

前 言

五届人大的召开，吹响了向四个现代化进军的号角。全国科学大会的胜利召开是我国人民在新的长征中迈出的重要一步，也是我国科学技术发展史上新的里程碑。全国人民在五届人大和全国科学大会精神的鼓舞下，积极响应英明领袖华主席的伟大号召，以只争朝夕的革命精神，决心尽快地攀登世界科学高峰，为在本世纪末实现四个现代化而努力奋斗！

我们遵照伟大领袖和导师毛主席“洋为中用”的教导，为适应全国科学大会后向科学技术现代化进军的需要，为适应我国电力和电机制造工业的大发展和赶超世界先进水平的需要，我所和东方电机厂情报组共同编译这本专题资料，供有关科技人员参考。

由于我们政治思想水平、专业和外语水平不高，加之对国内需要了解不多，缺点、错误一定不少，恳请读者批评指正。

目 录

大型汽轮发电机的发展.....	(1)
英国汽轮发电机设计的发展趋势.....	(12)
未来的大型汽轮发电机——200万千瓦电机的试验电机	(13)
50万千瓦汽轮发电机的端部磁场和热场研究.....	(22)
发电机定子绕组端部上的电磁力.....	(28)
司柯达厂制造的50万千瓦汽轮发电机的励磁系统.....	(37)
大型发电机转轴锻件的发展趋势.....	(43)
巨型发电机转子毛坯生产现状.....	(46)
大型汽轮发电机的转子锻件.....	(52)
大容量汽轮发电机轴的振动.....	(57)
汽轮发电机用高速轴承的性能.....	(69)

大型汽轮发电机的发展

一、前言

自从1898年Charles Brown在BBC公司设计的第一台100千伏安6极汽轮发电机投入运行以来,七十五年间发电机的单机容量增加到130万~150万千瓦伏安,即增加了15000倍。仅最近20年中,西欧的单机容量就由15万千瓦伏安左右增加到60万千瓦伏安,而美国甚至增加到90万千瓦伏安(图1)。随着第一台150万千瓦伏安机组在Rheinisch Westfälisch发电站的投入运行,美国和西欧在单机容量方面的《差距》也就消失了。

面临每年7~11%的增长速度,目前存在着许多要讨论的问题,其中包括必须预计将来单机容量如何增长的问题。1968年,R.R.Bennet^[1]按以后逐年增长7%推算,到1987年将出现300万瓩机组。过去10年中,最大容量大概是美国装机总容量的千分之二点五。从美国装机容量未来增长的预计来看^[2],将来单机容量的增长是不太乐观的,这与G.Hurlbert^[3]预计的结果(1984: 200万瓩;1987: 250万瓩)非常一致。

在一定程度上影响预计可靠性的因素,主要有以下6点:

- 1) 总能源的需要量和电能需要量的发展;
- 2) 电网连接趋势及其电网的总容量;
- 3) 总效率和电站单位容量的成本与单机容量的关系;
- 4) 运行可靠性;
- 5) 环境问题;
- 6) 技术的发展、制造能力、运输极限性。

在这些因素中,有的因素对未来单机容

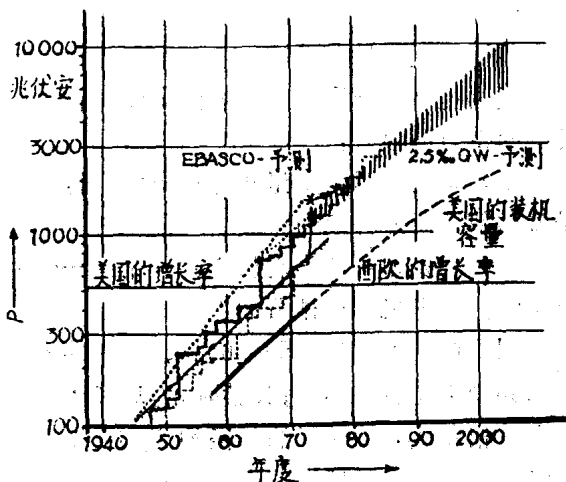


图1 1970—1990 (2000) 年汽轮发电机单机容量的预计

量增长的影响是积极的,有的则是消极的。即使单机容量不会再像过去那样迅速增长,但对于上述因素的分析仍有深远的意义。70年代的单机容量达到190~200万千瓦伏安是非常可能的,80年代可望达到220~250万千瓦伏安。但是,预计1990年,甚至2000年时容量达到300~500万千瓦伏安的可能性还是很不大的。

为了满足发电机单机容量不断增长的需要,保证良好的运行可靠性,下面仅就有关技术和制造方法方面的若干问题做一概述。

二、汽轮发电机制造工艺问题

在汽轮发电机的制造方面,工艺问题,过去需要解决,今后,随着单机容量的不断增长也是需要加以解决的,工艺问题直接与单机容量的增长有关,而单机容量的增长又

要求所采用的材料在机械、电和热方面得到充分利用^[4]。只有更好地了解所使用的材料,又了解电机对材料的要求,才能同时避免产生超过容许极限和运行发生故障的现象。下面讨论有关这方面的一些重要问题,探索汽轮发电机进一步发展的可能性和极限范围。

1. 机械利用率

通过提高机械利用率来增大容量,首先受到两个方面限制:

1) 采用的材料质量和允许应力,特别是旋转部分的允许应力;

2) 将发电机和汽轮机作为一个统一体评价时,发电机的机械可靠性。

用目前的锻件只能制造60赫、2极、外径为1150毫米左右的转子;50赫时,为1300毫米左右。相应地4极转子的外径约为1900和2200毫米。现在所采用的奥氏体钢转子护环的屈服极限达120公斤/毫米²,因此,由于转子护环的质量影响,在恰当地确定转子绕组尺寸时,必须考虑到最大转子直径下,转子和护环的强度均能互相适应。

虽然将来可以通过采用纤维增强塑料改善转子护环质量,锻造工厂也在努力进一步改善磁性能良好的锻件的强度,但估计最近在增大转子直径方面基本上不会有什么突破。因此,为了增大容量,在机械方面只能加长转子的长度,但转子加长后,又会使挠度过大,并带来以下几点作用:

1) 磁拉力的影响增大,易于引起较大的振动;

2) 冷态和热态间的振动特性(热不稳定度)相差较大;

3) 转子刚度的各向异性和内部阻尼引起较大的振动倍频;

4) 由于转子绕组的热—机械性能及其机械阻尼的强烈影响,有产生不稳定的危险。

此外,长转子在运行范围内通过几个临界转速,相应地会产生许多平衡面并要花费

较多的时间进行平衡。因此,力求把转子做得尽量短些。

制造200~300吨重的四极转子锻件时,还有一个要求锻造质量优良和废品率极低的问题。由于铸造和锻造技术的发展以及相应的大量投资,现在已能用500吨钢锭制造单机容量200万千瓦左右的4极发电机用的250吨锻件。

对于不能整体锻造的转子,可以采用把合或焊接技术,或将这两种方法结合起来,制造分段组合结构的转子。最近,BBC公司应用把合技术制造了一台210吨,总长20米的133.3万千伏安发电机的4极转子。40多年来,证明用这种方法制造的300多根组合转子是可靠的。将直径为1750毫米的三段轴用一根中心拉紧螺杆把在一起的转子,在转速达2160转/分时,仍能平稳而可靠地运行(图2)

