



水轮发电机定子线棒换位新方法研究

韩力¹, 石晓坤², 郭宁^{1,3}

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044;

2. 重庆水轮机厂有限责任公司, 重庆 400054;

3. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 昆明 650051)

[摘要] 针对大型水轮发电机定子铁心长度短、线棒换位方法缺乏灵活性、换位节距小等问题, 提出了定子线棒混合换位的思想与“不足360°+延长”换位、“不足360°+空段”换位、“360°延长+空段”换位等3种新方法, 并进行了相应的理论分析与计算, 旨在对大型水轮发电机定子线棒的设计与制造起到一定的参考作用。

[关键词] 水轮发电机; 定子线棒; 换位方法

[中图分类号] TM312 [文献标识码] A [文章编号] 1000-3983(2009)03-0001-04

New Methods for the Stator Bar Transpositions of Hydrogenerators

HAN Li¹, SHI Xiao-kun², GUO Ning^{1,3}

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Hydraulic Turbine Co. Ltd., Chongqing 400054, China; 3. Hydroelectrical

Investigation, Design and Research Institute, CHECC, Kunming 650051, China)

Abstract: The stator bar transpositions of large hydrogenerators are difficult due to the features of short bar length, few flexibility and small transposition pitch of the strands. A new idea of mixed transposition and 3 different new transposition methods, including deficient 360° extended transposition, deficient 360° void transposition and 360° void extended transposition, are proposed respectively in this paper. The interrelated theoretic analysis and calculation are carried out. The purpose of the research is to give some valuable hints for improving the design and manufacture of the stator bars of large hydrogenerators.

Key words: hydrogenerator; stator bar; transposition method

1 引言

为了减小循环电流及其附加损耗, 大型交流电机的定子绕组一般均由多根股线编织而成, 并按照一定的规律进行交叉换位, 形成条型线棒, 然后在两端通过并头套相连接。定子线棒换位技术最早可以追溯到1912年, 由BBC公司的工程师Roebel发明^[1], 因此也称为Roebel线棒。Roebel线棒采用0°/360°/0°换位方法(以下简称360°全换位), 即线棒中的并联股线在槽部进行一周的扭转换位, 在左、右端部不进行换位。但这种换位方法由于没有对端部漏感电势进行任何补偿, 因此仍然存在相当大的环流及其附加损耗, 导致各股线温差过高^[2,3], 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。

为了进一步减小股线环流及其附加损耗, 在Roebel线棒的基础上, 分别又出现了增加槽部换位角

度、在端部进行扭转换位、在槽部设置空换位段以及减小槽部换位角度等多种不同的改进方法。具体来说, 包括0°/540°/0°换位^[4]、90°/360°/90°换位、180°/360°/180°换位、180°/540°/-180°换位、0°/360°+空段/0°换位^[5-7](以下简称360°空换位)、0°/不足360°/0°换位^[8](以下简称不足360°换位)以及0°/360°延长/0°换位^[9](以下简称360°延长换位)等方法, 其中90°/360°/90°换位、180°/360°/180°换位、180°/540°/-180°换位等方法将对端部股线进行扭转换位, 仅适用于汽轮发电机。但与汽轮发电机相比, 由于水轮发电机轴向长度短, 考虑到制造工艺的因素, 定子线棒很难在端部进行扭转换位, 其换位方法的选取缺乏灵活性。目前, 水轮发电机的定子线棒主要是采用不足360°换位方法, 有时也采用360°空换位或者360°延长换位^[10]。

为了增加水轮发电机定子线棒换位方法选取的灵活性, 在兼顾减损效果与换位工艺的同时, 本文针对

水轮发电机的结构特点，提出了混合换位的思想与“不足 360°+ 延长”换位、“不足 360°+ 空段”换位、“360° 延长 + 空段”换位等 3 种新方法，并进行了相应的理论分析与计算，希望对大型水轮发电机定子线棒的设计与制造起到一定的参考作用。

