

文章编号:1000-582X(2007)02-0042-04

水轮发电机定子线棒4种换位的分析与比较

郭宁¹,韩力¹,石小坤²

(1. 重庆大学电气工程学院,重庆 400030;2. 重庆水轮机厂有限责任公司,重庆 400054)

摘要:为了减少水轮发电机定子线棒股线间的环流及其附加损耗和发热不均,提高发电机的可靠性和运行寿命,研究定子线棒的换位方法具有重要意义.文章对水轮发电机定子线棒的4种换位方法进行了分析对比,给出了360°延长换位时股线漏感电势的具体计算方法,利用所编制的优化程序对不同换位方法进行了计算,并对结果进行了分析比较.研究结果对水轮发电机定子线棒的优化设计具有较大的参考价值.

关键词:水轮发电机;定子线棒换位;环流损耗

中图分类号:TM311

文献标识码:A

为了减小由水轮发电机定子线棒股线间环流所引起的附加损耗,槽中股线需要采取一定的换位方法^[1-7].早期提出的是0°/360°/0°换位方法(以下简称全换位),也就是常说的罗贝尔线棒^[1].经过对投入运行机组的实测结果分析发现^[2],此种换位方法仍然存在相当大的环流,由此造成的附加损耗导致各股线温差过大,线棒平均温度升高,出现局部过热现象,严重影响了发电机的可靠运行和使用寿命.

为了进一步减小环流损耗,逐渐出现了一些改进的换位方法.由于水轮发电机定子铁心长度短,通常在全换位的基础上进行改进,如不足360°换位^[3](不足换位)、0°/360°/0°加槽部空换位段换位^[3-5](空换位)、0°/360°/0°延长换位^[6](延长换位).这些换位方法在不同程度上有效地抑制了股线间的环流,减小了线棒的环流附加损耗和平均温升,增加了发电机的出力和使用寿命.

现有文献大多数都是针对其中的1种或2种换位方法进行研究,而很少有文献对水轮发电机全换位、不足换位、空换位和延长换位等4种定子线棒不同换位方法综合进行定量计算和比较研究.在前期研究的基础上^[7],文章给出了定子线棒4种不同换位方法的简便计算模型,重点推导了延长换位股线漏感电势的具体计算公式,编制了相应的优化设计程序,并以4个电站不同容量的水轮发电机为例,对4种不同的换位方法进行了综合计算与对比分析,在此基础上提出了对水轮发电机定子线棒设计有参考价值的结论.

1 4种换位方法的对比分析

1.1 线棒换位模型

当采取全换位、不足换位以及空换位时,线棒换位长度不超过定子铁心长度,股线仅在槽部进行换位,端部股线为水平直线.当采取延长换位时,线棒换位长度超过定子铁心长度,端部有一部分股线参与换位,不再是水平直线.对编号为1至 m 的股线来说,其换位方向如图1所示;对编号为 $m+1$ 至 $2m$ 的股线来说,其换位方向与之相反.股线编号如图2所示.

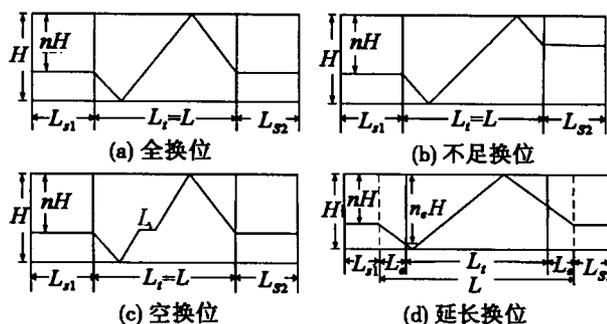


图1 定子线棒换位示意图

m	$m+1$
$m-1$	$m+2$
\vdots	\vdots
2	$2m-1$
1	$2m$

图2 股线编号

• 收稿日期:2006-08-10

作者简介:郭宁(1980-),男,重庆大学硕士研究生,主要从事电机现代设计方法的研究.韩力,男,副教授,电话(Tel.):023-65111229;E-mail:hanli@cqu.edu.cn.