2. 电磁利用率

电磁利用率是在很大程度上决定了定子叠片铁心尺寸、定子绕组尺寸、转子绕组尺寸、励磁功率以及电机在电网中的运行特性(即电机的电气可靠性)。

1) 定子铁心

最近20年,由于高质量电工硅钢片制造技术的发展,比铁耗减小了30~40%。而且,由于导磁性能好,允许磁密提高了10%左右^[4]。方向性硅钢片可使比损耗进一步降低到1瓦/公斤以下使铁心外径减小,这正是解决运输问题所需要的。磁轭的高度降低后必然加剧由于旋转磁场产生的铁心倍频径向振动。因此,首先要对大容量2极发电机的定子铁心采用弹性支撑,这样,能使传递给基础的定子振动减少到1/10左右。

随着单机容量的增长,不仅电机本身的有效部分在能量转换方面存在问题,而且遗憾的是还会产生一连串的不利影响。特别是利用率高的汽轮发电机,出现了端部空间问题。随着线负荷^[4]的增大,端部空间内复杂的三维磁场值明显增加。它们穿过电机的

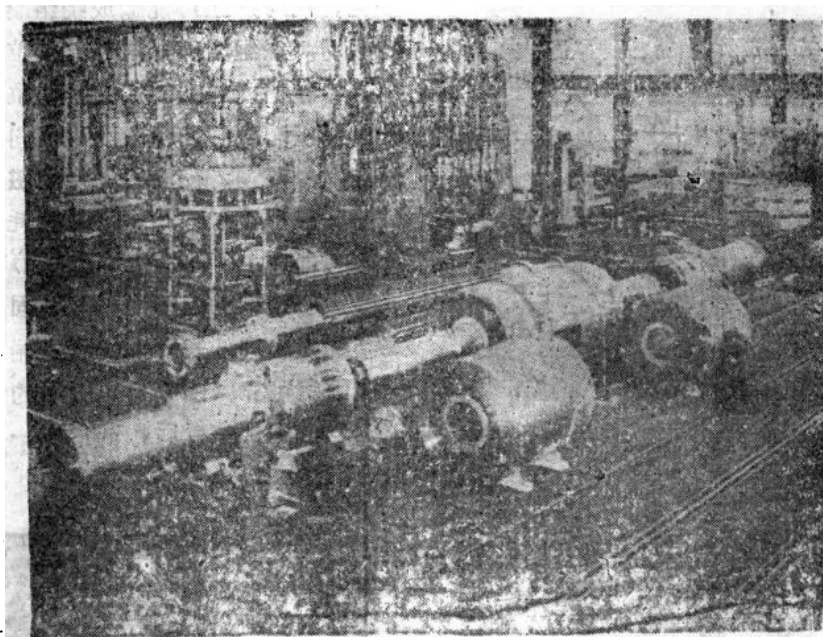


图2 用一根把合螺栓将一段中间轴、两段端轴和两个轴伸把合在一起的133.3万千瓦安/110万千瓦1800转/分、4极发电机转子

有效部分和结构件，并在其中产生附加损耗和发热，特别是在磁场分布断续变化而使磁场集中的端部空间，产生附加损耗和发热。因此，不仅在正常运行时产生有害影响（效率下降，过热，引起铁心烧坏的局部过热），而且在异常运行时（欠励运行、异步运行）亦会带来不利影响。带屏蔽或不带屏蔽的通用压板的缺点是气隙一端部空间变化不连续，局部磁通集中和发热很厉害。因此，利用率高的大容量发电机，便采用扇形电工硅钢片粘结而成的锥形叠片式压板结构（图3）。对67万千瓦安发电机进行的全面测量的结果表明，采用这种新结构后，磁场分布是连续的，端部磁通也能顺利进入铁心，从而相应地降低了压板中的比损耗，温升也下降了 10°C （图4）。

2) 定子绕组

随着单机容量的增长，对定子绕组的绝缘强度、热机械性能，抗振能力，以及短路时的运行可靠性要求更高了。

自从1912年发明罗贝尔（Robel）线棒以来，由于这种线棒制造方便，运行可靠，

涡流损耗最小，故在大电机制造中逐渐推广开来（图5）。罗贝尔线棒特殊的优点是易于将用同样方法制成的各个液冷导体组合在

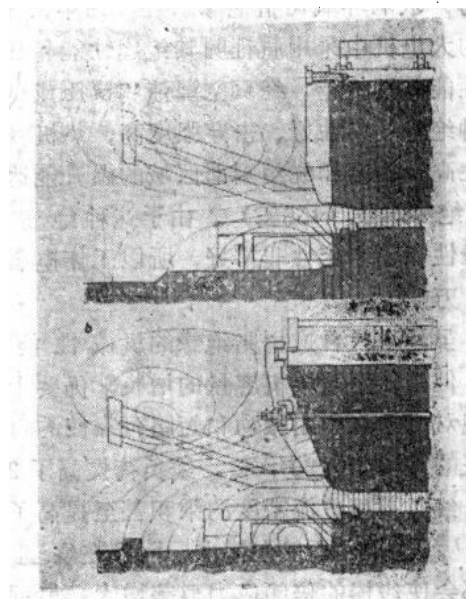


图3 额定负载时汽轮发电机的端部空间磁场 ($\cos\varphi = 0.85$)

a—具有完全屏蔽压板的铁心

b—具有锥形叠片式压板（Darrieus式）的铁心

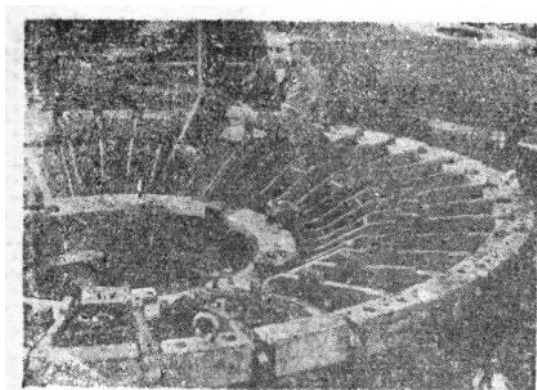


图4 用拉紧螺杆将硅钢片把合在一起的锥形压板

一起(图5)。因此,对百万瓩级发电机而言,罗贝尔线棒也是一种行之有效的且运行可靠的结构。

由于各厂家制造的电机的热利用率较高,战前沿用的虫胶和沥青绝缘很容易因槽绝缘漏电和槽口绝缘位移而损坏。虽然BBC公司由于采用一种特殊的云母箔而没有发生这类问题,但是在50年代仍然又发展了一种云母/玻璃环氧树脂绝缘系统,15年来在所有的大电机中采用后证明其绝缘性能和热机械性能非常优越。经真空浸渍和模压成型的这种绝缘均匀性好、击穿强度高,热机械稳定性高。槽部和绕组端部区域的温升能达到F级绝缘水平(155°C)。由于这种绝缘耐电晕性和耐老化性非常好,所以工作电压可达3万伏^[5]。

虽然现代合成树脂绝缘的机械性能很好,但是,随着单机容量的增长,仍要十分重视对定子绕组耐振动和短路可靠性的日益增长的需要。近20年来,线负荷提高了2.5倍,线负荷与电流密度的乘积甚至提高了10倍^[4]。这样,不仅在槽内,而且在绕组端部都会使线棒的倍频应力显著增大。根据7:1模型试验结果(图6)改善槽内线棒的固定方法后,便可以继续增大线负荷及其槽内电动力。

绕组端部强大的磁场在线匝中产生涡流

损耗,同时产生可能造成绕组端部机械损伤的振动。绕组端部采用 180° 换位(类似罗贝尔线棒在槽内的 360° 或 540° 换位)后,可以补偿绕组端部的3种磁场(横向自感磁场,横向互感磁场,径向磁场)的磁感应作用并且显著减小定子线棒中的总损耗^[6](图7)。绕组端部由于采用合理的固定方法而提高了承受短路和振动的能力。这种固定方法允许定子绕组轴向伸长,而使绕组端部在径向和切向固定可靠(图8)。适形的合成树脂浸渍的支撑元件聚合后,就形成一条牢固而耐振的绝缘层。

