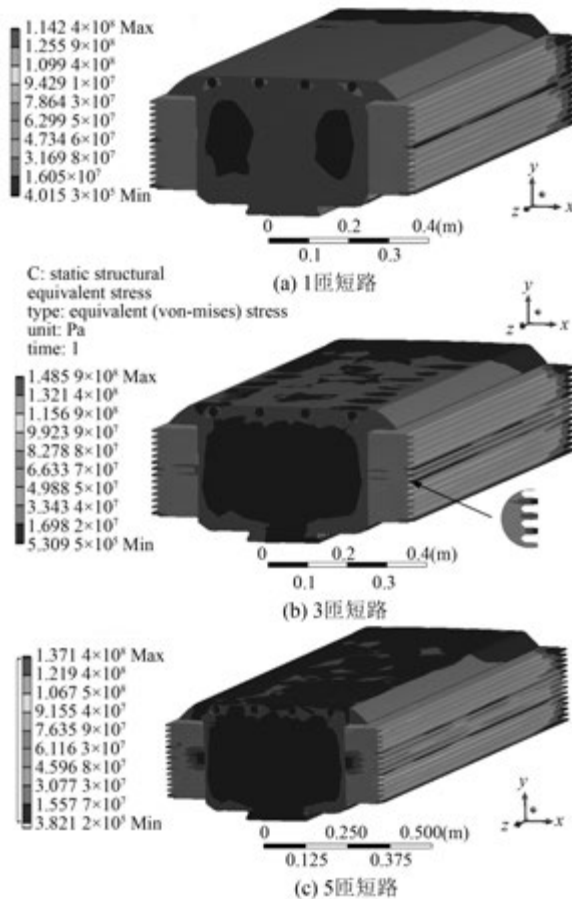


图5 短路时磁极热应力分布

(1) 由图5和表2对比分析看出,当转子发生1匝短路时,即第7匝励磁绕组被短路后,该短路绕组中部的热应力较正常时增加10%。随着短路匝数的增多,第7匝绕组热应力逐渐减小。造成这种情况是因为1匝短路时,短路匝发热量减少,温度下降,与周围正常绕组之间产生一定温差,致使热应力增加,且热应力增加的幅度大于因短路匝温度下降导致热应力减小的幅度。当发生多匝短路时,因短路温度下降的热应力更加明显,故短路匝热应力减小。

表2 第7匝励磁线圈热应力

绕组匝间 短路匝数	励磁绕组中 部热应力/MPa	励磁绕组散热 翅热应力/MPa
0	63.55	55.85
1	69.98	18.55
2	57.37	15.80
3	54.67	15.53
4	43.67	22.70
5	37.32	27.40
6	29.33	25.20

(2) 该励磁绕组发生匝间短路后,散热翅热应力大幅度减小。短路匝数较多时,第7匝散热翅热应力相比短路匝数较少时有所恢复,但是只接近正常状态时的一半。这主要由于相邻励磁绕组的散热翅不存在接触,只存在结构内部热应力,线圈短路使散热翅温度降低,热应力减小。

(3) 根据计算结果显示,转子绕组发生以第7匝为中心的匝间短路后,磁极整体温度降低,转子磁极的最大热应力减小。短路匝数不同时,最大热应力趋势也有所变化,其中,1匝短路时磁极最大热应力为141 MPa,3匝短路时磁极最大热应力为149 MPa,如图5所示。

(4) 图6所示为转子短路匝数从0~6时,不同励磁绕组的热应力变化情况。由图6可知,当发生匝间短路后,第2匝和第14匝励磁绕组热应力增大,其中前者在磁极6匝短路后热应力增加达20%,后者在磁极6匝短路后热应力减小;第4匝与第10匝绕组在短路匝数较小时,热应力变化不大,短路匝数较大时,第4匝热应力增加,第10匝热应力减小;第6匝热应力会随着短路匝数增加迅速减小。

