

# 国外机械技术资料

## 国外大型汽轮发电机发展综述

——七十年代初期水平——

哈尔滨大电机研究所编

第一机械工业部情报所

1973

## 前 言

根据我国大电机行业的发展需要，遵照毛主席“洋为中用”的教导，我们最近收集了国外近年来有关大型汽轮发电机方面的技术情报资料，编写了这本《国外大型汽轮发电机发展综述》。由此可一般地看出目前国外在发展大型汽轮发电机方面在六十年代末和七十年代初期的发展水平，以供广大工人、工程技术人员、领导干部、大专院校及有关方面参考。

由于受水平限制，加之时间仓促，错误和不足之处一定不少，望同志们批评指正。

——编 者

1 9 7 2

# 目 录

|                              |    |                                          |     |
|------------------------------|----|------------------------------------------|-----|
| 一、概述 .....                   | 1  | (四)材料消耗率 .....                           | 99  |
| 二、各国汽轮发电机的发展 .....           | 3  | 六、材料 .....                               | 100 |
| (一)美国 .....                  | 3  | (一)绝缘材料 .....                            | 102 |
| (二)苏联 .....                  | 6  | (二)硅钢片 .....                             | 103 |
| (三)日本 .....                  | 10 | (三)转子锻件 .....                            | 104 |
| (四)英国 .....                  | 17 | 七、励磁方式 .....                             | 108 |
| (五)西德 .....                  | 22 | 八、运行的问题 .....                            | 111 |
| (六)法国 .....                  | 25 | 1. 水系统装置与维护 .....                        | 111 |
| (七)瑞士 .....                  | 28 | 2. 振动 .....                              | 111 |
| 三、冷却技术的发展 .....              | 33 | 3. 异常运行 .....                            | 111 |
| (一)概述 .....                  | 33 | 4. 调相运行 .....                            | 112 |
| (二)国外几种冷却方式介绍 .....          | 34 | 九、国外发展汽轮发电机新品种 .....                     | 112 |
| (三)定子绕组的直接冷却 .....           | 34 | 1. 原子能电站用汽轮发电机 .....                     | 112 |
| (四)转子绕组直接冷却 .....            | 44 | 2. 大气隙绕组无槽汽轮发电机 .....                    | 112 |
| (五)各种冷却方式的比较及其<br>适用范围 ..... | 64 | 3. 超导体在大型汽轮发电机上<br>的应用 .....             | 113 |
| 四、结构与工艺 .....                | 68 | 附表 I 国外 20~30 万千瓦级汽轮<br>发电机技术经济性比较 ..... | 114 |
| (一)结构 .....                  | 68 | 附表 II 国外大型汽轮发电机<br>现代水平 .....            | 114 |
| 定子部分 .....                   | 68 | 附表 III 国外制造汽轮发电机企业<br>一览表 .....          | 115 |
| 转子部分 .....                   | 83 | 参考资料 .....                               | 115 |
| (二)新工艺 .....                 | 88 |                                          |     |
| 五、技术经济性 .....                | 93 |                                          |     |
| (一)额定容量与额定电压 .....           | 93 |                                          |     |
| (二)功率因数和短路比 .....            | 95 |                                          |     |
| (三)损耗与效率 .....               | 97 |                                          |     |

## 一、概 述

随着现代工业的迅速发展, 各国对用电的需求量不断增加, 从而相应的促进了电力和电机工业的发展。

1965 年~1970 年的几年中, 世界动力平均每年增长 7%, 发电量大约每十年增长一倍。表 1-1 为近几年来各国装机容量和发电量以及发电设备产量增长情况<sup>(1)</sup>。

表 1-1 几个主要国家发电量、装机容量及发电设备产量

|                      |                  | 美       | 苏      | 日      | 英      | 西 德    | 法      |
|----------------------|------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 发 电 量<br>(亿 度)       | 1965             | 11575.8 | 5066.7 | 1921.6 | 1959.9 | 1687.6 | 1014.4 |
|                      | 1970             | 16380   | 7400   | 3569   | 2459.6 | 2372   | 1407   |
| 总 装 机 容 量<br>(万千瓦)   | 1965             | 25451   | 11503  | 4100.4 | 4939.9 | 4060.3 | 2820.9 |
|                      | 1970             | 36120   | 16560  | 6734   | 6720   | 4953.4 | 3857   |
|                      | 其中火电<br>(%)      | 84.6    | 81     | 74.5   | 96.4*  | 90     | 60.6   |
| 发 电 设 备 产 量<br>(万千瓦) | 1965             | 1536.5  | 1440   | 403.2  | 705.1  | 479.3  | 224.4  |
|                      | 1969             | 3064    | 1270   | 1380   | 689.7  | 420.9  | 354.1  |
|                      | 1969年汽轮<br>发电机产量 | 2923.8  | —      | 816.8  | 679.3  | 373.4  | 281.3  |

\* 为 1968 年值

就电力和发电设备总装机容量而言, 国外现在分别以美国、苏联、日本、英国、西德、加拿大、法国、意大利、瑞士等国为先进。由于火电具有建站快和投资少的特点, 加之有些国家的能源分配关系, 很多国家的电力工业都是以火电为主。表 1-2 为几个国家 20 万千瓦以上的机组占火电站总容量的比例。表 1-3 为各国近几年的发电设备产量。

表 1-2 几个国家 20 万千瓦以上火电机组(2 极)<sup>(1)</sup>

| 国 别 | 年 份  | 火电机装机容量<br>(万千瓦) | 20万千瓦以上<br>机组台数 | 20万千瓦以上<br>机组容量<br>(万千瓦) | 所占总装机<br>比 例<br>(%) | 注                               |
|-----|------|------------------|-----------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 美 国 | 1970 | 23900            | —               | 9931                     | 41.5                | 仅为各电力公司统计数字, 实际火电站机组为 30543 万千瓦 |
| 苏 联 | 1970 | 12409            | 153             | 3840                     | 30.9                | 仅为电站部统计数字, 实际电站总装机容量是 13420 千瓦  |
| 日 本 | 1969 | 4017.2           | 55              | 1641                     | 40.8                |                                 |
| 英 国 | 1968 | 5746.4           | 44              | 1640                     | 28.5                |                                 |
| 西 德 | 1970 | 4475.5           | 26              | 746.9                    | 16.7                |                                 |
| 法 国 | 1970 | 2336             | 50              | 1355                     | 58                  |                                 |

近年来, 汽轮发电机发展的主要特点是, 在进一步提高单机容量的同时, 不断改善冷却系统、进一步降低材料消耗, 从而降低发电机造价。随着系统自动调节装置的进步, 发电机功率因数由 0.80~0.85 提高到 0.90; 短路比由过去的 0.58~0.60 降低到 0.4~0.5 左右。