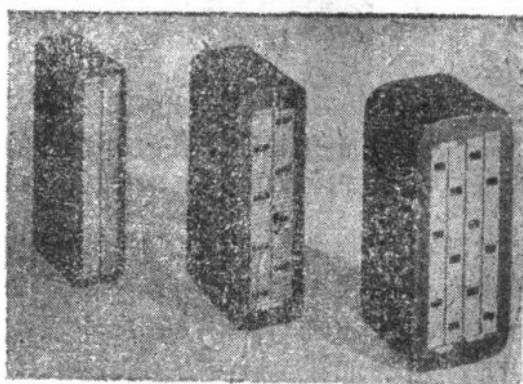


图5 间接气体冷却和直接水冷的罗贝尔线棒

3) 转子绕组及其励磁

对于定子绕组来说,主要是绝缘强度问题,而转子绕组则主要是克服作用于铜导体和绝缘上高达20公斤/毫米²的机械应力。由于负荷的变化而产生的热机械应力会使绕组发生蠕变,通过采用银铜合金,玻璃-石棉-环氧绝缘材料以及采用有效的直接冷却方法,可大大提高防止蠕变的能力,并为进一步提高容量创造先决条件。

在增大单机容量时,必须特别注意转子的励磁,其励磁功率达数千瓩。励磁系统主要有两种:旋转半导体整流器励磁或静止半导体整流器励磁。对于超过12.5万瓩的汽轮发电机,BBC公司优先采用了直接由发电机电端或交流励磁机供电的静止整流器励磁(图9)。在短路持续时间在1.5秒内的正

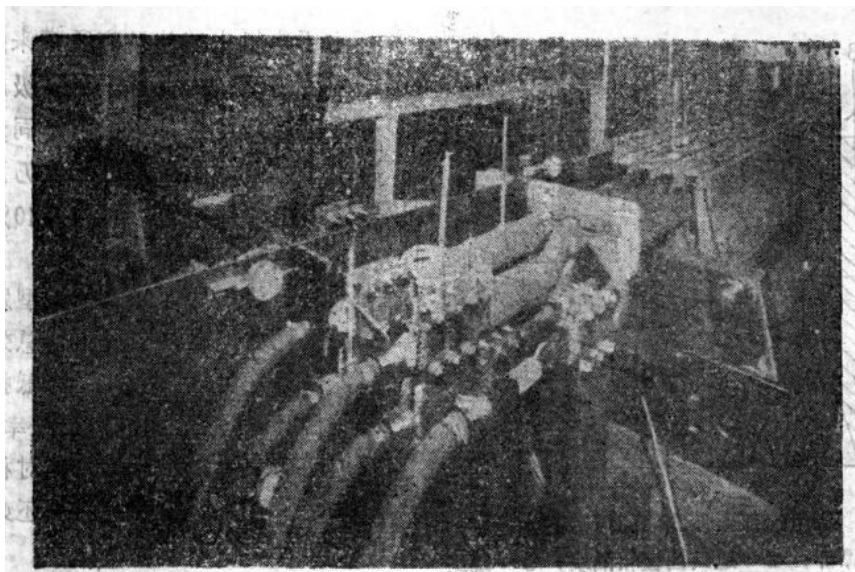


图6 100万瓩以上的汽轮发电机定子线棒的试验模型

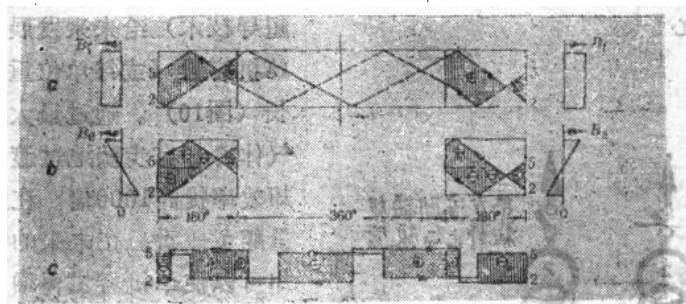


图7 绕组端部180°换位和槽部360°换位的罗贝尔线棒

a—横向互感磁场 B_t 的补偿

b—横向自感磁场 B_s 的补偿

c—径向磁场补偿

常电网中，建议采用由发电机端经静止可控硅和滑环励磁的方式。这种励磁方式的优点是：调节速度快，机组长度较短，噪音小和维修费用低。在短路持续时间超过1.5秒的电网中，发电机采用由交流励磁机经静止二极管的单独励磁方式，但此时必须考虑机组长度的增加和动态稳定性的降低。两种励磁系统均可胜任更高的励磁功率，能借助水冷滑环安全地供给转子10千安以上的电流，而且滑环的维修费用很低。采用双渠道调整器结构后，能满足安全运行的较高要求。

4) 电气稳定性

发电机的短路比是衡量静态稳定性的标准。在美国至今通用的短路比为0.5~0.6，而欧洲采用的短路比都较小(0.35~0.4)，

但并不影响运行稳定性。对汽轮机和发电机来说，由于电网并网和采用快速调节系统，在将来单机容量更大时，短路比仍可采用0.4左右，即取同步电抗约为250%。从静态稳定性来看只是在超距离输电的特殊情况下，发电机才需采用较低的利用率。

超瞬变电抗和瞬变电抗的增大与汽轮发电机利用率的增加有关，而且主要影响动态稳定性。单机容量为200万千伏安的4极机组，瞬变电抗值为40~50%，而目前容量为30~60万千伏安的2极发电机，瞬变电抗值通常约为30%。40~50%这样高的数值在将来对电机的动态特性基本上不会产生什么影响，因为借助转子负载角的变化(转差率，加速度增大)，快速动作的可控硅励磁系统补偿

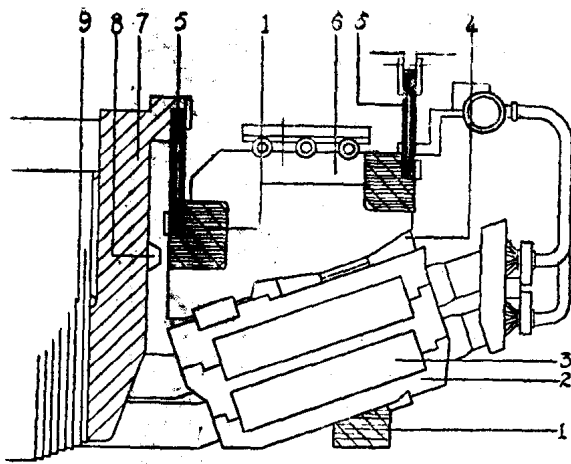


图8 绕组端部柔性支撑的原理图

1—撑环；2—通风挡板和隔板；3—绕组端部；4—楔块与拉紧螺栓；5—弹簧板；6—支撑角钢；7—压板；8—轴向制动器；9—铁心

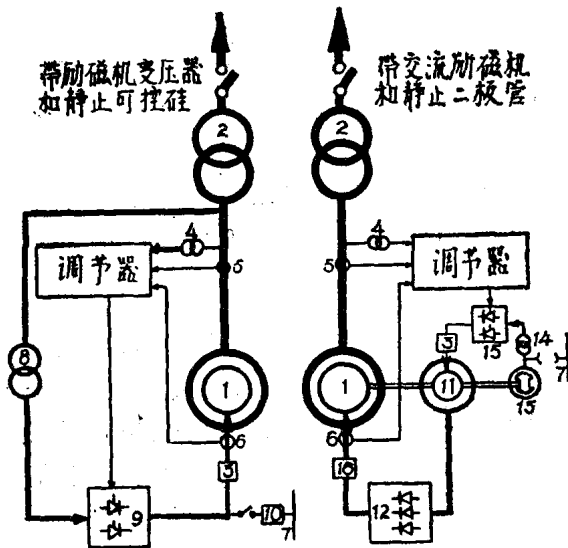


图9 大型汽轮发电机的励磁系统

1—汽轮发动机；2—主变压器；8—失磁和过电压保护；4—电压输入；5—电流输入；6—励磁电流输入；7—辅助电源；8—励磁机变压器；9—可控硅整流器；10—启动用励磁装置；11—交流主励磁机；12—二极管整流器；13—永磁式付励磁机；14—主励磁场变压器；15—主励磁场的可控硅整流器；16—过电压保护