2 水轮发电机现有换位方法的局限性

水轮发电机现有的 4 种换位方法如图 1(a)~(d)所示，其中 L_t 为定子铁心长度， L_{s1} 、 L_{s2} 分别为股线左、右端部经折算之后的直线长度， L_v 为空换位段长度， L_e 为线棒一端股线超出定子铁心部分的换位长度。

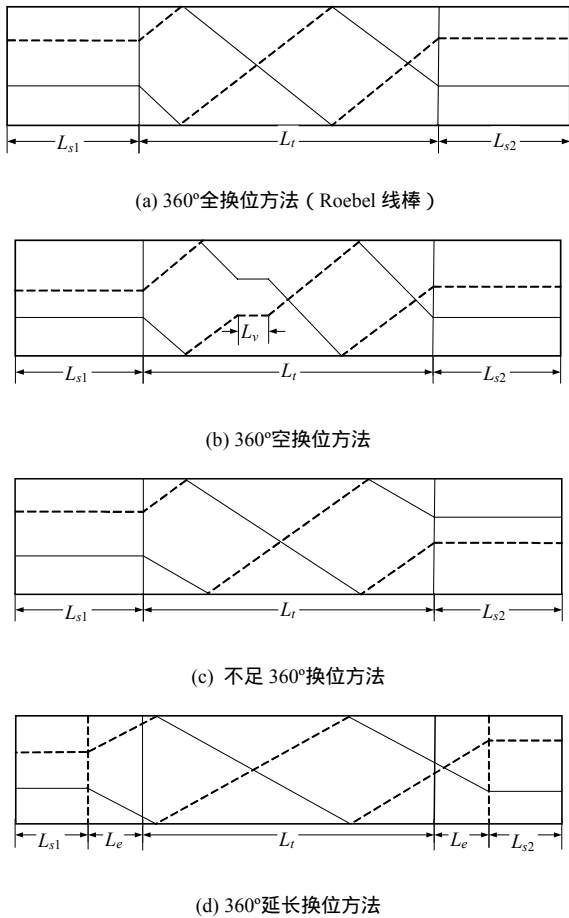


图 1 水轮发电机定子线棒的现有换位方法

与 360°全换位的 Roebel 线棒相比，360°空换位方法的最佳减损效果达 95%以上，不足 360°换位方法和 360°延长换位方法的最佳减损效果达 99%以上^[10]，其中 360°延长换位方法的减损效果最为明显。然而，以上水轮发电机现有的换位方法也存在一些局限性。比如 360°空换位方法的减损效果有限，且将使换位节距减小，对线棒制造工艺不利；不足 360°换位方法因受股线根数的制约，其实际的换位角度与理论计算得到的最佳换位角度相比，可能有较大的差别，从而使其

减损效果大打折扣；360°延长换位方法的最佳换位长度将受到线棒直线长度的限制，如果换位股线超过线棒的直线部分而进入渐开线部分，则在制造中绝缘容易受到损坏，从而造成股线间的短路。

3 水轮发电机定子线棒混合换位的思想

为此，本文认为，在选择水轮发电机定子线棒换位方法时，可以根据“优势互补、取长补短”的思路，在综合考虑不同换位方法优缺点的基础上，采用线棒股线“混合换位”的方法。比如，采用“不足 360°+ 延长”的混合换位方法，既可以增加换位节距，又可以减小延长换位长度，如图 2(a)所示；采用“不足 360°+ 空段”的混合换位方法，既可以保留不足 360°换位方法减损效果好以及空换位段长度选取灵活的优点，又不会造成换位节距的过分减小，如图 2(b)所示；采用“360°延长 + 空段”的混合换位方法，既可以使线棒的延长换位长度得到减小，同时也不会造成换位节距的过分减小，如图 2(c)所示。根据以上思想，下面针对 3 种不同的混合换位方法及其在减损和制造工艺方面的特点，进行具体研究。

