

B760/760

第13篇 同 步 电 机

主 编	上之園親佐	(京 都 大 学)
执 笔 者	上之園親佐	(京 都 大 学)
	上之藺 博	(電力中央研究所)
	河 相 成 孝	(三 菱 電 機)
	永 田 一 良	(日 立 製 作 所)
	野 原 真 一	(東 京 芝 浦 電 氣)
	埴 田 明	(東 京 芝 浦 電 氣)
	森 安 正 司	(富 士 電 機 製 造)

译 者 白廷年

目 录

第1章 同步电机概论	13-1	6.1 相量图	13-21
1.1 有关同步电机的定义	13-1	6.2 特性	13-21
1.2 同步电机的分类	13-1	6.3 起动特性	13-22
1.3 同步电机的结构	13-2	6.4 起动方法	13-24
第2章 汽轮发电机	13-3	6.5 自动起动及自动控制方式	13-26
2.1 汽轮发电机	13-3	6.6 特殊同步电动机	13-26
2.2 结构、材料及通风方式	13-3	第7章 励磁方式	13-27
2.3 汽轮发电机的冷却方式、尺寸、重量及效率	13-5	7.1 励磁方式的分类	13-27
2.4 冷却方式	13-5	7.2 励磁设备的特性	13-28
2.5 结构上的几个问题	13-9	第8章 同步电机的运行	13-29
第3章 水轮发电机	13-10	8.1 并联运行	13-29
3.1 分类	13-10	8.2 同步电机的振荡	13-30
3.2 结构	13-10	8.3 稳定性	13-31
3.3 抽水蓄能电站用发电电动机	13-12	8.4 各种负载工况下的运行	13-31
第4章 同步电机的暂态常数	13-13	第9章 同步调相机及特殊同步电机	13-34
4.1 同步电抗	13-13	9.1 同步调相机	13-34
4.2 瞬变电抗及超瞬变电抗	13-14	9.2 同步变频器	13-35
4.3 标么值制	13-14	9.3 高频发电机	13-35
4.4 等值电抗与等值电路	13-15	9.4 正弦波交流发电机	13-36
4.5 时间常数	13-16	9.5 永磁同步发电机	13-36
4.6 电抗及时间常数的饱和系数	13-17	第10章 试验方法	13-37
第5章 同步发电机的特性	13-17	10.1 温升限度与试验	13-37
5.1 饱和曲线、短路特性曲线及短路比	13-17	10.2 耐压试验	13-37
5.2 相量图	13-18	10.3 电压变化率的计算	13-37
5.3 同步发电机的输出功率	13-18	10.4 损耗的测定与效率的计算	13-37
5.4 损耗、温升及冷却	13-19	10.5 各种参数的测定法	13-38
5.5 励磁电流计算	13-19	10.6 波形畸变率的计算	13-41
5.6 电压变化率	13-19	10.7 特性试验	13-42
5.7 稳态短路及突然短路	13-19	10.8 机械性能试验	13-42
第6章 同步电动机的特性	13-21	10.9 同步指示	13-42
		10.10 事故的判断及相应措施	13-43
		参考文献	13-43

第1章 同步电机概论

同步电机是由其极数与交流频率决定的按一定转速运转的电机。将此转速称为同步转速。同步电机的主要功能是机械能与电能之间的相互转换。

现在的工业交流电源,为保持其频率恒定而采用同步发电机。将同步电机接于交流电源作电动机运转时便成为同步电动机。同步电动机由于其恒定的转速特性和一般具有良好的功率因数等在工业中得到广泛应用。

同步电机也可用来进行电能形态的转换,即交流与直流之间的转换和交流频率与相数的变换,但其应用数量甚少。此外,同步电机还可用来调节电力系统无功功率和功率因数。

1.1 有关同步电机的定义

1.1.1 同步转速 绕组因通过交流电流而产生旋转磁场,当转速与旋转磁场的转速相等时称为同步转速。假定交流电机的极数为 P 、频率为 f (Hz),则同步转速可由下式给出。

$$N = 120f/P \quad (\text{rpm})$$

1.1.2 同步电机 在正常运转时以同步转速运转的交流电机,称为同步电机。

1.1.3 三相同步电机 电枢绕组接成三相绕组的同步电机,称为三相同步电机。

1.1.4 单相同步电机 电枢绕组接成单相绕组的同步电机,称为单相同步电机。

1.1.5 凸极同步电机 (凸极电机) 励磁绕组集中绕在每个突出的磁极铁心上,具有这种磁场的同步电机,称为凸极同步电机。

1.1.6 圆柱形转子同步电机 (隐极电机) 转子为圆柱形,励磁绕组分布嵌入转子槽内的同步电机,称为隐极同步电机。

1.1.7 感应子式同步电机 电枢绕组与励磁绕组均固定不动,仅被称为感应子的具有凸极结构的转子铁心旋转,这种结构的同步电机称为感应子式同步电机。

1.1.8 旋转磁场式同步电机 电枢固定不动,磁场旋转,这种结构的同步电机称为旋转磁场式同

步电机。

1.1.9 旋转电枢式同步电机 磁场固定不动,电枢在其内侧旋转,这种结构的同步电机称为旋转电枢式同步电机。

1.1.10 卧式同步电机 转轴被水平支撑的同步电机,称为卧式同步电机。

1.1.11 立式同步电机 转轴被垂直支撑的同步电机,称为立式同步电机。

1.2 同步电机的分类

1.2.1 同步发电机 通常,这种电机是备有直流励磁的励磁绕组,将接受的机械功率转换成三相或单相交流电功率的同步电机,一般称之为交流发电机。

1.2.2 汽轮发电机 是由汽轮机或燃气轮机驱动的卧式交流发电机。这种发电机是在高转速下运转,因此几乎是隐极电机。

1.2.3 水轮发电机 是由水轮机驱动的凸极发电机。水轮发电机有卧式和立式两种结构型式。

1.2.4 柴油发电机 是由内燃机驱动的卧式发电机。因驱动转矩不均,为使运转稳定,需增大飞轮效应。

1.2.5 同步电动机 将交流电功率转换成机械功率的同步电机,称为同步电动机。因同步电动机在稳定状态下只能以同步转速不能在其他转速下继续运转,所以这种电动机的用途仅限于恒定转速的负载。

1.2.6 同步发电电动机 是具有同步发电机及同步电动机两种定额的同步电机,主要用于抽水蓄能发电。

1.2.7 感应同步电动机 (是一种隐极式同步异步电动机——译者注) 是与绕组型异步电机的结构相似,用次级电阻起动法起动,在运转时转子励磁绕组通以直流,按同步转速运转的电动机。

1.2.8 带绕组型起励绕组的同步电动机 (是一种凸极式同步异步电动机——译者注) 是在凸极磁场的极靴部设置与集电环相连接的起励绕组,

用次级电阻起动法起动的同步电动机。

1.2.9 同步调相机 是在空载下运转的同步电动机,它通过调节励磁能够调节从电网吸收的无功功率或调节供给电网的无功功率。

1.2.10 同步变频器 将同步发电机与同步电动机互相连接起来,接受交流电功率,将其变换成不同频率的交流电功率。

1.2.11 高频发电机 是产生显著高于工频的高频交流电功率的同步发电机,一般采用感应子式。

1.2.12 反应式电动机 是由不带励磁绕组的凸极构成转子,依靠电枢电流产生磁场使转子旋转的同步电动机。

1.2.13 永磁式同步电动机(发电机) 是以永久磁钢产生磁场的同步电动机(发电机)。

1.3 同步电机的结构

同步电机是由磁路、电路及机械部分构成的。磁路由导磁性好和损耗小的强磁性钢片叠成的电枢铁心和磁极铁心等构成的。电路是由电枢绕组、励磁绕组、阻尼绕组、集电环、电刷及励磁装置等构成的。通常,同步电机是电枢绕组固定不动、励磁绕组及阻尼绕组旋转的旋转磁场式结构,所以将电枢称为定子,磁极称为转子。机械部分有支承定子的定子机座、支承转子的转轴(圆柱形转子为整体锻钢转子)、轴承及冷却装置等。

