

大型汽轮发电机定子线棒股线间环流分析

郭有光 王雪帆
(华中理工大学电力系)

朱建国 V.S. Ramsden
(University of Technology, Sydney)

摘要 首先进行了汽轮发电机定子线棒端部附近的漏磁场分析与计算, 并将横向端部磁场分解成平均分量与剩余分量两部分, 而后者是线棒采用 540° 槽部完全换位时的环流源。磁场计算结果同实验值基本一致, 证实了磁场分析方法的有效性。在详细研究定子线棒混合型股线参数的基础上, 建立了股线间环流计算模型。最后, 进行了 QFQS-200MW 汽轮发电机定子上、下层线棒的环流分析。

关键词 汽轮发电机; 环流; 股线; 端部磁场

汽轮发电机定子线棒股线间环流的研究对于减小定子绕组铜耗, 提高电机效率, 降低定子温升有着十分重大的意义。定子线棒各股线间的环流既增加了定子附加铜耗, 又使股线出现过热点, 危及线圈绝缘寿命, 限制了电机出力的提高, 因此一直是人们所普遍关心的问题。

1. 环流产生机理及消除措施

大型交流电机定子绕组一般是由条形线棒组成的, 一根线棒一般为半匝, 由若干横截面为矩形的实心或空心或两者均有的股线组成, 并分别在线棒两端短接。在这种线棒中存在两种环流: 第一种环流流动于每一股线之内, 产生集肤效应, 使导线内各点电流密度分布不均匀, 从而使交流电阻和附加铜耗增加。为此, 股线应制得较薄 (小于某个临界厚度), 股线的电阻增加系数就限制在一个比较合理的范围内。第二种环流存在于任意两根股线所组成的回路中, 叠加在由负载电流决定的平均值之上, 使各股线电流呈现不均匀的现象, 如图 1 所示:

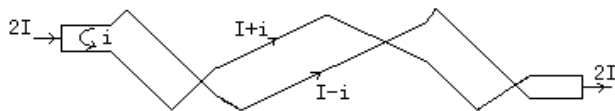


图 1 槽部 540° 换位时两股线环流回路

产生这种现象的原因是由于线棒的各并联股线在槽部和端部处于不同的高度, 它们所交链的漏磁链及感应的电势不尽相同, 在各股线回路中形成了电势差, 出现了环流。因回路中限制环流的阻抗很小, 如果不采取有效措施, 其值可能比第一种环流大得多。

为消除这种环流, 早在 1920 年 Roebel 就提出了槽部 360° 换位的 Roebel 线棒。它的基本思想是: 使每根股线在槽部均匀地占据所有的线棒高度, 从而交链任一股线的漏磁链彼此相等, 感生同样的电势, 任两根股线构成的回路里的电势差为零。此种换位方式能有效地消除槽部磁场的影响, 但端部漏磁场在股线

回路里所感生的电势互相叠加, 构成了环流源^[1]。大容量电机端部漏磁场很强, 环流电势的数值也就大, 因此产生的环流不容忽视。

大型汽轮发电机定子线棒较长, 采用 540° 换位在工艺上是没有困难的, 因此, 它成为汽轮发电机定子线棒最为普遍的换位方式, 如图 1 所示。采用此种换位方式的优点是: 不仅槽部漏磁场的作用完全被抵消, 端部漏磁场的径向分量和端部横向磁场的互感分量在线棒两端感生的电动势也被抵消。于是, 只剩下端部横向自感磁场, 它在任意两股线构成的回路两端感生的电势相位相同, 彼此叠加, 成为 540° 换位时的环流源。它究竟能激发起多大的环流以及由此引起股线电流分配改变的程度和增加的附加损耗是人们所关心的, 也是本文要研究的。

Bennington 和 Brenner 在文献^[2]中对此问题进行了探讨, 但有几个地方不能令人满意。首先, 端部漏磁场是产生环流的根本, 较为准确的计算非常重要, 但文献^[2]只是用了一个简单的理想化公式来计算端部横向自感磁场。其次, 大型汽轮发电机定子线棒常采用直接冷却方式, 线棒中存在着两种类型的股线: 实心股线和空心股线。它们的参数计算较为复杂, 但作为环流研究的基础, 仍需仔细研究。

