

发电机定子绕组端部电磁力特性与鼻端扭矩计算^{*}

万书亭¹, 姚肖方², 豆龙江¹

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院 保定, 071003) (2. 中国核工业集团海南核电有限公司 海口, 570100)

摘要 针对大型汽轮发电机端部结构, 提出了采用镜像原理、比奥萨格尔定律和叠加原理计算定子绕组端部电磁力密度解析式的方法。以国产 600 MW 汽轮发电机定子绕组端部为分析对象, 分别对一个极距内定子端部绕组在出槽口直线段、渐开线段和鼻端等不同位置处的轴向、径向、切向和合成的电磁力密度进行计算与分析。结果表明, 各相绕组内线棒所受的轴向、径向、切向电磁力密度和合成的最大值出现的位置是有规律的, 一般位于相带交界处, 相带始端或相带末端, 并给出了在出槽口部分、渐开线部分和鼻端部分所受力最大值及其位置。计算了鼻端所受的扭矩, 并找出了最大扭矩出现的位置, 为定子绕组端部的绑扎固定和在线监测提供了参考。

关键词 汽轮发电机; 定子绕组端部; 电磁力; 扭矩

中图分类号 TM311

引言

汽轮发电机单机容量的增加引起定子绕组端部漏磁通的增加, 运行时端部绕组在端区强大的漏磁场环境中将受到很大的电磁力作用, 进而产生相应的振动^[1]。当振动超过一定幅度后, 就会造成端部绕组的机械损伤, 有时将导致绕组及其固定结构松动、绝缘磨损、股线变形和疲劳断裂、绑带断开、鼻端及引线焊缝振裂渗漏水等现象^[2]。因此, 有必要研究发电机定子绕组端部不同部位电磁力与鼻端扭矩特性。对电机电磁力的计算一直是工程设计人员关注的问题, 国内外学者进行了大量的研究工作。定子电流在漏磁场中产生的电磁振动成为端部振动的主要因素^[3], 影响定子端部绕组振动的主要因素为该段绕组所受到的电磁力密度和绕组绑定位置及牢固程度。文献[4-5]基于电磁场基本方程, 推得汽轮发电机定子端部绕组区域磁场分布的统一表达式, 分析了定子绕组端部整体结构的电磁振动。文献[6]利用直线拟合渐开线部分, 基于洛伦兹力公式计算了端部绕组的电动力。文献[7]基于二维非线性有限元方法计算了感应电机的径向电磁力。文献

[8]基于比奥萨格尔定律和 3D 有限元两种方法分析了端部绕组电磁力的分布。文献[9]比较了基于 2D 有限元、3D 有限元和基于镜像法的端部绕组漏磁场计算。文献[10]以实际运行机组为例, 给出了 TBB-800-2EY3 型汽轮发电机端部绕组运行后的故障的位置、类型以及端部承受的径向电磁力。上述文献大都局限于径向电磁力分量的计算与分析, 对切向电磁力、轴向电磁力和合力的计算及分析涉及较少, 也没有对单根线棒不同部位的电磁力密度和位置以及鼻端部分所受的扭矩进行分析。因此针对出槽口部分、渐开线部分、鼻端部分同时研究径向、切向、轴向和合成电磁力密度的大小与分布, 以及分析鼻端部分所受的扭矩有很大的意义。

笔者在上述文献研究的基础上, 针对国产 600 MW 汽轮发电机的端部绕组结构, 在推导端部电磁力表达式的基础上, 分析了端部绕组线棒在出槽口部分、渐开线部分和鼻端部分的最大合力、最大轴向电磁力密度、最大径向电磁力密度和最大切向电磁力密度的大小及位置; 并针对定子绕组端部最薄弱的鼻端部位, 首次计算了鼻端所受的扭矩及最大扭矩出现的位置。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51177046); 河北省自然科学基金资助项目(E2011502024); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12MS101)