表 1-3 若干国家几年来发电设备产量<sup>(1)</sup>(万千瓦)

| 国 别 | 项 目 \ 年 份 | 1965   | 1966   | 1967   | 1968   | 1969    | 增 长 率 (%) |       |
|-----|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|-------|
| 美 国 | 总 产 量     | 1536.5 | 1856.3 | 2321.3 | 2741.5 | 3064.0* | A         | 11.4  |
|     | 汽轮发电机     | 1374.4 | 1549.2 | 2014.2 | 2544.2 | 2923.8  | B         | 16.0  |
| 苏 联 | 总 产 量     | 1440   | 1340   | 1460   | 1450   | 1100    | A         | 6.9   |
|     | 汽轮发电机     | —      | —      | —      | —      | —       | B         | —     |
| 日 本 | 总 产 量     | 403.2  | 375.7  | 434.6  | 694.4  | 1100    | A         | 19.97 |
|     | 汽轮发电机     | 295.4  | 293    | 281.3  | 480.6  | 816.8   | B         | 21.1  |
| 英 国 | 总 产 量     | 705.1  | 1013.0 | 1080.2 | 698.9  | 689.7   | A         | 3.1   |
|     | 汽轮发电机     | 697.1  | 985.5  | 1068.7 | 686.7  | 679.3   | B         | 5.9   |
| 西 德 | 总 产 量     | 479.3  | 453.2  | 385.3  | 418.6  | 420.9   | A         |       |
|     | 汽轮发电机     | 458.4  | 365.2  | 333    | 390    | 373.4   | B         |       |
| 法 国 | 总 产 量     | 224.4  | 245.7  | 366.8  | 302.2  | 354.1   | A         | 5.12  |
|     | 汽轮发电机     | 152.6  | 165    | 258.9  | 244.9  | 281.3   | B         | 6.99  |
| 意大利 | 总 产 量     | 212.2  | 293.2  | 327.8  | 217.4  | 347.0   | A         | 11.8  |
|     | 汽轮发电机     | 117.2  | 22.1   | 236.2  | 106    | 310.6   | B         | 23.25 |
| 瑞 士 | 总 产 量     | 128.8  | 123.8  | 170.1  | 278.9  | 238.8   | A         | 3.98  |
|     | 汽轮发电机     | 87.7   | 92.8   | 137.9  | 195.2  | 204.2   | B         | 11.9  |

注 1. \*为订货量。

2. 日本的汽轮发电机产量系根据日本《电机》1966~1971年某月刊统计而得。

3. A为近十年平均年增长速度；B为平均年增长速度。

随着容量提高，发电机电压大多提高到 22~26 千伏。而励磁方式正向各种半导体励磁系统方向发展。

目前，美国 3600 转/分 单轴机组最大容量为 81.5 万千瓦，双轴机组最大容量已达 130 万千瓦。英国机组的典型容量为 50 万千瓦。到 1970 年中，24 台 50 万千瓦的机组已投入运行。英国下一步将制造 66 万千瓦机组。法国典型机组从五十年代的 12.5 万千瓦、六十年代的 25 万千瓦正向 60 万千瓦过渡，并有多台 60 万千瓦机组投入运行。日本自制的 70 万千瓦发电机已经制成。西德的 60 万千瓦，71.4 万千瓦机组将在 1973 年投入运行。瑞士继完成丹麦用的 30 万千瓦全水冷汽轮发电机后，又制成美国用的 72.2 万千瓦伏安（2 极）和 133.3 万千瓦伏安（4 极）水氢冷汽轮发电机。

关于汽轮发电机的冷却方式，国外大部分厂家都采用直接冷却。其中大部分为定子绕组水内冷、转子绕组氢内冷、铁心氢冷，但全氢内冷方式也为数不少。转子水冷现仍处于试制研究阶段，为数不多。氢冷电机的氢压随单机容量提高而增大，一般为 3~4 个公斤/厘米<sup>2</sup> 表压，最高有达 5.2 个表压。

由于世界上一些国家用电量的猛增，使得火电站燃料愈来愈紧张，为了寻找新的能源，国外原子能电站正在发展，从而四极汽轮发电机已提到发展日程上来。目前，原子能电站用汽轮发电机单机容量多在 50~100 万千瓦左右。

## 二、各国汽轮发电机的发展

### (一) 美国

#### 1. 概述

美国电力和电机工业占世界首位。1965年的发电量是11575亿度,1970年增至16380亿度。总装机容量1965年是25451万千瓦,1970年增至36120万千瓦。美国电力工业以火电为主,1970年的水电火电比为15.4:84.6(%)。表2-1为美国发电量及装机容量增长情况。

表 2-1 美国近几年来发电量及装机容量的增长

|      | 发 电 量<br>(亿度) | 总 装 机 容 量<br>(万千瓦) | 其 中 火 电<br>(万千瓦) | 火 电 所 占 比 例<br>(%) |
|------|---------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 1965 | 11575         | 25451              | 21002            | 82.5               |
| 1966 | 12494         | 26681              | 22112            | 82.9               |
| 1967 | 13173         | 28818              | 23935            | 83                 |
| 1968 | 14360         | 31012              | 25824            | 83.3               |
| 1969 | 15522         | 32990              | 27578            | 83.6               |
| 1970 | 16380         | 36120              | 30543            | 84.6               |

美国1960年电站装机有80%以上是由20万千瓦以下机组组成。1970年有84%是由40万千瓦以下机组组成。美国汽轮发电机容量等级较繁杂,如50~59万千瓦之间就有七种之多。汽轮发电机年产量超过了2500万千瓦,平均年增长率为16%。表2-2为美国八年来汽轮发电机产量增长情况。

表 2-2 美国汽轮发电机年产量(万千瓦)

| 年 份  | 产 量    |
|------|--------|
| 1965 | 1374.4 |
| 1966 | 1549.2 |
| 1967 | 2014.2 |
| 1968 | 2544.2 |
| 1969 | 2923.8 |

#### 2. 主要厂家及其汽轮发电机

美国垄断汽轮发电机的主要企业有通用电气公司(GE)、西屋公司(WH)及阿里斯查满公司(AC)。

美国的汽轮发电机生产在世界上一直处于领先地位。于1927年开始采用氢气冷却,1938年制成31250千伏安3600转/分氢冷汽轮发电机,1950年制成20万千伏安(四极)和129500千伏安(两极)汽轮发电机。1953年开始研究直接冷却技术,并首次用在26万千伏安汽轮发电机上。

美国至今对定子全油冷或全水冷(绕组和铁心)转子水冷一直未能采用。因此,美国的汽轮发电机虽作为定型产品而居世界领先地位,但就冷却技术发展来说是不全面的。

近几年来,美国汽轮发电机单机容量不断提高。81.5万千瓦机组已投入运行。接近100万千瓦安级发电机将陆续制成。美国大约每三年单机容量增长一级。1957年是30~35万千瓦安(转子直径是939.8毫米),1960年是40~45万千瓦安(转子直径1016毫米),1962年是50~55万千瓦安(转子直径1016毫米,长度比1957年长25%)。最近的容量已增长到80~85万千瓦伏安以上。以后的发展约按每年15%的增长速度,下一步发展的是96万千瓦伏安(转子直径1082毫米)。

发电机单机容量的增长,使电气参数进一步提高。功率因数已由0.85增到0.90。致于再进一步增到0.95,如果系统特性及保护方式不进一步改进是难以采用的。短路比有所降低,一般多为0.4~0.52。