1.3.1 电枢绕组

(a) 绕组的种类(见第15篇2.1节)

(b) 各种绕组的特点及利弊(见第15篇2.1.3节(a))

(c) 相间连接(见第15篇2.1.3节(b))

(d) 并联支路数与极数的关系 双层电枢绕组的并联支路数,对整数槽绕组一般可采用极数 P 的约数,但对分数槽绕组则受到限制。即对分数槽绕组当每极每相槽数为 $q/p(=N/3P)$,式中 N 为总槽数, q 与 p 无公因数)时,则并联支路数须为 P/p 的约数。

(e) 槽内导体的挤流效应及导体换位^{〔1〕〔2〕} 当电枢槽内导体有交流电通过时,由于受槽漏磁通的影响,在导体内产生因挤流效应及涡流引起的损耗。防止此损耗的方法是将导体分成许多薄的互相绝缘的股线,并进行换位。通常,每个线圈的匝数

为1时,是将导体在槽内换位,匝数为2、3等情况下,在线圈端部换位。另外,还有在各相带内连接的线圈之间的连接部分进行换位的。

线圈匝数超过4以上时挤流效应的影响较小,多不需换位。设槽内导体因挤流效应及涡流引起的损耗为 K ,当用直流电阻损耗的百分率表示时,则

$$K = (K_s + FK_s) \times 100$$

式中 K_s : 涡流损耗 $= 6b\psi(f/60)^2(\pi nd^2/645)^2$;
 K_s : 挤流损耗 $= 0.28(f/60)^2(\pi bn^2d^2/645m)^2$;
 ψ : 三相电机、线圈节距为0时为1/4,1/3时为7/16,2/3时为13/16,1时为1,在上述各值之间按直线变化;
 b : (2倍铁心长)/(每匝线圈长);
 r : $(\rho h)/(ij)$;
 g : (股线带绝缘层) $\times$ (横排股线数);
 h : 股线带绝缘厚度;
 i : 槽宽;
 j : 股线厚度;
 n : 槽内高度方向股线总数;
 d : 股线厚度(mm);
 m : 线圈匝数;
 F : 与换位方式有关的挤流损耗的减少率,在槽内进行完全换位时 $F=0$,在同一相带内的相邻线圈之间的接头处换位时用下式表示^{〔3〕}。

$$F = \frac{15u(m/t)^2 + 1}{15m^2 + 1}$$

式中 t : 一个相带的线圈数;
 u : 三相全距绕组情况下一个相带的槽数为偶数时 $u=0$,奇数时 $u=1$,三相短距绕组情况下一个相带的槽中放置同相线圈边的槽数与放置异相线圈边的槽数均为偶数时 $u=0$,均为奇数时及一方为偶数另一方为奇数时 $u=1$ 。

一般对双层绕组如槽深为 H (mm)、频率为 f (Hz)时,则当线圈匝数小于 $0.43H^2 f \times 10^{-6}$ 时需进行换位^{〔4〕}。

(f) 线圈绝缘(见第15篇2.1.1节)

1.3.2 励磁绕组(见第15篇2.1.5节)

1.3.3 阻尼绕组(见第15篇2.1.8节)

1.3.4 感应电动势

(a) 感应电动势的公式(见第15篇2.2.1节(b))

(b) 与感应电动势有关的系数(见第15篇2.2.2节)

(c) 感应电动势的波形(见第15篇2.2.3节)

1.3.5 磁路(见第15篇2.3节)

1.3.6 漏磁电感(见第15篇2.4节)

第2章 汽轮发电机

2.1 汽轮发电机

汽轮发电机由汽轮机或燃气轮机驱动,多数由汽轮机驱动。因这类原动机采用高转速,效率高,所以要求与其直接连接的汽轮发电机也是高速电机。通常为两级旋转磁极式圆柱形转子电机,50Hz系列为3000rpm,60Hz系列为3600rpm。

通常,汽轮机与发电机直接连接,但输出功率在10MW级以下时,通过齿轮减速的情况也很多。发电机一般为两极电机,但对四级电机转子采用凸极式,有时也是经济的,所以1500rpm或1800rpm的发电机也得到应用,最大已制成15MW级(昭和50年制造)。

火力发电用大容量发电机,目前大部分都是两极电机,而用于原子能发电的发电机组,汽轮机因蒸气条件为低速机,发电机采用四级,由于容量大,其转子为圆柱形旋转磁极结构。

汽轮发电机制成三相电机,通常为Y形接线。一般为隐极实心转子,不装阻尼绕组,多用转子槽楔代用。但最近的大容量发电机,为了增加负序负载的承载能力,还有小容量发电机在较大的不平衡负载和整流负载下工作时,采取在转子槽楔下装设阻尼绕组的结构。

汽轮发电机的冷却方式有空气冷却、表面氢气冷却及内部直接冷却三种。空气冷却几乎不用开启式,小容量发电机多采用在空气进口处装设过滤器的开启管道通风式。在有可能使用冷却水的情况下,一般都用空气冷却器,空气冷却器安装在基础内或装在发电机本体内,以形成密封结构。而氢气冷却是全部将气体冷却器组装在发电机本体内以形成防爆密封结构。

最近的大容量发电机,其同轴汽轮机多采用以高压缸为主体的第一轴系和以低压缸为主体的第二轴系所组成的双轴机组,此时,第一轴系的发电机为两极电机,第二轴系的发电机为两极或四极电机。

2.2 结构、材料及通风方式

2.2.1 各部件名称及材料 图1表示定子线圈水冷式汽轮发电机的一例。各主要部件的名称与材质已注出。空气冷却汽轮发电机的全部结构比较简单,无轴承油密封装置(密封环,密封盖),此外,多用座式轴承来代替端盖轴承。

2.2.2 转子 转轴通常为整体锻造,将N、S磁极部分留出,其余加工出线槽,在槽内嵌入励磁绕组。转子剖面及磁通的分布状态如图2所示。

小、中、大型转子材料分别为碳素钢、碳钢,和Ni-Cr-Mo-V钢。汽轮发电机由于转速高,转子承受强大的离心力,其直径受强度的限制,同时从临界转速方面又限制其长度,所以转子在制造上有一定限度,使汽轮发电机的可能制造的最大容量受到限制。目前使用的最大转子,当转速为3600rpm时其直径为1100mm左右,3000rpm时为1200mm左右,总长达十几米。

对于临界转速,通常一阶临界转速约在额定转速的20~40%以下,但对大容量电机,其二阶临界转速也在额定转速以下。图3表示发电机容量与临界转速的关系的一例。

励磁绕组是嵌入转子铁心槽内的分布绕组,为了使线圈端部压紧,装有护环,为了压紧铁心部分的线圈,在槽上部装有槽楔。大型电机直径大,作用于绕组上的离心力亦增大,同时因轴的长度加长,使绕组的热膨胀与收缩也增大。由于以上两方面的作用,当使用一般铜导体时,因产生变形有可能成为故障的原因,所以应使用蠕变特性好的含银铜线。

在转子两端装设冷却用风叶,在与汽轮机相反一侧的轴端装有集电环。

2.2.3 定子 定子铁心是以硅钢片冲成扇形片叠装而成,但大型发电机的冲片有的为取向硅钢片。沿轴向每段铁心叠50~60mm,在每段之间为了形成通风沟放入I型钢间隔片(即通风槽钢——译者注)。

