

发电机定子绕组端部径向和切向电磁力分析*

万书亭¹, 姚肖方¹, 朱建斌², 李明¹, 绳晓玲¹

(1. 华北电力大学机械工程系 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固定比较薄弱极易发生事故的特点, 提出了采用镜像原理、比奥萨格尔德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 大型汽轮发电机端部结构为分析对象, 对沿圆周分布的各个线棒鼻端同一段处和几个关键点的径向和切向电磁力密度的分析结果表明, 不同时刻切向力最大值出现的位置是有规律的, 且径向和切向电磁力是一个数量级的, 总体上看径向电磁力大于切向电磁力, 但就最大值而言, 径向电磁力是小于切向电磁力的。计算仿真结果为发电机端部结构的固定和事故的预防提供了参考。

关键词 汽轮发电机; 定子绕组端部; 径向电磁力; 切向电磁力

中图分类号 TM311

引言

大型汽轮发电机定子端部绕组是一组庞大的载流导体, 运行时这种载流体在端区强大的漏电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]。随着发电机单机容量的增大, 作用在定子绕组端部的电磁力和由此引起的端部振动也随之增加。运行实践证明, 大容量发电机随着电磁负荷增大, 绕组端部固定件如不够, 运行后要逐步松动, 使绕组端部的振幅增大^[2]。当这种振动超过一定幅度后, 就会造成绕组的机械损伤, 严重的还会直接诱发端部事故的发生。因此, 为了准确掌握汽轮发电机端部的振动情况, 研究发电机端部绕组电磁力有重要意义。

端部绕组不仅承受着自身在漏磁场中的电磁力作用, 还受到槽内部分和定子铁心传来的振动, 其中径向力是振动的主要来源。随着负荷的增加, 由于旋转力矩的作用, 铁心各部件之间产生更为紧密的连接, 来自铁心的振动会减小, 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^[3-4], 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[5-7]分析和计算了在瞬态和稳态下端部区域的磁场密度和定子端部绕组的受力特点, 为端部绕组支撑结构的设计提供理论支撑。文献[8-9]根据磁场基本理论, 推导出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[10]以实际运行机组为例, 给出了汽轮发电机端部绕组运行后的故障的位置、类型以及端部径向电磁力出现最大值的位置。上述文献大都局限于径向电磁力密度的计算与分析, 对切向电磁力的计算和分析涉及较少, 但若线棒上下层线棒间切向力很大, 会导致上下层间静摩擦增大, 在径向力较大的情况下, 如果绑扎松动更有可能导致绝缘损坏。因此, 同时研究径向和切向电磁力密度的大小与分布有很大的意义。

笔者针对国产 600 MW 汽轮发电机的端部绕组结构, 进一步研究定子绕组端部的电磁力特性。在推导端部电磁力表达式的基础上, 进一步分析了沿圆周分布的鼻端某一段线棒在一个周期内不同时刻的径向和切向电磁力密度, 并比较了两者的, 分析了几个关键点的受力情况及变化趋势。

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,

* 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: 2012-04-15; 修改稿收到日期: 2012-06-13

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。

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^[12-13]。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,出槽口直线段各分为 4 个单元,渐开线各分为 20 个单元,鼻端各分为 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。

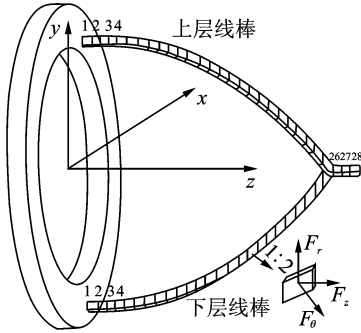


图 1 端部绕组电磁力分析模型

模型中所用到的参数,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 $I_N=19\ 245\text{ A}$ 。

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

$$\begin{cases} r_{ij} = r_1 + i \frac{r_2 - r_1}{n} \\ \theta_{ij} = -i \frac{\beta\pi}{2n} - j \frac{2\pi}{42} \\ z_{ij} = a_1 + i \frac{b_1}{n} \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\begin{cases} r_{ij} = r_3 + i \frac{r_4 - r_3}{n} \\ \theta_{ij} = i \frac{\beta\pi}{2n} - j \frac{2\pi}{42} \\ z_{ij} = a_2 + i \frac{b_2}{n} \end{cases} \quad (2)$$

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 A 相绕组分布为例来说明其电流关系。定子线圈 A 相电流分布如图 2 所示。

