

第2篇

同步电机

第2篇

同步电机

主编单位 哈尔滨大电机研究所

编写单位 哈尔滨大电机研究所

浙江大学

哈尔滨电机厂

机械工业部上海电器科学研究所

湘潭牵引电气设备研究所

机械工业部上海发电设备成套设计研究所

主 编 游善良

副 主 编 沈梁伟 刘公直

编 写 人 徐思进 许承千 徐 怡 沈梁伟

刘公直 庄月霞 席与俊 姚楚仁

江岳南 游善良 傅其伦 于升业

主 审 朱健南 林金铭

第 1 章 概 论

1 同步电机的特征

同步电机是一种交流电机,其转子的转速 n (r/min) 与电网频率 f (Hz) 之间有着恒定的比例关系,即

$$n = \frac{60f}{p} \quad (2.1-1)$$

式中 p ——电机的极对数。

2 同步电机的基本结构型式及分类

2.1 基本结构型式

同步电机有旋转磁极(电枢固定)和旋转电枢(磁极固定)两种结构型式,见图 2.1-1。通常三相同步电机的电枢绕组与三相电网连接,励磁绕组则与直流电源连接。对于高压、大中型同步电机,为了易于引出或引入电枢电流,一般都采用旋转磁极式,只有某些小型的或特殊用途的同步电机,如无刷励磁同步电机励磁系统中用的交流发电机,才采用旋转电枢式。

2.2 分类

同步电机按磁路结构的分类见表 2.1-1。同步电

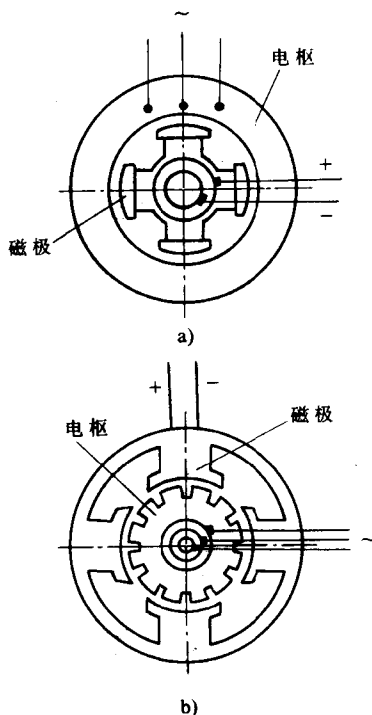
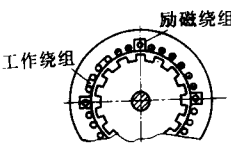
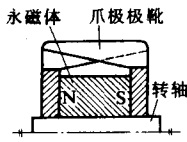
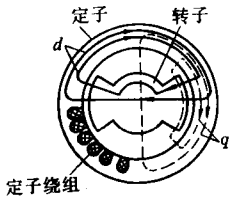
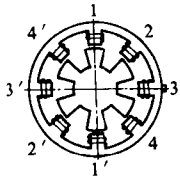



图 2.1-1 同步电机示意图
a) 旋转磁极式 b) 旋转电枢式

表 2.1-1 同步电机按磁路结构的分类表

磁路结构	结构示意图	特 点	用 途
凸 极 式		<ol style="list-style-type: none"> 1. 转子有显露的磁极 2. 励磁绕组为集中绕组 3. 转子的磁极铁心一般不是整体的, 而是叠片结构 	$p \geq 2$ 的同步发电机和电动机
隐 极 式		<ol style="list-style-type: none"> 1. 通常转子是细长的圆柱形结构 2. 励磁绕组为同心式分布绕组 3. 转子除小型的用叠片结构外, 通常都是整体的 	$p \leq 2$ 的同步发电机和电动机

(续)

磁路结构	结构示意图	特 点	用 途
感应子式		<ol style="list-style-type: none"> 1. 转子做成齿轮形, 一个转子齿距形成一对极 2. 励磁绕组在定子上 3. 可做成单极式或多极式 	中频发电机(小功率的用作超高速电动机、雷达装置的特殊电源; 大功率的用作高频加热电源)
爪极式		<ol style="list-style-type: none"> 1. 凸极式的一种变型, N、S极各一组, 做成爪状, 交错插合 2. 用永磁体或励磁绕组励磁(公用一个或两个励磁绕组) 3. 励磁绕组通常在定子上 	车辆用交流发电机、中频发电机
磁阻式		<ol style="list-style-type: none"> 1. 定子与一般交流电机的相似 2. 转子无励磁绕组, 有反应槽 	驱动及控制用小功率电动机、高速发电机
开关磁阻式		<ol style="list-style-type: none"> 1. 定、转子均为凸极式, 且两者极数不同 2. 定子极上绕有线圈, 以构成多相绕组 3. 用改变相电流脉冲频率来改变转子转速 	调速传动用小功率电动机
永磁式		<ol style="list-style-type: none"> 1. 磁路的一部分用永磁体做成, 以永磁代替直流励磁 2. 可做成凸极式或隐极式, 感应子式或爪极式 	中小功率发电机及电动机

