

苏联电机技术

(水轮发电机分册)

东方电机厂

四川东方大电机研究所

PDG

前 言

苏联“电力”电机制造联合公司(ПЭО)的代表团曾于1988年2月访问哈尔滨电机厂及哈尔滨大电机研究所。访问期间,双方交换了科技出版物,我方赠给苏方历年出版的《大电机技术》,苏方赠给我方1960~1989年出版的第20~37期《电力文集》。

“电力”电机制造联合公司是苏联最著名的列宁格勒“电力”厂与科研院所、运行部门和高等院校于60年代实现横向联合的实体,几十年来,它为发展苏联电机工业并使其达到世界先进水平做出了重大贡献。

《电力文集》属于厂、公司内部的不定期出版物,不对外发行。在过去的30年期间,我国没有这种刊物的馆藏,这次苏联赠送的《电力文集》是国内唯一的版本。它的特点是文字简练,图文并茂,内容具体,实用性强。它全面而又真实地反映了苏联电机工业在科研、设计、制造、运行、试验等各个领域的经验,对我们很有参考价值。

现在,哈尔滨大电机研究所与四川德阳东方电机厂已将这些《电力文集》选译出版,书名是《苏联电机技术》,分为5个分册,即:
①水轮发电机;②汽轮发电机;③交直流电机;④电机一般问题;⑤新工艺新材料。其中水轮发电机和电机一般问题2分册由东方电机厂负责翻译、出版及发行,其余3个分册由哈尔滨大电机研究所负责翻译、出版及发行。

《水轮发电机》分册在出版过程中，曾得到熊家驹、傅自清、陈锡芳等各位专家的帮助，特在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正，不胜感激。

目 次

“电力”公司的水轮发电机制造	(1)
极限容量水轮发电机的电磁问题	А.А.Дукштау等 (2)
论每极每相分数槽波绕组的设计	В.В.Домбровский等 (9)
条式叠绕组接线图的改进	В.Л.Скорятин等 (18)
水轮发电机新型冷却系统的研究方法	Э.И.Гуревич (20)
强迫冷却凸极同步电机转子绕组的设计问题	В.В.Домбровский (27)
试验确定电话谐波因数	В.М.Набока (35)
萨彦舒申斯克电站水轮发电机的研制经验	А.Б.Авроров等 (37)
萨彦舒申斯克电站水轮发电机无合缝定子铁芯试验	Б.М.Гиндин等 (40)
萨尔托格兰德电站水轮发电机的保证试验	А.А.Дукштау (42)
卡彼瓦拉(巴西)电站水轮发电机的安装特点	А.Ф.Новиков (45)
水轮发电机的不对称运行	Г.А.Бесчастнов等 (49)
水轮发电机的异步运行状态	Т.И.Пинская (56)
变极同步电机	А.А.Дукштау等 (59)
灯泡式水轮发电机的制造问题	А.Н.Лурье等 (67)
萨拉托夫电站灯泡式水轮发电机	Б.М.Гиндин等 (72)
加拿大詹佩格电站水轮发电机	А.А.Дукштау等 (78)
加拿大詹佩格电站灯泡式水轮发电机的安装与运行	Ю.А.Дегусаров等 (81)

“电力”工厂水轮发电机推力轴承的计算、结构设计、研究与运行问题.....	Ф.М.Детинко等 (86)
水轮发电机推力轴承稳定工况的特性计算.....	Ф.М.Детинко等 (97)
推力轴承油膜中的温度分布.....	Ф.М.Детинко等 (103)
水轮发电机定子.....	В.И.Брызгалов等 (107)
水轮发电机定子铁芯的装压.....	С.А.Прутковский等 (113)
铁芯冲片叠片方式和相对滑动对铁芯抗弯刚度的影响.....	В.И.Иогансен (115)
水轮发电机定子绕组固定系统在定子槽部模型上的试验.....	Б.Д.Ваксер等 (124)
热固性绝缘线棒的现代制造方法.....	Б.А.Викторжак等 (132)
电机绝缘中局部放电强度的测量.....	Б.Д.Ваксер等 (137)
水轮发电机制造用的电工钢.....	А.В.Борсенко等 (141)
水轮发电机转子磁轭用的高强度钢板.....	В.С.Дьяконова等 (143)
无磁性合金在水轮发电机结构中的应用.....	Г.И.Арковенко等 (147)

“电力”公司的水轮发电机制造

水轮发电机的生产在“电力”公司中占有一主导地位。从二十年代中期由于实现全俄电气化计划而开始生产以来，水轮发电机的生产得到了不断的发展和加强。其发展的基础是本国水力发电的大宗订货持续不断，订购的水轮发电机的单机容量增长及对其型式、参数和运行条件的要求不断提高。结果，水轮发电机制造形成了大规模生产，满足了国家对这些电机的大部分需求。在其基础上，在其他大型电机制造企业也发展了同类的生产，如在诺沃西比尔斯克、斯维尔德洛夫斯克、哈尔科夫。结果，产生了本国的水轮发电机制造风格，在世界上占据了一个主要位置，并以自己的生产和技术成就赢得了国际声誉。

国内水电站总容量的近三分之二是由公司的水轮发电机提供的。“电力”公司参加了本国动力发展中各阶段所有水电站的建设，从沃尔霍夫、德聂泊、雷宾斯克电站到伏尔加、布拉茨克、克拉斯诺雅尔斯克和萨彦舒申斯克电站；这些电站的发电机在许多技术数据方面，其中包括额定容量，超过了当时世界水轮发电机制造的水平。

作为水轮发电机方面的主导企业，“电力”公司以其理论研究和实际活动，在改进结构和生产工艺的主要方面不断地开辟了新的途径。“电力”公司研制了立式水轮发电机基本结构布置的改型，如采用无轴转子和推力轴承支座在水轮机顶盖上的伞式结构和转子上部有一个导轴承的悬式结构；负荷能力达3500t的双排瓦推力轴承；定子铁芯的静