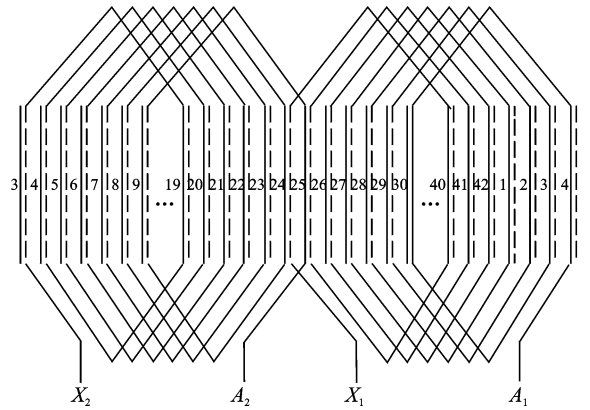


图 2 定子绕组展开图(A相)

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: $I_m = \sqrt{2} I$,其 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,即

$$\begin{cases} I_A = i_a/2 = 0.5 I_m \sin \omega t \\ I_B = i_b/2 = 0.5 I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ I_C = i_c/2 = 0.5 I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

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^[14-15]。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,通过叠加原理可计算得到整个端部绕组在某点 P 引起的总磁密为

$$B = \sum_{K=1}^N \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{L_K} \frac{i \, dl}{r^3} \quad (5)$$

其中: $i \, dl$ 为元电流向量; 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

$$F = i_0 B (\text{N/m}) \quad (6)$$

其中: i_0 为所计算线棒的电流。

在上述模型的基础上,以上层第4根线棒(A相)为例,得到这根线棒的电磁力密度表达式为

$$\begin{cases} F_r(m) = k_{r1}(m)I_A I_A + k_{r2}(m)I_A I_B + \\ \quad k_{r3}(m)I_A I_C \\ F_\theta(m) = k_{\theta1}(m)I_A I_A + k_{\theta2}(m)I_A I_B + \\ \quad k_{\theta3}(m)I_A I_C \\ F_z(m) = k_{z1}(m)I_A I_A + k_{z2}(m)I_A I_B + \\ \quad k_{z3}(m)I_A I_C \end{cases} \quad (7)$$

其中: F_r, F_θ, F_z 分别为该线棒所受的径向力、切向力和轴向力; $m=1, 2, \dots, 28$,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

在简化模型的基础上,利用自编 Matlab 程序进行数值辅助计算。某线棒鼻端一点在不同时刻的径向和切向电磁力波形图如图3所示。

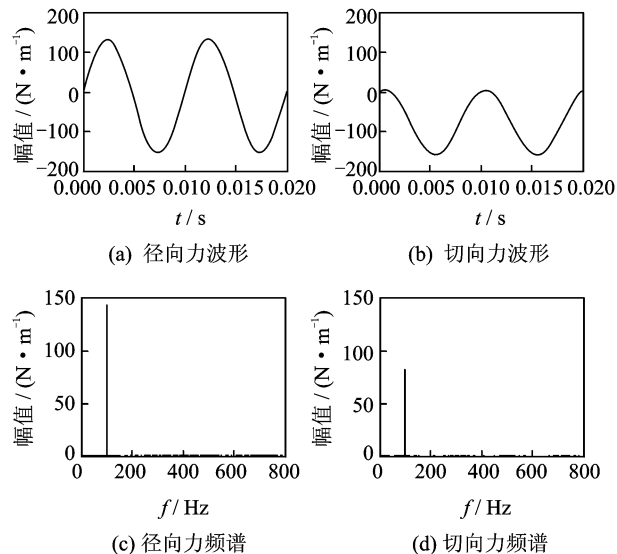


图3 波形图

从图3可见,不同时刻径向力和切向力数值大小是不同的,但其变化趋势都类似三角函数变化,且频率均为100 Hz。即,汽轮发电机定子绕组端部线棒在运行中总是受到一个交变电磁力作用,这个交变电磁力的变化频率是一个2倍工作频率,即为100 Hz。

由于不同时刻径向和切向电磁力大小不同,故计算了不同时刻沿圆周分布的各个线棒上鼻端上下层同一位置处的径向和切向电磁力密度。为便于表述,以内圆周表示上层线棒,外圆周表示下层线棒,分别对径向电磁力密度、切向电磁力密度进行了分析,并对两者进行了比较分析。

2.1 径向电磁力密度

由于一般的振动监测都是监测的径向方向振动情况,故先对径向电磁力进行分析。半个时间周期内电流是对称的,故只需对半个周期内的径向力进行比较,如图4所示(圆外部分表示正方向,圆内部分表示负方向)。