根据美国对48座火电站预定1970~1973年投运的汽轮发电机进行普查结果,可以看出美国汽轮发电机目前所达到的水平<sup>(48)</sup>:48座火电站共新装机组58台,总出力达3297万千瓦伏安,平均单机出力为56.8万千瓦伏安。其中50万千瓦伏安以上的32台,总容量为2368万千瓦伏安。在冷却方式方面,定子绕组水冷转子氢内冷的32台,定转子全氢内冷的20台,全氢外冷6台。50万千瓦伏安以上的32台中水氢冷的占20台,全氢冷的12台。在这58台机组中5个氢表压的有9台,4个表压的28台,3个表压的15台,2个表压的6台。功率因数0.9的有51台(占58台的88%)。无刷励磁37台(占58台的64%)。单机容量最大的是Powertons电站的99.2万千瓦伏安,电压25千伏,功率因数0.9,5个表压的氢压,定子(绕组)水内冷,转子(绕组)氢内冷,预定在1972年运行。

据估计,最近几年单机容量将超过100万千瓦伏安。用现在的技术水平制造比现在单机容量大50%的发电机是可能的。如果改善冷却系统,单机容量可达到200万千瓦伏安。

美国近年来汽轮发电机布置有所改变,即由原来的双轴改成单轴。这样,在同样机组出力情况下使单机容量增加一倍<sup>(4)</sup>。

关于冷却方式,通用公司采用传统的水氢氢方式(定子绕组水内冷,转子绕组氢内冷,铁心氢冷),西屋公司采用全氢内冷方式。随着单机容量的不断增长和电负荷的提高,沿用

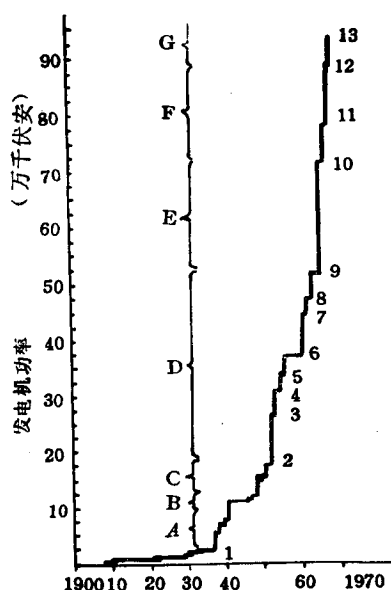


图 2-1 西屋(WH)公司汽轮发电机 (3600 转/分) 发展过程

图中: A-氢冷(0.5表压); B-氢冷(1表压); C-氢冷(2表压); D-氢冷(3表压); E-氢冷(4表压); F-氢冷(5表压); G-氢冷(5表压); 1-空冷; 2-18.2万千瓦伏安—1950; 3-27.1万千瓦伏安—1951; 4-32万千瓦伏安—1952; 5-35.2万千瓦伏安—1957; 6-38.4万千瓦伏安—1961; 7-46万千瓦伏安—1960; 8-48.6万千瓦伏安—1961; 9-53.5万千瓦伏安—1963; 10-73.3万千瓦伏安—1964; 11-80万千瓦伏安—1965; 12-90.7万千瓦伏安—1966; 13-94.8万千瓦伏安—1967。

的氢内冷系统已不能满足，因此两家公司都在转子氢冷系统上做了改进：即采用定转子气隙隔板结构，其目的是将轴向冷却长度分成几段使转子平均温升降低。采用气隙压力将冷却气体压入转子绕组中(WH)和使从转子逸出的热风不和进入转子绕组中的冷风相混流(GE)的两种结构，从而大大改善了冷却效果(图 2-3、4.5 为气隙隔板定转子)。

据报导，美国西屋公司容量超过 90 万千伏安的已将传统的定子绕组氢内冷改成水内冷，一台 90.7 万千伏安水氢氢冷却的汽轮发电机已在 1969 年制成。关于励磁方式，美国普遍采用半导体励磁系统。WH 为无刷励磁，GE 为静止整流的励磁方式。图 2-1、2-2 为西屋公司汽轮发电机历年来发展情况。表 2-3 为美国单轴 2 极大型汽轮发电机主要数据。

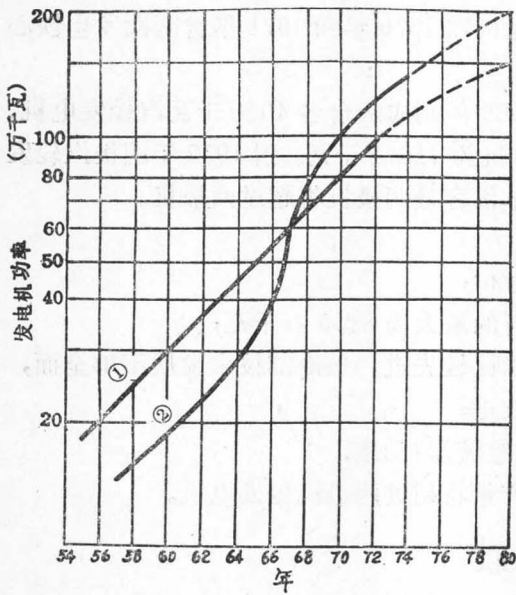


图 2-2 西屋公司汽轮发电机发展趋势  
①3600转/分；②1800转/分。

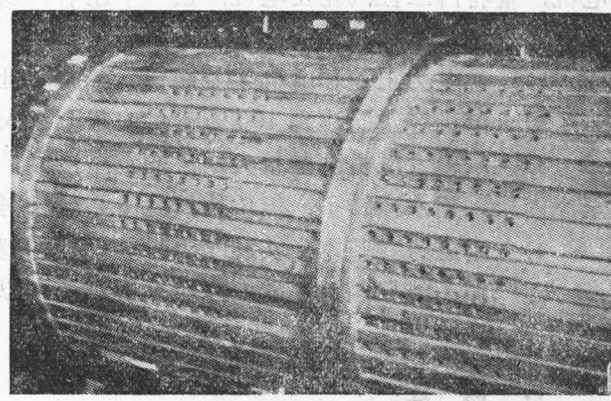


图 2-3 西屋公司带有气隙环形隔板的氢冷转子

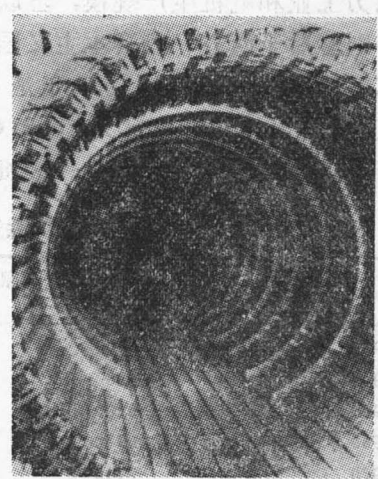
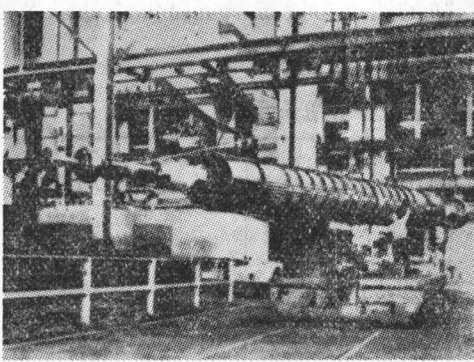


