

# 电机定子线棒股线间环流的简化计算模型

郭有光 王雪帆  
(华中理工大学电力系)

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

**摘要** 介绍了在假定条件下大型汽轮发电机定子线棒股线间环流计算模型中股线参数及线棒端部附近漏磁场的简化计算方法. 计算了 QFQS-200MW 汽轮发电机定子上、下层线棒的环流, 并与相关文献的结果做了比较, 证实了所用方法的有效性.

**关键词** 线棒; 股线; 环流; 计算模型

**分类号** TM311

大型汽轮发电机定子端部漏磁场很强, 容易产生严重的股线环流问题, 影响线圈绝缘寿命, 通常需采用股线扭转换位加以抑制. 但股线环流计算是一项非常复杂的工作, 三维磁场数值计算工作量大、耗时, 严谨推导的传统计算方法也很复杂, 工程实施不方便. 为此, 本文提出了一种简化计算模型.

## 1 股线环流机理

大型交流电机定子绕组一般都采用条形线棒. 线棒由若干横截面为矩形的实心或空心或兼而有之的股线组成, 并在两端各自短接. 由于线棒处在交变磁场中, 因而流过线棒的电流除了负载电流外, 还有附加电流. 第一种是流动于每一股线导体之中的涡流, 即有关文献中所论述的集肤效应. 它的存在使得股线内各点电流密度分布不均匀, 从而交流电阻和附加铜耗增加. 第二种是在任意两根股线所组成的回路中流通的环流, 是由各并联股线的电势不等所引起的. 它叠加在由负载决定的平均电流之上, 使各股线电流呈现不均匀的现象. 由于各股线损耗不同, 各股线的温升就不均匀. 根据试验结果, 大型电机定子线棒中股线间的温差可高达  $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ , 因而限制了绝缘的寿命和发电机的出力.

对于第一种附加电流的影响, 一般的分析方法是采用一维近似理论导出的公式来计算股线的交流电阻增加系数和电抗减少系数. 为了扼制由于集肤效应而引起的附加铜耗, 股线的厚度取得较薄, 小于某个临界高度. 这也是大型交流电机定子绕组线棒由多根股线并联而成的原因.

第二种附加电流是造成股线温度不均匀的主要原因. 为了削弱这种环流, 早在 1912 年 BBC 公司的工程师 Ludwig Roebel 就提出了在槽部采用  $360^{\circ}$  换位方式的 Roebel 线棒. 其基本思想是使各股线在槽部处于相同的磁位置, 从而槽部漏磁场在各股线中感生的电势基本相同, 达到减小环流和附加损耗的目的. 然而, 由于端部漏磁场在各股线中感生的电势没有被平衡, 大型交流电机的端部漏磁场又很强, 各股

线间仍然存在着相当大的环流. 因此, 有必要采取进一步的措施来减小线棒股线间的环流和附加铜耗, 降低线棒的温升, 例如采用在槽部作  $540^{\circ}$  换位的线棒或空换位、不完全换位方案<sup>[1]</sup>.

大型汽轮发电机定子线棒较长, 采用槽部  $540^{\circ}$  的换位方式在工艺上是没有困难的, 因而成为汽轮发电机定子线棒最为普遍的换位方式. 为分析方便, 将线棒端部附近的漏磁场区分为径向磁场与横向磁场. 其中, 横向端部漏磁场又区分为自感磁场  $B_e$  和互感磁场  $B_f$  (如图 1 所示), 它们在线圈的端部股线里分别产生各自的环流. 图 2 为槽部  $540^{\circ}$  换位、端部不换位线棒的股线电势分析图.