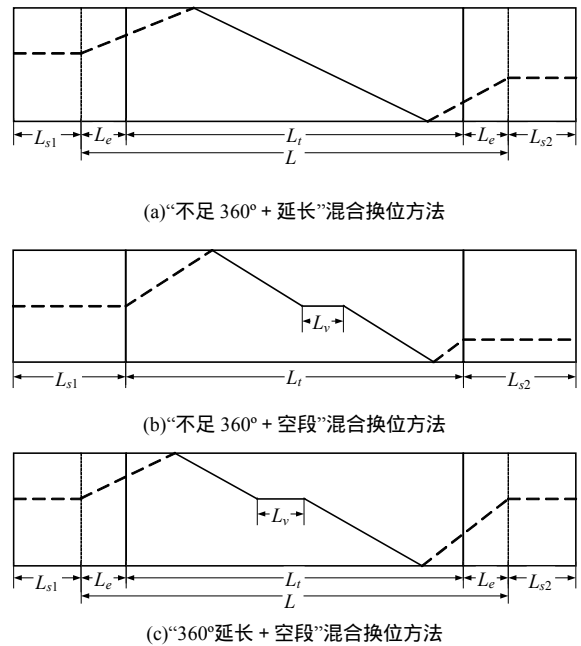


图 2 本文提出的水轮发电机定子线棒换位新方法

4 单一换位方法与混合换位方法的对比

换位角度与换位节距的计算公式如下：

$$\alpha = \frac{360^\circ}{N} (N - x) \tag{1}$$

$$t_H = \frac{L - L_v}{N} \tag{2}$$

式中： N 为股线根数； x 为少换位的股线根数； α 为股

线的实际换位角度； t_H 为换位节距。

在文献[10]的基础上，本文以龙马电站 95MW 水轮发电机的定子线棒设计为例，取 $B_f/B_e = 2.4$ ，以减损效果最佳作为优化目标，同时考虑到实际换位工艺，换位角度按式(1)取值，分别计算 3 种单一换位方法和 3 种混合换位方法的最佳换位参数，其结果如表 1 所示。表中， L 表示线棒换位长度， P_c^* 为定子线棒附加环流损耗的相对值，其基值为 360° 全换位时的附加环流损耗值。

分析表 1 的计算结果，可知：

(1) 采用“不足 360° + 延长”混合换位方法，其最佳减损效果比单一的 360° 空换位方法或不足 360° 换位

方法均要好；同时，该混合换位方法的换位节距明显增大，将给制造工艺带来方便。

(2) 采用“不足 360° + 空段”混合换位方法，其最佳减损效果好于“不足 360° + 延长”混合换位方法；同时，该混合换位方法的最佳空换位段长度很短，只有 64mm，其对应的换位节距比 360° 空换位方法增加了 5mm，比不足 360° 换位方法仅缩短了 0.4mm。

(3) 采用“ 360° 延长 + 空段”混合换位方法，其线棒的换位长度、减损效果和换位节距均与单一的 360° 延长换位方法大致相同，总体情况均优于前 2 种混合换位方法。

表 1 不同换位方法的计算结果与对比

换位方法	单一换位方法			混合换位方法		
	360° 空换位	不足 360° 换位	360° 延长换位	不足 360° + 延长	不足 360° + 空段	360° 延长 + 空段
最佳换位参数						
换位角 $\alpha/^\circ$	360	300	360	345	315	360
空换位段长度 L_v /mm	307	0	0	0	64	5
线棒换位长度 L /mm	1 626	1 626	1 951	1 882	1 626	1 947
损耗相对值 $P_c^*/\%$	3.65	2.63	0.31	1.84	0.75	0.33
换位节距 t_H /mm	27.5	33.9	40.6	39.2	32.5	40.5

