

田坝弃水电站的水轮发电机定子线棒换位的分析计算

重庆大学 姜可薰 韩 力

摘要 本文重点研究了西安交通大学换位计算方法,对文献[8]中的每一个公式进行了详细地推导和论证,并对原文中的某些公式进行了修正和简化,编制了相关的计算机程序。对云南省田坝弃水电站水轮发电机定子线棒换位进行了优化设计,在 30° 换位环流损耗比 360° 降低了 $78\% \sim 88\%$,最佳不完全换位角位于 $308^\circ \sim 316^\circ$ 。

关键词 水轮发电机 定子线棒 换位

1 引言

为计算云南省田坝弃水电站 SF105—32/8300 水轮发电机的定子线棒换位,收集、整理了有关资料,对西安大学宋文谦编写的《大型交流电机定子线棒新型换位方案的探讨·大型水轮发电机定子线圈股线换位论文集》文中的公式,进行了详细的推导和论证,扩充了线棒左、右两端长度不等的漏感电势计算方法,并对原文中的某些公式进行了修正和简化。

2 基本假设^[8]

- (1)不考虑径向漏磁场的作用;
- (2)端部横向互感漏磁场 B ,沿线棒长度方向取平均值,沿线棒高度方向近似不变;
- (3)端部横向自感漏磁场 B ,沿线棒长度方向取平均值,沿线棒高度方向呈直线变化,且过线棒中心时反向;

(4)线棒各并联股线具有相同的等效阻抗 Z 。

3 计算思路

3.1 线棒环流损耗 P_c

比较各种换位方案优劣的标准是线棒环流损耗 P_c 的大小。损耗 P_c 越小,换位方案越优。

3.2 P_c 与 I_k, Z_k 的关系

线棒的环流损耗决定于每根股线的循环电流 I_k 和等效阻抗 Z_k 。

$$P_c = \sum_{k=1}^N I_k^2 Z_k \tag{1}$$

式中 N ——单根线棒的并联股线根数

K ——股线编号

当认为每根股线的等效阻抗 Z_k 相等时

$$P_c = Z \sum_{k=1}^N I_k^2 \tag{2}$$

式中 Z ——每根股线的等效阻抗

N ——单根线棒并联股线根数

3.3 I_K 、电势 ΔE_K 、 Z 的计算

由电路原理得知,当每根股线的等效阻抗相等时,有

$$I_K = \Delta E_K / Z \quad (3)$$

$$\text{式中 } \Delta E_K = E_K - E_{av} \quad (4)$$

E_K ——第 K 根股线总的漏磁感应电势, V

E_{av} ——线棒并联股线的平均漏磁感应电势, V

$$E_{av} = \sum_{k=1}^N E_K / N \quad (5)$$

知道漏感电势 E_K 由式(3)~式(5)可直接求出第 K 根股线的循环电势 ΔE_K 和循环电流 I_K , 这时不需要解联立方程, 但当每根并联股线的等效阻抗 Z_k 不等时, 则必须求解联立代数方程组才能得到每根股线的循环电流。^[1,3,9,10]

3.4 附加铜损与等效阻抗及电势的关系式

$$P_s = \sum_{k=1}^N (\Delta E_K)^2 / Z \quad (6)$$

现在的 key 问题是计算每根股线的漏感电势 E_K , 而 E_K 的大小与漏磁 B_m, B_f, B_s 有关, 同时又与股线的换位方式(即股线在空间排列位置)有关, 本文就这两个问题进行详细的研究。

4 漏磁计算

4.1 槽部横向漏磁 B_m

$$B_m = \sqrt{2} \mu_0 I / b_s \quad (7)$$

式中 I ——线棒电流, A

b_s ——定子槽宽, m

4.2 端部横向自感漏磁 B_s

$$B_s = \frac{\sqrt{2} \mu_0 \cdot AS_1 \cdot t_1 \cdot k^*}{4(b_s + \Delta)} \quad (8)$$