态液压叠装；转子支架、定子绕组、磁极端部区等的独创结构。

“电力”公司在水轮发电机制造实践中，首次实现了定、转子绕组和磁极铁芯的直接水冷系统，以及磁极线圈上有横向风沟的励磁绕组强迫空冷系统。

“电力”公司完成的一系列重要的理论计算和试验研究，促进了电机制造中电磁、热、强度和振动计算方法的发展。建立的工程技术和科研基地，不仅保证了所需的设计、工艺和标准文件的编制，而且也为企业制定了上述文件，同时基地还在改进水轮发电机结构最有前景的方面进行了探索性的工作。

公司总共制造了容量40000MW左右、80种不同型号的380台水轮发电机，其中向14个国家的23座外国电站出口了容量9600MW的90台水轮发电机，而且约一半是最近10年提供的。

“电力”公司立式水轮发电机品种的特点是：基本技术数据的范围宽广（容量由20到640MW，转速由50到500r/min，电压由3.15至15.75kV，频率50和60Hz），结构布置型式各不相同，主要部件的结构和所用的材料多种多样。

公司还制造了许多全水冷卧式灯泡型水轮发电机。总计制造了20台这种型式的水轮发电机，总容量520MW，最大单机容量45MW。

现代的水轮发电机是一个复杂的构筑物，它本身包括各种各样的成套辅助设备、仪表、装置、励磁和调节系统，以及冷却、

极限容量水轮发电机的电磁问题

А.А.Дукштау等

随着大型河流水力资源的开发及正在建设和设计的水电站的数目增多,关于水轮发电机极限单机容量的问题变得极为迫切。

发电机结构的改进和新的高利用系数材料的应用,不断地扩大了发电机可能的容量极限,而且事实上总是超过了水力发电工程发展的实际需要。随着有效部分,首先是定子和转子绕组直接水冷系统的研制和应用,就有可能显著地缩小发电机的尺寸,同时使传统概念中的极限容量问题失去了其本身的敏锐性。

由于大型直接水冷发电机的制造和运行经验不足,其运行条件比空冷发电机的复杂,且必须采用具有相应设备的新型辅助系

统、新型保护装置及自动监控和调节设备,所以对采用新型直接水冷发电机(虽然它具有较高的效率和较轻的重量)的合理性应根据每一种具体情况单独确定。

因此,间接空冷发电机的极限容量问题具有公认的重要性。该容量取决于电机有效容积的最大利用系数和定子铁芯最大尺寸。

利用系数本身取决于定子电流线负荷,其上限受定子绕组发热的限制,其次还取决于发电机的气隙磁感应,它在很大程度上与定子铁芯电工钢片的特性有关。在对定子绕组采用热固性绝缘及在大型发电机上采用现代取向电工钢片时,可以取利用系数 $C = 8.0 \text{ kVA/m}^3 \cdot \text{r/min}$ 。今后,通过改进热固

供油、热监控、制动、灭火、信号、保护和自动控制系统。

“电力”公司的水轮发电机,在技术经济指标、可靠性、易维修性和寿命方面均处在国外优良产品的水平,或超过了国外产品;所有的发电机均按高的质量等级进行鉴定。

水轮发电机制造的进一步发展,在很大程度上与继续开发西伯利亚、中亚和远东最丰富的水电资源密切相关。当前面临的任

务,是为这些地区正在建设和设计的包古昌、布列伊、罗贡、奥西诺夫和其他电站制造300~600MW成批的水轮发电机。今后,图鲁汉等电站需要单机容量达1200~1500MW更大型的发电机。同时,会产生大量复杂的技术和生产问题,涉及到必须过渡到更高的额定电压,研究转子磁轭用的强度更高的厚钢板、更加完善的绝缘系统、一系列部件的新结构。其中需要制造总负荷和单位负荷更大的推力轴承、直径大于20m的定子铁芯和机座、相应尺寸的机架、部件的连接和固定结构,还需要重新装备主要的和辅助的生产部门及其他许多方面。解决这些课题也是公司在水轮发电机制造方面近期的主要工作内容。

艾力译自苏刊《电力文集》,1982,

№34, 3—4

熊家驹校

性绝缘的工艺和性能，而且预计电工钢片的质量将会有所改善，应当认为最大利用系数可提高到9.0~10.0kVA/m³·r/min。

转子最大直径（即定子最大内径）取决于转子磁轭的强度条件，在飞逸下磁轭上的拉应力可以按下式计算：

$$\sigma = \left[0.0612 \left(1 - \frac{h_m}{D_i} \right) \frac{h_m}{h_0} + 0.08 \left(1 - \frac{2h_m}{D_i} - \frac{h_0}{D_i} \right)^2 \right] k_0 v_p^2, \quad (1)$$

式中 h_m ——叠片磁极的极身高度，m；
 h_0 ——转子磁轭宽度，m；
 D_i ——定子内径，m；
 k_0 ——转子磁轭的削弱系数；
 v_p ——飞逸时转子周速，m/s。

目前，对于转子叠片磁轭，采用屈服极限 $\sigma = 500\text{MPa}$ 的钢板，这种钢板可以显著提高许用应力的水平及在巨型发电机上取 $\sigma = 400\text{MPa}$ 。

随着压力机的加工能力和尺寸增大，转子磁轭的宽度也可能增大。显然，转子磁轭

合理的最大宽度约为1m，这样，在极限容量发电机上将最大宽度从1.0m增大到1.1m，则转子直径将平均增大1%。

因此，设 $\sigma = 400\text{MPa}$ ， $h_0 = 1.0\text{m}$ ， $k_0 = 1.6$ ， $h_m = 0.32\text{m}$ ，即可利用（1）式计算在给定的直径和已知的飞逸系数下允许的最大转子转速（图1）。