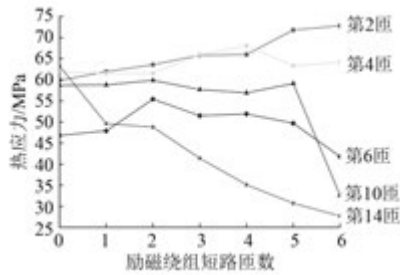


图6 不同短路匝数对励磁绕组热应力影响

根据上述结论进行分析可得到短路匝周围正常绕组的热应力变化情况。转子发生匝间短路后,距离短路绕组较远的绕组,如第2匝和第14匝,其热应力会增加。与短路匝相邻的绕组热应力会减小。处在以上两者之间的励磁绕组热应力总体变化不大,但是靠近转子磁极极靴端的绕组热应力有增大的趋势,靠近鸽尾端的绕组热应力有减少的趋势。

### 3.2 匝间短路位置对热应力分布影响

本节以励磁绕组3匝短路为例计算了短路位置不同对磁极热应力的影响。具体分析了不同故障位置情况下磁极整体热应力变化,短路绕组热应力,以及其他励磁绕组的热应力等。本节涉及匝间短路位置的数字为3匝短路时中间励磁绕组编号,因此编号为2~13。经过相关计算,匝间短路位置变化对热应力分布影响计算结果如下:

(1) 短路位置不同时磁极热应力分布如图7所示。图7列出3个不同的位置匝间短路故障时的热应力分布图,并沿磁极中心做纵向切割的截面图。对比图4和图7可知,短路区域在磁极极靴端附近时,磁极的最大热应力减小。短路区域靠近磁极磁轭处时,磁极的最大热应力增大。再综合图7中铁心处应力云图变化,分析可知,短路发生在磁极极靴端附近,磁极靠近鸽尾端热应力相对增大;短路发生在靠近鸽尾端处时,极靴端处的热应力相对增大。

(2) 图8所示为匝间短路发生位置变化时,短路三匝励磁绕组的热应力。图8的中上层代表更靠近磁极极靴端的励磁绕组,下层代表更靠近磁轭处的鸽尾端励磁绕组。根据图8,分析可得,短路的励磁绕组发生在磁极中部时短路匝热应力基本上都大于35 MPa,高于发生在极靴端与鸽尾端。