收稿日期: 2012-10-16; 修回日期: 2012-12-31

1 定子绕组端部电磁力计算模型

1.1 数学模型

以哈尔滨电机厂某 600 MW 大型汽轮发电机为例,其定子绕组端部为篮式双层压板结构,建立了大型汽轮发电机定子绕组端部电磁场和电磁力分析计算的数学模型。为便于分析计算,需要对磁场进行一定的简化,故作以下假设: a. 不计位移电流,忽略绕组电流高次谐波; b. 设铁磁介质的导磁系数为无穷大,忽略护环、中心环、端部压指、压圈、压指(或压板)、磁屏蔽、转轴、端盖及气隙的影响^[11]; c. 不计端部结构件中的涡流损耗,忽略磁滞效应并设铁心材料各向同性,具有单值的 B-H 曲线; d. 同层线棒的形状相同,以线棒的中心线代替实际的线棒,每根线棒上的圆弧区域以直线段代替; e. 由于额定励磁电流与定子额定电流相比较小,且转子绕组从定子铁心部分伸出的长度非常短,故在计算时暂时忽略了转子励磁电流对端部漏磁场的影响。

根据绕组端部渐开线部分的特点,采用一种较简单的直线段拟合渐开线部分的方法^[12]。拟合过程中忽略了线棒直线段与渐开线部分的圆弧连接和渐开线部分与鼻端部分的圆弧连接。每根上下层线棒各划分为 28 个单元,其中出槽口直线段 4 个单元、渐开线段 20 个单元、鼻端 4 个单元。定子绕组端部线棒分段及力的方向示意图如图 1 所示。

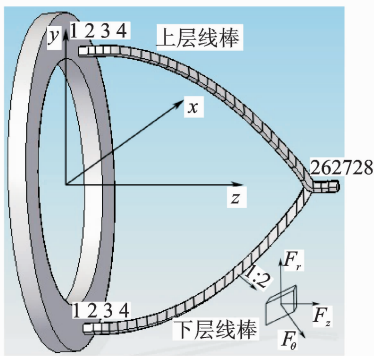


图 1 端部绕组电磁力分析模型

Fig. 1 The electromagnetic force analytical model of end winding

模型中的参数:定子槽数 $Z=42$,每极每相槽数 $q=7$,短距系数 $\beta=17/21$,并联支路数 $a=2$,定子额定电流 $I_N=19\ 245\text{ A}$,额定励磁电流 $I_f=4\ 218\text{ A}$ 。

上层线棒渐开线部分 20 个直线段端点的空间坐标表达式为

$$\begin{cases} r_{ij} = r_1 + i(r_2 - r_1)/n \\ \theta_{ij} = -i \frac{\beta\pi}{2n} - j2\pi/42 \\ z_{ij} = a_1 + ib_1/n \end{cases} \quad (1)$$

下层线棒渐开线部分 20 个直线段端点的空间坐标表达式为

$$\begin{cases} r_{ij} = r_3 + i(r_4 - r_3)/n \\ \theta_{ij} = i \frac{\beta\pi}{2n} - j2\pi/42 \\ z_{ij} = a_2 + ib_2/n \end{cases} \quad (2)$$

其中:取绕组的轴线为 $\theta=0$ 处; $i=0,1,\dots,20$,代表 20 个单元的 21 个端点; $j=0,1,\dots,41$,代表第 1 到 42 根线棒, $n=20$; a_1, b_1 分别为上层线棒直线段部分以及渐开线部分在 Z 轴上的投影长度; a_2, b_2 为下层线棒的相应长度。

1.2 端部磁感应强度 B 和电磁力表达式

由于定子绕组线圈三相电流对称分布,故以 B 相绕组分布为例来说明其电流关系。定子线圈 B 相绕组展开图如图 2 所示。

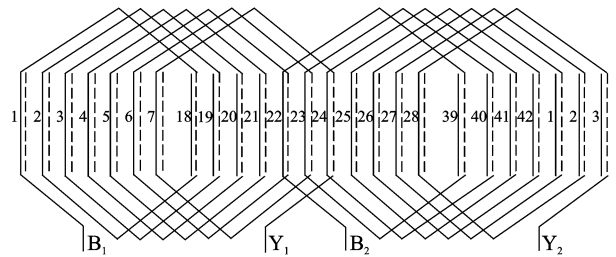


图 2 定子绕组展开图(B相)

Fig. 2 Stator winding expanded diagram (B phase belt)

设定子绕组三相对称电流为

$$\begin{cases} i_a = I_m \sin \omega t \\ i_b = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_c = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $I_m = \sqrt{2} I$; I 为电流有效值。