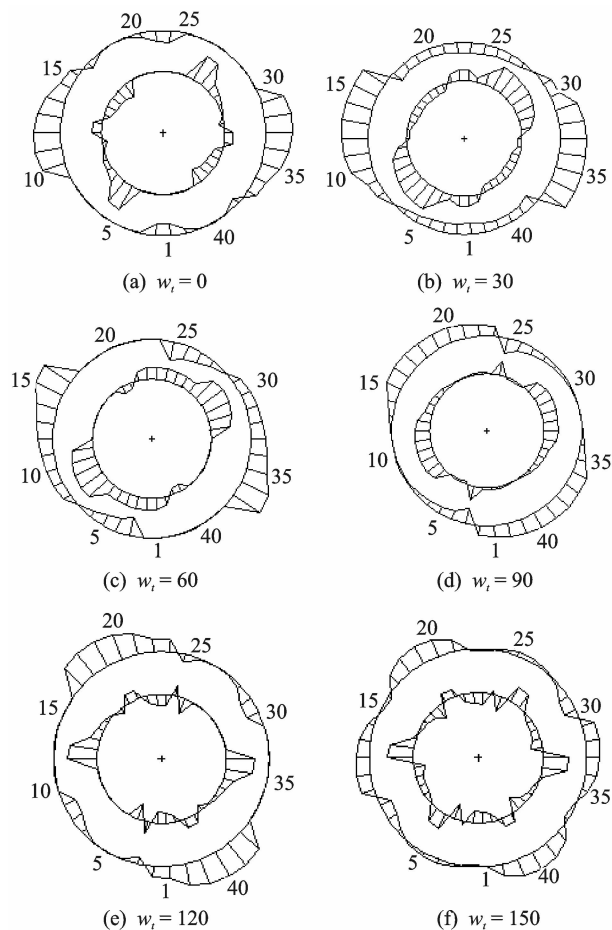


图4 不同时刻的径向电磁力密度(N/m)

由图4可见:径向电磁力沿圆周是对称分布的,即相差一个极距的线棒在同一时刻的电磁力大小是对称的;内、外层径向力之比,在不同时刻不同位置是不同的;定子绕组所受径向力使内外层线棒在不同区域内周期性的相互吸引或排斥;处于同一槽中的线棒,电磁力的方向有时相同、有时相反,所以各个槽中线棒所受电磁力都不相同,有的同时为正,线棒间受力同时向外扩张,有引起线棒变形扩张的趋势;有时同时为负,即都靠近转子轴线的方向;有时上层所受电磁力向外扩张而下层向内压缩,两个线棒之间是相互靠近的关系,挤压加剧;有时上层所受电磁力向内压缩而下层向外扩张,两个线棒之间的关系相互远离,时间久了有引起绑定松动的趋势。

从图中还可以发现,上、下层径向力基本上都是大于 0,即有向外扩张的趋势。特别是位于第 5,6,7,8,9 槽中的线棒,在任意时刻受的径向电磁力都是非负的,即沿着半径的方向向外扩张。如果发电机运行的时间久需要检修的话,应该注意检验这几处线棒的绑定、垫块松动、紧固件脱落及绝缘磨损等。

从安全运行和故障预防方面来说,一般都比较关心某方向力最大值出现的位置,所以对各个时刻径向电磁力最大值出现的位置进行比较,以 ss 表示上层线棒,xx 表示下层线棒,只分析比较 1—21 槽位置的力的情况,22—42 槽处力的大小可以通过 1—21 槽位置加上极距来确定,如表 1 所示。

表 1 各个时刻径向电磁力最大值出现的位置

		N/m					
$\omega_r / (^\circ)$		0	30	60	90	120	150
ss		05	05	08	09	12	12
		B 相	B 相	B 相	B 相	C 相	C 相
xx		11,12	14	16	17	18,19	19
		B 相	B 相	B 相	C 相	C 相	C 相

从表 1 可以看出,径向力出现最大值的位置的规律不太明显,但是一般出现在 B 相初,B 相中部和 B 相末 C 相初的比较多,这几个线棒位置处要加强预防和监测。

2.2 切向电磁力密度

对发电机定子端部绕组进行振动监测的时候,一般监测温度和径向振动,所以关于径向力的分析有很多,而很少有关切切向力的。现在以半个周期内的切向力变化趋势来分析切向电磁力密度,如图 5 所示。

从图 5 可见,切向电磁力沿圆周是对称分布的,即相差一个极距的线棒在同一时刻的切向电磁力大小对称;内外层切向力之比,在不同时刻不同位置是不同的;各个时刻,上层和下层线棒所受的切向力方向基本相反,即上、下层存在很大的静摩擦,如出现某处绑扎松动,会产生摩擦力,导致绝缘磨损。