了由于电机电抗值较高所带来的负作用。这一重要的改进是百万千瓦安级超导发电机的一大突破，在这种电机中，同步电抗大约要减小 $1/5$ ，而瞬变电抗值仍为几十万千瓦安发电机的通用值，即 $30\sim 40\%$ 。

3. 热利用率

对于效率约为 99% 的大型发电机，虽然降低损耗对提高整个机组的总效率已无济于事，但将来仍然要继续为降低损耗而努力。对一台 200 万千瓦的发电机损耗率 1% 即意味着损耗功率达 2 万千瓦，它要对材料和运行可靠性带来有害的影响，而且还必须采用适当的冷却方式将损耗带走。

只有知道产生损耗的位置、损耗量以及冷却技术的进步（由气体冷却、液体冷却到超导技术）给未来发展指出的方向，才能使单机容量（或每单位重量的功率）有明显增长（图10）。通过最大限度地降低损耗和从气体冷却有步骤地过渡到液体冷却，能使冷却效率提高 1000 倍。在过去 20 年中，单机容量翻了一番。在未来的 $10\sim 15$ 年中，液体冷却可以使单机容量再增大 50% 。虽然可以预料，大型液冷发电机的极限功率根据实际经验可进一步提高，而现在的问题是如何充分利用有效的冷却液体才能进一步提高单机容量。通常有两种方法：提高转子的允许温度，或者采用低温冷却。

不管用什么方法提高极限容量电机的温升都是行不通的，这是因为要带来以下问题：高压绝缘系统制造困难，在高温下的足够的机械强度问题，转子的热稳定性问题，特别是欧姆铜耗随着温度上升而急剧增加。因此，只剩下一条采用低温冷却技术的道路了。同时应指出，转子损耗超过 5000 瓦时，冷却设备的成本很高，这样，唯一有效的解决办法是：向无欧姆损耗的超导体转子突破。采用超导体转子可以达到的单位重量的容量，主要取决于低温技术、超导体和超低温材料在将来的发展状况。研究结果表明，目前单位重量的容量的动向是：从机械特

性（低温下的脆性）考虑，现有材料均不理想，而且，尚未证明超导电机能显著地降低电机每单位容量的成本。鉴于存在尚需解决的工艺问题，所以说，到本世纪末，如能用超导发电机可靠供电，而且首先使单位容量的成本与液冷电机相当，那么，这就算是取得巨大的成果了。

图11示出了不同的转子冷却方式 120万千瓦安/100万瓩、2极、50赫发电机中的损耗分布情况。转子绕组由氢（ H_2 ）冷过渡到水（ H_2O ）冷，在温升较低和温度分布较均匀的情况下，转子损耗可减少20%以上。在定子绕组为通用水冷结构时，氢冷转子电机的定子铜耗占24%，而在具有超导转子的电机中几乎增加一倍。尽管利用率提高了，但是，定子铁心损耗仍由气体冷却时的9%降至转子水冷时的8%，以及超导转子绕组时的7%。从图11可以清楚看出，绕组端部空间的损耗则显著增加相应由6%增至7%，15%，原因之一是随着单机容量的增大，端部空间的工艺问题增多了。氢冷电机的通风损耗通常占14%，而BBC公司的水冷转子发电机中实际上没有通风损耗。采用液体冷却时，电机有效长度缩短了20%左右，而在超

导转子绕组电机中缩短了70%左右，这是符合短转子有利于平稳运转的要求的。

图12表示转子绕组分别采用氢冷、水冷和氮冷时，160万千伏安/140万瓩4极50赫发电机中的损耗分布情况。

BBC公司的液冷2极发电机中的损耗分布可分成三个部分：

1) 定子绕组和转子绕组损耗约占70%；

2) 定子铁心和端部空间损耗约占20%；

3) 表面损耗和轴承损耗约占10%。

这3部分均采用了最佳冷却介质冷却：

(1) 绕组直接水冷；

(2) 定子铁心和端部压板直接油冷，位于端部空间内的绕组端部结构件直接水冷和用惰性气体氮冷却。

(3) 玻璃环氧气隙圆筒内表面水冷，气隙圆筒将转子空间与定子空间隔开，因此，可以尽量降低转子运转时的通风损耗。轴承采用通常的直接油冷。

1970年，BBC公司的第一台转子直接水冷33万千伏安，3000转/分汽轮发电机在丹麦的Skaerbaekvaerket电站投入运行（图13，14）。这台液冷发电机最主要的优点是^[7]：

1) 取消了氢气，从而解决了氢冷电机在技术和制造上以及运行方面带来的一系列复杂问题；

2) 定子机座结构比较简单，外径减小，而且运输方便；

3) 在正常运行和瞬变过程（负荷波动，快速起动）中，转子均能很好地平稳运转。样机试验表明，漏水较多也不影响平稳运转。

4) 由于有转子圆筒保护，转子偶然漏水不会影响定子，因此，电机在运行中偶而发生漏水时，也不需要立刻停机。

5) 在运行过程中，易于接近定子有效部分。

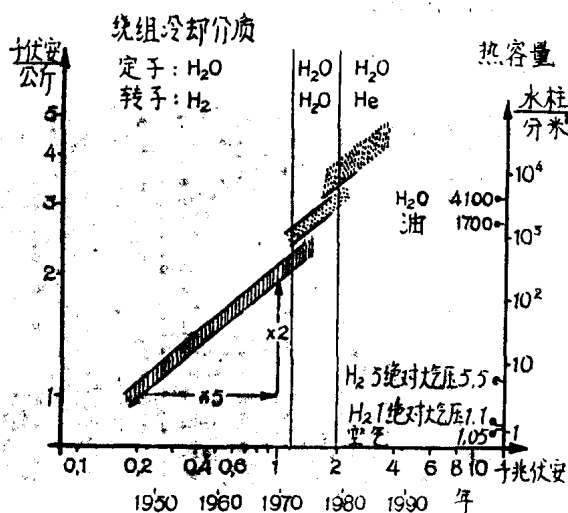


图10 2极汽轮发电机（60赫）单位重量的容量（千伏安/公斤）增长情况

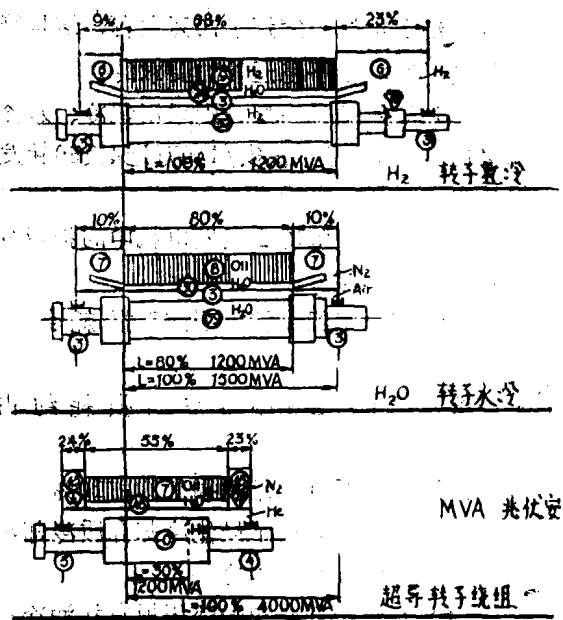


图11 2极、50赫、120万千伏安汽轮发电机分别采用氢冷、水冷转子或超导转子绕组时的主要尺寸和损耗分布(百分比)