其中: L_i 为定子铁心长度; L 为线棒实际换位长度; $L_c = (L - L_i) / 2$; n 为各股线在线棒中的相对高度。

$$n = \frac{y}{H} = \begin{cases} (m - k + 0.5) / m, & k \in [1, m], \\ (k - m - 0.5) / m, & k \in [m + 1, 2m]. \end{cases} \quad (1)$$

1.2 4种换位方法的比较

水轮发电机的定子线棒处于复杂的槽部漏磁场和

表1 4种换位方法的比较

换位方法	工作原理	主要优点	主要缺点
全换位	槽部换位角等于 360° , 端部不换位. 槽部漏感电势平衡, 端部漏感电势不平衡.	换位节距长, 股线分布均匀, 便于制造. 早期应用较多.	环流及其附加损耗大, 股线发热不均, 局部温升高, 影响线棒绝缘性能和寿命.
不足换位	槽部换位角小于 360° , 端部不换位, 利用槽部的不平衡漏感电势去抵消端部的不平衡漏感电势.	换位角度减小, 换位节距增大, 便于制造. 如换位角选取得当, 降损效果明显.	股线根数为整数, 不能任意选取换位角. 当股线根数较少时, 实际换位角与最佳换位角之间出现较大差别, 影响降损效果.
空换位	在槽部设置空换位段, 其余部分仍然进行 360° 换位. 利用槽部的不平衡漏感电势去抵消端部的不平衡漏感电势.	如空换位段长度选取得当, 可有效抑制环流.	换位节距减小, 制造工艺难度增大.
延长换位	仍然按 360° 换位, 但股线换位长度大于定子铁心长度, 即端部也有一部分股线进行了换位, 槽部相当于进行不足 360° 换位.	换位节距增大, 编织与股间绝缘改善, 便于制造. 如延长换位长度选取得当, 降损效果明显.	股线延长换位部分不宜超过线棒直线部分, 否则端部导线绝缘易受损坏, 从而造成股线间短路.

2 股线漏感电势的计算

环流及其损耗是由股线间的不平衡漏感电势产生的. 为了计算股线中的环流及其损耗, 关键需要计算股线的漏感电势.

2.1 基本假设

- 1) 忽略径向漏磁场的作用;
- 2) 槽部横向漏磁 B_m 沿线棒高度方向呈线性变化, 沿长度方向不变^[5,7];
- 3) 端部横向漏磁场分解为端部横向自感漏磁分量 B_e 和端部横向互感漏磁分量 B_f 两部分, 两者之比 B_f/B_e 为一常数^[5,7];
- 4) 各并联股线具有相同的等效阻抗, 即相同的等效电阻和等效电抗^[7].

2.2 延长换位股线漏感电势的计算

全换位、不足换位以及空换位的漏感电势计算公式参见文献[7], 在此不赘. 对延长换位方法, 其端部有一部分股线也进行了换位, 如图1(d)中 L_c 段所示. 这时股线漏感电势的计算应该对端部不换位部分、端部换位部分以及槽部换位部分分别进行计算. 经推导, 编号为1至 m 的股线环流损耗计算公式如下(编号为 $m+1$ 至 $2m$ 的股线环流损耗计算公式与之相似).

1) 当 $0 < n < 2L_c/L$ 时: 槽部股线出现一个换位弯,

端部漏磁场中, 2种漏磁场均会在股线中感应出漏感电势. 改进换位方法的目的就是采用灵活措施, 充分利用股线在槽部漏磁场中感应的不平衡电势, 最大限度地抵消股线在端部漏磁场中感应的不平衡电势, 减小股线间的不平衡漏感电势, 从而达到减小环流及其附加损耗的目的. 4种换位方法的对比见表1.