式中 AS_1 ——定子线负荷, A/m

t_1 ——定子齿距, (m)

k^* ——磁场校正系数, 新安江机组在接近额定负载时的实测磁场校正系数 $k^* = 0.4$

$\Delta = 1.2$ cm, 表面冷却时线棒端部的屏向距离

4.3 端部横向互感漏磁 B_f

至今为止尚未找到 B_f 的简易计算方法, 而 $B_f > B_s$, 因此 B_f 的大小对环流损耗 I 有明显影响, 但是一般来说 B_f/B_s 有一定范围, 参考其他机组的 B_f/B_s 值, 可大致估计田坝弃机组 SF105—32/8300 发电机 B_f 的大小。

新安江机组发电机真机测试数据见表 1。由表 1 中可知, 在发电机负荷运行时, $B_f/B_s = 2.411$ 。随着运行工况的变化, 当功率因数下降时, B_f/B_s 的比值相应减小。

新安江机组与田坝机组数据的比较见表 2。由表 2 的对比可见, 田坝机组和新安江机组的情况比较接近, 因此可以推断, 在额定工况下, 田坝机组的 B_f/B_s 在 2~2.5 范围内

表 1 新安江电站实测数据

	有功功率	无功功率 (MVar)	线电压 (V)	线电流 (A)	励磁电流 (A)	B_f (G)	B_s (G)	B_f/B_s
空载	0	0	13800	0	700	227	83	2.735
负载	74.04MW	47.58	14297	3547	1246	422	175	2.411
调相	-3.45NW	41.5	14200	1650	1040	274	143	1.916

表2 数据的比较

	新安江机组	田坝机组
发电机型号	TS854/156-40	SF105/32-8300
额定功率(MW)	75	105
额定电压(V)	13800	13800
额定电流(A)	3580	5020
线规(mm×mm)	2.44×5.99	2.8×7.5
股线根数	46	48
槽部长度(m)	1.56	1.626
端部长度(m)	1.123 ^[4]	1.306
线棒高度(m)	0.06396 ^[4]	0.0819

5 股线电势计算

本文对宋文谦编写的《大型交流电机定子线棒新型换位方案的探讨·大型水轮发电机定子线圈股线换位论文集》(以下简称论文集)中的每一个公式进行了详细的分析和论证,扩充了线棒左、右两端长度不等时的漏感电势计算方法,并对原文中的某些公式进行了修正,得出了比原文更为简便的计算公式,现列举如下。

设Y轴的原点在线棒的顶端(如图1、图2和图3),则第k根股线在线棒左端部的Y坐标为 $Y=nH$ 。其中,第k根股线在线棒端部的相对高度为

$$n = \frac{Y}{H} = \begin{cases} (m-k+0.5)/m & (\text{当 } 1 \leq k \leq m) \\ (k-m-0.5)/m & (\text{当 } m+1 \leq k \leq 2m) \end{cases} \quad (9)$$

式中 n——第k根股线在线棒左端部的相

对高度

H——不包括主绝缘的线棒高度,m

$m=N/2$ ——线棒高度股线层数(对双层股线而言)

第k根股线的漏感电势 E_k

$$E_k = E_m + E_v + E_f + E_e \quad (10)$$

式中 E_m ——由 B_m 在槽部换位段第k根股线中感应的漏磁电势,V

E_v ——由 B_m 在槽部空换位段第k根股线中感应的漏磁电势,V

E_f ——在槽部第k根股线中感应的漏磁电势,V

E_e ——端部第k根股线中感应的漏磁电势,V

(其中线棒槽部空换位长度 $L_v=0$ 时, $E_v=0$)