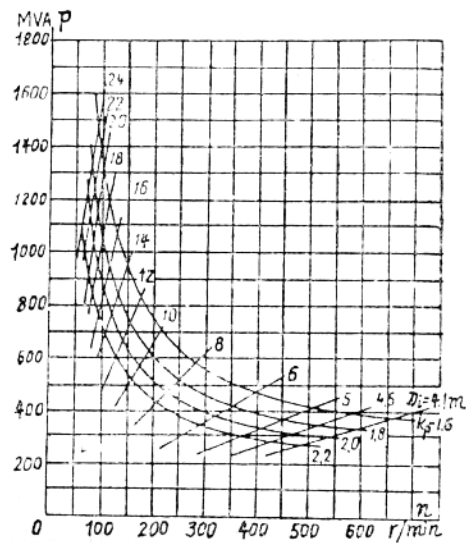


图2 空冷水轮发电机的极限容量

根据运输条件，定子铁芯最大长度为3.6m。此外，经验和专门研究表明，为了保证沿铁芯长度所必需的冷却均匀性，应满足以下条件：

$$l_i / \tau \leq 4.5$$

利用图1的关系曲线，取 $C = 8.0\text{kVA}/\text{m}^3 \cdot \text{r}/\text{min}$ ， $l_i = 3.6\text{m}$ （但是 $l_i / \tau \leq 4.5$ ），将得出间接空冷发电机的极限容量与转速和飞逸系数的函数关系（图2）。制造不采用直接水冷绕组的巨型水轮发电机在理论上是可能的，但因十分笨重，不仅制造，而且运输、安装和运行都是极其困难的，安装这样的发电机将要增加附加的建设费用。最后，这种发电机的效率显著地低于全水冷发电机。

考虑到以上所述和电机制造的一般趋

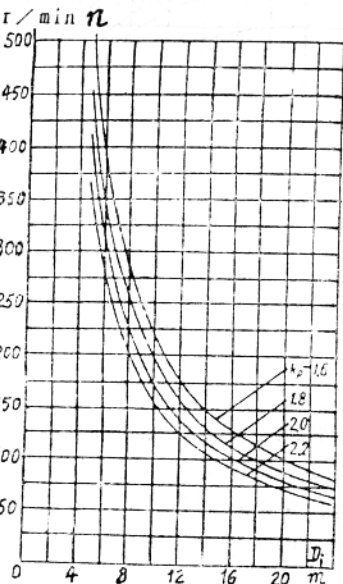


图1 水轮发电机最大转速与定子内径和飞逸系数的关系

势，可以说在制造超大型水轮发电机时，将利用各种技术措施和方法（包括水冷），以避免采用水轮发电机可能的极限尺寸。

在大型电机制造中，尤其是水轮发电机的制造中，最迫切的问题之一就是有效区域的局部发热问题。随着水轮发电机单机容量的增长，比电磁负荷亦随之提高，漏磁场密度增大，在电机各个结构部件中引起局部附加损耗和发热。

采用现代的高效冷却系统，包括直接水冷系统，可以使高利用率水轮发电机定子绕组、铁芯和转子的平均温升达到适当的数值，但是，经验证明，采用这些系统不能解决消除局部发热的问题，局部发热可能达到危险的数值，从而导致电机相应结构部件的工作寿命及电机的运行可靠性和耐久性降低。

在这方面最薄弱的是水轮发电机定子铁芯的边端区域，对于容量接近250MW、具有空冷时容许的最大电磁负荷的传统结构水轮发电机，该区域的局部发热已接近极限值。

而且，水轮发电机往往远离用电地区，通过长距离电力线路输电，其运行处于周期性的无功功率消耗状态（欠励状态），这时端部发热尤为严重。因此，实际上必须大大限制水轮发电机允许的无功功率。由于靠水电站补偿输电线路过剩无功功率的可能性极小，因而需要安装附加的补偿装置，如同步调相机。

因此，一方面要求提高水轮发电机单机容量和利用率，另一方面需要扩大水轮发电机欠励下长期允许运行状态的范围，这就提出了一个任务，即寻求降低定子铁芯边端区域发热的技术措施。

对一系列在水电站运行的水轮发电机边端区域三维电磁场和热场的研究表明，边端铁心（有时还包括第二段和第三段铁芯）的过热是由轴向磁场分量引起的。曾采用一维和三维磁感应测量元件对磁场密度进行了测

量，元件直接设置在定子绕组端部区内强磁介质边界上（压指、齿压板、边段铁芯齿部表面、定子通风沟内）。而对温度用热电偶埋置在定子铁芯段的整个表面和铁芯内部，以及压指和齿压板上进行了测量。从试验结果可以得出确定允许的无功功率的经验公式（图3）：

$$Q = (0.75 - 0.04 \varepsilon^{2.2} P) \frac{700}{A} \quad (2)$$

式中：Q——超前无功功率，用额定视在功率的百分数表示；

ε ——自然对数的底；

P——额定有功功率，用额定视在功率的百分数表示；

A——额定定子电流线负荷，A/cm。

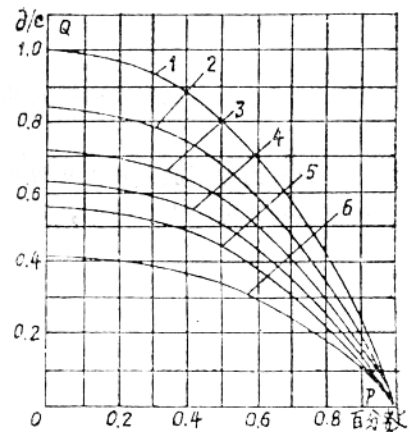


图3 按定子端部发热条件确定的欠励下允许的无功功率与有功功率的关系

1—A=500 A/cm, 2—A=600 A/cm,
3—A=700 A/cm, 4—A=800 A/cm,
5—A=900 A/cm, 6—A=1000 A/cm.