图 2-4 通用公司汽轮发电机带有气隙隔板的定子和转子外形  
(右图为定子、左图为转子)



表 2-3 美国单轴大型汽轮发电机<sup>(75)</sup>

| 制 造 公 司 | 容 量<br>(万千瓦安) | 电 压<br>(千伏) | 功 率 因 数 | 频 率<br>(赫) | 注             | 汽 机 出 力<br>(万千瓦) |
|---------|---------------|-------------|---------|------------|---------------|------------------|
| WH      | 90.7          | 26          | 0.9     | 60         | Mitchel №3 在制 | 76.4             |
| GE      | 90.8          | 26          | 0.9     | 60         | Monroe №1 在制  | 75.2             |
| GE      | 89.6          | 26          | 0.9     | 60         | 在 制           | 75               |
| WH      | 90.2          | 26          | 0.9     | 60         | 在 制           | 75               |
| GE      | 90.7          | 26          | 0.9     | 60         | 1969年投运       | 73.8             |
| WH      | 87            | 20          | 0.9     | 60         | 在 制           | 72               |
| GE      | 83            | 24          | 0.9     | 60         | 68年投运         | 71.5             |

据报导,美国 AC 公司制的双轴 100 万千瓦发电机在 1970 年和 1971 年曾两次发生铁心烧损造成重大停电事故。

美国原子能电站用四极汽轮发电机发展很快。1966 年制成两台各 40 万千瓦汽轮发电机,1970 年制成 8 台平均单机容量 75.5 万千瓦,最大单机为 110 万千瓦。到 1972 年四极汽轮发电机产量将占二极汽轮发电机产量一半左右。以后单机容量四极机将超过两极机。

### 3. 小 结

- 1) 就电力工业和电机工业而言,美国居世界首位;
- 2) 单机容量已达到 100 万千伏安级,投入运行的最大为 81.5 万千瓦;
- 3) 汽轮发电机已是量大面广的定型产品,技术比较先进。但冷却技术发展不够全面,至今尚未采用水冷转子,但传统氢内冷系统已得到改进;
- 4) 励磁方式基本上实现了半导体(无刷和静止整流器)励磁;
- 5) 原子能用四极汽轮发电机发展迅速。以后产量将超过两极汽轮发电机。

## (二) 苏 联

### 1. 概 述

苏联的电力和电机工业近几年来增长速度缓慢,由 1965 年以前的平均增长率 11.6% 下降到 1970 年的 7.9%。

电力工业和电机生产规模,苏联仅次于美国而居于世界第二位。但发电机制造水平和运行水平则落后于西方一般资本主义国家。

苏联的电站机装机容量 1966 年是 5450 万千瓦,1970 年增至 7400 万千瓦。其中火电为 13400 万千瓦,水电火电比为 10:81(%),因此苏联虽然水力资源很丰富但还是以火电为主。表 2-4 为苏联近几年来发电量、装机容量增长情况。

表 2-4 苏联近几年来发电量、装机容量增长情况

| 年 份  | 发 电 量<br>(亿度) | 装 机 总 容 量<br>(万千瓦) | 其 中 火 电<br>(万千瓦) |
|------|---------------|--------------------|------------------|
| 1966 | 5450          | 12300              | 9990             |
| 1967 | 5980          | 13500              | 11020            |
| 1968 | 6380          | 14250              | 11546            |
| 1969 | 6900          | 15500              | 12414            |
| 1970 | 7400          | 16600              | 13400            |

近几年来,苏联大力发展火电机组。据统计,1967 年苏联共有 154 台 15 万、20 万千瓦

机组投入运行, 约占火电站总装机容量的 35.3%, 单机 50 万和双轴 80 万千瓦机组已于 1967 年底投入运行。预计 1970 年初投入运行的大型机组将达到 209 台, 共 4300 万千瓦。

苏联现已成批生产 20 万、30 万千瓦系列汽轮发电机。50 万千瓦不同冷却方式的汽轮发电机于 1966 年同时由两家工厂制成。此外, 80 万千瓦汽轮发电机已于 1970 年完成, 并着手对 120 万千瓦机的技术设计工作。表 2-5 为苏联大型汽轮发电机基本数据。

表 2-5 苏联大型汽轮发电机基本数据

| 项 目 \ 型 号    | TBB-500-2 | TГB-500-2 | TBB-800-2 | TBB-1200-2<br>(设计) | TГB-500-4<br>(设计) | TBB-500-4<br>(设计) | TГB-1000-4<br>(设计) | TBB-1000-4<br>(设计) | TBM-500 |
|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------|
| 容 量(万千瓦)     | 50        | 50        | 80        | 120                | 50                | 50                | 100                | 100                | 50      |
| 转 速(转/分)     | 3000      | 3000      | 3000      | 3000               | 1500              | 1500              | 1500               | 1500               | 3000    |
| 功 率 因 数      | 0.85      | 0.85      | 0.9       | 0.9                | 0.85              | 0.85              | 0.9                | 0.9                | 0.85    |
| 电 压(千伏)      | 20        | 20        | 24        | 24                 | 20                | 20                | 24                 | 27                 | 36, 75  |
| 氢 压(表压)      | 4         | 3         | 4         | 4                  | 2                 | 3                 | 2                  | 3                  | —       |
| 转子本体直径(毫米)   | 1125      | 1120      | 1200      | 1250               | 1800              | 1800              | 1900               | 1900               | —       |
| 材料消耗(公斤/千伏安) | 0.65      | 0.59      | 0.58      | 0.457              | 0.755             | 0.825             | 0.63               | 0.623              | 0.58    |
| 短 路 比        | 0.42      | 0.45      | 0.475     | 0.437              | 0.45              | 0.5               | 0.54               | 0.63               | —       |
| 效 率(%)       | 98.8      | 98.8      | 98.82     | 99.03              | 98.6              | 98.6              | 98.9               | 98.9               | 98.92   |
| 瞬 变 电 抗(%)   | 36        | 36        | 31.4      | 36.1               | 37.2              | 40                | 39.3               | 39                 | 40.6    |
| 转 子 电 流(安)   | 3560      | 5120      | 3800      | 7720               | 4850              | 3440              | 4980               | 4980               | —       |
| 转 子 电 压(伏)   | 478       | 444       | 608       | 602                | 472               | 606               | 632                | 565                | —       |
| 励 磁 方 式      | 高频励磁机     | 水银整流器     | 高频励磁机     | 高频励磁机              | 无刷励磁              | —                 | —                  | —                  | —       |
| 冷 却 方 式      | —         | —         | —         | —                  | —                 | —                 | —                  | —                  | —       |
| 定 子 绕 组      | 水内冷       | 水内冷       | 水内冷       | 水内冷                | 水内冷               | —                 | —                  | —                  | 油内冷     |
| 转 子 绕 组      | 氢内冷       | 水内冷       | 氢内冷       | 水内冷                | 水内冷               | —                 | —                  | —                  | 水内冷     |
| 铁 心          | 氢         | 氢         | 氢         | 氢                  | 氢                 | —                 | —                  | —                  | 油       |