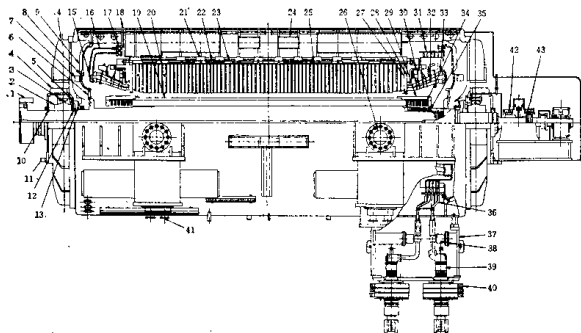


图1 定子线圈水冷式汽轮发电机剖面图

- 1—联轴器(锻钢) 2—轴瓦(铸铜及巴氏合金) 3—轴承座(低碳钢) 4—轴承盖(低碳钢) 5—密封盖(低碳钢) 6—风叶(锻钢或铝合金) 7—导向叶片(铸铝件) 8—导风环(铸铁) 9—挡风板(低碳钢或铸铁) 10—外侧挡油环(低碳钢及铝质) 11—定位键(低碳钢) 12—密封环(黄铜) 13—内侧挡油环(低碳钢及铝质) 14—端盖(低碳钢) 15—连接水管(不锈钢或铜) 16—绝缘引水管(聚四氟乙烯) 17—定子线圈冷却水汇水管(不锈钢) 18—定子机座(低碳钢板) 19—转子(锻钢) 20—定子铁心(硅钢片叠压) 21—间隔板(低碳钢) 22—定位筋(碳钢) 23—弹簧板(铝钢) 24—通风管道(低碳钢) 25—铁心通风沟(1变铜) 26—耳轴(锻钢) 27—端部压指(无磁性钢) 28—压板(低碳钢, 铸铁或无磁性铸铁) 29—护环(锻钢或无磁性钢) 30—屏蔽板(铜) 31—线圈支架(绝缘件) 32—线圈支架环(绝缘件) 33—定子线圈(铜线及绝缘) 34—转子线圈(铜线及绝缘) 35—转子引出铜排(铜) 36—定子线圈引出铜排(铜) 37—出线盒(低碳钢) 38—引出铜排支架(瓷瓶) 39—高压绝缘套管(瓷瓶及铜) 40—套管式电流互感器 41—氢气冷却器 42—电刷(石墨) 43—集电环(锻钢)

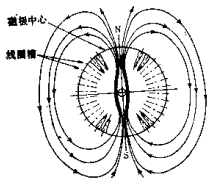


图2 转子剖面与磁通回路说明图

定子绕组通常为双层绕组, 由于是两极电机绕组端部较长, 采取特殊措施加强固定。因端部杂散负载损耗增大, 故端部结构件需采用无磁性材料等。

定子机座除支撑铁心外, 还可构成通风系统的风室。定子铁心由于磁拉力产生椭圆变形, 随着转

子的旋转, 其变形的位置在移动, 故产生2倍频率的振动。此振动值随容量的增大而变大, 故除小容量发电机外, 多在铁心与定子机座之间装设弹簧板以形成弹性支撑结构。

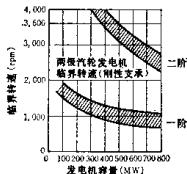


图3 发电机容量与临界转速的关系示例

2.2.4 通风方式 对于几千kVA级以下的发电机, 是采用从汽轮机侧和集电环两端吸入冷却

空气, 经过转子内部及气隙, 通过定子通风沟在铁心背部的定子机座内集中的通风方式。超过上述容量, 因铁心长度加长, 采用上述方法很难得到均匀冷却, 所以采取多路径向通风方式。

此种通风方式是将铁心背部的定子机座内部分几个进风室及排风室, 沿轴向交替配置, 冷却气体从发电机两端经过定子机座内的风道, 集中到各进风室, 由此进入定子铁心的进风侧通风沟, 沿径向流向发电机中心并到达气隙。冷却气体在气隙中沿轴向流动, 到达排风室一侧与冷却过转子内部的冷却气体汇合一起, 进入定子铁心的排风侧通风沟流向外径处, 在铁心背部的定子机座内的排风室集中。此热风经风道被集中, 到达风扇的吸风侧进行循环。图4为多路径向通风系统的一例, 即在定子机座内有2个进风室3个排风室, 共分5个风室, 空气冷却器或气体冷却器装在机座内的通风系统说明图。

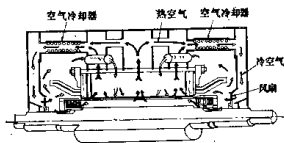


图4 通风系统说明图

2.3 汽轮发电机的冷却方式、尺寸、重量及效率

表1为各种冷却方式的发电机的定额、尺寸、重量及效率的示例。

2.4 冷却方式

2.4.1 概述 常规汽轮发电机的容量, 受转子尺寸的限制。即为了使励磁绕组的温升限制在标准规定值以下, 必须将转子绕组中的电阻损耗降至某一数值以下, 为此励磁所要求的安匝数受到限制, 发电机的安培导体数或利用系数不能大于某一数值。即当冷却方式相同时利用系数几乎为一恒定值。可是, 随着发电机容量的增加, 转子的尺寸也增大, 使冷却得到加强。

图5表示普通冷却方式的转子槽的形状, 小容量电机由于尺寸上的限制, 通常不设通风槽, 故在

冷却效果上要差一些。表2表示空气冷却发电机的利用系数为1时, 其他各种冷却方式的利用系数的一例。

正常空气冷却发电机的极限容量, 根据转子的制造限度, 3000rpm的发电机约为100MVA。

氢冷电机具有高的冷却效果, 早为人们所熟知。但为了防止封闭在发电机内的氢气泄漏及机内混入空气导致爆炸, 使结构复杂化。

为此, 正式采用氢气冷却并不很早, 我国约从1952年开始采用。采用氢气冷却的优点是: 一、因氢气极轻, 使通风损耗显著减小。在理论上氢气的通风损耗约为空气的1/14, 但因氢的实际纯度不是100%, 所以约为1/10。对于高速发电机, 因通风损耗在总损耗中占很大比例, 所以使效率大为提高, 一般可提高1~2%左右。二、提高冷却效果。

氢气与空气相比比重为0.07, 比热为14.35, 二者的乘积, 即热容量为0.966, 几乎与空气相同。这意味着当通过相同的流量, 冷却同一电气损耗的电机时, 气体本身的温升大致相同。

通常线圈导体的温升由(i)绝缘温差, (ii)冷却气体与绝缘表面或与铁心表面的温差, (iii)冷却气体本身的温升三部分占绝大部分。其中(i)与冷却气体无关。而(ii)在大气压下进行比较时, 氢气与空气比较约增加1.5倍左右。就(iii)而言, 在大气压下进行比较时, 氢气及空气吸收电损耗引起的温升大致相同, 但由于冷却气体本身的通风损耗引起的温升, 对于空气冷却时可达10℃左右, 而用氢气时由于通风损耗小, 约为空气时的1/10, 故可忽略。

如上所述, 由于采用氢冷而增大冷却效果, 使导热率提高和因通风损耗减少而使气体本身的温升大幅度降低, 考虑此通风损耗的显著减少, 可增强风扇作用, 使风量增加。一般在使用大气压下的氢气冷却时, 其有效铁心长度约为空气冷却时的60~70%。