在安装地点对水轮发电机进行的真机试验的最重要的结论指出，定子端部发热与汽轮发电机的区别在很大程度上取决于转子磁场向端部的排挤作用。这时，在被研究的水轮发电机结构中采取了人们熟悉的、可减小边缘效应及其对发热的影响程度的下述措施，即将边端铁芯作成阶梯形，压指用非磁

性钢制造，边端铁芯齿部开沟（在齿宽大于45mm时），以及加强边端铁芯的冷却。

上面列举的技术措施在水轮发电机制造中已形成规范，其最终达到的目的是尽可能削弱定子铁芯轴向磁通的影响。在一定阶段，当线负荷进一步提高（ $A > 900 \text{ A/cm}$ ）时，需要寻求新的附加措施，以降低定子铁芯边端区域的损耗和发热。

为了确定端部区域的最佳几何形状，已研制出了特殊的凸极同步电机，它的定子可以相对转子轴向移动。这样就能够改变磁极铁芯和定子铁芯的相对位置，从而研究端部区域形状不同时电磁场的分布。最后得出了一个重要的实用建议：如果定子铁芯的端部强磁边界超出极靴边界的长度接近电气间隙长度的三倍，则可大大地降低转子端部磁场密度。但是在传统结构下实现这个建议实际上是不可能的，因为磁极压板轴向有足够的长度，而且受磁极铁芯允许磁通密度的限制。这个矛盾可采用具有组合式压板的磁极结构来解决，磁极压板的上部采用非磁性材料，下部采用磁性材料（图4）。

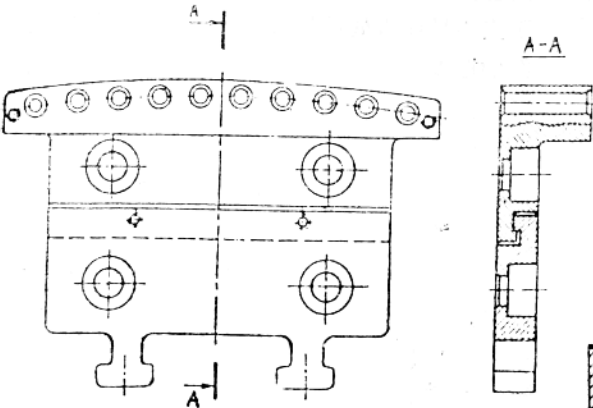


图4 组合式磁极压板

采用组合式磁极压板同时解决了两个问题：第一，在极靴区域形成了高磁阻，从而显著地减小了磁极边缘效应；第二，保证了磁极铁芯根部最大磁通区的最大截面积，从

而减小了电机的励磁电流。压板上部材料的选择对于结构的实现具有很大意义。这种材料应是非磁性的，具有足够的机械强度、塑性、高电阻，以及优越的工艺性能。钛基金在在很大程度上能满足这些要求。

头两个试验用组合式压板安装在捷依斯克（Зейской）水电站215MW水轮发电机上（2号机）。在转子静止及励磁电流约等于空载励磁电流的一半的情况下，得出的磁极压板（磁性的和组合式的）表面磁感应的分布特性如图5所示。在具有非磁性极靴的压板上测得的磁感应平均值比全磁性压板上测得的值低54.5%（图5）。更详细的电磁的和热的研究是在捷依斯克电站5号水轮发电

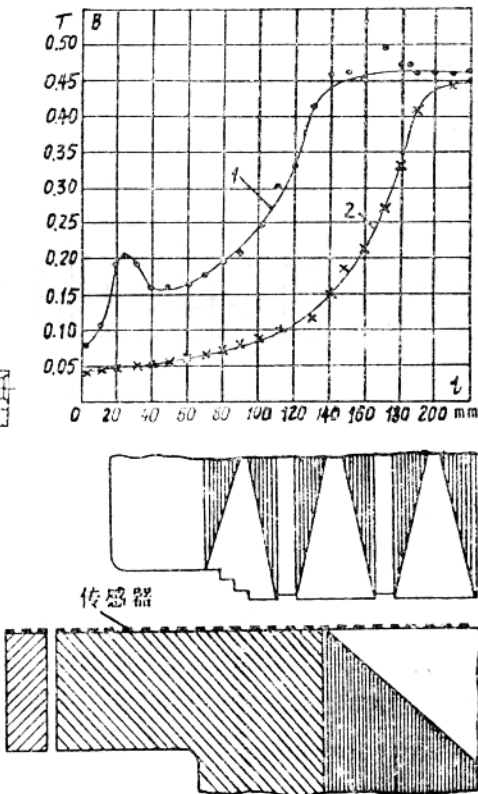


图5 215MW水轮发电机转子磁极压板表面磁感应的分布

1—磁性压板； 2—组合式压板。

机上进行的,该机全部44个磁极一端装有钛合金极靴的组合式压板,另一端为普通磁性压板。已有的数据表明新结构具有显著的效果,它的应用基本上解决了端部区域的发热问题。

试验证明,在具有大的槽电流和齿较宽的水轮发电机中,在有径向通风沟时,还必须考虑所有定子铁芯段边界上的边缘效应。图6所示为克拉斯诺雅尔斯克电站500MW水轮发电机定子铁芯段端面上磁感应轴向分量的分布。为了降低由于轴向磁场分量在定子扇形片平面引起的涡流附加损耗和相应的局