## 2. 主要制造厂及其汽轮发电机

苏联制造汽轮发电机的企业共有三家: 列宁格勒《电力》厂(Электросила)、哈尔科夫重型电机厂(Электротяжмаш)和新西伯利亚重型电机厂(НТГЗ)。大电机的科研部门有苏联电工科学研究院(НИИЭП, 在列宁格勒设有分院)、全苏机电研究所(НИИЭМ, 在列宁格勒设有分所)、科学院机电研究所(ИЭМ АН СССР)、苏联科学院动力研究所(ЭНИН АН СССР)以及科学院机械研究所(ИМАШ АН СССР)等。上述的工厂和研究部门互相配合从事大电机的科研工作, 其目的是研制经济性高运行可靠的大型发电机组。

《电力》厂是苏联发展最早生产规模最大的电机制造厂。生产汽轮发电机的主要产品有 TB<sub>2</sub>(氢外冷)、TBΦ(定子氢外冷转子氢内冷)和 TBB(定子水冷、转子氢内冷)系列。目前上述三种系列中的 TB<sub>2</sub> 系列除 15 万千瓦的和 TBΦ 系列的 10 万、20 万千瓦的外, 已被 TBB 系列取代。该厂今后着手生产 TBB 型产品。该系列共有 20 万、30 万、50 万和 80 万千瓦等规格。至 1969 年来, 已有 100 多台单机为 15 万千瓦或更大的机组总容量达 1600 万千瓦在运行中。

《电力》厂于 1966 年制成 TBB 型 50 万千瓦汽轮发电机。1967 年底投入运行。同型的 80 万千瓦机也已完成, 并于 1972 年投入运行。冷却方式为定子水冷、转子氢内冷。

《电力》厂对转子水冷技术也很重视。1957 年与全苏电工研究所共同着手对 3 万千瓦转子

水冷进行研究工作，并于 1960 年装于列宁格勒某电站试运行。以后又于 1961 年着手试制 20 万千瓦双水内冷汽轮发电机为以后制造更大型水冷汽轮发电机作准备。该厂的 50 万和 80 万千瓦 TBB 型发电机转子没有采用水冷，120 万千瓦机转子计划采用水冷方式。

哈尔科夫重型电机厂主要发展 TTB 系列产品。现已成批生产 20 万和 30 万千瓦汽轮发电机。

该厂于 1966 年制成 TTB 型 50 万千瓦双水内冷(铁心氢冷)汽轮发电机。TTB-500-4 型原子能电站四极汽轮发电机也采用水水氢冷却系统。

新西伯利亚重型电机厂是个新厂。1958 年开始研制 TBM 型独特的冷却系统。即定子(绕组、铁心)全油冷、转子水内冷，定转子间用气隙绝缘筒隔开，定子空间充入绝缘油。

该厂在 1962 年制成 6 万千瓦(10 万千瓦伏安)试验性 TBM 型汽轮发电机。1967 年~1968 年在吸收 6 万千瓦机经验基础上制成了 30 万千瓦 TBM 型汽轮发电机。该机安装在莫斯科电力系统的卡什电站，于 1968 年投入运行。现在正在制造 TBM-500-2 型 50 万千瓦汽轮发电机。

### 3. 重点产品特点介绍

#### 1) TBB 系列

定子绕组水内冷、转子绕组氢内冷、铁心氢冷。定子线棒为空心实心导线组合方式，采用将两个上下层线棒串联起来的水路。转子为气隙取气自通风，轴流式风扇(50 万千瓦机改为离心式)。三段式机座，立式冷却器放在机座的两个端部。采用在定位筋上开贯通沟的弹性定位筋以进行机座隔振。转子护环采用弹性中心环的三面紧配结构(50 万千瓦机改用悬挂式)。正压盘式油封(50 万千瓦机改为双流环式)。座式轴承。励磁系统是采用 500 赫芝的高频励磁机通过半导体整流器进行励磁。

#### 2) TTB 系列

定子和转子绕组均为轴向氢内冷(铁心氢冷)。50 万千瓦以上采用定转子双水内冷方式。定子为三段式，采用立式弹性板进行机座隔振。悬挂式护环。稳压盘式油封(50 万千瓦机改为双流环式油封)。端盖式轴承。励磁方式有水银整流器和无刷励磁。

#### 3) TBM 型

定子转子间的气隙中放置绝缘筒，定子铁心及绕组浸入绝缘油中。定子绕组采用油纸绝缘。额定电压较高为 36 千伏。气隙绝缘筒是用浸渍环氧树脂的玻璃布在设备上螺旋绕制而成。表 2-6 和表 2-7 为 TBB 和 TTB 型 50 万千瓦机温升和振动试验结果。图 2-6 和图 2-7 为苏联 TTB-500-2 型和 TBM-300-2 型汽轮发电机。

表 2-6 在额定氢压和冷却水流量时 50 万千瓦汽轮发电机主要部位的温升(°C)

| 各 部 名 称           | TTB-500-2 | TTB-500-2 |
|-------------------|-----------|-----------|
| 在额定电压下定子铁心的中心部分   | 16        | 25*       |
| 在额定电流下铁心边缘段的齿根    | 33        | 25        |
| 定 子 绕 组           | 10        | 16        |
| 在额定电流下定子绕组蒸馏水     | 22        | 21.7      |
| 在额定定子电流下转子绕组      | 41        | 15**      |
| 在额定的励磁电流(计算)下转子绕组 | 86        | 27.8      |
| 定 子 压 板           | 79.7      | 75.6      |

\* 在氢压为 1 个表压时代替等于 3 计示大气压的额定压力

\*\* 蒸馏水的温升

表 2-7 50 万千瓦汽轮发电机的振动特性

| 两倍振幅(最大值)微米 |                    |     | TBB-500-2(负载41万千瓦) | TTB-500(空载) |
|-------------|--------------------|-----|--------------------|-------------|
| 轴 承         | 垂 直 方 向<br>水 平 方 向 |     | 24                 | 31          |
|             |                    |     | 21                 | 22          |
| 集 电 环       | 内 外                | 环 环 | 160                | 150         |
|             |                    |     | 130                | 130         |
| 定 子         | 机 座                |     | 40                 | 50          |
| 定 子         | 铁 心                |     | 60                 | 65          |
| 基 础         |                    |     | 6                  | 4           |

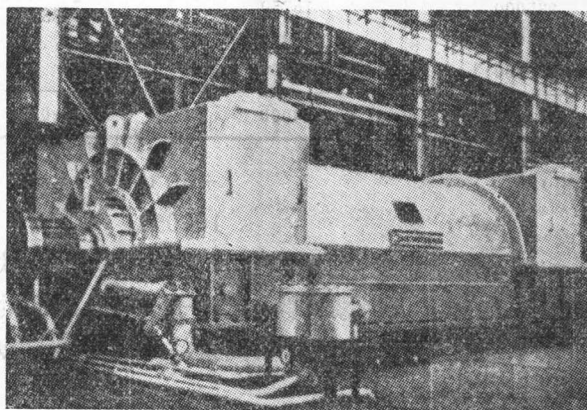


图 2-5 TTB-500-2 型 50 万千瓦水氢冷汽轮发电机外形图(哈尔科夫厂)