采用氢气冷却的初期, 一般使用氢压比大气压高0.05atg左右, 而现在的氢外冷发电机使用氢压为2atg, 氢内冷发电机使用氢压为3~5atg。

提高氢压时, 因随着传热率的提高, 氢气的热容量也与其密度成比例增加, 所以使氢气本身的温升与氢气的绝对压力成反比减少, 增大冷却效果。

一般将同一台发电机带负载时, 如采用氢外冷

表1 汽轮发电机的冷却方式、尺寸、重量及效率示例

冷却方式	极数	容量 (kVA)	转速 (rpm)	电压 (kV)	功率 因数	各种负载下的效率 (%)			尺寸 (cm)				重量 (t)		
						100%	75%	50%	A	B	C	D	转子	定子	其他
转子空气冷却	2	37500	3000	11	0.8	98.0	97.7	97.0	668	367	290	80	13.2	47.6	20
定子空气冷却	2	37500	3600	11	0.8	97.7	97.4	96.5	626	367	290	80	11.4	40.7	20
转子氢外冷	2	192000	3500	18	0.85	98.75	98.59	98.17	1106	491	420	76	43.5	222	26
定子氢外冷	2	224000	3000	15	0.85	98.83	98.73	98.42	1081	457	382	76	50	228	29
转子氢内冷	2	300000	3500	17	0.85	98.88	98.81	98.56	1170	476	400	76	43	225	35
定子氢外冷	2	320000	3000	12.6	0.85	98.89	98.85	98.60	1247	503	435	76	52	260	40
转子氢内冷	2	500000	3600	16	0.9	98.88	98.76	98.42	1291	420	380	76	51	287	20
	2	670000	3600	19	0.9	98.84	98.83	98.64	1434	451	400	76	58	381	25
	4	630000	1800	19	0.9	98.87	98.85	98.62	1237	414	380	107	114	322	21
定子氢内冷	4	920000	1800	22	0.9	98.75	98.76	98.58	1423	465	430	107	166	441	24
转子氢内冷	2	634800	3000	20	0.9	98.79	98.83	98.74	1355	473	396	91	65	290	52
	2	800000	3600	25	0.9	98.83	98.82	98.63	1595	538	440	91	67	380	50
	4	911000	1500	17	0.9	98.93	98.98	98.90	1460	462	395	122	170	328	82
定子水内冷	4	1300000	1800	24	0.9	98.84	98.95	98.87	1473	592	430	107	177	559	35

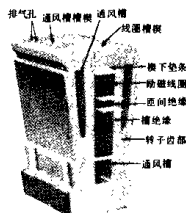


图5 转子槽说明图

方式, 氢压为 0.05 atg 时的输出功率为 100, 则 1 atg 时的输出功率为 115, 2 atg 时的输出功率为 125。氢气的温升在 0.05 atg 时为 20°C , 1 atg 时为 15°C ,

2 atg 时为 12°C 左右。

表2 各种冷却方式的利用系数之比值

冷却方式	转子 空气冷却	氢外冷	氢内冷	氢内冷	氢内冷	水内冷
定子	空气冷却	氢外冷	氢内冷	氢内冷	水内冷	水内冷
利用系数之比	1.0	2.0	3.0	3~4	4~5	6 以上

对于高速发电机, 因通风损耗在总损耗中占很大比例, 所以采用氢冷时的效率比空气冷却时提高 $1\sim 2\%$ 左右。由于提高效率、节约燃料费用受到重视, 氢冷小容量发电机也日益增多。

氢冷的其他优点是由于不存在氧气, 可使绝缘老化减缓以及噪声减小等。其缺点是混入 $30\sim 90\%$ 空气时, 因有着火爆炸的危险, 其外壳需制成气密

防爆结构。对于轴伸的防漏氢装置,通常是装设利用油膜的油密封装置,向油密封装置供油的密封油控制机构设在发电机外部,为了除去油中气体多采用真空处理方式。机内氢压靠自动补充氢气来维持。氢冷汽轮发电机也是由于转子强度等因素使发电机的制造容量受到限制,根据目前考虑的容量极限,3600rpm的发电机为200MVA左右,3000rpm的发电机可提高20~40%左右。上述制造极限并不表明当前实际的制造范围,为了考虑经济性,比上述容量低得很多的发电机也制成如下所述的内部直接冷却方式。

2.4.2 内部直接冷却 内部直接冷却是提高冷却能力的有效方式。为使绕组温升不受绝缘温度降的影响,是将导体用冷却介质直接冷却,其结构虽变得复杂些,但冷却能力可显著提高,这种冷却方式与氢外冷相比较,其有效铁心长度可缩短到70~50%。

内部直接冷却根据冷却介质的种类及冷却介质的通道可考虑各种配合,目前已研制了各种内冷方式。

作为冷却介质有氢气或水、油等液体,转子一般用氢冷,最近水内冷也得到实际应用,定子采用氢冷及液体冷却。

表3是在相同的通道截面上,通过的流量使温升为一定值时,为了比较各种冷却介质的传热能力而表示的各项数值。由此表可看出水的传热能力约为空气的50倍,是最优越的冷却介质。

(a) 转子内部直接冷却 一般采用氢气作为冷却介质。图6表示转子线圈截面图例。通风系统可大致分为从线圈端部输送氢气的端部压入式轴向通风系统和从气隙吸入、排出氢气的气隙取气式通风系统。

(1) 端部压入式轴向通风系统⁽¹⁾ 从转子端部压入转子线圈内的氢气,从转子中部通风孔逸出到气隙中。另外也有从转子一端进入线圈铜导体从另一端排出的通风系统。

转子线圈的截面形状大致分为旁路式和空心铜排式。这种通风系统如图7所示,氢气从线圈端部压入,为了能通过窄长的风道,需要特殊的高压风扇。通常采用这种通风系统时因定子线圈也采用氢内冷,所以此高压风扇被用于定子、转子线圈的冷却,装在转子的一端。因氢气进口与出口的温差是

流经风道的氢气质量流量的函数,所以提高氢压可降低温升,机内氢压一般取3~5atg。

(2) 气隙取气式通风系统⁽²⁾ 此通风系统如图8所示,在转子表面交替开有吸气孔和排气孔,利用旋转风速将气隙处的氢气从槽楔表面吸入,流经线圈铜导体内一定距离,摄取产生的热量,通过排气孔排至气隙。

表3 各种冷却介质的传热能力比较

冷却介质	比热	比重	实际流量	传热能力
空气	1.0	1.0	1.0	1.0
氢气0.05atg	5.25	0.138	1.0	0.75
氢气2atg	14.35	0.21	1.0	3.0
氢气3atg	14.35	0.28	1.0	4.0
变压器油	2.09	848	0.012	21.0
水	4.16	1000	0.012	50.0

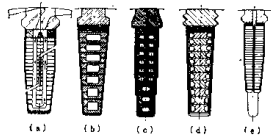


图6 转子线圈截面图例

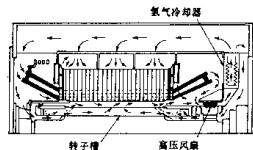


图7 氢内冷汽轮发电机端部压入式轴向通风系统图

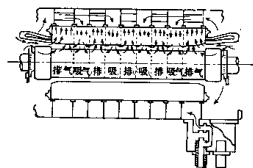


图8 氢内冷汽轮发电机气隙取气式通风系统图

此通风系统具有以下特点: (i) 调节吸气孔与排气孔的距离, 可进行高效率的冷却。 (ii) 由于是利用气隙处旋转产生的风速将氢气吸入与排出, (也就是对变成通风损耗的部分氢气加以利用), 为此, 不需提高转子风扇的风压, 不需特殊的高压风扇。 (iii) 由于从转子表面吸入与排出氢气, 所以可使转子的温度分布保持均匀, 具有最高温度为平均温度的 1.3 倍左右的较低温度的特点。