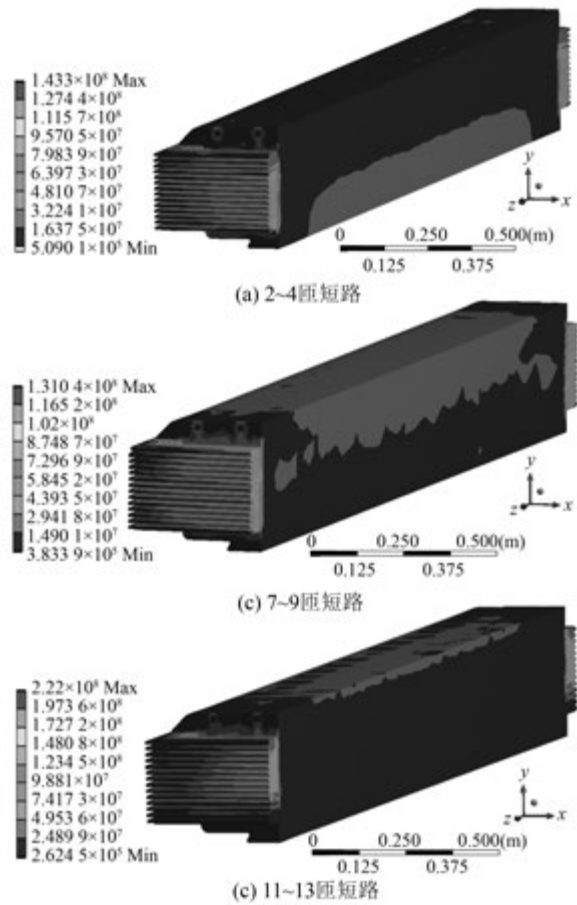


图7 短路位置不同时磁极热应力分布

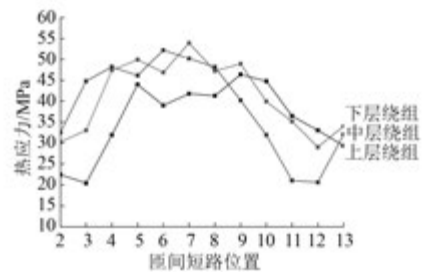


图8 短路位置不同时短路绕组热应力

图9所示为每匝绕组所对应正常与短路时的热应力对比图,横坐标为14匝励磁绕组各自编号。综合图9中热应力变化曲线关系可以得出:绕组正常情况下,匝间短路故障发生在磁极中部时短路匝热应力下降幅度较小;发生在磁极极靴端与鸽尾端时热应力下降幅度较大。

由图8还可得出,匝间短路靠近极靴端,上层绕组热应力大于下层;匝间短路靠近鸽尾端,下层绕组热应力基本上大于上层,也符合上述规律。

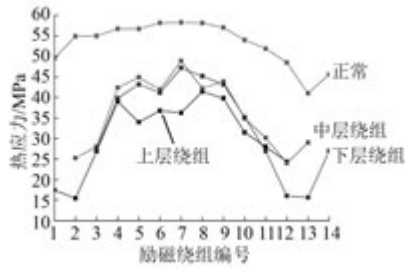


图9 短路绕组与正常绕组热应力对比

(3) 图 10 所示为匝间短路发生位置变化时, 几匝特定励磁绕组的热应力值。每条曲线都有不同程度的凹陷区域, 为该励磁绕组所对应的发生匝间短路故障时热应力下降产生的。同时, 励磁绕组处在非故障区域时, 热应力变化不尽相同。故障发生在第 7 匝之后, 靠近磁极极靴端的绕组热应力随着故障位置变化很小, 如第 2 匝与第 4 匝; 故障发生在第 7 匝之前时, 靠近磁极鸽尾端的绕组应力变化相对较大, 如第 10 匝和第 14 匝。

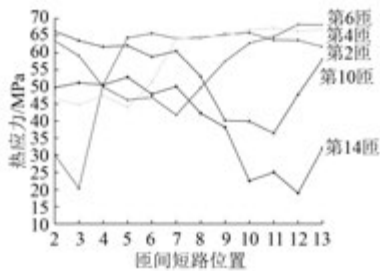


图 10 短路位置不同时励磁绕组热应力

将图 10 中 5 个励磁绕组故障时热应力与其各自对应的正常时热应力进行差值比较, 可得短路位置不同时励磁绕组热应力差值如图 11 所示。

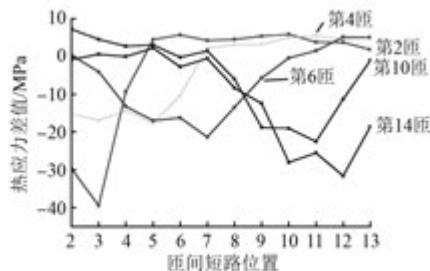


图 11 短路位置不同时励磁绕组热应力差值

差值为正时则表示该励磁绕组在该状态热应力大于正常状态, 反之, 热应力小于正常状态。图 11 中各匝励磁绕组在其短路时热应力均减小, 在

短路区域远离时, 其热应力增大。由图 11 分析证明了第 3.2 节中的结论, 即距离短路匝较远的励磁绕组热应力增加。

## 4 结 语

水轮发电机的励磁绕组匝间短路故障发生后, 转子磁极热应力变化比较复杂, 与短路匝数、短路发生的位置都有很大关系。本文通过对三峡右岸水轮发电机转子磁极热应力详细计算与综合分析, 得到各部分热应力主要结论如下:

(1) 当发生一匝短路时, 短路匝热应力增大。当发生多匝励磁绕组短路时, 短路匝热应力减小, 短路匝数越多热应力减小程度越大。匝间短路故障发生在磁极中部短路匝热应力下降幅度小, 发生在磁极极靴端与鸽尾端时热应力下降幅度较大。