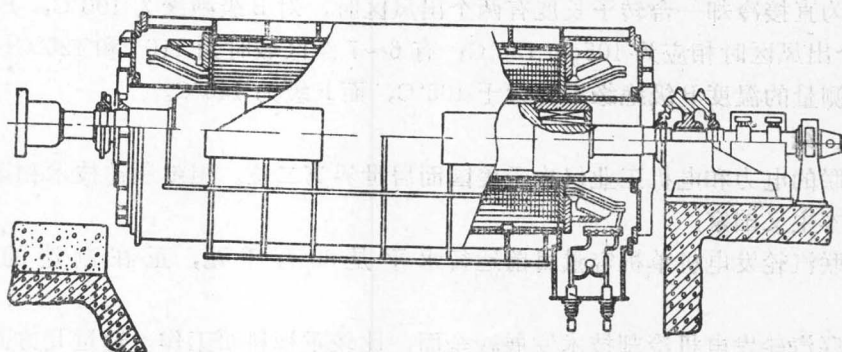


图 2-6 TBM-300-2 型 30 万千瓦定子全油冷转子水内冷汽轮发电机  
总体图(新西伯利亚厂)

#### 4. 汽轮发电机标准化情况

1968 年苏联为适应汽轮发电机的发展, 重新修订了汽轮发电机标准(ГОСТ533-68)。规定的标准数据列于表 2-8。

新标准中规定:

进入空气冷却器的水温  $+33^{\circ}\text{C}$

冷却气体的温度(空气或氢气)  $+40^{\circ}\text{C}$

表 2-8 苏联汽轮发电机新标准

| 容 量    |               | 电 压<br>(伏)  | 功 率 因 数   | 效 率<br>(%)  |
|--------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| (千 瓦)  | (千 伏 安)       |             |           |             |
| 2500   | 3125          | 3150, 6300  | 0.80      | 95.0        |
| 4000   | 5000          |             |           | 96.0        |
| 6000   | 7500          | 6300, 10500 |           | 96.4        |
| 12000  | 15000         |             |           | 97.0        |
| 32000  | 40000         |             |           | 98.2        |
| 63000  | 78750         |             |           | 98.4        |
| 100000 | 125000        | 10500       |           | 98.4        |
| 160000 | 188000        | 18000       | 0.85      | 98.6        |
| 200000 | 235000        | 15750       |           |             |
| 300000 | 353000        | 20000       |           |             |
| 500000 | 588200        | 20000       |           |             |
| 800000 | 941000~888900 | 24000       | 0.85~0.90 | 98.65~98.75 |

冷却液体温度(水或油)

+40°C

海拔允许高度不大于

1000米

新标准中规定, 定子和转子出水温度以及铁心均不得大于 80°C, 铁心和绕组的出风温度不得大于 95°C。考虑到采用 B 级和 F 级绝缘材料, 定转子绕组及铁心的允许温度如下:

用电阻测温计测出的定子绕组温度不得大于用间接法和直接测量冷却气或液体的值。对 B 级为 105°C, 对 F 级为 140°C。

用电阻法测量转子绕组温度, 当间接冷却时 B 级不应大于 130°C, F 级绝缘为 145°C; 当转子绕组为直接冷却一台转子长度有两个出风区时, 对 B 级绝缘为 100°C, F 级为 115°C; 当有 3~5 个出风区时相应为 105 和 120°C; 有 6~7 个区域时为 110° 和 125°C。定子铁心用电阻温度计测量的温度 B 级绝缘不得大于 105°C, 而 F 级为 140°C。

### 5. 小 结

1) 苏联的电力和电机工业仅次于美国而居世界第二位。但就制造技术和运行水平仍落后于西方资本主义国家;

2) 苏联汽轮发电机单机容量目前运行水平是 80 万千瓦, 正在制造的是 120 万千瓦;

3) 苏联汽轮发电机冷却技术发展较全面, 比较重视科研工作。通过几方面互相配合对水冷转子进行研制, 现已制成 30 万、50 万、80 万千瓦的水冷转子, 但缺少运行经验, 数量亦不多。

## (三) 日 本

### 1. 概 述

日本的电力及电机工业在战后(系第二次世界大战)发展非常迅速。1960 年日本总发电量还落后于加拿大, 而 1963 年赶上了西德, 1966 年至今又超过了英国。现仅次于美国和苏联, 居世界第三位。

1965 年日本总发电量为 1921 亿度, 1970 年增至 3569 亿度, 平均每年增长约 274.6 亿



度。1965 年的总装机容量为 4100 万千瓦, 至 1970 年增至 6734 万千瓦, 其中火电为 4724 万千瓦。

日本的电力原来以水电为主, 由于可开发的水力资源已日趋枯竭, 所以从 1962 年以后, 火电开始超过水电。1970 年水火电比为 29.9:70.1(%)。

日本一般蒸汽火电站燃料十分贫乏, 75% 以上的燃料依靠进口, 所以日本的电力工业缺少自力更生的基础。有鉴于此, 日本原子能电站用四极汽轮发电机今后将得到发展。表 2-9 为日本几年来发电站装机容量及汽轮发电机产量增长情况。

表 2-9 日本电站装机容量、发电机产量

| 年<br>份   | 项<br>目 | 电 站 装 机 容 量 (万千瓦) |        |               | 汽轮发电机产量<br>(万千瓦) |
|----------|--------|-------------------|--------|---------------|------------------|
|          |        | 总 计               | 火 电    | 火电所占比例<br>(%) |                  |
| 1965     |        | 4100.4            | 2472.9 | 60.3          | 295.4            |
| 1966     |        | 4481.4            | 2800.8 | 62.5          | 293              |
| 1967     |        | 4956.8            | 3244.4 | 65.5          | 281.3            |
| 1968     |        | 5265.0            | 3483.5 | 66.2          | 480.6            |
| 1969     |        | 5948.2            | 4017.2 | 67.5          | 816.8            |
| 1970     |        | 6733.6            | 4723.6 | 70.1          | 1266.9           |
| 1975(预计) |        | 10756             | 8380   | 78            | —                |

本表系根据[1](76)及《电机》(日文)整理而成

日本电机工业发展较快, 主要是依靠大量引进外国(主要是美国)技术, 使其在没有自己的科研基础上发展起来的。表面上看似乎走了一个“捷径”, 但却缺少自己的科研基础而全部依赖于外国。

日本汽轮发电机发展特点是, 首先引进一两台进口样机(包括资料), 然后仿制, 成功后正式工业生产, 在生产中又不断进行改进。自 1953 年首次引进 75000 千瓦样机以来, 每隔一两年就引进大一级容量的样机, 至 1964 年引进的 45 万、50 万和 60 万千瓦样机各一台为止的十年中, 共引进 17 台容量从 7.5 万千瓦至 60 万千瓦十二种不同规格的样机<sup>(77)</sup>。