(3) 转子水冷⁽¹⁷⁾ 转子水冷技术最近发展很快, 特别是在欧洲及苏联试制的发电机已投入实际运转。转子采用水冷在原理上很简单, 但为了将水通入旋转物体中具有很多困难。其中之一是在旋转时不漏水, 并且为了制造可靠性高的发电机, 还存在结构上的和精密工艺上的问题, 另一问题是为了将水通入高速旋转体中, 要承受离心力产生的很大的静水压, 四极发电机产生的静水压为 100 atg, 两极发电机的静水压约为 200 atg, 进水、出水机构要具有热伸缩的挠性和电绝缘性能。这在机械上是非常复杂的技术。

西德克服了这些困难, 制成了四极 1500 MVA 发电机, 于 1975 年投入了运转。

(b) 定子内部直接冷却

(1) 氢内冷⁽¹⁸⁾ 使用氢气作为冷却介质, 如图 9 所示, 氢气在夹在股线之间的矩形通风管内流通。股线导体产生热量的一小部分通过热阻很大的主绝缘传至铁心被冷却, 但大部分是通过热阻很小的冷却管被氢气带走。所以线圈的温升是由导体与氢气接触表面的温度降和氢气的温升构成 (见图 7)。在转子上安装多级高压风扇, 被高压风扇加压的氢气, 从定子线圈端部的进风口送入, 平行流经上下线圈, 从另一端流出。

另一种冷却方式是氢气不仅通过线圈铜导体内部, 也在定子铁心中所开的轴向风道流通。采取这种冷却方式有助于缩短铁心长度和缩小铜与铁之间的温差, 并对绝缘有利。

氢内冷的优点是无特殊外部装置, 易于维护。此外也不必担心像液体冷却时存在的漏泄问题。其缺点是在线圈端部有氢气的进、出口, 未绝缘的高压部分裸露在外, 需要采取相应技术对策, 改变线圈端部的形状, 使异相之间离开、同相之间靠近。此外, 还需要特殊的多级高压风扇用于通风。

(2) 液体冷却⁽¹⁸⁾ 定子线圈的液体冷却, 在

初期阶段, 其冷却介质为变压器油, 但口前采用比热大、对流传热率高和容易取得的纯水。

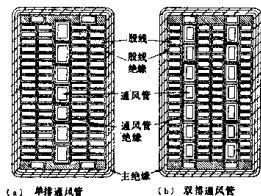


图9 氢内冷定子线圈截面图

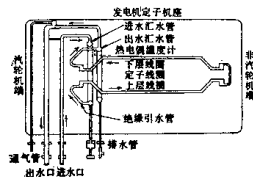


图10 液体冷却系统图 (串联双水路)

发电机内部的冷却水路如图 10 所示, 在汽轮机端装有冷却水汇水管, 由此汇水管通过绝缘引水管平行流入各线圈。首先流入上层线圈的液体在非汽轮机端流到下层线圈, 在汽轮机端的出水汇水管集中流出机外 (串联双水路)。对于大容量发电机, 为了减少线圈内的流体压降损失和减少上下层线圈之间的温差, 采取从非汽轮机端使冷却水平行流入上下层线圈, 在汽轮机端的出水汇水管集中流出机外的方式 (并联单流水路)。

流体管路为不锈钢管, 线圈及线圈端部的接头等的材料为无氧铜或脱氧铜。绝缘引水管一般为富有挠性、机械强度高和绝缘性能好的聚四氟乙烯管。图 11 表示定子线圈截面的图例, 股线为空心铜线, 液体在其中流通。

(3) 定子冷却方法的改进 随着发电机的大容量化, 定子线圈的冷却方法也有了改进。对于氢内冷方式, 过去是采用单排通风管方式, 但在此种方式中, 线圈股线的热流要经过三层股线绝缘和一层通风管绝缘, 产生很大的绝缘温差。图 9(b) 的双排通风管方式对降低绝缘温差有效, 用于大容量发

电机。

对于液体冷却所采用的新技术如图 11 所示,随着发电机的大容量化,股线由横向 2 排改为 4 排,冷却水路也由上下层线圈串联双流水路系统改用上下层线圈并联单流水路系统。最近,还有的改进是采用不同截面的上下层线圈。这是由于定子槽内上层线圈的涡流损耗比下层线圈的涡流损耗大,在上下层线圈形成温差,这个问题对线圈长度短的发电机不突出。可是对大容量发电机,由于线圈长度加长,存在由于温差而引起上下层线圈的伸缩差问题。为了减少上下层线圈的温差,上层线圈与下层线圈采用不同截面(见图 12)。



图 11 液体冷却定子线圈截面图

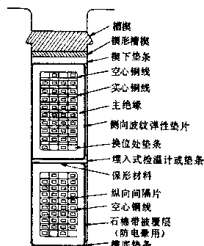


图 12 水冷定子线圈截面

2.5 结构上的几个问题

汽轮发电机的单机容量由于冷却方式的改进而增大。因此,其单位重量的输出功率颇为可观,也就是其利用系数及安培导体数急剧增加。为此,在结构上要做各种改进。

(a) 定子线圈的固定^[9] 随着发电机容量的增大,通过线圈的电流急剧增加。不论作用于槽内和线圈端部的相当于工作频率两倍的电磁力及短路故障时的电磁力都变得很大。为此,槽内的绝缘线棒

上下表面应垫以柔软的近形云母垫条,将上下层线棒嵌入槽内后,在加压下进烘房固化,在线棒与单侧槽壁之间应涂以具有弹性的半导体填料,并以斜楔与对头楔紧,以防止线棒在槽内松动。(见图 12)。

对于线圈端部,特别是由于从铁心伸出的端部很长,需要加强固定。端部固定采用近形间隔垫块、用浸合成树脂的玻璃丝绳绑扎以及在组装后将全部线圈喷涂合成树脂等方法。有些大容量电机要考虑采用在热伸缩时线圈沿轴向能有相对位移的端部固定结构。

(b) 对定子铁心端部损耗采取的措施^[10]

汽轮发电机的大容量化和随之引起的利用系数、安培导体数增加的同时,减少由于定子铁心端部漏磁通引起的杂散负载损耗的措施和加强冷却已成为重要问题。过去,对定子铁心端部的结构件,采用以无磁性材料制成,以减少漏磁通;并对于像压圈那样的大结构件以电屏蔽板覆盖,以减少损耗。

最近的大容量发电机如图 13 所示,在端部压指与压圈之间,以硅钢片叠成的磁分路环,使定子铁心端部的漏磁经磁分路环中均匀地流道,这种结构可防止铁心端部由于漏磁而引起的过热。

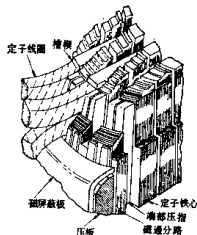


图 13 汽轮发电机定子铁心端部结构图

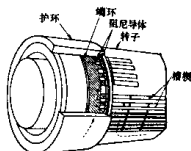


图 14 内部直接冷却转子端部说明图

(c) 考虑不对称负载运行时的转子结构^[11]

在三相对称负载状态下,各相电流只有正序分量,而在不对称负载状态下,由于尚有负序分量电流在电枢绕组中流过,所以在转子上感生2倍额定频率的涡流。此涡流仅限于转子表面,对于隐极汽轮发电机转子,这个双频电流在转轴表面、护环和转子槽楔上流通。

当连接整流器和电炉等含有谐波的负载时,其谐波电流也与负序电流的情况相同,在转子表面有

涡流通过。

随着发电机容量的增大,利用系数和安培导体数也相应地大幅度增加,所以即使负载的不平衡率相同,转子表面单位面积的涡流电流密度或损耗也增加。因此根据发电机的冷却方式或容量,在降低不对称负载的极限值的同时,为了提高不对称负载的承载量,在转子端部装设阻尼导体及端环时(见图14),在转子全长的槽楔下设置铜排作为阻尼条等结构。