转子氢冷:

转子铜损32% 定子铁损9%

定子铜损24% 表面损耗8%

端部空间损耗 $2 \times 6\%$ 轴承损耗 $2 \times 3\%$

通风损耗14%

通过对定子铁心分别采用氢冷、油冷和水冷的试验,证明了油冷的优越性。BBC公司制造的第一台25.4万千伏安、3000转/分的定子油冷汽轮发电机在荷兰的 Amer-Zentrale 电站已运行了十多年(图15)。与氢和水相比,用油作为铁心的冷却介质有一系列重要优点:

1) 油的热容量的数量级和水相同,即是氢的 10^3 倍;

2) 油不导电,与水相反,能直接接触硅钢片,在叠片式压板和定子齿中冷却效果好;

3) 在铁心偶然发生振动时油是一种极好的减振介质。

Amer电站汽轮发电机的运行情况表

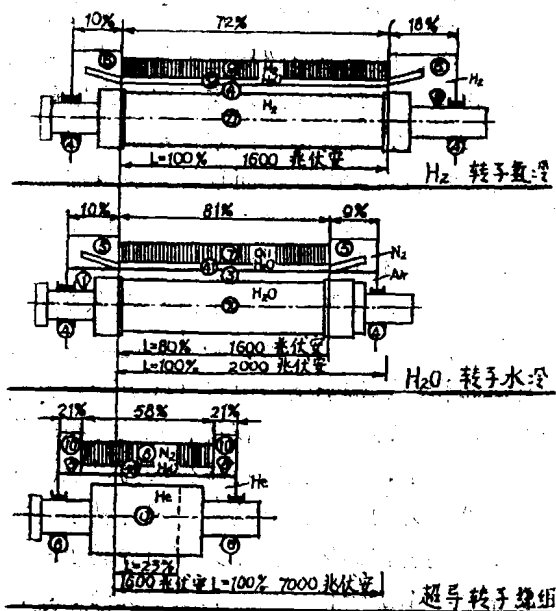


图12 转子绕组分别采用氢冷、水冷和超导体的4极、50赫、1600万千伏安汽轮发电机的主要尺寸和损耗分布(百分比)

明,漏油量很小,由于装有气隙圆筒,因而也不影响发电机的运行性能。同时,还采用了一种能保证百万瓩级发电机可靠运行的铁心结构件,这种结构件经在大容量变压器中运行十年证明是可靠的。

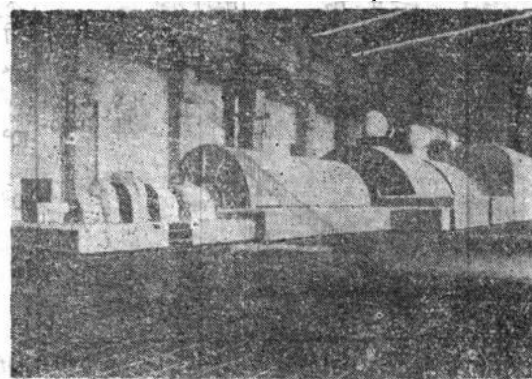


图13 发电机采用全水冷的Skaerbaekvaerket电站汽轮发电机组(33万千伏安,18千伏,3000转/分)

要求电机各部分均采用最佳冷却方式的原则，必然导致转子绕组采用氦冷超导低温发电机。采用超导绕组后，转子铁心的磁密可以突破目前的20000~25000高斯范围，而且不受钢的磁化特性的影响。因而，当电抗和电稳定性实际不变时，可以显著地增大线负荷和单位体积的容量。所以，在进一步研究发展液冷技术的同时，必须研究超导转子绕组发电机的经济性，并为解决今后制造这种电机的工艺问题创造条件。

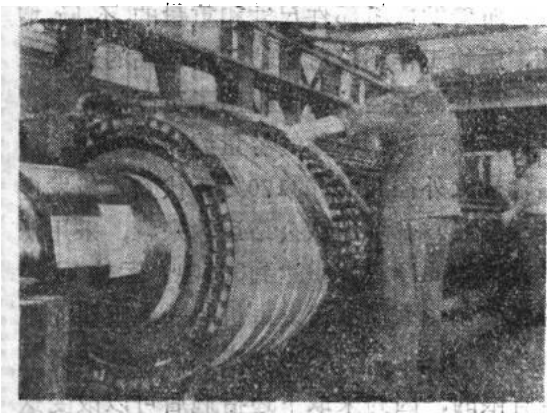


图14 励磁绕组和阻尼绕组水冷的汽轮发电机转子

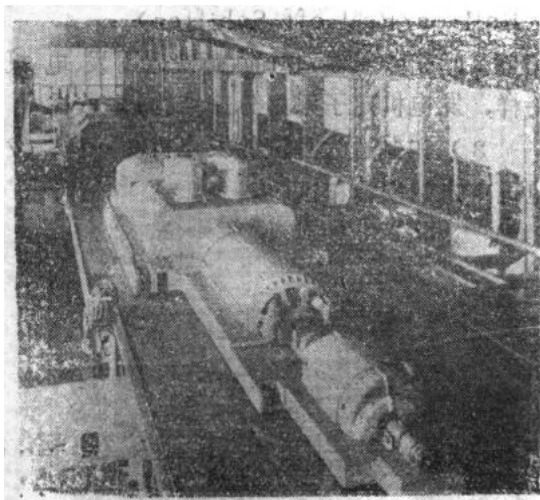


图15 铁心和定子绕组采用油冷的Amer V汽轮发电机(25.4万千伏安, 12千伏, 3000转/分)

图16为一台具有超导转子绕组低温发电机的结构原理图。转子为一旋转的深冷装置，绕组由铌钛(NbTi)合金制成，通过

液氮(4~5°K)使绕组保持超导状态。转子径向空间装有防辐射屏蔽，使之成为高真空状态；轴向装有热阻高的连接块使转子呈绝热状态。转子表面起阻尼圆筒作用，它并保护转子绕组不受定子中瞬变过程的影响。如果考虑到离心力以及短路时径向力和切向力所产生的合成应力，则在确定这种圆筒的尺寸时，还要遇到特殊的难题。

定子绕组完全装在电机的气隙中并采用直接水冷。由于水在径向和切向环流，所以必须采取特殊措施来降低附加损耗。而且，定子绕组还要求所采用的非金属材料在短路时具有很高的强度。