左端部换位部分没有换位弯, 右端部换位部分出现一个换位弯.

$$\left. \begin{aligned} n_e &= n + 2L_c/L, n_{ld} = n, n_{ru} = 2L_c/L - n, n_{rd} = n - 2L_c/L, \\ L_{ld} &= L_c, L_{ru} = L_c - 2n/L, L_{rd} = 2n/L, \\ E_m &= C_m [5/6 + (2n_e + n_e^2/2)\beta_1 - (2 + n_e)\beta_1^2 + \\ &\quad 2\beta_1^3/3 - n_e^2] + C_v(3/2 - n_e - n_e^2/2), \\ E_f &= (C_{f1} + C_{f2})n + C_{fe}(n_{ld}L_{ld} + L_{ld}^2/L) + \\ &\quad C_{fe}(n_{ru}L_{ru} - L_{ru}^2/L) + C_{fe}L_{rd}(n_{rd}L_{rd} + L_{rd}^2/L), \\ E_e &= (C_{e1} + C_{e2})(n - n^2) + \\ &\quad C_{ee}[(n_{ld} - n_{ld}^2)L_{ld} + (1 - 2n_{ld})L_{ld}^2/L - 4L_{ld}^3/3L^2] + \\ &\quad C_{ee}[(n_{ru} - n_{ru}^2)L_{ru} + (2n_{ru} - 1)L_{ru}^2/L - 4L_{ru}^3/3L^2] + \\ &\quad C_{ee}[(n_{rd} - n_{rd}^2)L_{rd} + (1 - 2n_{rd})L_{rd}^2/L - 4L_{rd}^3/3L^2]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $C_m, C_v, C_{e1}, C_{e2}, C_{f1}, C_{f2}, C_{ee}, C_{fe}, \beta_1$ 均为计算系数^[4], E_m, E_f, E_e 分别代表股线在槽部横向漏磁 B_m 、端部横向漏磁互感分量 B_f 和端部横向漏磁自感分量 B_e 中所感应的电势.

2) 当 $2L_c/L \leq n \leq L_i/L$ 时: 槽部股线出现2个换位弯, 左端部换位部分和右端部换位部分没有换位弯.

$$\begin{aligned} n_e &= n + 2L_c/L, n_{ld} = n, n_{rd} = n - 2L_c/L, \\ L_{ld} &= L_{rd} = L_c. \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 E_m &= C_m [5/6 - (2n_e - n_e^2/2)\beta_1 + (2 - n_e)\beta_1^2 + 2\beta_1^3/3] + \\
 &\quad C_v(3/2 - n_e - n_e^2/2), \\
 E_f &= (C_{f1} + C_{f2})n + C_{fe}(n_{id}L_{id} + L_{id}^2/L) + \\
 &\quad C_{fe}(n_{rd}L_{rd} + L_{rd}^2/L), \\
 E_e &= (C_{e1} + C_{e2})(n - n^2) + \\
 &\quad C_{ee}[(n_{id} - n_{id}^2)L_{id} + (1 - 2n_{id})L_{id}^2/L - 4L_{id}^3/3L^2] + \\
 &\quad C_{ee}[(n_{rd} - n_{rd}^2)L_{rd} + (1 - 2n_{rd})L_{rd}^2/L - 4L_{rd}^3/3L^2].
 \end{aligned} \right\} (3)$$

3) 当 $L_i/L < n < 1$ 时: 槽部股线出现一个换位弯, 左端部换位部分出现一个换位弯, 右端部换位部分没有换位弯.

$$\left. \begin{aligned}
 n_e &= 1 - n + L_i/L, n_{lu} = 2 - n, n_{id} = n, n_{rd} = n - 2L_e/L, \\
 L_{lu} &= L_e - (1 - n)L/2, L_{id} = (1 - n)L/2, L_{rd} = L_e, \\
 E_m &= C_m [5/6 - (2 - n_e^2/2)\beta_1 + n_e\beta_1^2 + 2\beta_1^3/3 + \\
 &\quad (1 - n_e)^2/2] + C_v(3/2 - n_e - n_e^2/2), \\
 E_f &= (C_{f1} + C_{f2})n + C_{fe}L_{lu}(n_{lu}L_{lu} - L_{lu}^2/L) + \\
 &\quad C_{fe}(n_{id}L_{id} + L_{id}^2/L) + C_{fe}(n_{rd}L_{rd} + L_{rd}^2/L), \\
 E_e &= (C_{e1} + C_{e2})(n - n^2) + \\
 &\quad C_{ee}[(n_{lu} - n_{lu}^2)L_{lu} + (2n_{lu} - 1)L_{lu}^2/L - 4L_{lu}^3/3L^2] + \\
 &\quad C_{ee}[(n_{id} - n_{id}^2)L_{id} + (1 - 2n_{id})L_{id}^2/L - 4L_{id}^3/3L^2] + \\
 &\quad C_{ee}[(n_{rd} - n_{rd}^2)L_{rd} + (1 - 2n_{rd})L_{rd}^2/L - 4L_{rd}^3/3L^2].
 \end{aligned} \right\} (4)$$