本文以 QFQS-200MW 汽轮发电机为研究对象, 首先把定、转子端部绕组电流简化成电流层或电流片的形式, 采用求解泊松方程的方法, 找出定子线棒附近的漏磁场^[3], 并处理成横向磁场的平均分量和剩余分量形式, 为建立股线电流模型做好准备。其次, 股线电阻与电抗是求解股线电流的基础, 本文对由实心股线和空心股线组成的组合导线的电阻与电抗求法作了较为详细的探讨^[4]。最后, 建立股线电流方程组, 找出各股线由于环流影响后的电流值, 并给出衡量环流大小的几个参数: 股线环流系数、线棒的最大环流系数和平均环流系数的定性分析与定量分析。

2. 定子线棒端部附近磁场

上面提及,准确计算线棒端部附近的漏磁场是研究环流的基础.但是,由于端区结构和端部绕组的电流分布都十分复杂,准确计算端部漏磁场的大小是很困难的.随着计算机技术的发展,特别是有限元技术的应用,数值解法越来越受到人们的重视.但从目前的文献资料来看,数值解法还不能真正解决电机端部磁场问题,尤其是线棒附近的漏磁场.本文采用解析法-直角坐标系下的分离变量法求解[3].考虑了铁心压板、机座壁、转轴和端盖等磁结构件对磁场分布的影响,并将这些结构件简化为磁导率为无穷大的理想磁镜面.气隙的影响用气隙回转电流表示.和数值解法相比,解析法结果为表达式,很容易处理,各部分电流对磁场的贡献明显,也易于作定性分析.解析法的缺点是作了较多的假设,影响了计算精度,为此,本文将求解结果与在哈尔滨电机厂 QFQS-200MW 汽轮发电机定子端部线棒上的实测数据作一比较,证实了所用方法的有效性.

2.1 磁场计算

求解区域有电流源,只能采用向量磁位法.向量磁位满足泊松方程:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J} \quad (1)$$

在直角坐标下,上式可分解为三个标量方程:

$$\frac{\partial^2 A_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_i}{\partial z^2} = -\mu_0 J_i \quad (i = x, y, z) \quad (2)$$

由于电流密度的三个分量沿 x 轴(周向)是周期性分布的,故可展开为付立叶级数:

$$J_i = \sum_v J_{miv}(y, z) \sin(\omega t - v \frac{\pi}{\tau} x + \varphi_{iv}) \quad (3)$$

式中 J_{miv} 为电流密度的 v 次谐波幅值, φ_{iv} 为 v 次谐波的初相角.基波的影响是主要的,忽略高次电流谐波的影响,则 J_i 可简化为:

$$J_i = J_{mi}(y, z) \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \varphi_i) \quad (4)$$

由于 J_i 是 x 的正弦函数,根据正弦函数求导后的特点,泊松方程的解可以写成:

$$A_i = u_i(y, z) \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \varphi_i) \quad (5)$$

将式(5)代入式(2),可得:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} - \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 u_i = -\mu_0 J_{mi}(y, z) \quad (i = x, y, z) \quad (6)$$

从边界为理想镜像面的假设可得求解区域的边界条件如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial z} = 0, & \text{当 } z = 0 \text{ 或 } T \text{ 时} \\ \frac{\partial u_x}{\partial y} = 0, & \text{当 } y = 0 \text{ 或 } H \text{ 时} \end{cases} \quad (7-1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u_y}{\partial z} = 0, & \text{当 } z = 0 \text{ 或 } T \text{ 时} \\ u_y = 0, & \text{当 } y = 0 \text{ 或 } H \text{ 时} \end{cases} \quad (7-2)$$

$$\begin{cases} u_z = 0, & \text{当 } z = 0 \text{ 或 } T \text{ 时} \\ \frac{\partial u_z}{\partial y} = 0, & \text{当 } y = 0 \text{ 或 } H \text{ 时} \end{cases} \quad (7-3)$$

式中, T 为电机定转子铁心端面至端盖的距离, H 为转轴表面至机座壁的高度,坐标原点取在电机定转子铁心端面与转轴表面相交圆上的某一点.