5 三种混合换位方法的特点比较

为了进一步研究 3 种不同混合换位方法的特点，本文在更宽广的范围内对定子线棒损耗进行了分析与计算，结果如下。

5.1 “不足 360° + 延长”混合换位方法

分析图 3 和表 2 可得，对于“不足 360° + 延长”混合换位方法，在换位角度 α 一定的情况下，随着线棒换位长度 L 的增加， P_c^* 先减小后增大，每 1 个不同的换位角度都有 1 个对应的最小 P_c^* 。目前，该混合换位方法已在龙马电站水轮发电机的定子线棒设计中得到应用，其实际换位角度为 330° 、实际换位长度为 1716mm，对应的 P_c^* 为 13.1%；如果将线棒的换位长度增加到 1816mm，其对应的 P_c^* 将进一步降低到 6.72%。对于“不足 360° + 延长”混合换位方法，当换位角度从 360° 逐步减小时，其优点是可以减小线棒的最佳换位长度，其缺点是减损效果将变差、换位节距将缩短。当“不足 360° + 延长”混合换位方法的换位角度为 360° 时，其效果与单一的 360° 延长换位方法相同；当“不足 360° + 延长”混合换位方法的换位角度小于等于 315° 时，其效果与单一的不足 360° 延长换位方法相同。可见，如果线棒端部直线部分的长度十分有限，

采用“不足 360° + 延长”混合换位方法更合理；否则还是应该采用单一的 360° 延长换位方法。

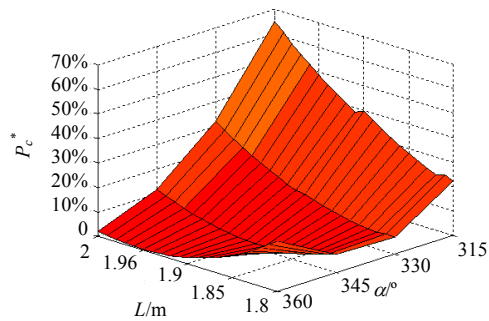


图 3 “不足 360° + 延长”混合换位损耗分布

表 2 “不足 360° + 延长”混合换位计算结果

换位角 $\alpha/^\circ$	最小 $P_c^*/\%$	线棒换位长 L /mm	换位节距 t_H /mm
360	0.31	1951	40.6
345	1.84	1882	39.2
330	6.72	1816	37.8
315	4.04	1626	33.9
300	2.63	1626	33.9
285	24.9	1626	33.9

5.2 “不足 360° + 空段”混合换位方法

分析图 4 和表 3 可得，对于“不足 360° + 空段”混合换位方法，在换位角度 α 一定的情况下，随着线棒

空换位段长度 L_v 的增加, P_c^* 先减小后增大, 每 1 个不同的换位角度都有 1 个对应的最小 P_c^* 。当换位角度大于等于 330° 时, 其效果接近于单一的 360° 空换位方法, 最小 P_c^* 较大, 同时需要设置较长的空换位段长度, 将减小换位节距, 不利于制造工艺; 当换位角度取 315° 时, 减损效果最好, 且空换位长度很短, 只有 64mm, 对制造工艺有利; 当换位角度小于等于 300° 时, 其效果与单一的不足 360° 换位方法相同, 设置空换位段将起不到更好的减损效果。由此进一步说明, 采用“不足 $360^\circ +$ 空段”混合换位方法十分灵活, 在实际工程中, 通过合理设置换位角度和空换位段长度, 可以在保持换位节距基本不变的情况下, 取得比单一 360° 空换位方法或不足 360° 换位方法更好的减损效果。