由图 2 可知,并联支路数 $a=2$,故 A, B, C 三相绕组对应线棒内电流各为各相电流的一半。考虑到定子绕组端部电磁场精确计算很复杂,这里采用镜像法来简化定子绕组端部电磁场,用一个或一组镜像电流产生的效应来代替介质的存在,可以使两个介质磁场问题简化为单一介质求解^[13-14]。以镜像电流模型和比奥-萨格尔定律为主要的理论依据,利用直接积分法,通过叠加原理计算可得到整个端部绕组在某点引起的总磁密

$$B = \sum_{k=1}^N \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{L_k} \frac{id\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (4)$$

其中: $id\mathbf{l}$ 为元电流向量; \mathbf{r} 为元电流向量到场点的距离; L_k 为某一线棒的中心轨迹。

得到场点 P 的总磁感应强度 B 后,由安培力定律可得到某一线棒中点处所受的电磁力密度为

$$\mathbf{F} = i_0 \times \mathbf{B} \quad (\text{N/m}) \quad (5)$$

其中: i_0 为所计算线棒的电流大小。

在上述模型的基础上,以上层第3根线棒(B相)为例,得到这根线棒的电磁力密度表达式为

$$\begin{cases} F_r(m) = k_{r1}(m) * I_A * I_B + k_{r2}(m) * I_B * I_B + k_{r3}(m) * I_C * I_B \\ F_\theta(m) = k_{\theta1}(m) * I_A * I_B + k_{\theta2}(m) * I_B * I_B + k_{\theta3}(m) * I_C * I_B \\ F_z(m) = k_{z1}(m) * I_A * I_B + k_{z2}(m) * I_B * I_B + k_{z3}(m) * I_C * I_B \end{cases} \quad (6)$$

其中: F_r, F_θ, F_z 分别为该线棒所受的径向电磁力密度、切向电磁力密度和轴向电磁力密度; $m=1, 2, \dots, 28$,为被计算线棒的28个单元; $k_{r1}, k_{r2}, k_{r3}, k_{\theta1}, k_{\theta2}, k_{\theta3}, k_{z1}, k_{z2}, k_{z3}$ 为系数。不同线棒的表达式相似。

2 电磁力计算结果与分析

经计算比较发现,整个绕组受力呈现明显的对称性,相差一个极距的同层线棒受力分布相同,故只需分析一个极距内的电磁力密度即可。选取几个具有代表性的线棒进行分析,当B相绕组电流达到最大值的时刻,几个线棒的电磁力密度如图3所示。

S代表上层线棒,X代表下层线棒。图中: S_3 与 S_4 属于同层同相的两根线棒; X_3 与 X_4 属于同层异相的两根线棒; S_3 与 X_3 属于同槽同相的两根线棒; S_4 与 X_4 属于同槽异相的两根线棒; S_3 与 X_{20} 属于相差一个节距的鼻端相连的两根线棒。

分别对一个极距内定子绕组端部线棒在出槽口直线段、渐开线段和鼻端直线段各段的轴向、径向、切向和合成的电磁力密度进行分析与比较。

2.1 线棒出槽口部分电磁力密度分析

对于线棒出槽口直线段部分,轴向电磁力密度为零,只需比较其径向和切向电磁力密度的变化趋势。对端部绕组各个线棒出槽口部分在各自绕组电流达到最大值时的电磁力密度进行统计,得到各相绕组电流达到最大值时出槽口直线段所受的轴向、径向、切向和合成的电磁力密度最大值及位置如表1所示。