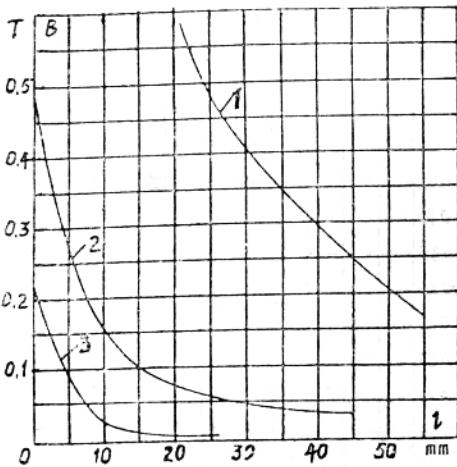


图6 克拉斯诺雅尔斯克电站水轮发电机在空载额定电压下磁感应轴向分量的分布(从定子内径指向铁芯)

1—第一段铁芯端面上; 2—第三段铁芯段沿第一通风沟侧面上; 3—中部铁芯段沿通风沟侧面上。

部发热,必须在铁芯齿部开槽,以适应轴向磁场沿叠片段深度和厚度的实际渗透。萨彦舒申斯克电站的水轮发电机定子铁芯就是在电机结构中直接考虑了上述试验数据的一个实例(图7)。

定子绕组局部发热的实际水平,对于保证水轮发电机运行的可靠性也具有更大的意义。应用直接水冷可以大大地降低绕组运行

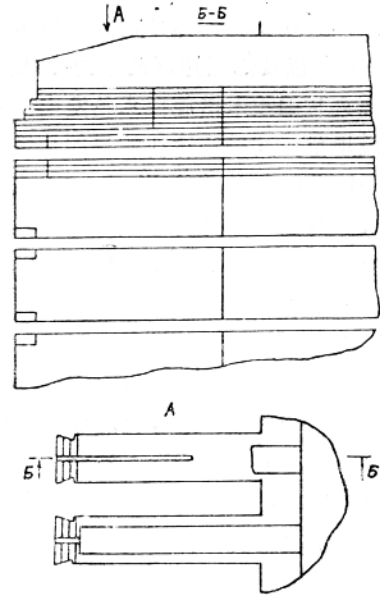


图7 齿部开槽的定子铁芯结构

温度的平均值,但是由于电流密度和磁场强度提高,这个问题远未得到解决。

在通常结构的水冷定子绕组线棒中,空心导体由蒸馏水循环冷却,并与实心导体组交替排列,实心导体的温升取决于它们相对于空心导体所处的位置、各个股线间绝缘间隙的厚度和热传导率,以及它们本身的比损耗密度。

一般情况下,在一排上两根空心导体之间分布 n_c 根实心导体,同时每根导体具有本身的绝缘,最大温升将出现在同一排上距空心导体最远的实心导体上,因为这个导体距离冷却区域的绝缘间隙的数量最多;如果 n_c 为偶数,则为 $n_c/2$,如果 n_c 为奇数,则为 $(n_c + 1)/2$ 。

该导体相对于同一排上最近的空心导体的温升可按下式计算:

$$\theta = \frac{P_c}{b} \cdot \frac{\delta}{\lambda} \cdot A \quad (3)$$

式中 P_c ——一根实心导体单位长度的损耗, W/cm;

b ——实心导体宽度, cm;

δ ——一排上两根相邻导体之间的绝缘厚度, cm;

λ ——导体间绝缘的比热传导系数, W/cm·°C;

A ——通过距离空心导体最远的实心导体之间绝缘间隙的热流总合系数。

为了实用, 采用下列总合系数表达式是方便的: 当 n_c 为偶数时,

$$A = \frac{n_c(n_c + 2)}{8} \quad (4)$$

当 n_c 为奇数时,

$$A = \frac{(n_c + 1)^2}{8} \quad (5)$$

如果认为一排股线中从线棒最边缘到第一根空心导体的实心导体数 $n_a = n_c/2$, 则可用(4)式确定总合系数, 以计算线棒中最边缘的实心导体相对于同一排中最近的空心导体的温升。热传导不经过绕组的对地绝缘和股线排间。

在这些假设条件下, 实心导体相对水冷空心导体的最大温升为:

$$\theta = A j^2 a \rho_t k_f \frac{\delta}{\lambda}, \quad (6)$$

式中 j ——绕组的电流密度, A/mm²;

a ——实心导体高度, cm;

ρ_t ——在实际温度下导体材料的比电阻, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

k_f ——附加损耗系数。

按照限制股线相对热变形和保持线棒整体性的条件, θ 值不应该超过一定的水平, 实际上该值通常被限制为20°C。取这个值作为规范, 并举例取 $a = 0.25\text{cm}$; $\rho_t = 0.0217 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ (当温度为75°C时); $k_f = 1.4$; $\delta = 0.035\text{cm}$; $\lambda = 0.002\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$ 作为(6)式中参数的平均值, 即得:

$$A j^2_{\max} = 150 \quad (7)$$

(7)式实际上是选择直接水冷定子绕

组容许电流密度的公式, 选择的条件是将长期稳定运行时的局部发热限制到可接受的水平。但是, 根据(6)式、(7)式得出的电流密度值实际上还不能采用。首先必须考虑一根空心股线通道被堵塞的可能性, 因为现有的检查方法可以发现这种堵塞或者两根及多根空心导体通道压扁的现象。当中断空心导体的循环水时, 不能直接冷却的导体数目增加到 $2n_c + 1$ 或 $n_a + 1$ (取决于沿线棒端部高度上故障导体所处的位置), 因此选择绕组电流密度也应考虑这一情况。

此外, 还可能发生沿线棒高度方向股线发热极不均匀的情况, 这是由于各个股线中流过的涡流, 特别是鼻部并联使股线之间产生环流引起的。在水轮发电机中, 定子绕组股线换位采用槽部360°换位, 以保证所有的股线交链同样的槽漏磁通, 但是不能补偿端部磁场引起的环流。因此, 在线棒较高且磁场强度强的情况下, 沿线棒高度方向损耗密度分布明显地不均匀(图8), 它尤其对绕组端部热场图具有影响。