对于不完全换位的股线,有4种不同类型的空间结构,其 E_k 需分别对图2及图3按几种情况进行计算。

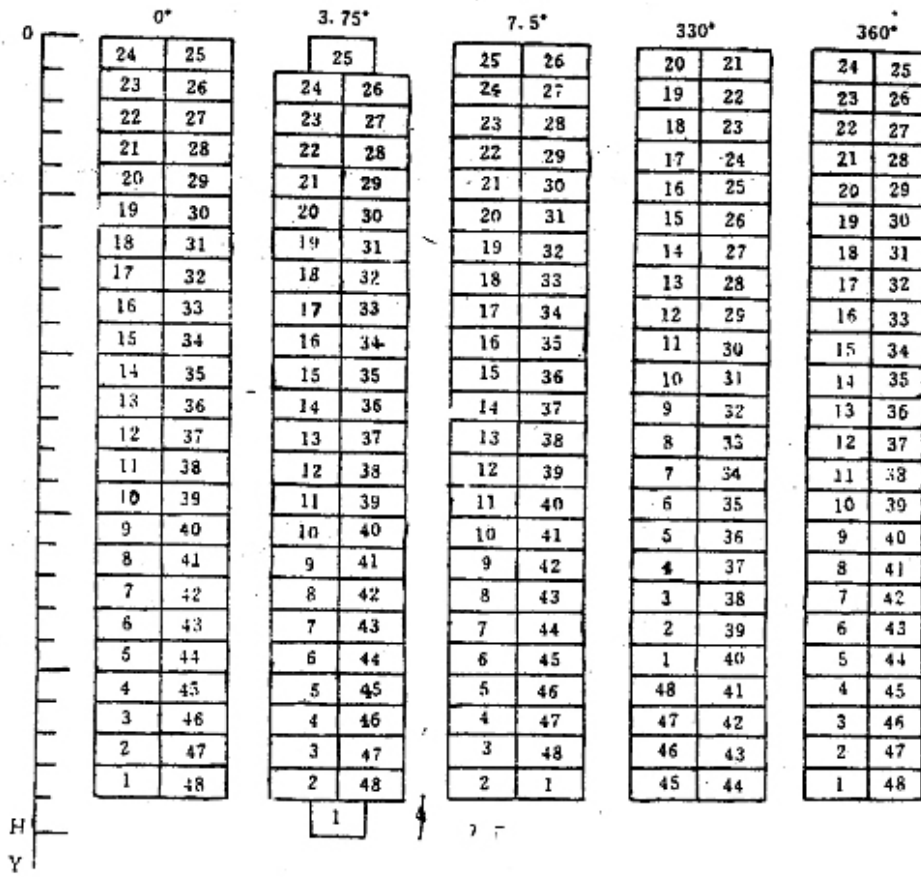


图1 线棒换位图

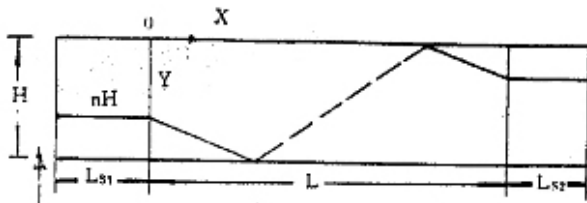


图2 股线换位图

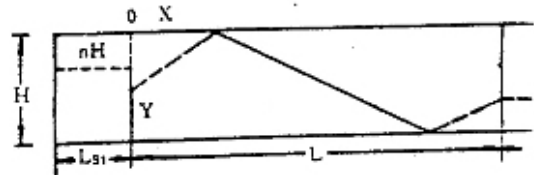


图3 股线换位图

5.1 $2\beta_1 \leq n \leq 1$

$$\begin{cases}
 E_m = C_m [5/6 - (2n - n^2/2)\beta_1 + (2-n)\beta_1^2 + 2\beta_1^3/3] \\
 E_v = C_v (1.5 - n - n^2/2) \\
 E_f = C_{f1}n + C_{f2}(n - 2\beta_1) \\
 E_s = C_{s1}(n - n^2) + C_{s2}[(n - 2\beta_1) - (n - 2\beta_1)^2]
 \end{cases} \quad (11)$$