(2) 转子发生匝间短路后, 距离短路绕组较远的绕组, 其热应力会增加。与短路匝相邻的绕组热应力会减小。处在以上两者之间的励磁绕组热应力总体变化不大, 但是靠近转子磁极极靴端的绕组热应力有增大的趋势, 靠近鸽尾端的绕组热应力有减少的趋势。

(3) 本文所做的工作可以帮助设计人员预测水轮发电机在发生匝间短路后, 对转子磁极稳定性进一步的影响, 为设计方案优化奠定基础, 还可为水轮发电机相关故障检测和更深层次的研究提供理论依据。

## 【参 考 文 献】

- [ 1 ] 贾杰.水轮发电机转子绕组匝间短路故障的研究与识别[D].保定: 华北电力大学, 2015.
- [ 2 ] 石薇.水轮发电机转子绕组匝间短路故障研究[D].保定: 华北电力大学, 2012.
- [ 3 ] 李俊卿, 马少丽, 李和明.基于耦合物理场的汽轮发电机定子温度场的分析与计算[J].华北电力大学学报(自然科学版), 2008, 35(5): 6-10.
- [ 4 ] 王艳武, 杨立, 陈翹, 等.异步电机转子三维温度场及热应力场研究[J].电机与控制学报, 2010, 14(6): 27-32.
- [ 5 ] 王艳武, 杨立, 孙丰瑞.异步电动机定子绕组匝间短路三维温度场计算与分析[J].中国电机工程学报, 2009, 29(24): 84-90.
- [ 6 ] 刘娅娟, 张伟, 洪玉萍, 等.水轮发电机转子磁极悬

- 挂结构动应力研究[J].大电机技术,2012(4): 1-5.
- [7] 李伟力,陈玉红,霍菲阳,等.大型水轮发电机转子旋转状态下磁极间流体流动与温度场分析[J].中国电机工程学报,2012,32(9): 132-139.
- [8] 李伟力,周封,侯云鹏,等.大型水轮发电机转子温度场的有限元计算及相关因素的分析[J].中国电机工程学报,2002,22(10): 86-91.
- [9] 胡田,唐任远,李岩,等.永磁风力发电机三维温度场计算及分析[J].电工技术学报,2013,28(3): 122-126.
- [10] 杜灿勋,桂卫华,周光厚.大型全空冷水轮发电机定子线棒损耗和温度场综合计算[J].中国电机工程学报,2012,32(12): 111-119.
- [11] 梁大伟.大型水轮发电机定子温度与热应力的耦合计算[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2012.
- [12] 王国海.三峡右岸全空冷水轮发电机关键技术研究[J].中国电机工程学报,2009,29(15): 74-79.
- [13] 王国海.三峡右岸巨型全空冷水轮发电机组关键技术——水轮机篇[J].大电机技术,2008(4): 30-36.
- [14] 戴庆忠.水冷式水轮发电机特殊问题及三峡水轮发电机冷却方式选择[J].东方电机,1997(2): 1-11.
- [15] 王岩禄.三峡水轮发电机磁极设计特点[J].大电机技术,2003(2): 11-14.
- [16] 徐正蓉.三峡电站 700MW 水轮发电机磁极线圈匝间绝缘试验方法[J].上海大中型电机,2014(3): 44-47.
- [17] 吕日新.三峡水轮发电机磁极装配技术[J].大电机技术,2009(2): 13-14.
- [18] 寇攀高,李超顺,李如海,等.大型水轮发电机温度场与热应力分析[J].水电能源科学,2017(3): 163-166.
- [19] 付敏,邹继斌,孔祥春,等.水轮发电机转子三维温度场的有限元计算[J].电机与控制学报,2001,5(3): 137-139.
- [20] 南日山.大型凸极同步发电机温度场及电磁场的有限元计算[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2003.
- [21] 黄世勇.汽轮机转子热应力及寿命分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [22] 李勇,王亮,张波,等.航空用盘式绕组旋转式音圈电机的热应力与热变形分析[J].电工技术学报,2015,30(12): 181-185.
- [23] 陈锡芳.水轮发电机电磁与计算[M].北京:中国水利水电出版社,2011

收稿日期: 2018-02-06

(上接第 115 页)