这时可选择540°换位, 在一定程度上可减轻由于股线交链的电机端部磁通 (首先是它的切向分量) 不同而引起的环流, 但是对定子铁芯较短的水轮发电机而言, 由于股线

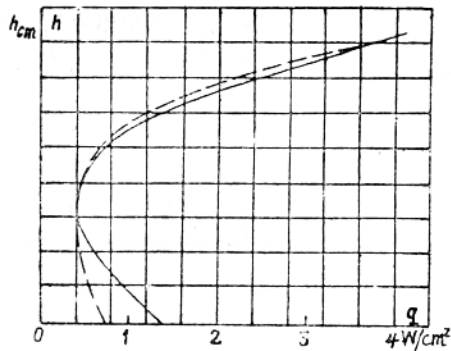


图8 定子绕组线棒中比损耗的分布
I=10800 A; 实心导体360°换位 (—);
空心导体360°换位 (---)

从一排换到另一排时要加以弯曲,实现 540° 换位是相当困难的。如果将分布在一排里紧邻的两根股线同时换位,则可克服这个困难。

计算表明,由于槽漏磁通不能完全补偿,在一起换位的导体之间的环流引起的附加损耗,显著地小于从 360° 过渡到 540° 换位时能够避免的损耗。

为了扩大条式绕组在许多中、小容量低速发电机中的应用范围,也可以广泛采用双股成对换位导体。

目前进行的理论和试验研究工作,应该能在不远的将来拟订出降低定子绕组局部发热的最有效的典型技术措施。

水力发电机组的额定转速随其容量提高而降低。由于这个原因以及提高电磁利用水平,即增大槽电流的要求,就必须采用较小的每极每相槽数。同时,正如试验证明,小的分数槽由于定子绕组磁势曲线中分数次谐波引起的定子铁心振动可能达到危险的水平(尤其是当定子和转子的互感值较高时),因此希望过渡到每极每相槽数为 $q=3.0; 2.0; 1.5; 1.0$,这样就可能消除定子的振源。但是这使电能的质量保证产生了问题,由于气隙磁场中高次谐波,首先是齿谐波的含量增高,电压波形的正弦性和电话干扰系数的适当水平受到影响。由于这些原因,需要采用成熟的技术措施和相应的计算方法,以满足在实际的任何每极每相槽数时

国际标准和规范对电压波形的要求。抑制电势波形中齿谐波的各种已知的方法(定子铁心斜槽、斜极、斜极靴、阶梯磁极),在大型低速电机中都碰到了极大的工艺困难,或者不可能实现。同时,所列举的大家都知道的方法并没有包括抑制齿谐波的全部可能性。

列宁格勒“电力”电机制造联合公司在理论上论证并且试验验证了磁极成组移位的方法,通过将磁极分组使磁极的磁轴线移位,可以保证实际上完全消除一阶及三阶齿谐波。实现的方法是使一组内相邻磁极磁轴间的角度为:

$$\gamma = \left(1 \pm \frac{t}{\tau n}\right)\pi, \quad (8)$$

即相邻磁极间的距离为:

$$\tau_p = \tau \pm \frac{t}{n}, \quad (9)$$

式中 τ ——电机的平均极距, cm;

t ——齿距, cm;

n ——每一组的磁极数。

这样,每组处在边缘且同时相邻的磁极磁轴之间的夹角为:

$$\alpha = \left(1 \pm \frac{n-1}{n} \cdot \frac{t}{\tau}\right)\pi, \quad (10)$$

两组磁极接合处磁极间的距离

$$\tau_m = \tau \pm \frac{n-1}{n}t. \quad (11)$$

磁极成组移位可以用各种不同的方法来实现:极靴的轴线相对极身的位移,相对磁

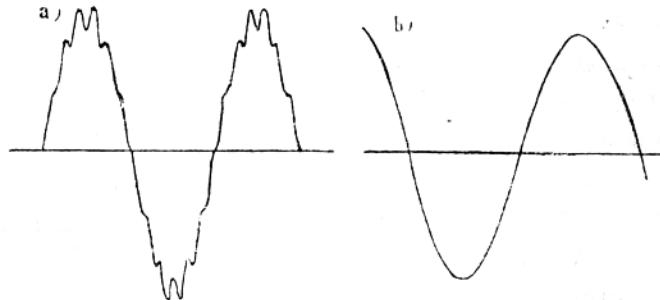


图9 $q=2$ 的发电机电压波形图

a—磁极未作成组移位; b—磁极经过成组移位

论每极每相分数槽波绕组的设计

В.В.Домбровский等

接线图选择

在绘制多极同步电机，如水轮发电机的波绕组接线图时，工艺性和可靠性问题具有非常重要的意义。连接线最少的绕组，是最经济、最简单、工艺性最好的绕组。这对于采用直接水冷的大容量水轮发电机尤为适用，因为这类发电机单根连接线的重量可能超过100kg，随着连接线数目增多，焊接部位和引水管的绝缘工作将更为复杂。因此，首先必须研究可以保证每极每相分数槽波绕

组的附加连接线（跨接线）数目最少、总长度最短的条件，每极每相槽数为：

$$q = \frac{z}{2pm} = b + \frac{c}{d}$$

式中 z ——槽数；

m ——相数（ $m=3$ ）；

$2p$ ——极数。

为了解决这个问题，可以采用最直观、实际中最常用的方法，即画绕组表和基波电势的向量图。为了简化计算，现以每极每相槽数分数部分的分母较小，如 $d=5$ 的绕组为例来进行研究。在分母 $d=5$ 时， q 数可能有