式中 $C_m = g_m H \sqrt{(L_1 - L_v)^2 + 4H^2} (V)$

$C_v = g_m H L_v (V)$

$$C_n = g_f H L_n (V)$$

$$C_n = g_f H L_n (V)$$

$$C_n = g_r H L_n (V)$$

$$C_a = g_r H L_a (V)$$

$$g_r = \sqrt{2\pi f B_m} (V/m^2)$$

$$g_f = \sqrt{2\pi f B_f} (V/m^2)$$

$$g_a = \sqrt{2\pi f B_a} (V/m^2)$$

L ——线棒槽部实际换位长度, m

L_n, L_a ——分别为线棒左、右端长度(分别为立式发电机上、下端), m

$L_1 = L/\beta$, 360° 换位虚拟线棒长度, m

$\beta = \alpha/360^\circ$, $\beta_1 = 1 - \beta$ (α 为不完全换位角)

当线棒为 48 股, 采用 330° 换位时, $k = 1, \dots, 20$ 的股线属于这种情况。

5.2 $0 \leq n \leq 2\beta_1$

$$\begin{cases} E_u = C_u [5/6 + (2n + n^2/2)\beta_1 - (2+n)\beta_1 + 2\beta_1^2/3 - n^2] \\ E_v = C_v (1.5 - n - n^2/2) \\ E_f = C_{fn}n + C_{fn}(2\beta_1 - n) \\ E_a = C_{an}(n - n^2) + C_{an}[(2\beta_1 - n) - (2\beta_1 - n)^2] \end{cases} \quad (12)$$

图 2 中, 当 $2\beta_1 \leq n \leq 1$ 时, 股线有 2 个 S 弯。当 $0 \leq n \leq 2\beta_1$ 时, 股线只有一个 S 弯。当线棒为 48 股, 采用 330° 换位时, $k = 21, \dots, 24$ 的股线属于这种情况。

5.3 $0 \leq n \leq 2\beta - 1$

$$\begin{cases} E_u = C_u [5/6 - (2n - n^2)\beta_1 - (2-n)\beta_1 + 2\beta_1^2/3] \\ E_v = C_v (1.5 - n - n^2/2) \\ E_f = C_{fn}n + C_{fn}(n + 2\beta_1) \\ E_a = C_{an}(n - n^2) + C_{an}[(n + 2\beta_1) - (n + 2\beta_1)^2] \end{cases} \quad (13)$$

在图 3 中, 当 $0 \leq n \leq 2\beta - 1$ 时, 股线有 2 个弯。当线棒为 48 股, 采用 330° 换位时, $k = 25, \dots, 44$ 的股线属于这种情况。

5.4 $2\beta - 1 \leq n \leq 1$

$$\begin{cases} E_u = C_u [5/6 - (2n - n^2/2)\beta_1 + n\beta_1 + 2\beta_1^2/3 + (1-n)^2/2] \\ E_v = C_v (1.5 - n - n^2/2) \\ E_f = C_{fn}n + C_{fn}(2\beta - n) \\ E_a = C_{an}(n - n^2) + C_{an}[(2\beta - n) - (2\beta - n)^2] \end{cases} \quad (14)$$

在图 3 中, 当 $2\beta - 1 \leq n \leq 1$ 时, 股线只有一个弯。当线棒为 48 股, 采用 330° 换位时, $k = 45, \dots, 48$ 的股线属这种情况。

6 计算结果

根据本文推出的有关计算公式, 编制了相应的计算机程序, 并分别对新安江机组的发电机和田坝电站的发电机进行了核算和优化计算。

6.1 新安江 TS854/156—40 机的计算对比分析

根据文集集中的算例: $L = 1, L_n = L_a = L, L/2 = 0.36, H = 0.41, m = 11, B_m = 1, B_f = 0.38, B_a = 0.14$ 。这些数据为相对值, 实际值 $L = 1.56m, B_m = 0.1286T$, 计算结果见表 3。