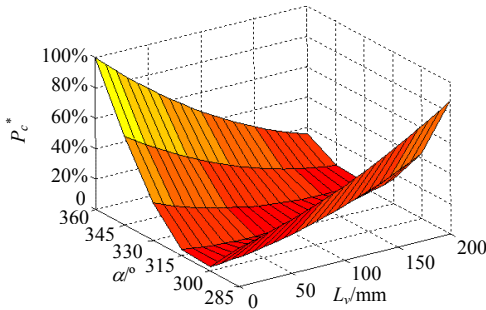


图 4 “不足 $360^\circ +$ 空段”混合换位损耗分布

表 3 “不足 $360^\circ +$ 空段”混合换位计算结果

换位角 α°	最小 $P_c^*/\%$	空换位长 L_v/mm	换位节距 t_H/mm
360	3.65	307	27.5
345	3.32	242	28.8
330	2.61	158	30.6
315	0.75	64	32.5
300	2.63	0	33.9
285	24.9	0	33.9

5.3 “ 360° 延长 + 空段”混合换位方法

分析图 5 和表 4 可得, 对于“ 360° 延长 + 空段”混合换位方法, 在空换位段长度 L_v 一定的情况下, 随着线棒换位长度 L 的增加, P_c^* 先减小后增大, 每 1 个不同的空换位段长度都有 1 个对应的最小 P_c^* 。此外, 当空换位段长度从 0 逐渐增大时, 其优点是线棒的最佳换位长度逐渐减小, 其缺点是减损效果将变差、换位节距将缩短。由此进一步说明, “ 360° 延长 + 空段”混合换位方法在平衡减损效果与制造工艺时, 也有 1 个合理选择的问题。

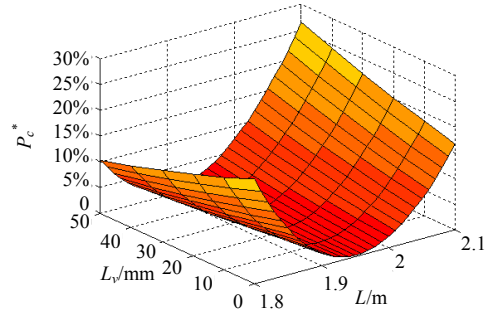


图 5 “ 360° 延长 + 空段”混合换位损耗分布

表 4 “ 360° 延长 + 空段”混合换位计算结果

空换位长 L_v/mm	最小 $P_c^*/\%$	线棒换位长 L/mm	换位节距 t_H/mm
0	0.31	1951	40.6
10	0.37	1943	40.3
20	0.47	1934	39.9
30	0.62	1925	39.5
40	0.81	1916	39.1
50	1.03	1907	38.7

6 结论

本文提出了 3 种新的混合换位方法, 并进行了相应的理论分析与计算, 为大型水轮发电机定子线棒的优化设计提供了更为丰富的选择方案。对于“不足 $360^\circ +$ 延长”混合换位方法和“不足 $360^\circ +$ 空段”混合换位方法, 其最佳减损效果比单一的 360° 空换位方法或不足 360° 换位方法均要好, 且“不足 $360^\circ +$ 延长”换位可有效增加换位节距, 改善换位工艺; 对于“ 360° 延长 + 空段”混合换位方法, 其总体效果与单一的 360° 延长换位方法大致相同, 其最佳空换位段长度非常短, 对换位节距的影响不大, 同时可以通过合理配置线棒的换位长度与空段长度, 更加灵活地解决工程实际问题。

[参考文献]

[1] Roebel L. Leiter für Electricische Maschinen, Welcher aus Zwei Oder Mehr Gruppen von Teilleigem Besteht[P]. German Patent 277 012, Mar. 19, 1912.

[2] 章柏寿. 新安江水电厂发电机定子线棒股线换位方式的研究[J]. 水力发电, 1989, (11): 71-74.

[3] 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.

[4] Ringland W L, Rosenberg. A New Stator Coil Transposition for Large Machines[J]. AIEE Trans., 1959: 743-747.