极轴线移动磁极的尾部或其固定位置，或者在转子圆周上不均匀配置磁极在磁轭上的固定位置，对于实心磁轭实现起来最为简单，当然，在叠片转子磁轭情况下也可以实现磁极成组移位，其中包括完全对称的移位。

图9a为一台同步发电机的空载线电压波形图，该电机的数据为： $2p=84$ ， $q=2$ ，绕组节距 $y=1\sim6$ ， $\delta/\tau=0.026$ ， $b_p/\tau=0.684$ 。从图中可以看出，电压波形中有明显的一阶齿谐波，此谐波也使电压波形具有高的畸变系数——大约9%。

图9b为另一台发电机空载线电压波形图，该机具有相同的绕组数据（ $q=2$ ， $y=1\sim6$ ），极为接近的其他数据（ $2p=80$ ， $\delta/\tau=0.0279$ ， $b_p/\tau=0.706$ ），而且实施

了磁极成组移位。其成组移位的方式是使磁极的齿频磁场的合成磁势系数等于零。为此，在转子直径的两端，两对相邻的磁极附加张开39/40齿距，而所有其余的磁极极距做成相等且相应减小 $t/40$ 。

这台发电机的电压波形畸变系数为1.1%（标准允许值为5%），比许多每极每相分数槽的发电机还低，其电话干扰系数为0.57%，而国际电工委员会标准允许1.5%。

根据我们的观点，磁极成组移位的方法在大型低速水轮发电机上，包括极限容量发电机上均可得到广泛应用。

傅自清译自苏刊《电力文集》，

1982，№34，5—14

放原校

的分数部分是1/5、2/5、3/5、4/5。大家知道，每极每相分数槽绕组的接线图中，当其整数部分相等，分数部分之和等于1时，例如1/5和4/5，其接线图相似，而且跨接线的数目相同，因此，只需研究四种情况中的两种，即1/5和2/5。

现以 $q = 2\frac{2}{5}$ 为例来进行研究。利用文献〔1〕中所述的方法，求出基波最大分布的线圈组交替排列数列为2，3，2，2，3…单元电机的槽数 z_0 为：

$$z_0 = 6(bd + c) = 6(2 \cdot 5 + 2) = 72,$$

相对应的极对数 p_0 为：

$$p_0 = p \frac{z_0}{z} = d = 5.$$

算出绕组的合成节距为：

$$y_p = \frac{6(bd + c) \pm m}{d} = \frac{72 - 2}{5} = 14,$$

而且，这里最小的 m 值等于2，因此可按照这些数据画绕组表。这种接线图画成含有 z_0 个方格的表格形式（图1）。表的宽度为 y_p 个方格。画垂直粗线，分出A，C'，B，A'，C，B'相带，它们分别含有2，3，2，2，3，2个方格（按照数列）。接着在下一行用垂直线画出与循环数列位数相同的方格，重复排列，在填满表格后便可得到用折线表示的相带边界。

在估计所研究接线图的跨接线数目和复杂性之前，我们先看看某些一般的原理。条式波绕组之所以优于叠绕组，就是因为波绕组

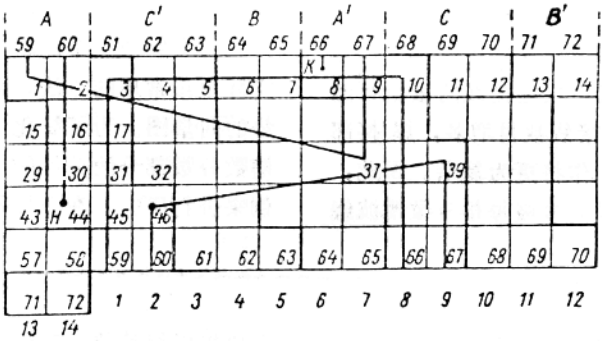


图1 $p_0 = 5$ ， $z_0 = 72$ ， $q = 2\frac{2}{5}$ 的单元电机分数槽波绕组表

的极间连接线即是波绕线圈的弯曲端部。在每极每相整数槽的波绕组中，这样的线圈形成闭合回路，即围绕定子整个圆周的多重通路。在每极每相分数槽的波绕组中，没有附加连接线，通路不可能沿整个圆周闭合，因为在不同磁极下同一相线圈数是不相同的。在这样的通路的个别部分，线圈端部串联，我们将这部分线圈称为波组（волновые группы）。附加连接线的数目取决于波组数目。

将绕组表分成单个相带，我们可以看到，只有分布在表的同一直行中的线圈才能

借助端部来连接，即形成波组，在表的A和A'每个半相中最少将有两个直行（图1）。A相的波组须用三条跨接线连接。

利用向量图（图2）可以很容易的观察所研究绕组的波组的形成和连接。可以证明，当槽数 z_0 为偶数时，A和A'两个半相的电势相等，而方向相反，因此只研究A半相的向量图就够了。

在这种情况下，相邻槽中有效线圈边的基波电势向量之间的夹角为：

$$\alpha = \frac{180^\circ}{3q} = \frac{180d}{3(bd + c)} = \frac{60 \cdot 5}{12} = 25^\circ$$