表3 新安江机组的发电机计算结果比较

	最佳不完全换位角及对应的 P_2		最佳空换位长度及对应的 P_2	
	本文程序	$\alpha=313.7^\circ$	$P_2=0.34\%$ ⁽¹⁾	$L_s=0.1558$
西安交通大学	$\alpha=315^\circ$	$P_2=0.60\%$	$L_s=0.16$	$P_2=4.35\%$
清华大学	选用 $\alpha=313^\circ$			
浙江大学			选用 $L_s=0.1538$ (实长 24cm)	

注:(1) P_2 —环流损耗标么值(基值为 360° 换位时的环流损耗)

从表3中可以看出,本文的计算结果与西安交通大学的计算结果十分接近,与清华大学、浙江大学实际选用的最佳不完全换位角和最佳空换位长度更为接近,从而说明本文的基本假设、计算方法和程序编制是大致正确的。

同时还可以看出,不完全换位方案优于 360° 带空换位方案(损耗小,换位节距大)。因此不完全换位线棒的最高铜温有可能比空换位线棒略低一些^[2]。

6.2 田坝弃水 SF105—32/8300 发电机的计算分析

(1)已知数据^[1] $N=48, m=24.1,$

$L=1.628\text{m}, L_{s1}=0.690\text{m}, L_{s2}=0.616\text{m},$

$H=0.08\text{m}, AS_1=66880\text{A/m}, t_1=0.0751\text{m},$

$b_1=0.0261\text{m}, I=2510\text{A}, Z=0.1064\Omega.$

(2)计算结果, $B_m=0.1709\text{T},$

$B_s=0.0234\text{T},$ 取 $B_f=(0.5\sim 3.5)B_s,$ 分别进行比较计算(见表4)。

表4 田坝弃水机组的计算结果

B_f/B_s		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
360° 换位时的环流损耗	实际值(W)	3.509	11.831	25.701	45.119	70.085	100.60	136.662
	相对值(%)	100.	100	100	100	100	100	100
330° 换位时的环流损耗	实际值(W)	6.383	0.968	0.692	5.555	15.557	30.70	50.98
	相对值(%)	181.93	8.18	2.69	12.31	22.20	30.52	37.30
最佳不完全换位角度数		347°	336°	325°	316°	308°	301°	294°
最佳 α 对应的环流损耗	实际值(W)	0.4716	0.259	0.153	0.139	0.384	0.744	1.276
	相对值(%)	13.44	2.19	0.60	0.42	0.55	0.74	0.93
最佳空换位长度(m)		0.056	0.116	0.175	0.234	0.294	0.353	0.410
最佳 L_s 对应的环流损耗	实际值(W)	0.993	1.296	1.641	2.026	2.451	2.917	3.427
	相对值(%)	28.30.	10.96	6.38	4.49	3.50	2.90	2.51

取 $B_f/B_e=2.0B_e$ 及 $B_f/B_e=2.5B_e$ 分别作出 360° 换位、 330° 换位以及最佳不完全换位方

案的股线电流及损耗分布图,如图4~图9所示。

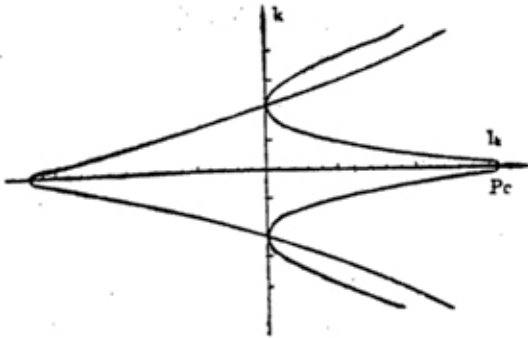


图 4

$B_f/B_e=2 \quad \alpha=360^\circ \quad L_w=0 \quad P_c=45.119$
 $P_{c,n}=100\% \quad P_{c,max}=P_c(24)=3.39$
 $P_{c,min}=P_c(13)=4.69$
 $I_{k,max}=I_k(1)=4.14 \quad I_{k,min}=I_k(24)=-5.6$