(下转第 22 页)

表 1 小波神经网络部分样本(1 根断条)

样本(1 根断条)	$(1-2s)f$	50Hz	$(1+2s)f$	故障程度	
训练样本	1	0.58256	0.15936	0.77825	0.68
	2	0.47511	0.14027	0.69915	0.58
	3	0.55231	0.14763	0.70835	0.63
	4	0.42123	0.13658	0.58441	0.45
	5	0.43587	0.15024	0.61255	0.51
测试样本	1	0.58223	0.15941	0.77627	0.6778
	2	0.47499	0.14201	0.70084	0.5821
	3	0.55345	0.14802	0.71063	0.6289
	4	0.43012	0.13719	0.59037	0.4543
	5	0.44004	0.15411	0.62014	0.5124

表 2 小波神经网络部分样本(2 根断条)

样本(2 根断条)	$(1-2s)f$	50Hz	$(1+2s)f$	故障程度	
训练样本	1	0.69548	0.22357	0.85390	0.75
	2	0.70140	0.25347	0.89125	0.79
	3	0.69012	0.21589	0.84221	0.74
	4	0.70121	0.23416	0.86124	0.76
	5	0.68321	0.20351	0.82564	0.71
测试样本	1	0.69536	0.23014	0.85412	0.7482
	2	0.71149	0.25451	0.89250	0.7921
	3	0.70041	0.22014	0.84332	0.7394
	4	0.69954	0.23825	0.86213	0.7587
	5	0.68415	0.21430	0.82697	0.7122

6 结语

通过遗传算法的优化改进传统小波神经网络，缩小网络初始搜索空间，解决了传统网络易于陷入局部最小的缺点。电机诊断实验证明，经过改进的小波神经网络，训练时间较短，提高了诊断识别的精确度，

(上接第 4 页)

[5] Bernard J. Bennington, W. C. Brenner. Transpositions in Turbogenerator Coil Sides Short Circuited at Each End[J]. IEEE Trans. on PAS, 1970, 89(8): 1915-1921.

[6] 蒋同海, 宋文谦. 大型交流电机定子 0°/360°/0°线棒空换位的分析[J]. 电工技术学报, 1989, (4): 23-29.

[7] 蒋同海, 宋文谦. 大型交流电机定子 0°/540°/0°线棒空换位的分析[J]. 大电机技术, 1987, (5): 7-11.

[8] 李隆年, 姚若萍, 王健生. 水轮发电机定子线棒空换位及小于 360 度换位的对比分析[J]. 大电机技术, 1986, (1): 1-6.

同时避免了遗传算法局部搜索能力较差的缺陷。应用此方法对电动机转子断条故障进行分析，证实了该方法的正确性和有效性。

[参考文献]

[1] 梁霖. 基于电流法的鼠笼异步电机故障特征提取及自动诊断[D].西安:西安交通大学, 2001.

[2] 胡匡枯, 李淑宇, 苏万芳. 小波神经网络及其应用[J]. 中国体视学与图像分析, 2001, 6(4):239-245.

[3] 赵学智, 邹春华, 等. 小波神经网络的参数初始化研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, 31(2):77-84.

[4] Zhang J, Wavelet neural network for function learning[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1995, 43(6): 1485-1497.

[5] GA ICEABU M, ROSU E, TATARU A M. Neuro-optimal controller for three-phase induction motor based on Leven-berg-Marquardt training algorithm [EB/OL]. [2006-02-15].

[6] 赵月明, 陈在平. 基于遗传 - 神经网络的电机故障诊断[J]. 天津理工大学学报, 2006, 22(5): 41-43.

[收稿日期] 2008-06-02

[作者简介]



刘亚军 (1983-), 在读硕士, 研究方向为电气系统故障诊断。

[9] 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.

[10] 郭宁, 韩力, 石小坤. 水轮发电机定子线棒四种不同换位方法的分析与比较[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(2): 42-45.

[收稿日期] 2008-05-07

[作者简介]



韩力(1963-), 1986 年毕业于重庆大学电机专业, 博士, 教授, 方向为电机优化设计与电机电磁场。