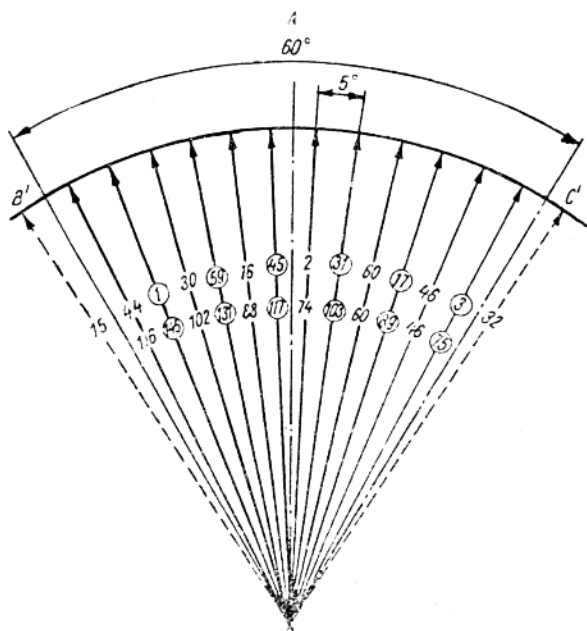


图2 图1所示绕组A半相的向量图

相距一个合成节距、彼此串联的线圈的电势向量间的夹角为：

$$\begin{aligned}\beta &= \alpha y_p = \frac{6(bd + c) \pm m}{d} \cdot \frac{180^\circ}{3q} \\ &= \frac{60^\circ [6(bd + c) \pm m]}{bd + c},\end{aligned}$$

在我们所指的情况下，

$$\beta = 25^\circ \cdot 14 = 350^\circ$$

增大到两倍极距的附加合成节距为：

$$360^\circ - \beta = \frac{180^\circ m}{3qd} = \frac{60m}{bd + c}$$

在我们所指的情况下，

$$360^\circ - \beta = 360^\circ - 350^\circ = 10^\circ.$$

在图2所示的向量图上，两相邻向量间的夹角为：

$$\beta' = \frac{360^\circ}{z_0} = \frac{360^\circ}{72} = 5^\circ$$

在图2向量图上先画上彼此相距 $\alpha = 25^\circ$ 的三个向量1, 2, 3作为基准，再画其他向量，方法是按表使A半相范围内的其他向量位移，并注意在向槽号增大方向位移时，

在向量图上按顺时针方向画角度线，而在向槽号减小方向位移时，按反时针方向画角度线。画完向量图后，我们就可以确信，全部半相的向量占有 60° 相角，而向量图扇形区的边界对应于绕组表中相带边界的折线。因为在向量图上按顺时针方向画串联波绕线圈向量的夹角 β ，与按反时针方向画 $360^\circ - \beta$ 角是完全一样的，可将线圈的电势向量从第3个开始，每隔一个用圆圈标出，即得：

$$-3-17-31-45-59-1-;$$

这就是一个波组。另一个波组由下列线圈组成，即：-46-60-2-16-30-44-

在这种情况下，要想得到最少的波组数是不可能的，但是，如果使图中两相邻向量间的夹角 β 等于被连接线圈电势向量间的夹角 $360^\circ - \beta$ ，则可得到一个波组。

波组数最少的条件为：

$$360^\circ - \beta = \beta'$$

或在d为奇数时，

$$\frac{60m}{bd+c} = \frac{360}{6(bd+c)} \quad (m=1);$$

d为偶数时,

$$\frac{60m}{bd+c} = \frac{350}{3(bd+c)} \quad (m=2)。$$

因此, m应为最小的整数或偶数, 这就是说合成节距应尽可能地接近两倍极距。换句话说, $6q$ 愈接近整数, 绕组每相的波组愈少, 连接所需的跨接线也愈少。

在这方面, 有意思的是第二个例子, 即 $q=2\frac{1}{5}$ 。在该例中, $z_0=66$, $p=5$, $y_p=\frac{66-1}{5}=13$, $m=1$ 。画出这种情况下的绕组表(图3), 即可证实单元电机的半相仅由一个波组构成, 连接绕组的整个一相只需一条跨接线。

在向量图(图4)上, 并列有串联线圈的电势向量(上排数字)。

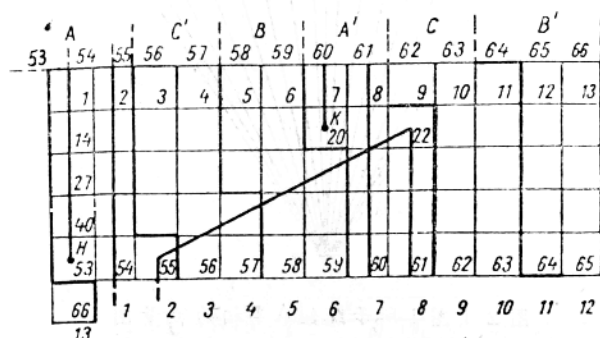


图3 $p_0=5$, $z_0=66$, $q=2\frac{1}{5}$ 单元电机分数槽波绕组表

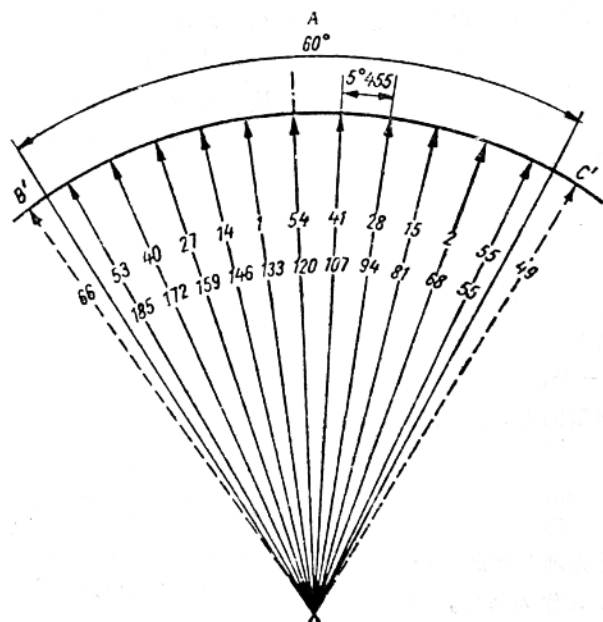


图4 图3所示绕组A半相的向量图