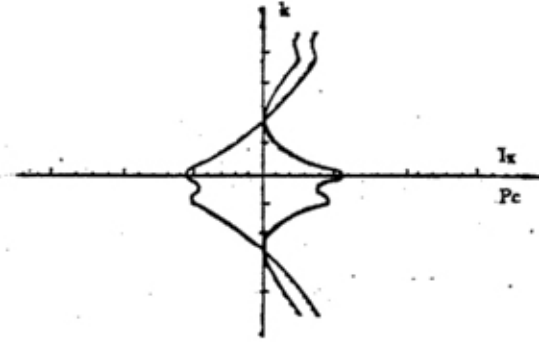


图 5

$B_f/B_e=2 \quad \alpha=330^\circ \quad L_w=0 \quad P_c=5.55$
 $P_{c,n}=12.3\% \quad P_{c,max}=P_c(25)=0.36$
 $P_{c,min}=P_c(12)=2.0$
 $I_{k,max}=I_k(1)=1.30 \quad I_{k,min}=I_k(25)=-1.94$

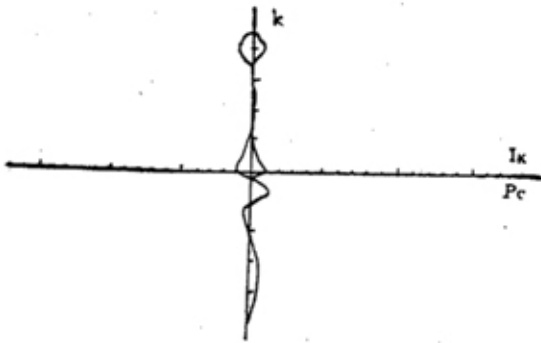


图 6

$B_f/B_e=2 \quad \alpha=316^\circ \quad L_w=0 \quad P_c=0.18 \quad P_{c,n}=4.186\%$
 $P_{c,max}=P_c(21)=2.22 \quad P_{c,min}=P_c(33)=9.81$
 $I_{k,max}=I_k(21)=0.45$
 $I_{k,min}=I_k(25)=-0.48$

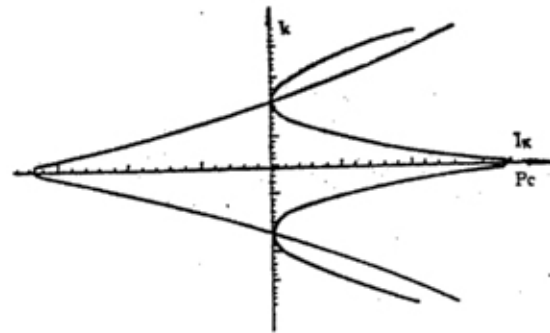


图 7

$B_f/B_e=2.5 \quad \alpha=360^\circ \quad L_w=0 \quad P_c=70.0 \quad P_{c,n}=100\%$
 $P_{c,max}=P_c(24)=5.8 \quad P_{c,min}=P_c(13)=2.61$
 $I_{k,max}=I_k(1)=5.37$
 $I_{k,min}=I_k(24)=-6.87$