根据边界条件和源,可求出 u_i , 也即求得了 A_i , 再由 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, 便求解出磁场.

2.2 端部磁场的测量

为证实磁场计算的正确性,测量了哈尔滨电机厂 QFQS-200MW 汽轮发电机定子线棒端部附近在空载和短路工况下的漏磁场.测试的方法是把探测线圈贴在线棒的宽面和窄面,线圈的引出线串接毫伏表,在不同工况下读出不同测点线圈中毫伏表的读数,然后换算成横向或径向磁密值.图 2 给出了实测点布置图.线棒上长方形标记为测量径向磁场用的线圈,共 4 个,圆形标记是测量横向磁场用的线圈,共 12 个.

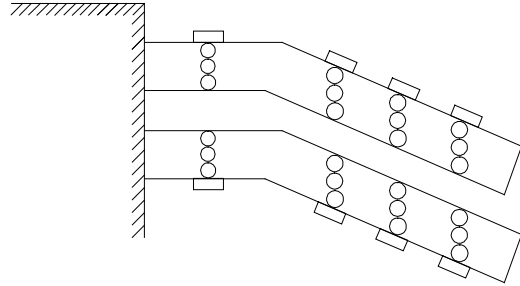


图 2 实测点布置图

测试的原理是,交变磁场在闭合线圈内所感生的电势有效值同交链它的磁密有如下关系:

$$E = 4.44 f W B S = k B \quad (8)$$

其中 k 为标定系数, f 交变磁场的频率, W 线圈的匝数, S 线圈的等效面积.

2.3 磁场计算与测量结果分析

空载运行是指定子绕组开路时的情况,因而定子绕组中没有电流流过,即只有转子电流产生漏磁场.图 3 给出了空载运行转子励磁电流为 640 安时上层线棒测点径向磁密的计算与测量结果.图 4 则给出了同样情况下上层线棒测点横向磁密的结果.为清楚起见,只画出第一排测点的磁密曲线.至于空载时下层线棒测点情况以及短路运行时各测点的结果,为节省篇幅起见,也未在本文中给出.

从磁场计算与实验结果来看,两者还是比较吻合的,证实了所用求解方法的可行性.至于存在区别,除实验上的原因外,计算模型本身因对源和边界都做了较大的简化,势必带来计算结果的误差.主要原因为:(1)采用直角坐标系,而事实上两极汽轮发电机

的空间曲率还是较大的。(2) 电流层的简化, 并只考虑了基波电流。(3) 边界条件全为理想的磁镜面, 但实际上端区铁磁结构件很复杂, 并有涡流与饱和现象。(4) 没有考虑定、转子不一样长的影响。

图3 空载时上层线棒测点径向磁密

图4 空载时上层线棒第一排测点横向磁密

3. 定子线棒股线的参数计算

股线的电阻和电抗是分析定子线棒股线间环流的基础。为增强定子绕组的散热能力, 大型汽轮发电机定子线棒通常采用实心股线和空心股线并用的混合型股线, 其参数计算比全实心或全空心的要复杂得多, 本文作者在文献[4]中对此作了较为详细的探讨。

4. 线棒股线间的环流计算

4.1 股线电流数学模型

为建立线棒股线的电流模型, 需做几个必要的假定: (1) 不考虑温度对股线电阻的影响, 即认为线棒中所有股线处在同一温度下, 如 75°C。这一假定是必要的, 因为在股线电流求出之前, 无法知晓各股线的具体温度。(2) 考虑股线在槽部的自抗和互抗, 忽略股线端部漏电抗。实际上, 端部漏电抗数值彼此之间接近, 在电流模型中起作用的是它们的差值, 所以略去端部漏电抗不会引起什么误差。(3) 端部线棒的横向磁场和径向磁场是环流电势的源。由于电机采用 540° 槽部换位的定子线棒, 如认为汽端和励端对称, 那么径向磁场和横向磁场的平均分量不会引起环流, 它们在线棒两端引起的感应电势正好被抵消。(4) 端部线棒的横向磁场由两部分组成: 平均分量和剩余分量。互感磁场与平均分量相对应, 而自感分量则与去掉平均分量后的剩余分量相对应[5]。平均分量在线棒两端部股线回路里感应的电势大小相等, 相位相反, 正好抵消, 而剩余分量感生的电势彼此叠加, 成为 540° 槽部换位线棒的环流源。