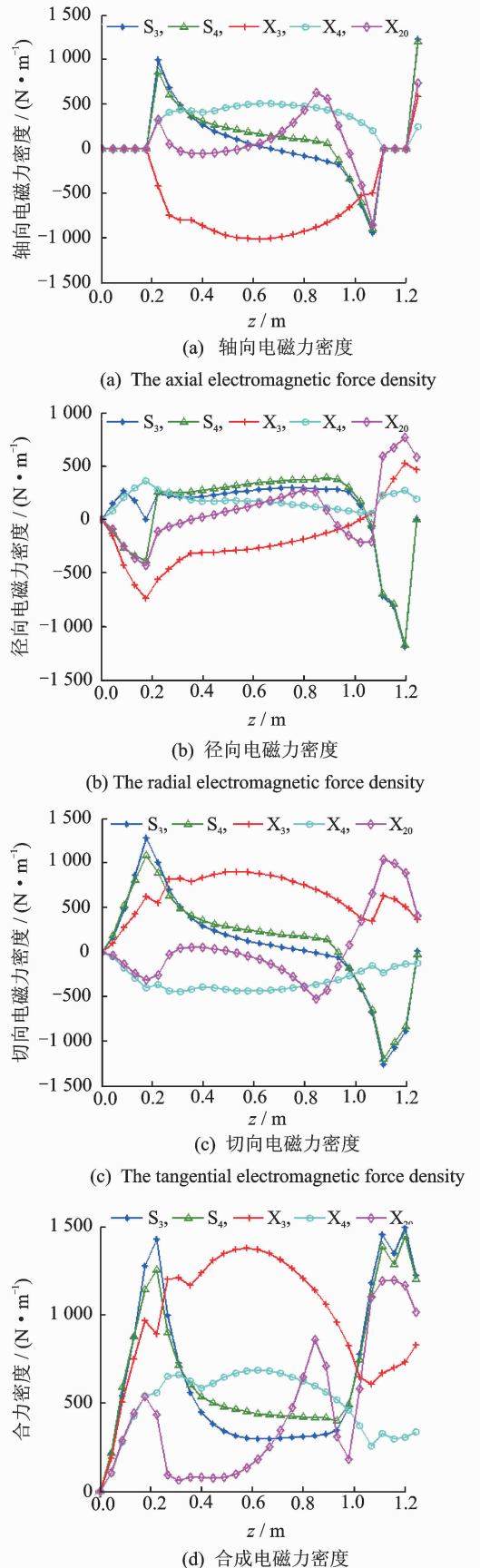


图3 线棒的电磁力密度(单位: $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

Fig. 3 The electromagnetic force density of bars(unit: $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

表 1 出槽口直线段所受电磁力密度最大值及位置

Tab. 1 The maximum and location of the electromagnetic force density in the exiting slot part (N · m⁻¹)

位置	出槽口直线段			
	轴向力	径向力	切向力	合力
B 相绕组	0	-742.7 X ₂ (4)	1 299.7 S ₇ (4)	1 359.4 S ₇ (4)
C 相绕组	0	-699.5 X ₁₀ (4)	1 038.7 S ₀₇ (4)	1 099.3 S ₁₄ (4)
A 相绕组	0	-715.1 X ₁₁ (4)	-971.4 X ₁₁ (4)	1 027.1 X ₁₁ (4)

从表 1 可以看出,各相绕组出现最大值的线棒位置位于绕组电流相带交界处,或位于相带始端,或位于相带末端。不同线棒在出槽口段力的最大值均出现在线棒的第 4 段处,即出槽口向渐开线过渡处,且电磁力密度分量最大值的位置并不是合力最大值的位置。因此需要注意预防的位置是出槽口直线段向渐开线段过渡的位置,最大合力密度为 1 359.4 N/m,出现在上层第 7 根线棒,最大径向电磁力密度为 -742.7 N/m,出现在下层第 2 根线棒,最大切向电磁力密度为 1 299.7 N/m,出现在上层第 7 根线棒,且切向电磁力密度最大值大于径向电磁力密度最大值。

2.2 线棒渐开线部分电磁力密度分析

对于线棒渐开线部分,同时受到轴向力、径向力和切向力作用,且各力密度分量在渐开线部分会发生方向的转变。对端部绕组各个线棒渐开线部分在各自绕组电流达到最大值时的电磁力密度进行统计,得到各相绕组电流达到最大值时渐开线部分所受的轴向、径向、切向和合成的电磁力密度最大值及位置如表 2 所示。

表 2 渐开线段所受的电磁力密度最大值及位置

Tab. 2 The maximum and location of the electromagnetic force density in the involute part (N · m⁻¹)

位置	渐开线段			
	轴向力	径向力	切向力	合力
B 相绕组	1 186.8 S ₇ (16)	719.4 S ₇ (17)	1 164.2 S ₇ (5)	1 768.5 S ₇ (16)
C 相绕组	1 758.2 S ₁₄ (16)	625.4 S ₁₄ (17)	1 525 S ₁₄ (16)	2 384.4 S ₁₄ (17)
A 相绕组	1 206.7 X ₁₁ (11)	-513.5 S ₁₅ (13)	-1 021.9 X ₁₁ (10)	1 614.1 X ₁₁ (17)