第3章 水轮发电机

3.1 分 类

山水轮机驱动的发电机,称为水轮发电机。水轮发电机有卧式和立式结构,卧式的比立式使用的要少,一般多为小容量发电机,它与电厂自用水轮机或与特殊水路条件下的卧式水轮机例如贯流式水轮机直接连接。立式结构与卧式结构相比,具有水轮机结构上合理性以及机组占地面积小的特点,对水轮发电机则专用立式结构。立式结构根据轴承的布置分以下几种型式。

(a) 悬式 推力轴承设在转子上部的结构[图15(a)]。

(b) 全伞式 推力轴承设在转子下部的结构[图15(b)]。全伞式在转子上部不设置导轴承。

(c) 半伞式 此种结构在转子下部设置推力轴承及导轴承,而在转子上部也设置导轴承[图15(c)]。

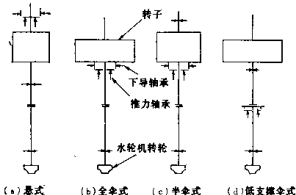


图15 立式水轮发电机的轴承布置

(d) 低支撑伞式 此种结构是将推力轴承设置在水轮机顶盖上[图15(d)]。

水轮发电机的冷却方式有将厂房内的空气直接引进机内,热风从风道引至通风管道再排出厂外的出口管道通风式和将室外的空气从通风管道经过风道引进机内,再从风道引至另一通风管道排出厂外的两侧管道通风式。大容量发电机的冷却方式则多数为热交换器式,即将机内空气通过空气冷却器进行循环冷却。此外,还有将电枢线圈或励磁线圈内部通水直接用冷水冷却的方式,但要引起飞轮力矩(GD^2)减小、瞬变电阻增加、短路比减小和检查维护范围扩大。

水轮发电机励磁方式一般为静止晶闸管励磁。水轮发电机制造的实际成绩如图16所示。

3.2 结 构(见图17)

3.2.1 定子 定子机座为了便于运输分成2至12瓣。铁心以0.35mm或0.5mm厚硅钢片冲制的扇形片顺次相错半片叠成圆形,用压板和螺栓紧固。每隔40~60mm厚铁心段设6~13mm通风沟,在定子机座分瓣处是将扇形冲片在中部分开,在合缝处进行对接。

定子线圈是以绝缘扁铜线叠成长方形导体,外周包绕云母,以聚酯树脂或环氧树脂等热固性无溶剂漆浸渍并进行加热、加压制成。也有采用预先将云母带用树脂处理的预浸绝缘方式。为了消除线圈匝间绝缘的故障,多采用单匝线圈。由于发电机的槽电流过大或过小时均不经济,所以在选定电压时

需要考虑发电机规格、磁极数和并联支路数等,图18表示发电机电压随输出功率增加的趋势。

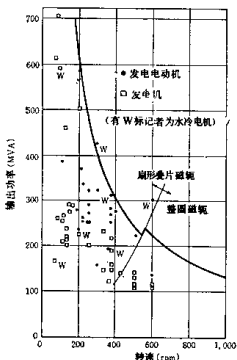


图16 水轮发电机制造的实际成绩

绝缘等级以B级为主,但耐热等级高的F级绝缘也已在实际应用。

3.2.2 转子 转子磁轭有用以下两种结构。

(a) 整圆结构 是用环状钢板叠成的磁轭或环状锻钢直接与转子支架或主轴相配合的结构。小容量发电机也有以铸钢制造的情况。

(b) 扇形结构 低速大容量发电机因其磁轭外径增大,由于运输上的原因需采用拼装的叠片磁轭结构。该结构是用3.2~6mm厚的扇形钢板沿转子支架外缘,每层将接缝错开叠装成整圆,再用磁轭拉紧螺杆把紧。

转子支架多制成钢板焊接结构。

磁极用1.6~3.2mm厚的钢板冲片叠成,借磁极压板用螺栓或铆钉紧固,套入励磁线圈,固定在磁轭外缘开设的鸽尾槽内。励磁线圈用扁铜线扁绕,层间用石棉纸绝缘,线圈上下端垫以绝缘托板,套入磁极铁心。磁极铁心与励磁线圈之间进行绝缘,但励磁线圈的外表面一般不绝缘。为了防止励磁线圈因离心力的侧向分力使线圈沿侧向外胀,有时在两磁极间装设励磁线圈撑块。

3.2.3 轴承 推力轴承是由镜板和由几块到多至20块的扇形瓦以及支承结构所构成,并安装在

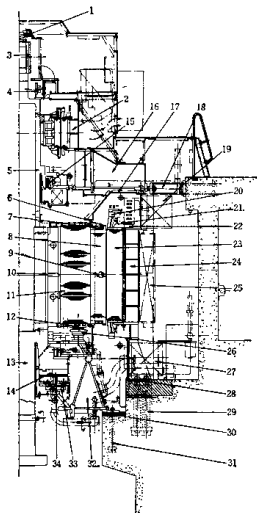


图17 立式水轮发电机(265 MVA/277MW发电电动机之例)

1—调速器用永磁发电机 2—启动用同轴连接电动机 3—电动机用集电环 4—集电环 5—上端轴 6—阻尼绕组 7—励磁线圈 8—磁极铁心 9—励磁线圈撑块 10—转子支架 11—转子磁轭 12—制动环 13—下端轴 14—推力轴承镜板 15—上导轴承 16—上机架 17—上挡风板 18—防振支撑千斤顶 19—上部通风用鼓风机 20—定子线圈 21—定子铁心拉紧螺栓 22—定子叠压板 23—定子铁心 24—定子机座 25—空气冷却器 26—制动器兼油压千斤顶 27—下部通风用鼓风机 28—定子基础板 29—定子基础螺栓 30—下机架基础板 31—下机架用基磁螺栓 32—下机架 33—弹性托盘 34—推力轴承瓦

在油槽内。油冷却器可设置在油槽内或油槽外。

(a) 支柱式推力轴承 每块轴承瓦被支承在瓦背面一点,运行中在镜板与轴瓦之间形成楔形油膜。一点支承有支柱螺钉、杯形弹性托盘和板簧等结构。

⊙ 原书误为上部通用プロウ。——译者注

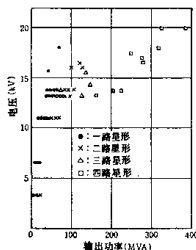


图18 单匝线圈发电机的制造实例

(b) 弹簧式推力轴承 每块轴承瓦以许多弹簧支承,在进油边少放置一部分弹簧,成为易于自动调节的结构。

导轴承有扇形和筒形结构。推力轴承处的导轴承通常设在推力轴承油槽内。

3.2.4 制动器 机械制动器的压力传动源为气压或油压。制动块是由石棉编织物或石棉粉末合成,或者用树脂固化而成。也有采取电制动方式,即将发电机的输出回路接以适当的电阻短路或直接短路后,供给励磁将转动能量转换成电阻损耗。

3.2.5 与水轮机型式有关的结构特点 发电机必须适应水轮机的 GD^2 、飞逸转速和水推力等要求进行设计。当水轮机要求的 GD^2 比发电机的标准 GD^2 大时,需要在设计时加大转子外径或铁心长度。NEMA的数据表⁽¹²⁾可作为发电机 GD^2 的一例。将此数据表用最小二乘法进行数学公式化,如下式所示。

$$GD^2 = 0.6 \times 10^6 (MVA)^{1.25} (rpm)^{-1.98} (t \cdot m^2)$$

混流式水轮机所要求的 GD^2 多为上式的 1.0~1.5 倍左右,而飞逸转速一般约为 160~200%。

冲击式水轮机所要求的 GD^2 一般较上式为小,另外因水推力极小,所以与其直接连接的发电机比混流式水轮机直接连接的发电机的重量要轻。

轴流式水轮机的飞逸转速较大,为 200~300%,水推力也大,所以与其直接连接的发电机比混流式水轮机直接连接的发电机要重。

对于斜流式水轮机,其水轮机特性约处于混流式与轴流式之间,但因水轮机转轮与固定部分仅有 1~5mm 的狭窄的斜向间隙,所以需要注意水轮机

转轮的轴向位移。

3.3 抽水蓄能电站用发电电动机

3.3.1 结构 发电电动机与一般水轮发电机相比,因频繁起动、停机,须考虑交变应力以及冷热循环,故必须采用坚固的线圈。因制动器经常工作,需采用磨损小的制动块。

与可逆式水泵水轮机直接连接的发电电动机,其结构要求能按正、反两方向旋转,支柱式推力轴承或导轴承一般为中心支承式结构,风扇为不定向式结构(即转子正反向旋转时具有相同冷却效果的风扇——译者注)。