对外部强磁场的屏蔽，提出了以下特殊问题：

1) 采用电工钢片叠装的磁轭以获得单位体积磁屏蔽的最大功率；

2) 采用良导体铜制成的铜屏蔽，使单位体积重量最轻。但是单位体积的功率下降约2/3。

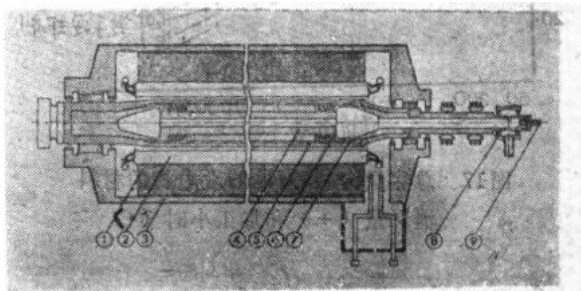


图16 采用超导转子绕组的低温发电机的结构原理图

1—叠片式屏蔽；2—水冷定子绕组体；3—定子机座；4—内转子；5—阻尼圆筒(为外转子)；6—超导转子绕组；7—转子隔热层(真空)；8—真空密封；9—供氮装置

至今的研究表明，目前尚未解决的技术问题基本上可以在近年内解决。但是，从用液冷过渡到采用低温冷却的电机的功率极限，不仅取决于将来液冷技术的不断发展，而且还决定于超导体及低温冷却技术的进展情况。

4. 制造和运输问题

图19为生产100万瓩电机（相当于20台5万瓩电机，5台20万瓩电机，2台50万瓩电机和1台100万瓩电机）所需要的材料和工时。曲线表明，随着单机容量的增长，可以实现人们充分利用现有原材料的迫切而合理的要求。然而，如上所述，节约成本的意义不大，这是由于除制造厂需要用于研究发展以及购买必要的加工设备的费用迅速增加之外，随着利用率提高，通常还对材质、以及手工和机器的加工质量提出了更高的要求。

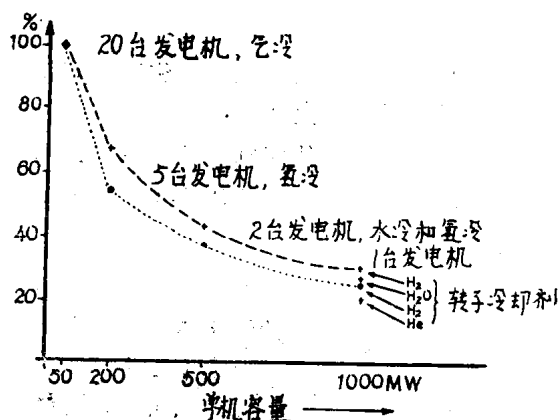


图17 总容量为100万瓩的发电机的材料消耗量(+)和加工小时(·)

因此，随着单机容量的不断增长，大型发电机的发展和制造提出了如下要求：

1) 所有参加生产的人员熟练和精神集中地进行工作；

2) 有一个周密的质量检查系统，原材料无缺陷，安装顺利，投入运行安全可靠。

遗憾的是，在建立必要的质量保证系统方面，只有极少一部分可以根据纯理论或模型试验方法得到。对于新的研究项目，做成1:1的样机是绝对必要的。

随着发电机部件尺寸和重量的不断增加，运输工作不仅对制造厂和电站的运输工具，而且对承运公司也提出了更高的要求。目前，欧洲铁路运输的容量约为420吨，可运输最大外径4.2米的170万千伏安4极发电机（图18）。美国从公路运输来看，采用低平板拖车的净载重量达到600吨。运输问题的确是制造大型汽轮发电机的一个重要的限制条件，但是，对于容量增长的影响毕竟还是有限的，因为采取下述措施后可以改变这种状况：

1) 制造由水路运往电站用的集装箱船（Roll-on/Roll-off-Schiffen）；

2) 和一般制造16²/3赫铁道用发电机一样，发电机定子采用分瓣结构；

3) 和制造大型汽轮发电机时一样，发电机在电站安装和试验。

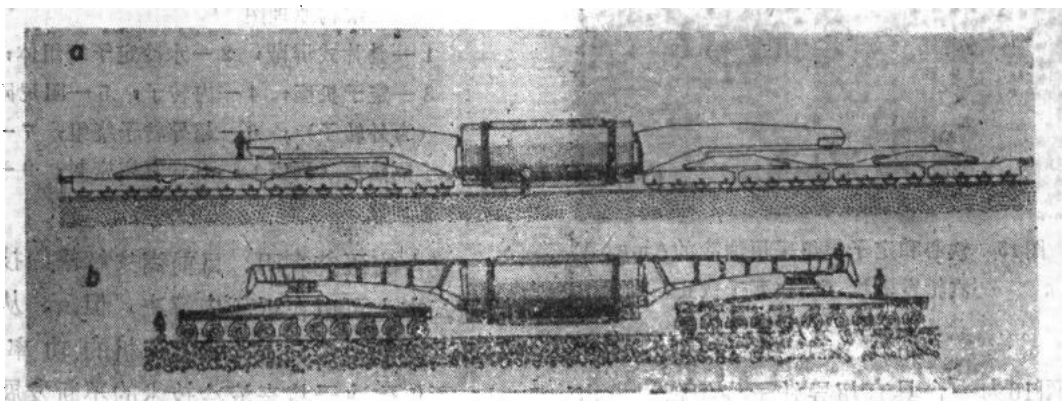


图18 汽轮发电机的运输

a—420吨铁路运输用凹型拖车

b—600吨公路运输用特种车辆

三、BBC公司的最新结构和发展

BBC公司为美国田纳西流域管理局的Cumberland电站制造了大型双轴汽轮发电机组，其单机容量72.2万千瓦安/65万瓩、3600转/分（图19）。第一套机组在1972年6月17日已达到135万瓩的最大功率。第二套机组已于1973年初投入运行。发电机采用氢冷，而定子绕组采用直接水冷（图22）。为美国电力公司（American Electric Power）和许多欧洲电站制造的24台相同容量的发电机正在生产和安装中。

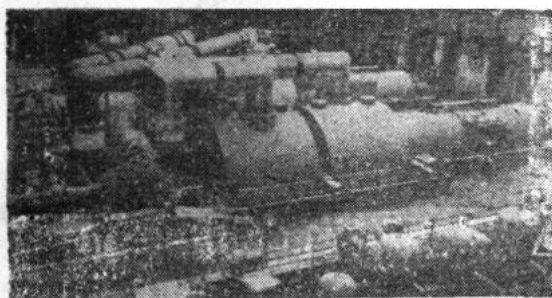


图19 美国田纳西流域管理局Cumberland 11 电站的双轴汽轮发电机组（130万瓩、60赫）

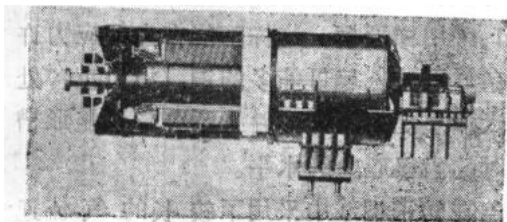


图20 72.2万千瓦安、22千伏、3600转/分、2极汽轮发电机（定子绕组水冷，转子绕组氢冷）

对于容量为80~120万千瓦安的氢冷2极发电机，采用在励端安装带2级风扇的压缩机的冷却方式（图21）。由于送气管和排气管布置在机座外部，因此电机的有效部分最符合运输条件的要求。同时，因为对风扇进行了仔细的空气动力学计算，从而降低了通风损耗。

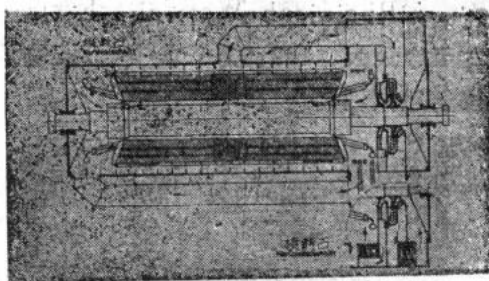


图21 120万千瓦安，27千伏，3000转/分，2极汽轮发电机（定子绕组水冷；转子绕组带2级径向的氢压缩机冷却）

在美国密执安州的AEP COOK电站的第一台133.3万千瓦安/110万瓩、1800转/分4极汽轮发电机已经完工（图22）。该发电机亦采用氢冷和定子绕组直接水冷，机组的结构可用于4极、60赫、150万千瓦安以上的发电机。