表3 4个电站水轮发电机的4种换位方法计算结果

换位方法	田坝 B_f/B_e		阿鹁田 B_f/B_e		大盈江 B_f/B_e		龙马 B_f/B_e	
	2.0	2.6	2.0	2.6	2.0	2.6	2.0	2.6
全换位	损耗相对值/%		100	100	100	100	100	100
不足换位	最佳换位角/(°)		316	307	315	305	319	310
	损耗相对值/%		0.42	0.59	0.41	0.57	0.34	0.49
空换位	最佳空换位段长度/m		0.235	0.305	0.210	0.275	0.195	0.250
	损耗相对值/%		4.49	3.35	4.46	3.33	4.46	3.34
延长换位	最佳延长换位长度/m		1.87	1.95	1.61	1.68	1.65	1.72
	损耗相对值/%		0.37	0.25	0.38	0.27	0.34	0.22

3.3 不同换位方法对线棒环流损耗的影响

以龙马电站水轮发电机为例, 分别取 B_f/B_e 为 2.2、2.4、2.6, 对3种改进的换位方法进行优化设计, 计算结果如图3所示, 其中 P_e^* 为线棒损耗的相对值, 其基值为相同 B_f/B_e 值下全换位时的损耗值. 其它3个电站水轮发电机的计算结果变化规律大体一致, 只是具体数据有所不同.

3.4 计算结果验证及工程实际应用

笔者利用新安江电站水轮发电机的数据进行了验算, 优化结果最佳换位角度为 313.7° , 最佳空换位段长度为 0.1558 m , 这与在真机上通过温升试验所验证

3 4种换位方法的对比计算

根据上述推导公式, 文章在 Windows 平台上编制了相应的优化设计程序, 并利用云南省田坝、阿鹁田、大盈江三级(以下简称大盈江)和龙马等4个电站水轮发电机的数据(其中田坝和阿鹁田电站已投运, 大盈江和龙马电站即将投运), 对4种不同换位方法进行了计算.

3.1 发电机基本数据(见表2)

表2 4个电站水轮发电机基本数据

电站名称	P_N/kW	U_N/V	I_N/A	股线根数	铁心长/m	线棒总长/m
田坝	105 000	13 800	5 020	48	1.626	2.932
阿鹁田	35 000	10 500	2 264	36	1.390	2.566
大盈江	50 000	10 500	3 234	34	1.450	2.621
龙马	95 000	13 800	4 542	48	1.626	3.050

3.2 不同换位方法的最佳值计算

发电机运行工况不同, 其 B_f/B_e 值不同. 今取 B_f/B_e 分别为 2.0 和 2.6, 对4个电站水轮发电机的4种换位方法进行了综合计算. 其中对于3种改进的换位方法, 计算了各自的最佳换位值及其相应的损耗相对值, 结果如表3所示. 在计算各种损耗的相对值时, 其基值取为相同 B_f/B_e 值下全换位时的损耗实际值.

的最佳换位角度 313° 、最佳空换位段长度为 0.16 m 至 0.24 m 较为一致, 能够满足工程设计要求. 在此基础上, 重庆水轮机厂有限责任公司采用文章提出的算法对田坝、阿鹁田、大盈江和龙马等4个电站水轮发电机的定子线棒进行了优化设计, 并用于产品制造中.

4 结论

1) 提出了一套完整的水轮发电机定子线棒环流及其损耗的简便算法和相应的优化设计程序, 适用于定子线棒4种不同换位方案的比较与优选, 对工程设计具有较大的参考价值.