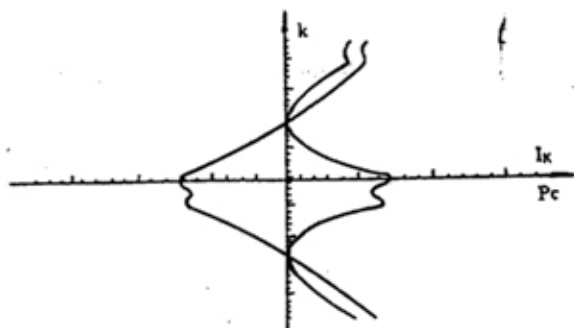


图 8

$$B_f/B_s=2.5 \quad \alpha=330^\circ \quad L_s=0 \quad P_c=15.56$$

$$P_{cn}=22.198\% \quad P_{cmax}=P_c(24)=0.87$$

$$P_{cmin}=P_c(34)=4.95$$

$$I_{smax}=I_s(18)=2.32 \quad I_{smin}=I_s(24)=2.87$$

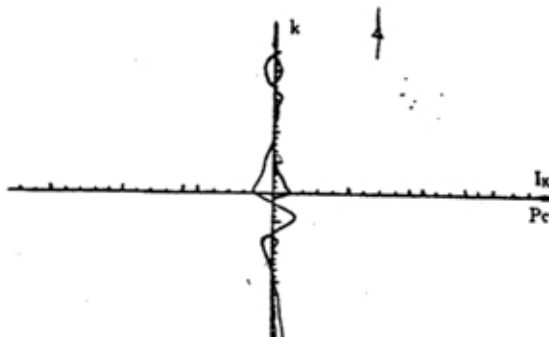


图 9

$$B_f/B_s=2.5 \quad \alpha=308^\circ \quad L_s=0 \quad P_c=0.384$$

$$P_{cn}=0.547\% \quad P_{cmax}=P_c(21)=5.85$$

$$P_{cmin}=P_c(12)=2.22$$

$$I_{smax}=I_s(21)=0.69 \quad I_{smin}=I_s(25)=-0.56$$

7 结论

(1) SF105—32/8300 发电机可以采用 330° 换位方案。与 360° 换位方案相比, 330° 换位的环流损耗可降低 $78\% \sim 88\%$ 。

(2) SF105—32/8300 发电机, 如果采用 $308^\circ \sim 316^\circ$ 的不完全换位方案, 估计环流损耗减小 99% 左右, 其效果优于 330° 换位方案。

(3) 本程序的全部操作采用菜单提示, 具有使用方便、输入量少、算法简单、寻优迅速、作图美观等特点。适用于大型交流电机定子线棒各种换位方式的计算和优化设计。

参考文献

- 1 许承干. 大型水轮发电机定子线棒中的环流、温升与换位方式. 大电机技术, 1985(2), 1~8
- 2 李隆年. 水轮发电机定子线棒股线温升不均匀问题的研究. 大电机技术, 1985(2), 21~27
- 3 李隆年. 水轮发电机定子线棒空换位及小于 360° 换位的对比分析. 大电机技术, 1986(1), 1~6

- 4 蒋同海. 大型交流电机定子 $0^\circ/540^\circ/0^\circ$ 线棒空换位的分析. 大电机技术, 1987(5), 7~11
- 5 余恪三. 水轮发电机定子 $0^\circ/360^\circ/0^\circ$ 换位线棒的股线电流温度不均的原因及改进措施. 大电机技术, 1989(2), 7~12
- 6 罗荣杰. 用分离变量法求解水轮发电机端部三维磁场. 大电机技术, 1989(3), 1~14
- 7 张日强. 大型交流电机定子线棒翻转交叉换位连接的分析. 大电机技术, 1991(5), 18~21
- 8 宋文谦. 大型交流电机定子线棒新型换位方案的探讨. 大型水轮发电机定子线棒股线换位论文集, 1989(10), 67~75
- 9 许善椿. 大型发电机定子线棒新型换位方案的探讨. 大型水轮发电机定子线棒股线换位论文集, 1991. 5
- 10 侯小全. 水轮发电机定子线棒新换位方式的分析及实验研究. 大型水轮发电机定子线棒股线换位论文集, 1991. 5
- 11 重庆水轮机厂. 云南省田坝弃水电站 105MW 水轮发电机组及其附属设备扩初设计审查会资料, 1993. 4
- 12 D. C. MacDonald. Losses in Roebel bars effect of slot portion on circulating currents, Proc. IEE, 117(1), JAN. 1970
- 13 D. C. MacDonald. Circulating current loss within Roebel-bar stator windings in hydro electric alternators, Proc. IEE, 118(5), MAY 1971