机按原动机、运行方式以及频率等的不同还可分为汽轮发电机、水轮发电机、柴油发电机、中频发电机、同步电动机、同步调相机、发电电动机以及自动控制系统和日用电器中使用的小型 and 微型同步电机。

3 同步电机的用途

绝大多数发电厂, 如现代电力工业中火力发电厂、水电站(厂)、核能发电厂均采用同步电机作发电机, 由内燃机驱动的发电机也采用同步电机。对需要直流电流的地方也多数用交流电源通过整流装置来获得。

一台独立运行的同步发电机, 必须向与它连接的负载提供有功功率和无功功率。然而多数同步发电机是并联到电网上运行的。由于电网的负载经常处于变动状态, 根据原动机的机动能力和机组的运行经济性, 在有功负载方面有些发电机组被指定承担基本负载, 长期运行; 另一些发电机组承担尖峰负载, 短时运行。

火电机组及核电机组宜承担基本负载。抽水蓄能电站所用的发电电动机, 在电网处于高峰负载时可作为发电机运行, 向电网提供电能; 在电网处于低谷负载时作为电动机运行, 驱动水泵(或水泵水轮机作水泵运

行或同轴水泵),把下游水库的水抽回上游水库,将电能转换成水的位能而储蓄备用。

在无功负载方面,除发电机供给一部分外,不足的部分主要靠连接在电网上的电容器、静止补偿器、同步调相机或作调相运行的发电机以及一些同步电动机来供给。

同步发电机的有功功率的调节,由原动机的调速器根据转速的变化,调节机械能的输入来实现。无功功率,则通过励磁系统,调节发电机的励磁电流来控制。

同步电机还可用作电动机,以恒速或变频调速方式驱动功率较大的机械设备,如轧钢机、透平压缩机、鼓风机、泵和变流机组;或者用于驱动功率虽不大,但转速较低的各种磨机和往复式压缩机;还可用于驱动大型船舶的推进器等。各种不用电励磁的小型 and 微型同步电动机,因其结构较简单,运行稳定,也被广泛用于要求转速恒定的或变频调速的日用电器装置和自动控制系统中(参见第5篇第3章和第6篇第3章2·2节、第4章3·1节)。

与异步电动机相比,同步电动机可通过调节励磁电流来改善自身的和电网的功率因数,提高稳定性,使电站装机容量充分得到利用。

同步电动机的主要运行性能必须满足被驱动机械的要求(例如,轧钢机需要较大的过载能力,磨机需要较大的起动转矩,往复式机械需要足够的飞轮力矩等)和节能、保护、环境、安全等方面提出的要求。

此外,对变频调速的同步电动机,其参数的选择、运行特性和结构等还应满足控制系统、电力转换装置、起动等提出的要求。

同步电机还可作为同步调相机(一种接在交流电网上,不带任何机械负载而空转的同步电动机),向电网输出电感性的或电容性的无功功率,以改善电网的电能品质。

综上所述,同步电机在国民经济中具有十分重要的地位和作用。

4 同步电机的冷却方式

随着单机容量的增大,电机的冷却问题日趋严重,为解决此问题,在同步电机中采用了许多不同的冷却方式。目前,同步电机有直接冷却方式和间接冷却方式两大类型。常用的冷却介质有空气、氢和水(参见第1篇第6章5·2节)。中小型同步电机通常采用空气间接冷却;大型汽轮发电机采用空气^[1]、水或氦水冷却。

水轮发电机容量在500MVA及以下的,采用空气冷却;容量大于500MVA的,则应根据电机的转速和其他条件具体分析确定。

同步电机无论采用何种冷却介质和冷却方式,电机运行时各部分的允许温升或温度都不应超过相应技术标准的规定。

5 同步电机的励磁方式

励磁是保证同步电机正常运行和对其进行调控的重要条件之一。励磁系统是同步电机的一个重要组成部分,励磁系统和组成元件的性能对电机运行有重大影响。同步电机运行的可靠性、经济性以及主要特性,如电压调整率、短路特性、过载能力等,都直接与励磁系统有关。常用的励磁方式是,小型和微型同步电机的励磁磁场可用永磁体来产生或从电枢方面通过电力电子器件供给;大型同步电机则由通入直流电流的励磁绕组来提供励磁。通入励磁绕组的直流电可由直流发电机直接供给,也可由交流发电机、同步发电机本身的辅助绕组或本身的输出端等的交流电流经过可控或不可控整流器(静止的或旋转的)整流后供给(表2·8-1)。随着电力电子技术的发展,这种励磁系统在不同容量的同步电机中获得了广泛的应用。