线棒股线的截面如图5所示。股线回路的选取方法是由股线1和2, 2和3, ..., 29和30分别组成29个独立回路。这种选取方法的特点是, 让横向磁场尽可能交链所取回路。

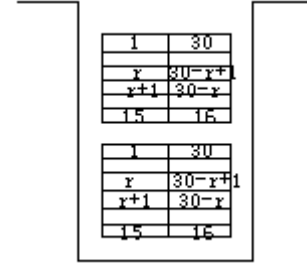


图5 线棒股线的截面示意图

从电网络角度来看, 股线回路是一个由二节点、N 条支路组成的网络。网络中存在 1 个独立节点, N-1 个独立回路。以支路电流(即股线电流)为变量, 根据网络理论可得出 1 个节点电流方程和 N-1 个回路电压方程, 从而可以联立解出 N 条支路的电流。具体分析时, 电流变量用复数表示, 所以最后可得到 2N 个实数方程。

以上层线棒为例, 第 r (r=1, 2, ..., N) 根股线的电压方程为:

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{I}_r R_r + j \sum_{k=1}^N \mathbf{I}_k X_{rk} + j \sum_{k=1b}^{Nb} \mathbf{I}_k X_{rk} + \mathbf{E}_r \quad (9)$$

式中 R_r 为第 r 根股线的电阻, X_{rk} 为第 r 根股线与第 k 根股线之间的互感, \mathbf{E}_r 为端部横向磁场的剩余分量在第 r 根股线中感生的电势, 1b 至 Nb 则为下层股线的编号。根据自感和互感的定义, 可得 $X_{r1b} = X_{rr}$, $X_{r2b} = X_{rr}$, ..., $X_{rNb} = X_{rr}$ 。于是, 式(9)可改写为:

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{I}_r R_r + j \sum_{k=1}^N \mathbf{I}_k X_{rk} + j \mathbf{I}_b X_{rr} + \mathbf{E}_r \quad (10)$$

式中, \mathbf{I}_b 为下层线棒的电流。由第 r 根股线与第 r+1 根股线构成的第 r 个回路的电压方程则为:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{V}_r &= \mathbf{V}_r - \mathbf{V}_{r+1} \\ &= (\mathbf{I}_r R_r - \mathbf{I}_{r+1} R_{r+1}) + j \sum_{k=1}^N \mathbf{I}_k (X_{rk} - X_{r+1,k}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$+ j \mathbf{I}_b (X_{rr} - X_{r+1,r+1}) + \mathbf{E}_r - \mathbf{E}_{r+1} \quad r = 1, 2, \dots, N-1$$

$$\text{其中: } \mathbf{I} = P + jQ, \quad \mathbf{I}_r = P_r + jQ_r,$$

$$\mathbf{I}_k = P_k + jQ_k, \quad \mathbf{I}_b = P_b + jQ_b, \quad \sum_{k=1}^N P_{kb} = P_b,$$

$$\sum_{k=1}^N Q_{kb} = Q_b.$$

把(11)式实部和虚部分开可得:

$$\begin{aligned} \text{Re} \Delta \mathbf{V}_r &= (P_r R_r - P_{r+1} R_{r+1}) - \sum_{k=1}^N Q_k (X_{rk} - X_{r+1,k}) \\ &\quad - Q_b (X_{rr} - X_{r+1,r+1}) + \text{Re} \Delta \mathbf{E}_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Im} \Delta \mathbf{V}_r &= (Q_r R_r - Q_{r+1} R_{r+1}) + \sum_{k=1}^N P_k (X_{rk} - X_{r+1,k}) \\ &\quad + P_b (X_{rr} - X_{r+1,r+1}) + \text{Im} \Delta \mathbf{E}_r \end{aligned}$$