3.3.2 起动方式 与可逆式水泵水轮机直接连接的发电电动机,为了减少水泵运转起动时的推力轴承静摩擦损耗,可采用油压顶起装置向轴承中心部分注入高压油将转子顶起或电磁减载装置将转子用电磁铁吊起。对斜流式水轮机,关闭转子叶片在水中起动也是可能的;但对混流式水轮机,为了降低转轮的电阻损耗,一般通入压缩空气将转子室内的水面压下使转轮空转。起动方式采用以下几种。

(a) 阻尼绕组起动 利用极靴部装设的阻尼绕组作为异步电动机起动。超过 170MVA 左右时,因起动能量很大,阻尼绕组难以设计,多利用变压器的低压抽头或第三绕组降压起动,待牵入同步后再切换到全电压。

(b) 用起动电动机同轴起动 在发电电动机的上部同轴连接绕线型异步电动机进行起动。此种起动方式比阻尼绕组起动方式昂贵,但在起动时对电力系统的影响小,因容易设计,用于 200MVA 级以上的大容量机组。

(c) 同步起动 需要一台起动用的发电机与

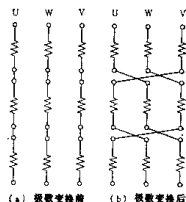


图19 定子极数变换法

被起动的发电机在停机状态下进行电连接,并给两台电机以适当的励磁,在保持同步状态下提高起动用电机的转速,将发电电动机并联接入系统。

(d) 晶闸管起动 代替(c)的起动用电机,利用晶闸管变频装置进行频率变换,并进行同步起动。

3.3.3 极数变换 可逆式水泵水轮机,由于水泵运转与水轮机运转时改变转速可提高水泵水轮机的效率,所以有时采用改变定子及转子绕组的接

线以改变二者极数的变极电机。

对于定子绕组,如图19(a)所示,属于每相的绕组各分三组,当按图19(b)改接时便可改变极数。此时,每相有6个、三相共有18个引出线引出机外,利用转换开关进行极数变换。

对于转子绕组,采用改变特定几个极的极性或消除几个磁极(不给励磁),来改变气隙磁通波形,利用相当于变极后的极数的基波磁通,使其在定子绕组内感生电动势。

第4章 同步电机的诸常数

4.1 同步电抗

4.1.1 电枢反应电抗 电枢磁动势的大部分在气隙中产生与主极磁场同步旋转的基波磁场,即正序磁场,使主极磁动势受到影响,并改变电枢的感应电动势。把这种作用称为电枢反应,与此磁通有关的电抗称为电枢反应电抗。

电枢反应的作用根据电枢磁动势与主极磁场之间的位置关系,即根据功率因数而不同。当电枢磁动势的轴线与主极极间中心线(交轴)一致时,电枢反应在磁极一端增强主极磁通,在另一端减弱主极磁通[图20(a)],功率因数为1.0。当电枢磁动势

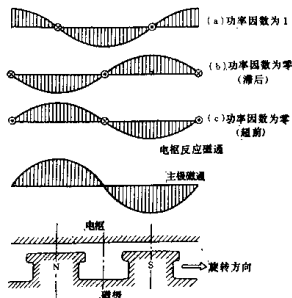


图20 同步发电机主极基波磁通与电枢反应基波磁通之间的位置关系

的轴线与主极磁场轴线(直轴)一致时,电枢磁动势减弱主极磁通[图20(b)],功率因数为零、滞后,或增强主极磁通[图20(c)],功率因数为零、超前。前者对应交轴电枢反应电抗,后者对应直轴电枢反应电抗。对任意相对位置下的电枢反应,可分成直轴与交轴分量,并分别对应上述两种电抗。

因磁阻不同,一般直轴电枢反应电抗比交轴电枢反应电抗大。

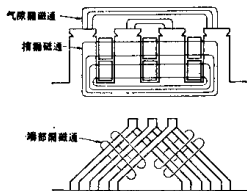


图21 电枢漏磁通说明图

4.1.2 电枢漏抗 从电枢磁动势中减去电枢反应磁动势所剩下的磁动势,主要产生只与电枢绕组本身交链而不与主极相交链的磁通,此即电枢漏磁通,并与电枢漏抗相对应。一般可将此漏抗分成以下三部分(图21)。

(a) 槽漏抗 是由横穿过电枢槽壁的漏磁通所引起的电抗。

(b) 气隙漏抗 是由从电枢铁心齿顶经过气隙回到其他齿顶的磁通,或穿过气隙到达磁极表面再经气隙回到其他齿顶的磁通所引起的电抗,它是

由电枢磁动势的空间谐波分量引起的。可将气隙漏抗分为因相数有限产生的相带漏抗和因槽数有限产生的曲折漏抗(亦称齿谐波漏抗 译者注)。气隙漏抗随功率因数而异,功率因数为1时最大,但从总漏抗考虑无明显差别,故在实际应用上通常可视为与功率因数无关。

(c) 绕组端部漏抗 是由在电枢线圈端部空间产生的磁通引起的电抗,它因减少极数使线圈端部加长而增大。

4.1.3 同步电抗 电枢反应电抗与电枢漏抗的和,从电枢引线端看,可视为一等效电抗,称之为同步电抗。将此同步电抗与电枢有效电阻按矢量加法所得的阻抗称为同步阻抗。电枢电阻与同步电抗相比甚小,一般可以忽略。

4.2 瞬变电抗及超瞬变电抗⁽¹⁴⁾

在同步电机的瞬变过程中,由于电枢绕组与励磁绕组及阻尼绕组之间存在磁耦合,从电枢引线端看,其等效电抗值与同步电抗不同。采用标么值,上述三个绕组之间的互电抗即是电枢反应电抗。各绕组分别存在本身的漏抗(图22)。

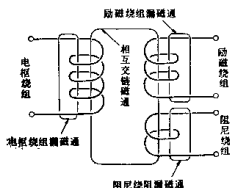


图22 瞬变过程中各绕组间的磁耦合说明图

4.2.1 磁极漏抗 隐极电机时磁极漏抗与电枢漏抗大致相同,可分为槽漏抗、气隙漏抗和绕组端部漏抗。凸极电机时分为极靴及极身两侧漏磁及磁极端部漏磁。

4.2.2 瞬变电抗 是无阻尼效应时对应瞬变电流的等效电抗,由电枢绕组与励磁绕组的磁路耦合状态决定。

4.2.3 阻尼绕组漏抗 设在凸极电机极靴上的阻尼条和隐极电机转子槽内放置的阻尼导体,也同样存在漏磁通。此外,对于隐极电机及一部分具有实心磁极的凸极电机,由于实心钢块表面起阻尼