从表 2 可以看出,各相绕组出现最大值的线棒位置位于绕组电流相带交界处,或位于相带始端,或位于相带末端。不同线棒在渐开线部分各力最大值

出现在各个线棒上的位置是不同的,这是由渐开线的性质以及绕组的排列决定的。但是一般位于渐开线的中间位置,且电磁力密度分量最大值的位置并不是合力最大值的位置,合力密度最大为 2 384.4 N/m,位于上层第 14 根线棒第 17 段位置处;轴向电磁力密度最大为 1 758.2 N/m,位于上层第 14 根线棒的第 16 段处;径向电磁力密度最大为 719.4 N/m,位于上层第 7 根线棒的第 17 段处;切向电磁力密度最大为 1 525 N/m,位于上层第 14 根线棒第 16 段处,且最大轴向电磁力密度大于最大切向电磁力密度,大于最大径向电磁力密度。

2.3 线棒鼻端部分电磁力密度分析

对于鼻端部分,只有鼻端上下层线棒连接处有很大的轴向电磁力,直线段部分轴向电磁力密度为零,故在鼻端直线段部分只需比较其径向和切向电磁力密度的变化趋势。比较相差一个节距的在鼻端相连的两根线棒,其各个方向的电磁力密度变化趋势是相反的。

对端部绕组各个线棒鼻端部分在各自绕组电流达到最大值时的电磁力密度进行统计,得到各相绕组电流达到最大值时鼻端部分所受的轴向、径向、切向和合成的电磁力密度最大值及位置如表 3 所示。可以看出,不同线棒在鼻端部分的三个方向力最大值出现在各个线棒上的位置位于渐开线部分向鼻端直线段过渡的位置或上下层线棒在鼻端连接的位置,且电磁力密度分量最大值位置并不是合力最大值的位置。合力密度最大为 1 689.2 N/m,位于上层第 19 根线棒第 27 段,轴向电磁力密度最大为 1 482.5 N/m,位于上层第 17 根线棒第 28 段处;径向电磁力密度最大为 -1 451.9 N/m,位于上层第 17 根线棒第 27 段处;切向电磁力密度最大为 -1 285.4 N/m,位于上层第 2 根线棒第 25 段处,且最大轴向电磁力密度大于最大径向电磁力密度,大于最大切向电磁力密度。

表 3 鼻端所受的电磁力密度最大值及位置

Tab. 3 The maximum and location of the electromagnetic force density in the nose part (N · m⁻¹)

位置	鼻端部分			
	轴向力	径向力	切向力	合力
B 相绕组	1 247.4 S ₁ (28)	-1 212.8 S ₂ (27)	-1 285.4 S ₂ (25)	1 524.4 S ₁ (27)
C 相绕组	1 325.7 S ₁₁ (28)	-1 300 S ₁₁ (27)	-934 S ₁₁ (25)	1 435.7 S ₁₁ (27)
A 相绕组	1 482.5 S ₁₇ (28)	-1 451.9 S ₁₇ (27)	-1 276.4 S ₂₀ (25)	1 689.2 S ₁₉ (27)

对比表1~3可以发现,整个绕组的合力和轴向、切向电磁力密度最大值均出现上层第14根线棒在渐开线部分中间位置,而径向电磁力密度最大值出现在上层第17根线棒鼻端直线段向上下层鼻端连接处过渡的位置,且最大轴向电磁力密度,大于最大切向电磁力密度大于最大径向电磁力密度。

3 鼻端扭矩分析

鼻端固定比较薄弱,且鼻端部分是上下层线棒汇合并连接的位置,受力比较复杂,现场事故中也有很大一部分是发生在鼻端部分。

为了解整个绕组在鼻端的受力情况,对各个线棒鼻端同一轴向位置处的平均径向和切向电磁力密度进行分析。为便于表述,以内圆周表示上层线棒,外圆周表示下层线棒,圆内部分表示方向为负,圆外方向表示方向为正。鼻端某一位置处的平均径向和切向电磁力密度如图4所示。

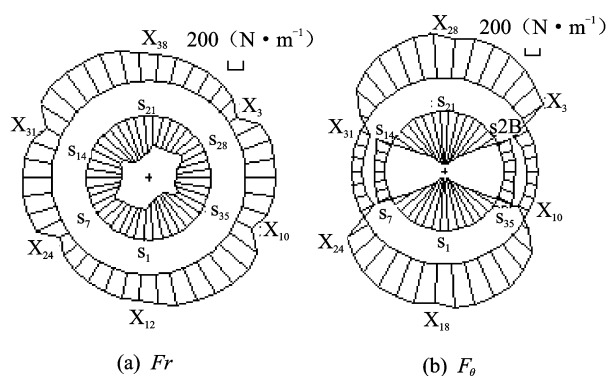


图4 平均径向和切向电磁力密度(单位: $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

Fig. 4 The average radial and tangential electromagnetic force density(unit: $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