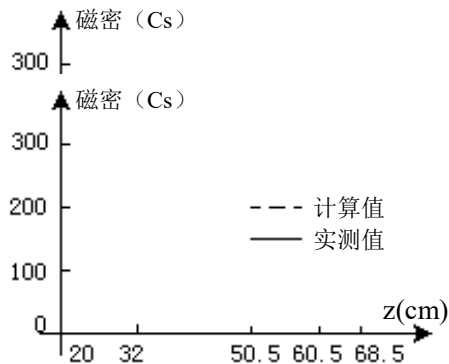


图3 空载时上层线棒测点径向磁密

图4 空载时上层线棒第一排测点横向磁密

其中, $r=1, 2, \dots, N-1$. 再加上一节点电流方程 $\mathbf{I} = \sum_{k=1}^N \mathbf{I}_k$, 分解为 $P = \sum_{k=1}^N P_k$ 和 $Q = \sum_{k=1}^N Q_k$, 则得到求解股线电流的 $2N$ 阶方程组, 用矩阵表示为:

$$[G_s] \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re} S \\ \text{Im} S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \text{Re} \Delta \mathbf{E}_r \\ 0 \\ \text{Im} \Delta \mathbf{E}_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中:

$$[G_s] = \begin{bmatrix} R & -X_s \\ X_s & R \end{bmatrix}$$

$$[P] = [P_1, P_2, \dots, P_N]^T$$

$$[Q] = [Q_1, Q_2, \dots, Q_N]^T$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ R_1 & -R_2 & & & & \\ & R_2 & -R_3 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & -R_{N-1} & \\ & & & & R_{N-1} & -R_N \end{bmatrix}$$

$$[X_s] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ X_{11} - X_{21} & X_{12} - X_{22} & \dots & X_{1N} - X_{2N} \\ X_{21} - X_{31} & X_{22} - X_{32} & \dots & X_{2N} - X_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N-1,1} - X_{N1} & X_{N-1,2} - X_{N2} & \dots & X_{N-1,N} - X_{NN} \end{bmatrix}$$

$$[\text{Re} S] = [P, Q_b(X_{11} - X_{22}), Q_b(X_{22} - X_{33}), \dots, Q_b(X_{N-1,N-1} - X_{NN})]^T$$

$$[\text{Im} S] = [Q, -P_b(X_{11} - X_{22}), -P_b(X_{22} - X_{33}), \dots, -P_b(X_{N-1,N-1} - X_{NN})]^T$$

式 (12) 右端第二项为端部磁场横向分量的剩余分量在股线回路里感生的电势差, 其大小由去掉平均分量后端部线棒股线回路间的横向磁场 \mathbf{B}_r 来确定:

$$\Delta \mathbf{E}_r = \begin{cases} j\omega S_r \mathbf{B}_r & r = 1, 2, \dots, 14 \\ 0 & r = 15 \\ -j\omega S_r \mathbf{B}_r & r = 16, 17, \dots, 29 \end{cases}$$

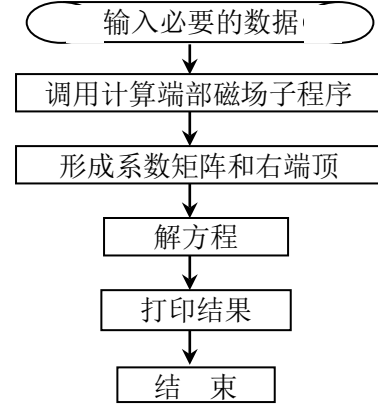
其中, $\omega=2\pi f$ 为磁场基波的角频率, S_r 是沿线棒高度方向第 r 根股线与第 $r+1$ 根股线构成的回路在端部区域的面积.

仿照上面步骤, 可容易地建立下层线棒股线的电流模型, 其主要区别在于上层线棒电流对下层无影响, 因而电流模型中不会出现上层线棒电流.