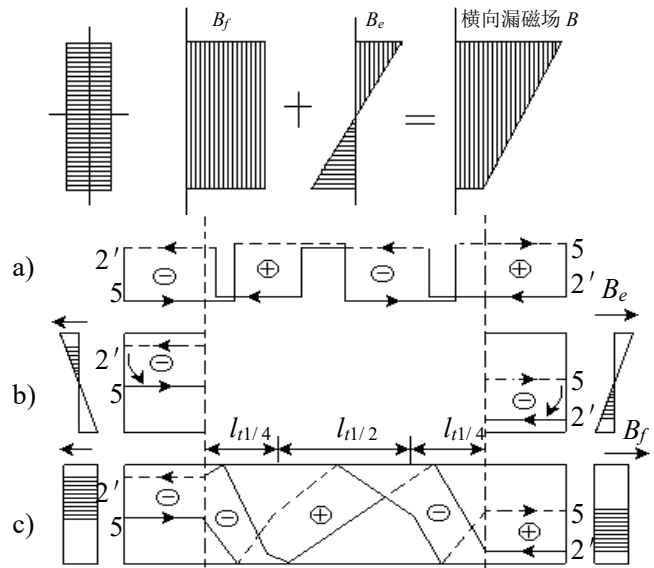


图 1 定子线棒端部横向漏磁场

图 2 槽部  $540^{\circ}$  换位、端部不换位的线棒

- (a) 径向磁场在端部感生的电势被抵消
- (b) 横向自感磁场在端部感生的电势不能被抵消
- (c) 横向互感磁场在端部感生的电势被抵消

由股线电势分析图可见, 采用槽部  $540^{\circ}$  换位、端部不换位的线棒时, 不仅槽部径向、横向磁场的作用完全被抵消, 端部径向磁场与端部横向磁场的互感分量的作用也被抵消, 与槽部  $360^{\circ}$  换位的 Roebel 线

棒相比,有进一步抑制环流的优点.但是,端部横向磁场的自感分量所感生的电势作用不能被抵消,成为 $540^\circ$ 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仍是人们所关心的.文献[2]对此作了较为详细的分析: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,求解直角坐标系下的泊松方程,找出定子端部线棒附近的漏磁场[3],并将横向磁场处理成平均分量与剩余分量形式,为建立股线电流模型作好准备.其次,为改善定子绕组的冷却状况,大型汽轮发电机定子线棒常采用由实心股线与空心股线组成的混合型股线,其导线的参数求解比全实心或全空心股线要复杂的多,文献[2]对此作了较深入的探讨,并用于 QFQS-200MW 和 QFQS-300MW 汽轮发电机定子线棒股线间的环流分析.

在工程实践中,人们往往希望有一套简便的计算方法,只要计算结果在工程允许的误差范围内.本文在合理的假定条件基础上,介绍了大型汽轮发电机定子线棒端部横向漏磁场的自感分量与股线参数的简化计算模型,并用于 QFQS-200MW 汽轮发电机定子线棒股线间的环流分析.最后,将计算结果和文献[2]的有关数据做一比较,证实了简化计算模型的有效性.

## 2 简化计算模型

### 2.1 端部磁场的计算

前面提及,对于采用槽部 $540^\circ$ 换位的大型汽轮发电机定子线棒,只有端部横向漏磁场的自感分量在股线回路里产生电势差,引起环流.定子线棒端部横向自感磁场可近似地由下式求得[4].

最大自感磁密:

$$B_{e\max} = \frac{\sqrt{2}\mu_0 AS_1}{4} \frac{t_1 k}{b_n + \Delta}$$

其中, $\mu_0$ 为空气的磁导率, $AS_1$ 为定子线负荷, $t_1$ 定子齿距, $k$ 修正系数, $b_n$ 定子槽宽, $\Delta$ 相邻线棒间距,取 $0.8\sim 1.2\text{cm}$ .

最小自感磁密:

$$B_{e\min} = -B_{e\max}$$

从图1可以看到,线棒的自感磁密沿高度方向线性地变化.显然,在线棒中点自感磁密 $B_e=0$ .

### 2.2 股线参数的计算

#### 2.2.1 股线电阻

由于定子线棒股线在槽部进行了 $540^\circ$ 的完全换位,如果不计端部的集肤效应,各实心股线或各空心股线的电阻增加系数应分别相等.