合利用对称分量法对各种相序情况以及缺相情况的分析,将各种情况转化为对应的直流分量,再考虑实际可能出现的三相电压不平衡的情况,分析出可靠的相序自适应方法及缺相故障检测算法。

通过理论分析和仿真表明,本文所提的相序自适应及三相三线/四线缺相故障检测方法切实可行,可对相序进行准确识别,并能够在 15 ms 内对缺相故障做出准确判断。

### 【参考文献】

- [1] 张崇巍,张兴.PWM 整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 林献坤,余双,陶晨.基于 DSP 的电动执行机构相序检测及缺相保护方法[J].测控技术,2017,36(2): 128-131.
- [3] 王栋,刘利.一种基于单片机的相序检测及电机缺相保护方法[J].电机与控制应用,2006,33(9): 50-52.
- [4] RODRIGUEZ P, TEODORESCU R, CANDELA I, et al. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions [C] // Power Electronics Specialists Conference, South Korea, 2006: 1-7.
- [5] 刘筌.电气工程基础[M].北京:科学出版社,2002.
- [6] 配电网禁止同步补偿装置技术规范: DL/T 1216—2013[S].

收稿日期: 2018-01-03



# 《电机与控制应用》合订本征订



《电机与控制应用》是上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的全国中文核心期刊。上海电器科学研究所始建于1953年，是中国最大的多领域、综合性电工产品研究开发机构，上海市高新技术企业。电科所在电工行业内，从技术、检测、标准及人才优势等方面都具有举足轻重的地位，国内外对其关注程度都相当高。

《电机与控制应用》创刊于1959年，是经国家新闻出版总署批准注册，由上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。每月10日出版，国内外公开发售，邮发代号4-199。在近半个世纪的岁月中，该杂志为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献，在中国电机及其应用领域享有很高的影响。

名称	价格（元/套）
2008年《电机与控制应用》合订本	200
2009年《电机与控制应用》合订本	200
2010年《电机与控制应用》合订本	200
2013年《电机与控制应用》合订本	200
2014年《电机与控制应用》合订本	200
2015年《电机与控制应用》杂志全年散本	144
2016年《电机与控制应用》杂志全年散本	144

## 订阅方式

### 1、编辑部订阅：

邮局汇款：（200063）上海市普陀区武宁路505号9号楼6楼  
《电机与控制应用》发行部

### 2、邮局订阅：具体咨询当地邮局，邮发代号4-199。

### 3、网上订刊渠道：我得杂志网（<http://www.myzazhi.cn>） 蜘蛛网（<http://www.spider.com.cn>） 电子版购买可登陆读览天下网（<http://emca.dooland.com>）

### 4、海外读者订阅：可致电中国国际图书贸易集团有限公司

亚洲地区订刊电话010-68433109 欧美地区订刊电话010-68433119

## 联系方式：

期刊：《电机与控制应用》发行部 地址：上海市普陀区武宁路505号9号楼6楼（200063）  
电话：021-62574990-745 传真：021-32230809  
网站：<http://www.motor-abc.cn> 电子邮箱：[emca@seari.com.cn](mailto:emca@seari.com.cn)

中文核心期刊 / 中国科技核心期刊  
专业缔造权威 服务创造价值  
高效节能 绿色电机

我们专注于 电机技术的研究  
电机系统节能的解决方案  
电机与控制技术

电机智能制造  
电机绿色制造

.....

## 《电机与控制应用》

创刊于1959年，是上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。每月10日出版，国内外公开发行，邮发代号4-199。杂志集合了上电科在技术研发、产品检测、标准制定及专业人才等各方面优势资源，专业服务于行业与用户，为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大贡献，在电机及控制应用领域享有很高的荣誉，具有很大的影响力。

编辑部地址：上海市武宁路505号9号楼6楼 邮编：200063  
电话：021-62574990-745 传真：021-62432316  
E-mail: 392483864@qq.com



扫码关注电机与控制应用

携手节能减排 悠享生活空间  
让你我从点滴做起



《电机与控制应用》杂志社宣