4.2 环流计算

本文根据上面分析所得的股线电流模型对 QFQS-200MW 汽轮发电机定子线棒采用 540° 槽部换位方案进行了计算, 程序框图如下:

为了能定量地分析股线环流, 引入了环流系数,



即某根股线在有环流影响时的铜耗与不计环流影响时铜耗的比值. 最大环流系数反映了由于环流影响附加损耗增加最为强烈的那根股线情况, 平均环流系数则是针对整根线棒的附加损耗增加而言的.

QFQS-200MW 汽轮发电机在额定负载下定子上层线棒股线的环流系数沿线棒高度的变化如图 6 所示.

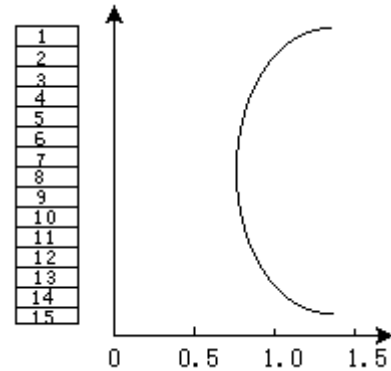


图 6 上层线棒股线环流系数

线棒左排各股线和右排位于同一高度股线的环流系数一样. 由图 6 可见, 最大环流系数出现在股线 1 和 15 (30 和 16) 上, $k_{\max}=1.419$, 最小的出现在线棒中间股线, $k_{\min}=0.779$, 线棒的平均环流系数 $k_{\text{mean}}=1.012$. 另外, 各股线电流的相位角基本上是一致的, 均位于股线 1 ($\theta_1=3.17^\circ$) 和股线 8 ($\theta_8=-2.01^\circ$) 的电流相位之间, $\Delta \theta_{\max}=5.18^\circ$.

环流影响使得线棒铜耗增加. 对于上层线棒, 在未考虑环流影响时铜耗为 $P_{\text{cu1}}=5.459$ kW, 考虑环流影响后铜耗为 $P_{\text{cu2}}=5.525$ kW, 所增加的附加损耗为 $\Delta P_{\text{cu}}=0.066$ kW; 对于下层线棒, $P_{\text{cu1}}=4.836$ kW, $P_{\text{cu2}}=4.911$ kW, $\Delta P_{\text{cu}}=0.075$ kW. 整台电机增加的附加铜耗为 7.6 kW.

5. 结语

本文以 QFQS-200MW 汽轮发电机为例, 探讨了定子线棒采用 540° 槽部完全换位时股线间环流的分析方法. 首先计算了线棒端部附近磁场, 并将其处理成能在股线回路里引起电势差的端部横向磁场的剩余分量形式. 然后, 进行了定子线棒混合型股线的参数计算. 最后, 根据基尔霍夫电流与电压定律, 建立了股线环流分析模型, 并计算了 QFQS-200MW 汽轮发电机采用 540° 槽部换位定子线棒时股线环流引起的股线电流不均匀分布和由此增加的附加铜耗. 由于分析环流的机理是一样的, 本文所用的方法也适合于采用其它换位方式时的换流分析.

参 考 文 献

- [1] G. Neidhöfer. Roebel Bar Windings for Large Synchronous Machines. BBR, 1970
- [2] B. J. Bennington, W. C. Brenner. Transpositions in turbo-generator coil sides short circuited at each end. IEEE-PAS, Nov. 1970
- [3] 汤蕴璆. 电机内的电磁场. 科技出版社, 1981
- [4] 郭有光, 王雪帆, 朱建国, V.S. Ramsden. 大型汽轮发电机定子混合型导体的参数计算. 华中理工大学学报, 2000 (4)
- [5] 陈世坤. 电机设计. 机械工业出版社, 1982

Analysis of Circulating Currents among the Stator Bar Strands of Large Turbine-generators

Guo Youguang Wang Xuefan Zhu Jianguo Ramsden V.S.