线棒实心股线的电阻增加系数为[4]:

$$k_{Fs} = 1 + \left( \frac{\mu_0 \pi f m n b}{3 \rho b_s} \right)^2 a^4$$

$$\approx 1 + 0.107 m^2 \left( \frac{n b f}{50 b_s} \right)^2 a^4 \times 10^8$$

上式中,铜线的电阻率 $\rho \approx 0.02 \times 10^{-6}$ 欧米,空气的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米,电流频率 $f = 50$ 赫兹, $m$ 为沿槽高方向的股线根数, $n$ 沿槽宽方向的股线根数, $b$ 铜线宽, $b_s$ 槽宽, $a$ 导线厚度.

线棒空心股线的电阻增加系数为:

$$k_{Fe} = 1 + 0.107 m^2 \left( \frac{n b f}{50 b_s} \right)^2 a_1^4 \left( 1 - \frac{a_k b_k}{a_1 b_1} \right) \left( 1 - \frac{a_k^3 b_k}{a_1^3 b_1} \right) \times 10^8$$

上式中, $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_k$ 、 $b_k$ 分别为空心股线截面和中心孔的长度和宽度.

股线电阻为各自的电阻增加系数与直流电阻的乘积.

#### 2.2.2 股线电抗

假定铁心的磁导率 $\mu_{Fe} = \infty$ ,槽漏磁力线平行于槽底,则股线电流 $I_n$ 在股线以上区域产生的磁通密度为:

$$B = \frac{\mu_0 I_n}{b_n}$$

在股线以下区域产生的磁通密度为零. $B$ 为常值,所以只要求出漏磁场交链的面积 $S$ 即可求得股线电抗:

$$X = \omega L = \omega \frac{BS}{I_n}$$

对于单根股线的自感,由于所有股线均在槽部作了 $540^\circ$ 的完全换位,因而股线以上区域和股线以下区域的面积相等:

$$S = \frac{1}{2} l H$$

其中, $l$ 为定子槽部轴向长度, $H$ 为去掉主绝缘后线棒的高度.

对于两根股线的互感,由于源电流只在该股线以下区域产生槽漏磁场,计算互感磁通时考虑的是目标股线以上的区域,因而互感面积应是同时位于两根股线以上部分的面积.如果假定各股线占据的高度均匀,位于第 $i$ 根和第 $j$ 根股线以上区域的面积为:

$$S_{ij} = l H \left[ \frac{1}{2} - \frac{|i-j|}{N} + \left( \frac{|i-j|}{N} \right)^2 \right]$$

其中, $N$ 为线棒股线总数, $\omega = 2\pi f$ 为电流角频率.于是,线棒股线的电抗为:

$$X_{ij} = \frac{\omega \mu_0}{b_n} l H \left[ \frac{1}{2} - \frac{|i-j|}{N} + \left( \frac{|i-j|}{N} \right)^2 \right]$$

当  $i=j$  时,  $X_{ij}=X_{ii}$  为股线的自抗.

因为各股线端部漏抗的数值较小, 彼此又接近, 并且在股线电流计算模型中起作用的是它们的差值, 所以本文只考虑槽漏电抗.

### 2.3 股线环流计算

大型汽轮发电机定子线棒是由多根股线并联组成的, 线棒两端各自短接. 如果有  $N$  根股线, 则这根线棒可看作有  $N$  条并联支路的网络, 如图 3 所示.

从电网络角度来看, 这是由 2 个节点、 $N$  条支路组成的网络. 若以股线电流为未知量, 根据网络理论可写出  $N-1$  个独立回路电压方程和一个节点电流方程, 从而就可以解出所有的股线电流. 在简化模型里, 各支路的电阻与电抗和支路电流大小无关, 方程组是线性的, 容易求解.