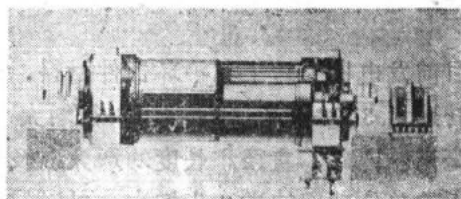


图22 133.3万千瓦安，26千伏，1800转/分4极汽轮发电机（定子绕组水冷，转子绕组氢冷）

对于100万千瓦安以上的2极发电机和120万千瓦安以上的4极发电机，现在已不用氢冷而愈来愈多地采用全液冷方式。图23示出了一台2极全液冷汽轮发电机的冷却原理。图中明显算出了将转子空间与定子隔开的气隙圆筒、定子绕组的水系统、锥形叠片式压板和铁心的油系统。绕组直接水冷的转子在0.5个绝对大气压下运转。定子内充满一种惰性气体（氮）。采用这种结构的发电机，单机容量大约可达170万千瓦安（60赫）和200万千瓦安（50赫），因此，该双轴发电机的总容量，可达340万千瓦安和400万千瓦安^[8]。

全液冷4极发电机也是按照2极发电机的原理制成的，单机容量可达300万千瓦安

左右。如Rheinisch-Westfälisch发电厂制造的至今最大的163.5万伏安4极发电机就是按上述原理制造的。

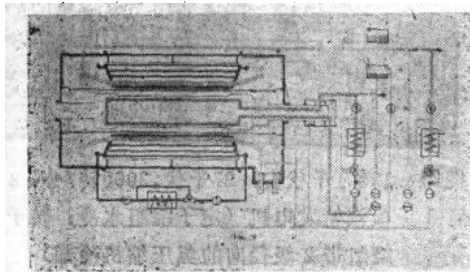


图23 一台全液冷汽轮发电机的冷却原理
(定子和转子绕组水冷, 铁心油冷)

随着运行经验的不断积累和发展, 可以预料2极发电机和4极发电机的容量还会进一步增大。因此, 液冷电机将提供一段必需的时间, 用以发展和研究下一代发电机——具有超导转子绕组的低温发电机。

〔原载(德)《Bulletin des schweizerischen elektrotechnischenvereins》, 1973, 64, №26, 1692~1703, 分所电工组译, 东方电机厂校〕

英国汽轮发电机设计的发展趋势

目前发电机的转子和护环锻件材料, 允许在转速为3000转/分时转子直径增大到1270毫米。因此, 直径和长度的增大以及与此相应的单位功率的进一步增大, 可以使转子氢冷的两极发电机的出力达到150万瓩, 而不需要采用任何根本的新概念。

伴随着增大的局部损耗和振动力, 可以通过严密的计算来加以限制。增大的电抗对稳定性的影响会成为一种限制, 但是可以通过进一步改进励磁控制来弥补, 特别是和汽轮机调节器控制一道考虑更为合适。空气隙中具有定子绕组的结构在尺寸、造价和性能方面有巨大的优越性, 而这类电机的实现则有赖于高度可靠性的结构设计。

发电机额定电压为23千伏, 功率因数为0.85, 短路比为0.5, 额定氢压为4.2公斤/厘米²。

转子和定子设计的改进已使比功率有了显著的增长。例如, 与50万瓩机组相比, 虽然短路比从0.4增加到了0.5, 输出功率增长32%, 而因定子重量(它是最重的一个部件)只增加15%。

这就使得设计、基础和建筑更经济, 但是为便于运输, 仍要求将铁心和绕组装配成为一个内定子, 装在气密的机座内, 并单独地运到工地。

采用最合理的机械设计和绕组冷却方案, 转子的比功率也达到了较高数值。最重要的特点有如下几点:

1. 采用梯形槽, 这样, 能在齿部应力许可的条件下放入尽可能多的铜, 沿齿上各处应力大体上是相同的, 并且不会超过矩形槽设计时的齿根应力的水平。

2. 在转子铜线中采用了较长的气流通道, 并具有较高的速度以增加紊流, 从而有较高的热传导率。

3. 采用进口处有导向叶片的离心式风扇, 以便提供转子通风系统所需的较高的压力。

转子容量提高后, 定子功率也可以随之增大, 因而获得上述经济性, 提高了线负荷, 就不可避免地使端部漏磁场增强, 局部的杂散损耗增大。因此, 在铁心端部结构中更多地采用了非磁性材料, 并在压圈上装设较

厚的铜屏蔽。匝圈及其屏蔽采用强化氢冷，以便在无需另加水冷回路的条件下保持允许的温度。定子铁心端部迭片段的厚度与中间段不同，以降低在超前功率因数时因漏磁场饱和而出现的温度。

定子线圈是由水冷铜导线组成，经换位以减小涡流损耗。水冷系统的成功经验，是从定子汽轮机通过绝缘管成对地给半线圈供水。外部水路装有在冷却水温异常时动作的普通警报器。

定子线圈的主绝缘采用Resitherm系统，它是由环氧树脂粘结云母带，沿整个线圈长度，通过加热加压完全固化而成的。

短路力和负载振动力比较小型电机中的力大些，因此端部绕组支承结构作了适当的加强。保留了在50万千瓦机组上用得较为满意的线圈端伸部份连续支承的结构。

在第一台发电机的一系列试验中，把一部份转子线圈与其余的线圈反接，这样，可使全负荷励磁时，定子短路电流不会超过额定值。除了采用通常的电阻法来测量平均温度外，还在绕组的50个点上安装了热电偶，来测量温度。测量结果表明，平均温升比英国最新标准的要求低得多。

实际上在4.2公斤/厘米²压力下进行的这些温度试验，表明在氢压远比额定压力低时，转子就能满负荷运行。

发电机将采用旋转励磁机和二极管装置，具有不用大电流滑环的优越性。

〔原载(英)《Electrical review》，1972，191, No 8, 272~276, 分所电工组摘译，东方电机厂校〕

未来的大型汽轮发电机

——200万千瓦电机的试验电机

近年来，随着锅炉和汽轮机容量的增大，汽轮发电机的单机容量也不断增长。在采用较大部件的情况下，这种增长之所以成为可能是由于改善了材料的机械强度，有了更完善的设计经验，以及有了更重大部件的运输能力，而主要的原因还在于改善了冷却技术，能更有效地排除电能损耗产生的热量。

最早的发电机采用间接冷却，初期用空气，后来用压缩氢气。直接冷却的采用则是一个突破，它使氢气与绕组直接接触。五十年代进步最大，当时发展了定子绕组直接水冷，使发电机单机容量以更高的速度增长。

转子绕组水冷为另一重大发展，Par-

sons公司正在制造两台水冷转子。第一台为在制造第二台之前检验其结构设计特性的样机，容量50万千瓦，准备安装在英国中央电力局Pembroke电站。目前，转子的冷却对于提高发电机的单机容量还不是一个限制因素；事实上制造150万千瓦以下的发电机都可不采用转子水冷。Parsons公司与中央电力局合作制造这两台发电机是为了获得必要的技术经验，并证明其生产能力完全能满足制造这样转子的需要。

未来发电机的单机容量

今后发电机的单机容量可达多大？如果冷却技术不是限制因素，那么什么是限制因

素?