日本的汽轮发电机单机容量增长很快, 现运行水平为 60 万千瓦, 70 万千瓦机组已在 1972 年制成, 预计 1974 年投入电站运行。目前, 汽轮发电机年产量已突破 1000 万千瓦。

日本的汽轮发电机冷却方式与美国相同(东芝和日立与 GE 同, 三菱与 WH 同, 富士与西德西门子同), 即定子绕组氢内冷和水内冷, 转子氢内冷。氢气压力为 3~4 个公斤/厘米<sup>2</sup>表压。发电机频率有 50 和 60 赫两种。

因为日本的几家企业分别同美国有关公司订有技术合同, 所以从日本的汽轮发电机上可以反应出美国汽轮发电机的特点。表 2-10 为日本制造的最大两极汽轮发电机。

## 2. 主要企业及其汽轮发电机

日本制造汽轮发电机的主要企业有东芝电气公司(TOSHIBA)、三菱电机公司(MITSUBISHI)、日立公司(HITACHI)和富士电机公司。这些公司除了生产火电设备外, 还生产其它电工产品。制造汽轮发电机以东芝公司规模为最大。

### (1) 东芝公司

该公司与美国 GE 公司有技术合同, 所以生产的汽轮发电机基本上和 GE 公司的相同。

表 2-10 日本制造最大的汽轮发电机(单轴二级)

| 电 站         | 容 量<br>(万千伏安/万千瓦) | 电 压<br>(千伏) | 功 率<br>因 数 | 短 路 比 | 频 率<br>(赫) | 冷 却 方 式 |    | 完成时间 | 制造公司 |
|-------------|-------------------|-------------|------------|-------|------------|---------|----|------|------|
|             |                   |             |            |       |            | 定子绕组    | 转子 |      |      |
| 中部电力·知多电站*4 | 80/70             | 25          | 0.9        | 0.58  | 60         | 水       | 氢  | 1972 | 东芝   |
| 关西·海南电站*4   | 67/60             | 22          | 0.9        | 0.58  | 60         | 水       | 氢  | 1971 | 东芝   |
| 关西·海南电站*3   | 67/60             | 18          | 0.9        | 0.58  | 60         | 氢       | 氢  | 1971 | 三菱   |
| 中部·渥美电站*2   | 62.5/50           | 22          | 0.85       | 0.58  | 60         | 水       | 氢  | 1970 | 东芝   |
| 关西·海南电站*1   | 50/45             | 22          | 0.9        | 0.58  | 60         | 水       | 氢  | 1969 | 东芝   |
| 关西·高砂电站*1、2 | 50/45             | 16          | 0.9        | 0.58  | 60         | 氢       | 氢  | 1970 | 三菱   |
| 东北·秋田电站     | 40.8(万千伏安)        | —           | —          | —     | 50         | 水       | 氢  | 1969 | 日立   |

于 1953 年开始采用氢外冷技术(64700 千伏安、转子外冷)。1960 年制造 28.16 万千伏安转子氢内冷发电机。1965 年采用定子绕组水内冷技术(用于 44.2 万千伏安)。图 2-7 为该公司历年来汽轮发电机单机容量增长情况。表 2-11 为该公司近几年来汽轮发电机年产量。该公司生产的氢冷汽轮发电机至 1969 年末已超过了 1000 万千瓦。

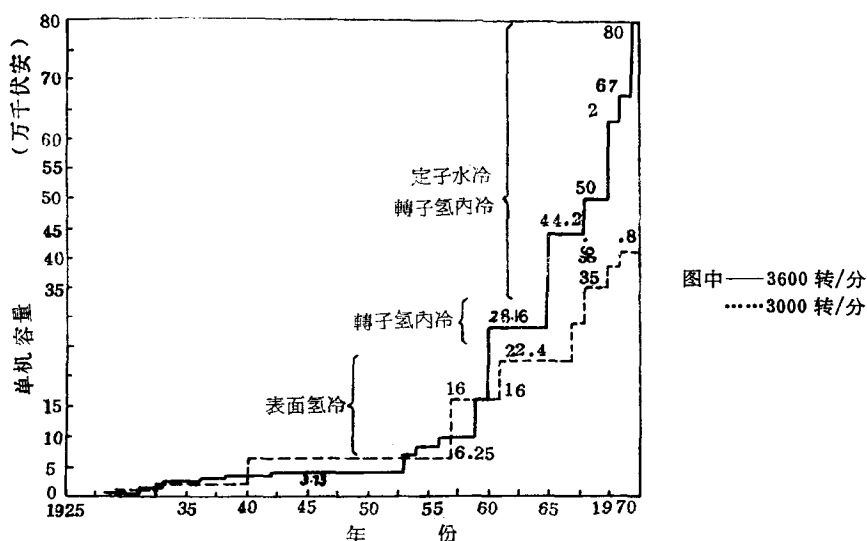


图 2-7 东芝公司历年来汽轮发电机单机容量的增长

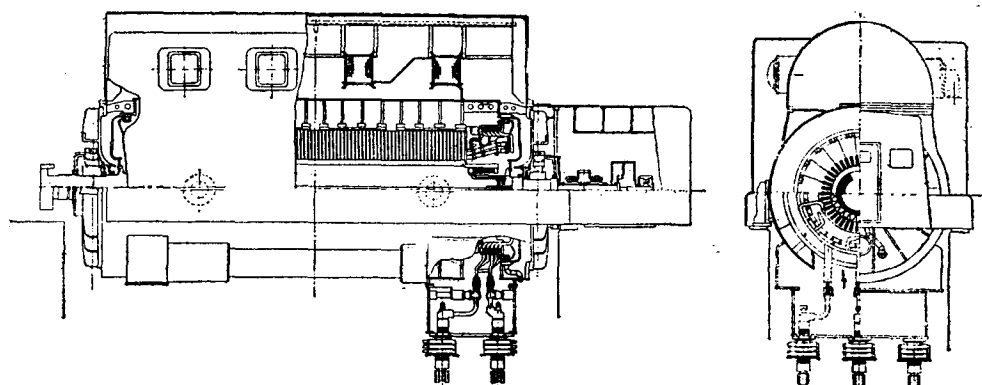


图 2-8 东芝公司 50 万千伏安汽轮发电机总体图(改进机座)

表 2-11 东芝公司几年来汽轮发电机产量\*

| 年 份  | 产 量 (万千瓦安) | 台 数   | 注                  |
|------|------------|-------|--------------------|
| 1966 | 137.2      | (6)   | (1) 括号内为事业电站用电机台数  |
| 1967 | 274        | 18(3) | (2) 产量包括事业电站用, 企业自 |
| 1968 | 400        | 12(7) | 用电及输出产量的总和。        |
| 1969 | 240        | 35(8) |                    |
| 1970 | 495.5      | 35(6) |                    |

\* 根据《东芝レビュー》1967—1971年№3统计而得。

东芝公司近两年来已制成 37.5 万千瓦、50 万千瓦和 60 万千瓦汽轮发电机(3600转/分)。70 万千瓦汽轮发电机已在 1972 年制成。汽轮发电机特点如下:

冷却方式: 10 万千瓦伏安以下采用氢外冷; 30 万千瓦伏安以下采用定子氢外冷、转子氢内冷; 30 万千瓦伏安以上采用定子水内冷、转子氢内冷。二极汽轮发电机转子采用气隙取气多流式氢内冷。转子槽楔上吸风孔和排风孔位置的配置原则是导体的最高温度和平均温度之比为 1.3 左右。50 万千瓦以上采用定子吸风区、排风区和转子相对称的所谓耦合通风方式。100 万千瓦级的氢内冷转子传统结构将进一步改进。

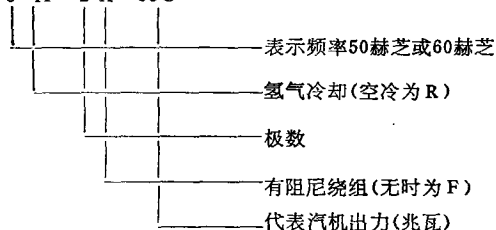
东芝公司目前正在研制一种转子蒸发冷却系统, 并作了一个 20 万千瓦的试验性转子。

结构特点: 汽轮发电机为整体机座, 采用轴向组合式弹性定位筋的隔振元件。立式冷却器。50 万千瓦以上的冷却器为横置机座上圆顶中(图 2-8)。端盖式轴承。单流环式油封。定子端部采用允许轴向有弹性的绑线结构。定子铁心用外圆穿心螺杆固定, 螺杆和扇形片相等。端部有铜屏蔽, 定子压圈为非磁性合金钢。定子槽部用柔软的经加热后硬化的配合形云母制品以充满空间。在槽侧嵌入波形弹性半导体聚酯玻璃板, 槽楔下面又打进一个斜楔以防止振动。定子绕组采用玻璃布环氧云母绝缘。励磁方式多采用半导体励磁的静止整流器和无刷励磁系统。

表 2-12 东芝大型汽轮发电机标准规格 (50赫芝)

| 型 号     | 容 量<br>(千伏安) | 电 压<br>(伏) | 功率因数 | 短 路 比     | 氢压<br>(表压) | 冷却方式 |     | 励磁容量 |     | 总 重<br>(吨) | 材料消耗率<br>(公斤/千伏安) |
|---------|--------------|------------|------|-----------|------------|------|-----|------|-----|------------|-------------------|
|         |              |            |      |           |            | 转子   | 定子  | 千瓦   | 伏   |            |                   |
| 5H2K550 | 634800       | 20000      | 0.9  | 0.58(0.6) | 4.2        | 氢内冷  | 水   | 2800 | 500 | 500        | 0.625             |
| 5H4K450 | 519900       | 20000      | 0.9  | 0.58(0.6) | 3.2        | 氢内冷  | 水   | 1300 | 500 | 430        | 0.827             |
| 5H2K350 | 408000       | 20000      | 0.9  | 0.58      | 3          | 氢内冷  | 水   | 1540 | 440 | 377        | 0.924             |
| 5H2K300 | 350000       | 18000      | 0.9  | 0.58(0.6) | 3          | 氢内冷  | 水   | 1140 | 375 | 320        | 0.915             |
| 5H2K250 | 290000       | 15000      | 0.9  | 0.58      | 2          | 氢内冷  | 氢外冷 | 1050 | 440 | 300        | 1.03              |
| 5H2K175 | 224000       | 16500      | 0.9  | 0.58      | 2          | 氢内冷  | 氢外冷 | 1000 | 440 | 260        | 1.16              |
| 5H2K135 | 150000       | 13800      | 0.9  | 0.58      | 2          | 氢内冷  | 氢外冷 | 700  | 370 | 212        | 1.40              |

注 1. 型号说明: 如 5 H 2 K 55 O



2. 括号内为标准值

这种无刷励磁方式已在 10 万千伏安以上的发电机上采用。据报导,已有 10 台投入运行、正在制造的(无刷励磁)达 30 多台。

经过整理现已形成汽轮发电机系列化。该公司汽轮发电机品种较多,规格繁杂。以 50 赫芝为例, 15 万千伏安至 63.48 万千伏安共七种规格, 60 赫芝的 18.2 万千伏安至 80 万千伏安的共十一种规格。功率因数多为 0.90, 短路比多为 0.58。电压 20、22 或 25 千伏。表 2-12 为东芝 50 赫芝汽轮发电机标准规格一览表。

### (2) 三菱电机公司

三菱公司与美国的 WH 公司订有技术合同, 所以制造的汽轮发电机基本是仿 WH 型的。该公司于 1959 年首次制成 208696 千伏安 18 千伏的转子氢内冷汽轮发电机。1962—1964 年分别制成定转子绕组全氢内冷 32 万千伏安 24 仟伏和 39.6 万千伏安 24 仟伏汽轮发电机。1970 年制成 45 万千瓦全氢内冷汽轮发电机。1971 年制成 60 万千瓦汽轮发电机。公司自 1959 年起至 1968 年止, 制造的氢内冷汽轮发电机已达 51 台, 总容量约 1350 万千伏安。

图 2-9 为三菱汽轮发电机历年来发展情况。表 2-13 为该公司几年来汽轮发电机年产量。目前, 公司的汽轮发电机年产量已接近 550 万千瓦。

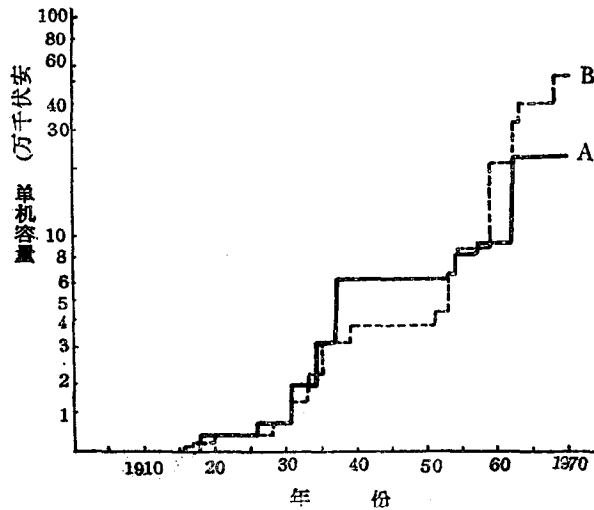


图 2-9 三菱公司汽轮发电机历年来发展

A——3000转/分  
B.....3600转/分

表 2-13 三菱电机公司近几年来汽轮发电机产量

|      | 产 量 (万千伏安) | 台 数    | 注                              |
|------|------------|--------|--------------------------------|
| 1967 | 118.4      | 19(5)  | (1) 括号内为事业电站用发电机台数。            |
| 1968 | 246.2      | 45(8)  |                                |
| 1969 | 275.5      | 37(13) | (2) 产量系包括事业电站、企业自用电和输出用发电机的总和。 |
| 1970 | 546.3      | 53(11) |                                |

注: 本表根据《三菱电机技报》1968~1971年№1 统计而得。

### 结构特点:

该公司汽轮发电机是仿 WH 型的, 为全氢内冷方式, 采用弹性板隔振机座。定子绕组原