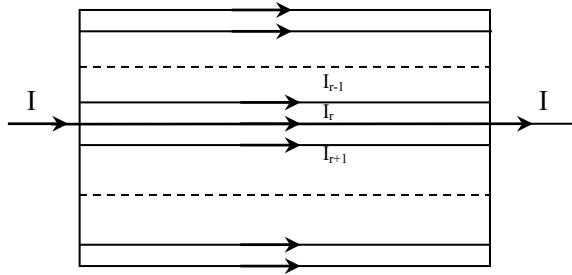


图 3 线棒的等效网络

具体计算时, 上、下层线棒分别进行计算. 以计算端部横向磁场的自感分量在上层线棒中的环流为例, 由第  $r$  根股线与第  $r+1$  根股线组成的第  $r$  个回路的电压方程为:

$$(\mathbf{I}_r R_r - \mathbf{I}_{r+1} R_{r+1}) + j \sum_{k=1}^N \mathbf{I}_k (X_{rk} - X_{r+1,k}) + j \mathbf{I}_1 (X_{rr} - X_{r+1,r+1}) = \mathbf{E}_d + \mathbf{E}_{tr}$$

其中,  $R_r$  为第  $r$  根股线的交流电阻,  $X_{ij}$  第  $r$  根股线与第  $j$  根股线间的槽部互感抗,  $\mathbf{I}_1 = \sum_{k=1}^N \mathbf{I}_k$  为下层线棒中的负载电流,  $\mathbf{E}_d$ 、 $\mathbf{E}_{tr}$  为左右端部横向自感磁场的感应电势, 根据法拉第电磁感应定律  $\mathbf{E}_d + \mathbf{E}_{tr} = j\omega S_r B_r$ . 这里,  $S_r$  为横向磁场穿过回路的有效面积,  $B_r$  为该面积上的平均磁密.

### 2.4 股线环流系数

为了便于分析线棒股线环流的影响, 下面引入了衡量环流的一个指标: 环流系数. 它的定义是某根股线在有环流影响时的损耗值同不计环流影响时损耗值之比. 至于最大环流系数和平均环流系数的意义则是显而易见的. 最大环流系数反应了由于环流影响附加铜耗增加程度最为强烈的那根股线情况, 线棒的最高局部温升与之有关. 平均环流系数是针对整根线棒的附加铜耗而言的, 它将反应线棒平均温升的水平.

## 3 计算实例与结论

根据上述的简化环流分析方法, 计算了 QFQS-200MW 汽轮发电机定子上、下层线棒在额定负载下的环流情况. 表 1 列出了最大环流系数  $k_{max}$ 、最小环流系数  $k_{min}$  和平均环流系数  $k_{mean}$  的计算结果, 并同时列入了文献<sup>[2]</sup>的有关数据, 以便比较.

表 1 QFQS-200MW 汽轮发电机定子线棒股线环流系数

	上层线棒		下层线棒	
	计算结果	文献数据	计算结果	文献数据
$k_{max}$	1.394	1.419	1.501	1.484
$k_{min}$	0.980	0.779	0.975	0.751
$k_{mean}$	1.081	1.012	1.100	1.015

由表 1 可见, 由简化环流分析方法得到的结果和文献<sup>[2]</sup>采用较为严谨的推导而来并经过实验验证的数据有较好的一致性, 尤其是最为人们关心的最大股线环流系数, 因而满足工程计算的要求. 相比起来, 本文采用的方法十分简单, 特别是线棒端部漏磁场的计算, 适合工程实际的分析和应用.

### 参考文献

- [1] 许善椿, 吴祚潭. 大型发电机定子线棒的新型换位技术. 大电机技术, 1992 (1), 1~5 页
- [2] 郭有光, 王雪帆, 朱建国, V.S. Ramsden. 大型汽轮发电机定子线棒股线间环流分析. 华中理工大学学报, 2000 (4)
- [3] 汤蕴璆. 电机内的电磁场. 北京, 科学出版社, 1981
- [4] 陈世坤. 电机设计. 北京, 机械工业出版社, 1982

## Simplified Calculation Model of Circulating Currents among the Stator Bar Strands of Electrical Machines

Guo Youguang Wang Xuefan Zhu Jianguo Ramsden V.S.

**Abstract** Under certain postulates a simplified calculation method is introduced in this paper to compute the strand parameters and the end-region magnetic field for analyzing the circulating currents among the stator bar strands of large turbo-generators. This method is applied to calculate the circulating current of a QFQS-200MW turbo-generator and validated by the results in a reference.