1969年,已预计了如图1所示的发电机容量的增长速度^[1],但是从那时以来实际增长速度却因种种原因而慢得多。首先,是因为发现试运行的电站的总可靠性(包括锅炉、汽轮发电机组及所有辅助设备)落后于单机容量的增长;其次,是因为世界各国的需电量增长率减少;最后,则是因为最大机组必然要采用核动力,而在美国一环境保护组织(environmental lobbyists)却已大大推迟了它们的建造和今后更多的大型电厂的订货。

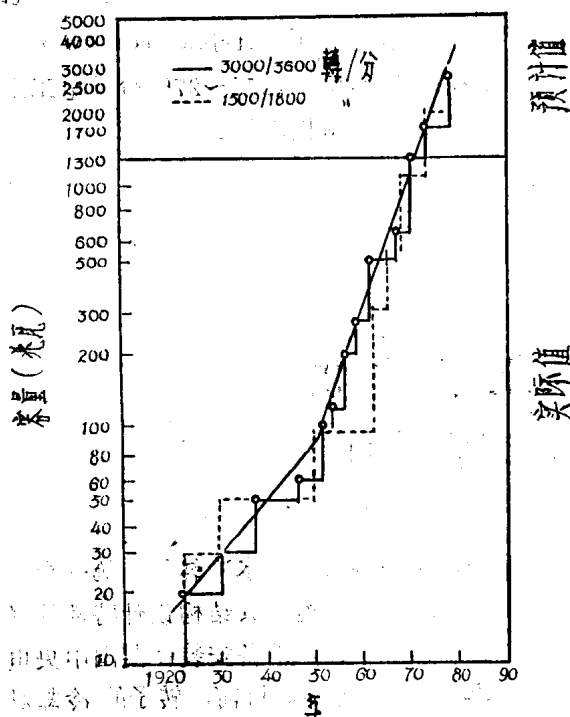


图1 1969年预计的单机容量增长率

然而,由于环境保护问题将被解决,则必然会增加对电力的需要。同时,随着电力系统的扩大,电站厂址的不足,只要电站的可靠性能提高,采用增大容量的汽轮发电机组将是经济的。因此,这也刺激了Pickering核电厂的建造,该电站由Ontario Hydro公司提供Candu式反应堆,Parsons公司提供63.5万千瓦安汽轮发电机组,目前已并网投入有运行记录的满负荷运行,其

净利用系数比预期的和以前同类电站所达到的都高得多^[2]。基于对这些因素的认识,对于150万千瓦高速(3000或3600转/分)和200万千瓦低速(1500或1800转/分)的发电机组,Parsons公司必须尽快具备得到验证的详尽的设计方案。

影响发电机单机容量的因素

发电机的容量P可用其有效材料(铁和铜)的尺寸和电、磁负荷表示:

$$P = K E_L B_L D^2 L n \quad (1)$$

式中: K—常数

E_L —电负荷(安培导体数/每厘米定子铁心周长)

B_L —磁负荷(即定、转子间气隙磁密)

D—定子铁心直径

L—定子铁心长度

n—转速

根据这个公式,设计者还能从哪个方面着手设计出更大容量的发电机呢?

大型发电机的转子一般设计成2极或4极转子转速便依电力系统的频率而定,即

$$f = np/60 \quad (2)$$

式中f为电力系统的频率,p为转子极对数。

所以,一台2极、50赫的发电机转速一定是3000转/分。

过去靠增加转子的直径已经得到了增大发电机容量的好处,但再要增加就受到绕组铜和护环钢的机械强度的限制。由于材料的强度未能得到重大改善,因此,在更大直径转子条件下这些部件尚不能承受所增大的离心力。过分加长定子铁心和转子本体也不行,因为转子长度/直径比增大,则转子挠度也增大,会使转子动平衡更加困难。其次,对尺寸也有一些限制,例如供应的转子锻件的最大重量应考虑到便于运输,但是这些问题至今已得到解决。

磁负荷可稍稍增加,但这种增加由于转子体、磁极和定子铁心齿中磁饱和的影响而

受到明显限制。电负荷则仍是一个能大大增加的因素。但是出现的大部分问题是按（电负荷）²成比例增加的。因此，近几十年来电

负荷的增长正使得发电机设计者面临的挑战越来越厉害。（图2）

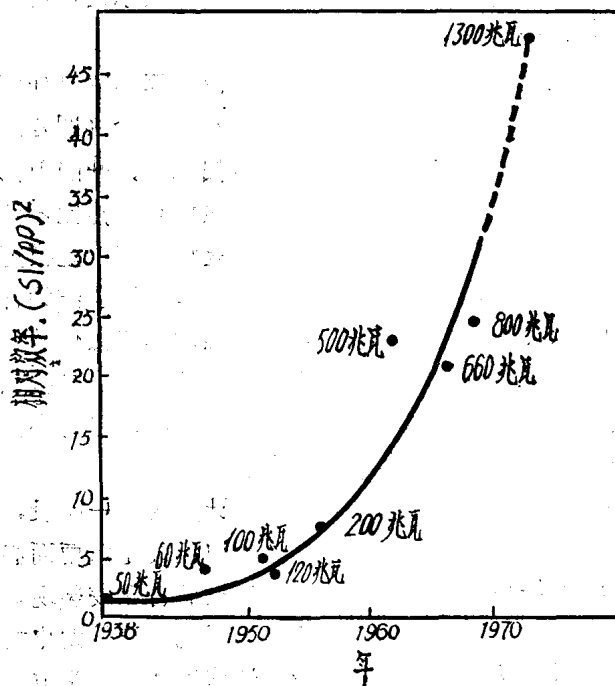


图2 近几十年来电负荷的增长

电负荷仅仅表明对发电机的设计会带来多少困难；显而易见，要从一台发电机获得更大功率，只不过是得到更大的电流，又因为电负荷是导体电流与定子铁心内径单位周长上导体数的乘积，所以它必定随电流成比例地增加。

为使部件的重量和机械强度保持在极限内，发电机设计者必须从越来越有限的条件中求得越来越大的单机容量，因为与锅炉或汽轮机设计者不同，他不能在系列中增加更多的发电机组，而只能从单机上获得他所需要的全部出力。事实上，在过去20年里，设计者们已成功地每单位重量有效材料所获得的电功率增加5倍（图3）。

增加电负荷的影响

那么，增大电负荷会引起什么问题呢？虽然增大电流使定子槽里线棒间的作用力增

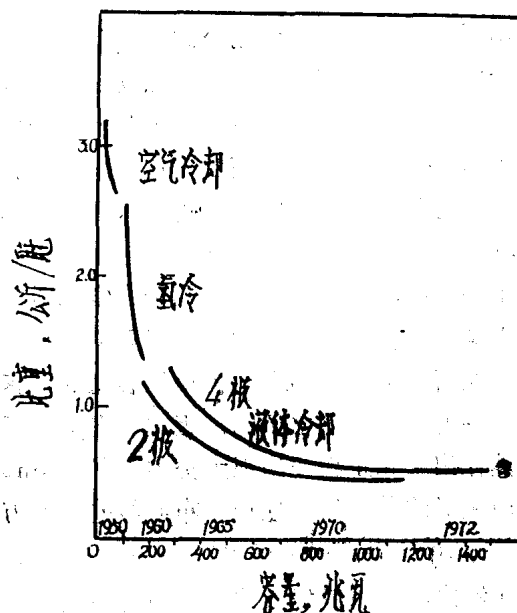


图3 单位有效材料重量的输出功率的增长