Abstract The magnetic fields near the stator end-windings of large turbine-generators are calculated by means of separation of variables under Descartes coordinate system, strand current model is created and the effect of circulating currents is analyzed in this paper. Measurement of the end region magnetic fields confirmed the theoretical values. The transverse end leakage field is divided into two parts (i.e. mean and remained ones) and the later is the source of the circulating current. There are two kinds of strands in the coil sides (i.e. solid and empty ones) and the parameter calculation is studied in detail. In the end, the effect of circulating current in a QFQS-200MW turbine generator is analyzed and the results can be used to improve the design and performance of large turbine-generators. The method applied in this paper is basically suitable for the coil sides with 540° transposition in slots.

Keywords turbine-generator; strand; circulating current; end-region magnetic field

Y.G. Guo Lecturer; Department of Electrical Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

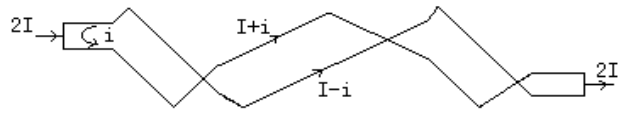


图1 槽部 540° 换位时两股线环流回路

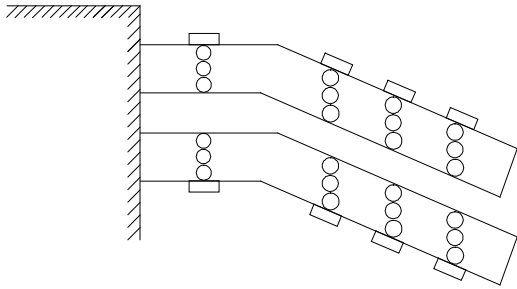


图2 实测点布置图

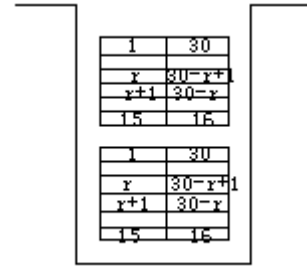


图5 线棒股线的截面示意图

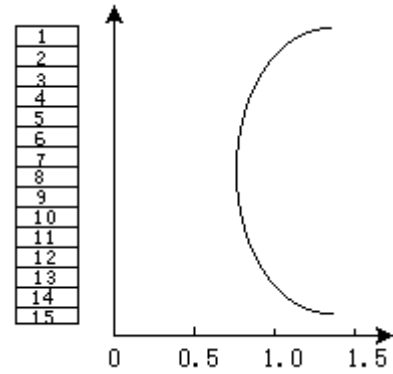


图6 上层线棒股线环流系数

大型汽轮发电机定子线棒股线间环流分析

郭有光 王雪帆
(华中理工大学电力系)

朱建国 V.S. Ramsden
(University of Technology, Sydney)

摘要 首先进行了汽轮发电机定子线棒端部附近的漏磁场分析与计算, 并将横向端部磁场分解成平均分量与剩余分量两部分, 而后者是线棒采用 540° 槽部完全换位时的环流源。磁场计算结果同实验值基本一致, 证实了磁场分析方法的有效性。在详细研究定子线棒混合型股线参数的基础上, 建立了股线间环流计算模型。最后, 进行了 QFQS-200MW 汽轮发电机定子上、下层线棒的环流分析。

关键词 汽轮发电机; 环流; 股线; 端部磁场

Analysis of Circulating Currents among the Stator Bar Strands of Large Turbine-generators

Guo Youguang Wang Xuefan Zhu Jianguo Ramsden V.S.

Abstract The magnetic fields near the stator end-windings of large turbine-generators are calculated by means of separation of variables under Descartes coordinate system, strand current model is created and the effect of circulating currents is analyzed in this paper. Measurement of the end region magnetic fields confirmed the theoretical values. The transverse end leakage field is divided into two parts (i.e. mean and remained ones) and the later is the source of the circulating current. There are two kinds of strands in the coil sides (i.e. solid and empty ones) and the parameter calculation is studied in detail. In the end, the effect of circulating current in a QFQS-200MW turbine generator is analyzed and the results can be used to improve the design and performance of large turbine-generators. The method applied in this paper is basically suitable for the coil sides with 540° transposition in slots.

Keywords turbine-generator; strand; circulating current; end-region magnetic field

Y.G. Guo Lecturer; Department of Electrical Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China