从图4中可以看出,就径向电磁力密度而言,上层线棒幅值为负,表示向内收缩,下层线棒幅值为正,表示向外扩张,则同一槽上下层线棒是相互排斥的,且最大排斥力的力密度为 $1\,008.2\text{ N/m}$ 。位于上层第17根线棒与下层第34根线棒鼻端直线段;就切向电磁力密度而言,同一槽上下层线棒方向相反,有一定的静摩擦力,最大静摩擦力的力密度为 244.2 N/m ,位于上层第15根线棒与下层第32根线棒鼻端直线段。

从图4还可以发现,鼻端部分上下层所受的切向力和径向力方向均相反,又由于相差一个极距的上下层线棒在鼻端相连,故存在很大的扭矩。各个线棒在鼻端某一位置处不同时刻的扭矩最大值与位置如表4所示。

表4 各个线棒在不同时刻的扭矩最大值与位置

Tab. 4 The maximum and location of the torque in the same axial direction in the nose of all the bars at different moments

$\omega t/(\circ)$	扭矩/ $(\text{N} \cdot \text{mm})$			
	F_r 引起		F_θ 引起	
0	735.5	S_{10} 与 X_{17} 鼻端	1 394.4	S_3 与 X_{20} 鼻端
30	720.5	S_1 与 X_{18} 鼻端	2 511.5	S_2 与 X_{19} 鼻端
60	798.5	S_{16} 与 X_{33} 鼻端	2 453	S_1 与 X_{18} 鼻端
90	1 014.6	S_{16} 与 X_{33} 鼻端	2 619.9	S_{21} 与 X_{38} 鼻端
120	735.5	S_{17} 与 X_{34} 鼻端	1 455.1	S_{20} 与 X_{37} 鼻端
150	813.6	S_{10} 与 X_{17} 鼻端	803.7	S_8 与 X_{25} 鼻端

由径向力引起的扭矩是由于上下层线棒在鼻端部分形心不重合且径向力的方向相反所致,由切向力引起的扭矩是由于上下层线棒本身的厚度且切向力方向相反所致。从表4中看出,鼻端部分所受的扭矩是很大的,由径向电磁力引起的扭矩最大达 $1\,014.6\text{ N} \cdot \text{mm}$,位于上层第16根线棒与下层第33根线棒的鼻端位置处,由切向电磁力引起的扭矩最大达 $2\,616.9\text{ N} \cdot \text{mm}$,位于上层第21根线棒与下层第38根线棒的鼻端位置处。

综上所述,鼻端部分受到的扭矩比较大,破坏力也比较强,特别是鼻端部分结构固定比较薄弱,故鼻端是很脆弱的部位,会发生定子端部绝缘件松动现象、多层连接盒下部与引线的焊接部位疲劳开焊、引线烧断漏水,造成单相接地等事故,应加强监测。所以一般的定子绕组端部振动监测会把传感器安装在鼻端部分,测试鼻端的振动值。同时,由于定子绕组端部不仅承受径向电磁力,还承受较大的轴向和切向电磁力,故在现场进行端部振动监测的时候,应安装可以同时测径向、切向和轴向振动的三维传感器,才能比较真实地反映端部的振动情况。

4 结论

1) 出槽口部分,各个线棒力密度最大值出现在出槽口直线段向渐开线段过渡的位置;渐开线部分,不同线棒在渐开线部分各力最大值出现的位置是不同的,一般位于渐开线的中间位置;鼻端部分,不同

线棒各力最大值出现的位置位于渐开线部分向鼻端过渡的位置或鼻端相连的位置。

2) 各相绕组线棒出现最大值的线棒位置位于绕组电流相带交界处,或位于相带始端,或位于相带末端;单根线棒上电磁力密度最大值出现在线棒上的位置并不是合力最大值的位置。