导体作用,所以也有漏磁通。与这类磁通相对应的称阻尼绕组漏抗。

4.2.4 超瞬变电抗 是在有阻尼效应时对应初期瞬变电流的等效电抗,故由电枢绕组、励磁绕组和阻尼绕组三者的磁路耦合状态决定。

4.3 标么值制⁽¹³⁾⁽¹⁸⁾

在表示某些数量时,取其基准值为1,将某量与此基准值相比的表示方法称为标么值制,因为它可以省去各量之间的换算手续,并有立即知道电机性能的优点,所以经常在同步电机中采用。标么值以 per unit 或 pu 表示,某一量的标么值以小写字母(如 x_d 等)表示,以便与大写字母表示的一般单位的量(如 $X_d(\Omega)$ 等)相区别。

作为基准值的电枢回路的电压、电流、磁通、功率和频率,一般分别采用额定相电压幅值、额定相电流幅值、相当于空载额定电压时的气隙基波磁通、三相额定 kVA 和额定频率。所以电抗及电阻、时间、角速度的基准值分别为额定相电压/额定相电流、 $1/2\pi f$ (秒)(f 为额定频率)和额定转速时的角速度。但在实际应用上时间及时间常数(见 4.5 节)等不用标么值,多采用正常的单位。

将励磁回路的各量折算到电枢侧表示时,采取励磁电流所产生的磁动势与基准电枢电流所建立的电枢反应磁动势相同时的励磁电流为基准值是很方便的,对等值电路(见 4.4.2 节)也用此基准值。即
励磁电流基准值 = 电枢反应磁动势基准值/励磁绕组的匝数

励磁电压基准值 = 电枢电压基准值

$$\times \left\{ \frac{(3/2) \text{电枢电流基准值}}{\text{励磁电流基准值}} \right\}$$

励磁电阻及励磁电抗基准值

$$= \frac{2}{3} \text{电枢电抗基准值}$$

$$\times \left\{ \frac{(3/2) \text{电枢电流基准值}}{\text{励磁电流基准值}} \right\}^2$$

当励磁回路的各量没有必要折算到电枢侧表示时,空载额定电压时的励磁电流(或空载饱和曲线直线部分对应的励磁电流)也经常作为励磁电流基准值使用。

对阻尼回路的考虑方法与励磁回路相同。

4.4 等值电抗与等值电路^{[14] [17] [18]}

4.4.1 由双反应法确定电抗 是将电枢正序电流分成直轴分量与交轴分量来考虑的电抗(见第3篇1.8节)。直轴(d 轴)取磁极的纵轴,其正方向取N极方向。交轴(q 轴)是从直轴滞后旋转方向90度的轴(见图23)。直轴与交轴都被固定在磁极上,一起对电枢旋转。

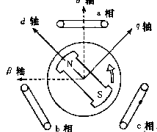


图23 坐标轴的相互关系

由双反应法决定的电抗表示如下。

(1) 直轴同步电抗 $x_d = x_l + x_{ad}$

(2) 直轴瞬变电抗 $x_d' = x_l' + x_{ad}'$

(3) 直轴超瞬变电抗 $x_d'' = x_l'' + x_{ad}''$ (无阻尼效应时 $x_d'' = x_d'$)

式中 x_l : 电枢漏抗; x_l' : 瞬变电枢漏抗(仅在隐极转子采用磁性护环时与 x_l 不同,在其他情况下

$x_l' = x_l$); x_{ad} : 直轴电枢反应电抗; x_{ad}' : 有效励磁绕组漏抗 $= x_{ad} x_{ad} / (x_{ad} + x_{ad})$; x_{ad}'' : 有效直轴阻尼绕组漏抗 $= x_{ad} x_{ad}' / (x_{ad} + x_{ad}')$; x_{ad} : 直轴阻尼绕组漏抗。

(4) 交轴同步电抗 $x_q = x_l + x_{aq}$

(5) 交轴瞬变电抗 $x_q' = x_q$

(6) 交轴超瞬变电抗 $x_q'' = x_l'' + x_{aq}''$ (无阻尼效应时 $x_q'' = x_q' = x_q$)

式中 x_{aq} : 交轴电枢反应电抗; x_{aq}' : 有效交轴阻尼绕组漏抗 $= x_{aq} x_{aq}' / (x_{aq} + x_{aq}')$; x_{aq}'' : 交轴阻尼绕组漏抗。

凸极电机时,因磁阻不同, x_d 常比 x_q 大。 x_d' 因受励磁回路的影响比 x_d' 小, x_q' 与 x_q 大致相同。有阻尼绕组时 x_d'' 一般比 x_d' 小, x_q'' 大致是 x_d'' 的1.3倍左右。

隐极电机时除瞬变电抗以外的直轴与交轴电抗大致相等。

此处,当磁链数为恒定值时, x_d' 及 x_d'' 为具有定义意义的量,此磁链数的大小用内电抗电势或用电抗后的电势 e_d' 、 e_d'' ($e_d' = v + jx_d' i$, $e_d'' = v + jx_d'' i$, 式中 v : 端电压; i : 电枢电流)来表示。

各种电抗的典型数据如表4所示。

4.4.2 等值电路 为了表示由双反应法所决

表4 各种电抗与时间常数的典型数据⁽²³⁾

电机类型	x_d	x_q	x_d'	x_d''	x_l
内部直接冷却汽轮发电机	$\frac{1.68}{1.48 \sim 2.01}$	$\frac{1.67}{1.47 \sim 1.82}$	$\frac{0.27}{0.15 \sim 0.42}$	$\frac{0.21}{0.14 \sim 0.31}$	$\frac{0.21}{0.14 \sim 0.28}$
两极汽轮发电机	$\frac{1.70}{1.28 \sim 2.08}$	$\frac{1.70}{1.27 \sim 2.05}$	$\frac{0.22}{0.14 \sim 0.31}$	$\frac{0.16}{0.09 \sim 0.24}$	$\frac{0.17}{0.09 \sim 0.28}$
水轮发电机	$\frac{0.97}{0.59 \sim 1.49}$	$\frac{0.60}{0.34 \sim 0.87}$	$\frac{0.32}{0.14 \sim 0.48}$	$\frac{0.23}{0.10 \sim 0.35}$	$\frac{0.23}{0.14 \sim 0.36}$
同步电动机	$\frac{1.06}{0.49 \sim 1.64}$	$\frac{0.71}{0.26 \sim 1.10}$	$\frac{0.28}{0.13 \sim 0.47}$	$\frac{0.20}{0.07 \sim 0.35}$	$\frac{0.22}{0.08 \sim 0.42}$
电机类型	x_0	T_d'	T_d	T_d''	T_e
内部直接冷却汽轮发电机	$\frac{0.11}{0.07 \sim 0.16}$	$\frac{7.1}{3.7 \sim 10.6}$	$\frac{1.0}{0.7 \sim 1.6}$	$\frac{0.03}{0.015 \sim 0.125}$	$\frac{0.4}{0.20 \sim 0.61}$
两极汽轮发电机	$\frac{0.06}{0.02 \sim 0.18}$	$\frac{6.7}{3.0 \sim 11.2}$	$\frac{0.8}{0.38 \sim 1.70}$	$\frac{0.037}{0.02 \sim 0.11}$	$\frac{0.22}{0.08 \sim 0.98}$
水轮发电机	$\frac{0.12}{0.03 \sim 0.24}$	$\frac{5.8}{1.4 \sim 12.9}$	$\frac{1.7}{0.4 \sim 3.9}$	$\frac{0.076}{0.007 \sim 0.20}$	$\frac{0.18}{0.04 \sim 0.35}$
同步电动机	$\frac{0.07}{0.01 \sim 0.18}$	$\frac{2.9}{0.4 \sim 7.9}$	$\frac{0.8}{0.09 \sim 2.6}$	$\frac{0.019}{0.001 \sim 0.40}$	$\frac{0.11}{0.03 \sim 0.38}$

注: 各种电抗用标么值表示, 时间常数用秒表示。