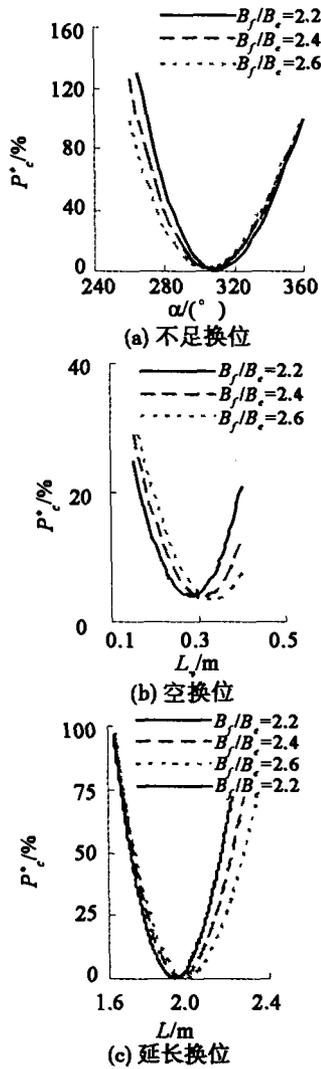


图3 线棒环流损耗与不同换位方法的关系

2) 与全换位相比, 无论采用哪种改进的换位方法, 只要换位参数优化设计适当, 均能有效减小环流损

耗. 采用最佳空换位段长度, 环流损耗可减小 95% 以上; 采用最佳换位角或最佳延长换位长度, 环流损耗可减小 99% 以上.

3) 4 种换位方法相比较, 延长换位减小环流损耗的效果最为明显, 且换位节距大、便于制造, 是一种值得推荐的换位方法. 然而, 如果计算得出的最佳延长换位值超过线棒的直线长度, 则应该考虑制造工艺的可能性而适当调整.

4) 发电机端部漏磁场对线棒环流及其损耗有直接影响. 随着 B_f/B_e 值的增加, 最佳换位角逐步减小, 最佳空换位长度和最佳延长换位长度逐步增加. 当 B_f/B_e 较大时, 可考虑采用不足换位方案; 当 B_f/B_e 较小时, 可考虑采用延长换位方案.

参考文献:

- [1] JOHANN HALDEMANN. Transposition in stator bars of large turbogenerators [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 119(3): 553-560.
- [2] 李隆年, 王健生. 水轮发电机定子线圈股线温升不均匀问题的研究 [J]. 大电机技术, 1985 (2): 21-27.
- [3] 张日强, 宋文谦. 大型交流电机定子线棒换位技术综述 [J]. 大电机技术, 2000 (1): 22-23.
- [4] 许承千, 罗荣杰. 大型水轮发电机定子线棒中的环流、温升与换位方式 [J]. 大电机技术, 1985 (2): 1-8.
- [5] 蒋同海, 宋文谦. 大型交流发电机定子 $0^\circ/360^\circ/0^\circ$ 线棒空换位的分析 [J]. 电工技术学报, 1989 (4): 21-30.
- [6] 唐群一. 新安江水力发电厂发电机定子线棒延长 360° 换位方式的研制和应用 [J]. 大电机技术, 1996 (2): 1-7.
- [7] 姜可薰, 韩力. 云南省田坝弃水电站 SF105-32/8300 水轮发电机定子线棒换位方案的分析计算报告 [J]. 东方电机, 1995 (2): 23-30.

Analysis and Comparison of Four Transposition Methods in the Stator Bar of Hydrogenerator

GUO Ning¹, HAN Li¹, SHI Xiao-kun²

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Chongqing Hydraulic Turbine Co. Ltd., Chongqing 400054, China)

Abstract: To reduce the circulating currents, its losses and uneven temperature rise within the stator bar strands and enhance the reliability, prolong the life span of a hydrogenerator, it is important to study the transposition methods in the stator bar of the hydrogenerator. Four different transposition methods of a hydrogenerator stator bar are discussed and compared. Concise formula for leakage flux e. m. f. calculation of 360° extended transposition are proposed in detail. An optimal design program is used to calculate and compare the circulating current losses for different transposition methods. The results are helpful for the stator bar design of hydrogenerators.

Key words: hydrogenerator; transposition of stator bar; circulating current losses