3) 最大轴向电磁力密度大于最大切向电磁力密度大于最大径向电磁力密度,三者是一个数量级。

4) 首次对鼻端部分线棒所受的扭矩进行了数值计算,并找出了最大扭矩出现的位置及大小。

参 考 文 献

- [1] 刘进强,韩东,王瑞发.大型汽轮发电机定子绕组端部振动测量研究[J].大电机技术,2000(4):11-15.
Liu Jinqiang, Han Dong, Wang Ruifa. Research on measuring the vibration of stator end windings for large turbogenerator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2000(4): 11-15. (in Chinese)
- [2] 刘德,杨向宇,陈权涛.汽轮发电机定子端部绕组振动问题研究[J].防爆电机,2007,42(6):38-40.
Liu De, Yang Xiangyu, Chen Quantao. Research on faults of turbogeneration stator winding end vibration [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2007, 42(6): 38-40. (in Chinese)
- [3] 刘明丹,许丽佳,康志亮.冲击负荷下发电机端部磁场及绕组振动分析 [J].电机与控制应用,2010,37(6):14-17.
Liu Mingdan, Xu Lijia, Kang Zhiliang. Analysis of electromagnetic force and vibration of end windings under impact load for turbo-generator[J]. Electric Machines & Control Application, 2010, 37(6): 14-17. (in Chinese)
- [4] 胡宇达,邱家俊,黄良.大型发电机定子端部绕组的电磁特性[J].机械强度,2006,28(1):20-24.
Hu Yuda, Qiu Jiajun, Huang Liang. Electromagnetic characteristics on stator end windings of large turbo-generator[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(1): 20-24. (in Chinese)
- [5] 胡宇达,邱家俊,卿光辉.大型汽轮发电机定子端部绕组整体结构的电磁振动[J].中国电机工程学报,2003,23(7):93-98,116.
Hu Yuda, Qiu Jiajun, Qing Guanghui. Electromagnetic vibration of integrity end winding of large turbo-generator stator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 93-98, 116. (in Chinese)
- [6] 刘明丹,刘念.发电机端部绕组电动力计算及振动分析[J].电力系统自动化,2005,29(15):40-44.
Liu Mingdan, Liu Nian. Electrodynamical force calculation and vibration analysis of the end winding of turbo-generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 40-44. (in Chinese)
- [7] Mori D, Ishikawa T. Force and vibration analysis of induction motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1948-1951.
- [8] Kim K C. Comparison of biot-savart's law and 3D FEM in the study of electromagnetic forces acting on end winding [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2010, 6(3): 369-374.
- [9] Liu Yujing, Stig Hjärne. Analysis of end zone magnetic field in generators and shield optimization for force reduction on end windings[C]//Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2007). Korea, Seoul: IEEE, 2007: 1019-1024.
- [10] 王绍禹,孙术文,韩长利,等. TBB-800-2EY3型汽轮发电机定子端部绕组故障与结构弊病分析[J].中国电力,2009,42(5):35-40.
Wang Shaoyu, Sun Shuwen, Han Changli, et al. Analysis of stator end winding fault and constructional defect for the design of TBB-800-2EY3 turbo-generator [J]. Electric Power, 2009, 42(5): 35-40. (in Chinese)
- [11] 师楠,梁艳萍,朱显辉.空冷汽轮发电机端部磁场计算研究[J].防爆电机,2006,41(6):34-36,43.
Shi Nan, Liang Yanping, Zhu Xianhui. Study on the calculation of end magnetic field of air-cooled turbo-generator[J]. Explosion-proof Electric Machine, 2006, 41(6): 34-36, 43. (in Chinese)
- [12] Lambert N, Lula A, Pappalardo M. A piezoelectric motor using flexural vibration of a thin piezoelectric membrane[J]. IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 45(1): 23-29.
- [13] 单继聪.大型汽轮发电机定子端部绕组电磁力的解析计算[D].杭州:浙江大学,2008.
- [14] 毕纯辉,李淑钰,戴景民.水轮发电机定子绕组端部电动力的计算[J].大电机技术,2001(3):11-13.
Bi Chunhui, Li Shuyu, Dai Jingmin. Analyzing and calculating on electric force of end winding in hydro-generator stator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2001(3): 11-13. (in Chinese)



第一作者简介:万书亭,男,1970年12月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为汽轮发电机状态监测与故障诊断。曾发表《基于最小二乘支持向量机的滚动轴承故障诊断》《振动、测试与诊断》2010年第30卷第2期)等论文。
E-mail: wanshuting1@sina.com