不同时刻定子三相电流大小和相位是不同的,下面分别从电流最大和电流为 0 的时刻进行分析。

1) 当 ω_r 分别等于 0,60 和 120°时,A,C,B 相电流分别为 0。这 3 个时刻最大切向力出现的位置如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,若某相电流为 0,则此时切向力最大值出现在其余两相的相带交界处的线棒处。

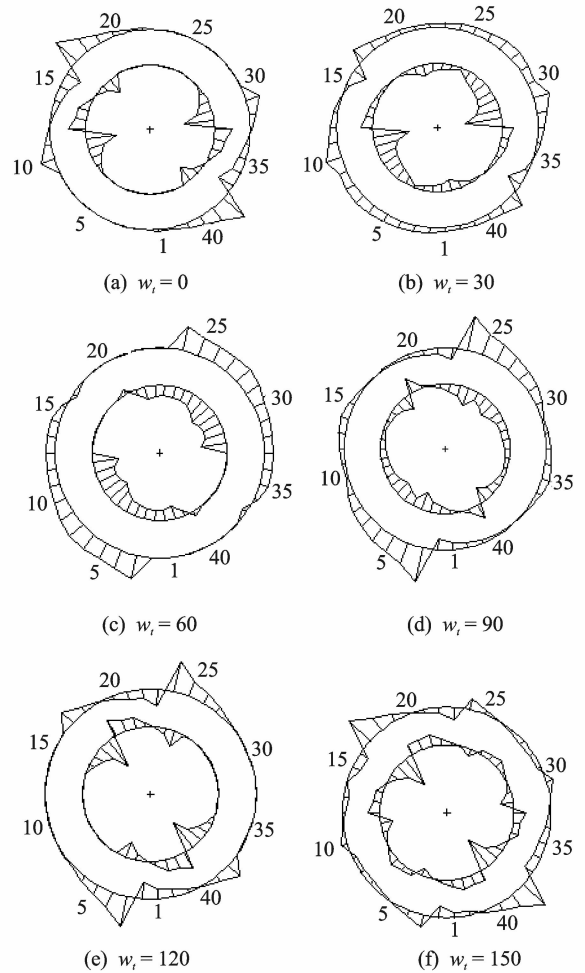


图 5 不同时刻的切向电磁力密度(N/m)

表 2 某一相电流为 0 时最大切向力出现的位置

		N/m		
$\omega_r / (^\circ)$		0	60	120
ss		11	11	18
		17	03	03

表 3 某一相电流最大值时最大切向力出现的位置

		N/m		
$\omega_r / (^\circ)$		30	90	150
ss		11	04	18
		10	03	17

从表 3 中可以看出:若某相电流达到最大值,则最大切向力出现在电流为最大值的相带;且若为上层线棒,则最大值出现在属于此相电流区域的最后一个线棒处;若为下层线棒,则最大值出现在属于此

相电流区域的第一个线棒处。

从图5还可以发现,不同时刻的切向力方向会在某个位置处发生突变,切向力发生方向突变的位置如表4所示。

表4 切向力发生力方向突变的位置 N/m

$\omega_r/(\circ)$	0	30	60	90	120	150
ss	11,12	11,12		18,19	18,19	11,12 18,19
xx	16,17	16,17		23,24	23,24	16,17 23,24

从表4可以看出,切向力发生力方向突变的位置

表5 不同时刻径向力和切向力密度最大值及位置

$\omega_r/(\circ)$	0	30	60	90	120	150						
$F_r/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	Ss05	403.7	Ss05	377.1	Ss08	408.1	Ss09	245	Ss12	403.7	Ss12	354.7
	Xx12	387.7	Xx14	416.7	Xx16	465.1	Xx17	265.7	Xx19	387.7	Xx19	261.9
$F_\theta/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	Ss11	-420	Ss11	-513.3	Ss11	-350.1	Ss04	-247	Ss18	-420	Ss18	-426.7
	Xx17	397	Xx10	223.6	Xx03	324.5	Xx03	481	Xx03	397	Xx17	400.6
最大值	F_θ	F_θ	F_r	F_θ	F_θ	F_θ	F_θ	F_θ	F_θ	F_θ	F_θ	F_θ