**Keywords** stator; strand; circulating current; calculation model

**Guo Youguang** Lecturer; Department of Electrical Power Engineering; Huazhong University of Science and

附件一：论文中所用的插图

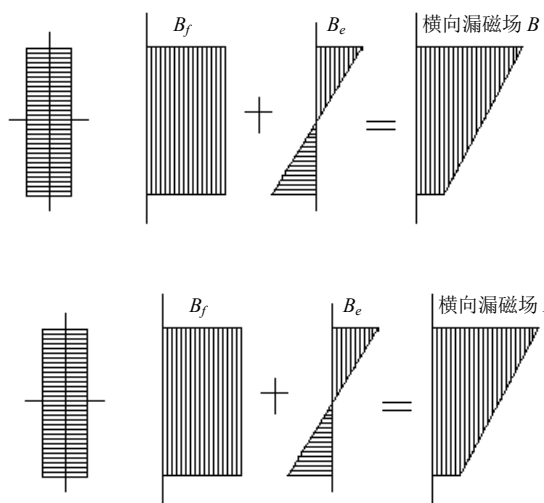


图1 定子线棒端部横向漏磁场

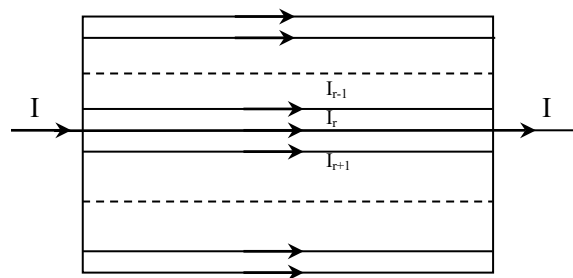


图3 线棒的等效网络

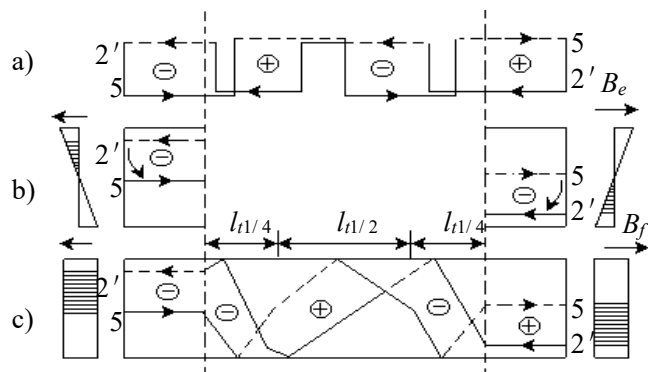


图2 槽部  $540^\circ$  换位、端部不换位的线棒

- (a) 径向磁场在端部感生的电势被抵消
- (b) 横向自感磁场在端部感生的电势不能被抵消
- (c) 横向互感磁场在端部感生的电势被抵消

# 电机定子线棒股线间环流的简化计算模型

郭有光 王雪帆  
(华中理工大学电力系)

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

**摘要** 介绍了在假定条件下大型汽轮发电机定子线棒股线间环流计算模型中股线参数及线棒端部附近漏磁场的简化计算方法. 计算了 QFQS-200MW 汽轮发电机定子上、下层线棒的环流, 并与相关文献的结果做了比较, 证实了所用方法的有效性.

**关键词** 线棒; 股线; 环流; 计算模型

## Simplified Calculation Model of Circulating Currents among the Stator Bar Strands of Electrical Machines

*Guo Youguang Wang Xuefan Zhu Jianguo Ramsden V.S.*

**Abstract** Under certain postulates a simplified calculation method is introduced in this paper to compute the strand parameters and the end-region magnetic field for analyzing the circulating currents among the stator bar strands of large turbo-generators. This method is applied to calculate the circulating current of a QFQS-200MW turbo-generator and validated by the results in a reference.

**Keywords** stator; strand; circulating current; calculation model

**Guo Youguang** Lecturer; Department of Electrical Power Engineering; Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China