通过表5可以看出,径向力和切向力最大值出现的位置是不同;径向力和切向力是属于一个数量级,且切向力最大值一般是大于径向力的。

为了对整体受力趋势进行分析,故计算了一个周期内的平均径向电磁力密度和切向电磁力密度,如图6所示。

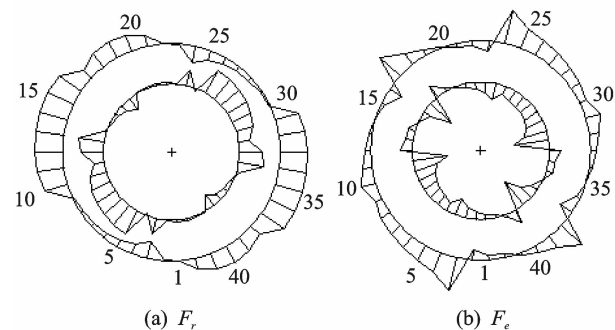


图6 平均径向和切向电磁力密度(N/m)

从图6可以看出,平均径向电磁力密度总体上是比平均切向电磁力大的,但是最大值要小于平均切向电磁力最大值。故在现场进行端部振动监测的时候,同时应安装可以测径向和切向振动的双向传感器,才能比较真实地反映端部的振动情况。

关于2.1节中所述的几个关键点的受力情况如表6所示。

从表6可以看出,5,6,7,8,9这几点的径向电磁力都呈相互挤压的趋势,而切向电磁力方向都是相反的,即上下层线棒之间存在静摩擦力,这几处受力比较大,应该多加监测。

置位于相带交换的位置,即,随着相带的改变切向力方向也会发生改变;且上下层线棒发生力突变的相带位置是相同的。

2.3 径向和切向电磁力密度比较

通过上述分析,对不同时刻径向电磁力密度和切向电磁力密度大小及变化趋势有了一定的了解,接下来对两者进行比较分析,并详细分析几个关键点的受力情况。半个周期内不同时刻径向力和切向力密度最大值及出现的位置如表5所示。

表6 关键点的平均径向和切向电磁力密度 N/m

关键点	5	6	7	8	9	
$F_r/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	ss	188.5	183.2	175.3	165.1	150.5
	xx	-52.8	-37.8	-25.8	-15.3	-5.9
趋势	挤压	挤压	挤压	挤压	挤压	
$F_\theta/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	ss	-58.9	-85.1	-98.9	-112.5	-132.3
	xx	121.2	102.7	89.1	75.6	49.8
趋势	摩擦	摩擦	摩擦	摩擦	摩擦	

表格中所列出的位置,均有可能出现磨损、绝缘损坏和绑定松动的位置,应加强预防,多加检测。

3 结论

1) 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。

2) 内外层径向力和切向力之比,在不同时刻不同位置是不同的。

3) 各个时刻,上下层径向力基本上都是大于0的,即有向外扩张的趋势;上层和下层线棒所受的切向力方向基本相反,即上下层存在很大的静摩擦。

4) 若某相电流为0,则此时切向力最大值出现在其余两相的相带交界处的线棒处;若某相电流达到最大值,则最大切向力出现在电流为最大值的相带;且若为上层线棒,则最大值出现在属于此相电流区域的最后一个线棒处;若为下层线棒,则最大值出现在属于此相电流区域的第一个线棒处。

5) 切向力发生力方向突变的位置位于相带交

换的位置;且上下层线棒发生力突变的相带位置是相同的。

6) 各个时刻径向力和切向力最大值出现的位置不同;径向力和切向力是属于一个数量级,且切向力最大值一般是大于径向力的;平均径向电磁力密度总体上比平均切向电磁力大,但是最大值要小于平均切向电磁力最大值。

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] 汪耕,王作民,邵亚声,等.汽轮发电机的振动问题(上)[J].振动与冲击,1999,18(4):1-5.
Wang Geng, Wang Zuoming, Shao Yasheng, et al. Vibration problems in turbine generators[J]. Journal of Vibration and Shock, 1999, 18(4):1-5. (in Chinese)
- [3] 曹剑绵,陈小沁,张建.汽轮发电机定子绕组端部振动测试分析[J].东方电机,2002,30(4):356-359.
Cao Jianmian, Chen Xiaoqin, Zhang Jian. Vibration test analysis of stator end windings in turbo-generator[J]. Dongfang Electrical Machine, 2002, 30(4):356-359. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] Salon S J, Scott D J, Kusik G L. Electromagnetic forces on the armature end windings of large turbine generators i-steady state conditions[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(11):4597-4603.
- [7] Salon S J, Scott D J, Kusik G L. Electromagnetic forces on the end windings of large turbine generators. ii. transient conditions[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(1):14-19.
- [8] 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)
- [9] Khan G K M, Buckley G W, Brooks N. Calculation of forces and stresses on generator end-windings—part I: forces[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1989, 4(4):661-669.
- [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] 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)
- [14] 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.
- [15] 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。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