近年来,由于冷却技术的发展,电机的电负荷显著增加,使同步发电机,特别是汽轮发电机的短路比明显下降,瞬态电抗相应增大,对电力系统的稳定性带来不利的影响。但是,如采用适当的自动励磁调节方式和具有较高顶值电压倍数和电压增长速度的励磁系统,就能对上述不利影响起补偿作用。

对励磁系统的基本要求是,它必须对外加控制信号迅速做出反应,以便实现对电压所希望的控制。例如,当发电机运行时,无论负载怎样变化,必须长期将发电机的电压波动控制在标准规定的值之内;当负载突然变化或电网扰动时,将短时的电压波动减至最小并迅速使发电机恢复到规定的电压。对励磁系统的具体要求,参见本篇第8章。

6 同步电机的额定值

额定值是由制造厂对电机的每一个电量或机械量做出的规定。同步电机的额定值如下:

1. 额定容量 S_N 或额定功率 P_N 对同步发电机, S_N 是指发电机线端的额定视在功率,单位为 VA、kVA 或 MVA;而额定功率 P_N 是指发电机输出的额

定有功功率,单位为 W、kW 或 MW。对同步电动机, P_N 是指轴上输出的有效机械功率,单位为 W、kW 或 MW。对同步调相机,则用线端的额定无功功率表示,单位为 var、kvar 或 Mvar。

2. **额定电压 U_N** 是指在额定运行时,电机定子三相线端的线电压,单位为 V 或 kV。

3. **额定电流 I_N** 是指电机在额定运行时,流过定子的线电流,单位为 A。

4. **额定功率因数 $\cos\varphi_N$** 电机在额定运行时的功率因数。

5. **额定效率 η_N** 电机在额定电压、额定电流、额定功率因数下运行的效率。它是指电机有功输出功率和有功输入功率之比(%)。有功输入功率等于输出功率加电机的总损耗。

6. **额定转速 n_N** 电机在额定运行时对应电网频率的同步转速,单位为 r/min。

7. **额定频率 f_N** 电机在额定运行时的频率,用 Hz 表示。我国标准工频为 50Hz。

此外,还有额定励磁电压和电流等。

1~5 项额定值之间的基本关系是,对三相同步发电机: $P_N = S_N \cos\varphi_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N$; 对三相同步电动机: $P_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N \eta_N$ 。

7 同步电机的发展趋势

当前,同步电机的发展重点是提高电机的经济性、可靠性和适应性,关键在于提高电机总的技术水平,通过各种合理措施,保证产品的高品质,降低成本,缩短交货期;同时采用现代监控技术,加强运行维护,提高电机的可用性,延长电机寿命^[2]。其发展趋势是:

(1) 增大单机容量,扩大品种。无论从高速发展我国电力工业以适应国民经济发展的需要,还是从提高发电机效率,降低运行成本,发展核电和有效开发水利资源着眼,都要求增大发电机的单机容量。在电气传动方面,由于钢铁、能源、建材等工业的发展,也要求提供大容量恒速与变频调速的同步电动机。目前,国外汽轮发电机的最大单机容量已达 1710MVA(四极)和 1412MVA(两极),水轮发电机已达 825MVA,柴油发电机已达 30MW,同步电动机已达 70MW。

为满足国民经济各部门多种用途的需要,还应发展核能发电厂用大型四极汽轮发电机,适应燃气蒸汽联合循环发电的大型空冷汽轮发电机,大型抽水蓄能

电站用发电电动机,大型贯流机组发电机,用于等离子体物理研究的和大型高压电器设备试验的大功率同步发电机和短路发电机,风力发电机,具有新的几何造形的永磁式和磁阻式同步电机,以及各种新型的用于驱动、控制领域的微特同步电机。

(2) 提高可靠性、经济性和适应性。国内外大型同步发电机和电动机的实际运行经验表明,随着单机容量的增大,使用要求的提高,适应性的扩大,使电机运行中的事故率也相应增加。发电机因事故而强迫停机,将中断电能正常供应;电动机因事故停机,将使被驱动机械设备工作中断。这些不仅给国民经济造成巨大的损失,而且还将严重影响人们的工作和生活。微型同步电机往往要在恶劣的环境中使用,并要求具有低的失效率。因此,进一步提高各种类型同步电机的可靠性,尤其是大型发电机的可靠性,仍是今后发展的一个重要问题^[3]。

提高同步电机的可靠性不是片面强调可靠性越高越好。通常,可靠性越高,投资越大,产品的成本越高。产品的可靠性是指其在规定的条件下,在规定的时间内,完成规定功能的能力。目标在于使电机在使用时满足其特定的可靠性指标的要求。这样,才能将可靠性与经济性统一起来,更好地满足使用需要。

(3) 进一步提高电机冷却技术水平。在给定材料的力学性能下,增大电机的单机容量主要靠增加电机单位体积的输出,从而增加了电机单位体积的损耗,使电机散热困难。此外,由于不同类型电机的发展和电机结构尺寸的变化,也给电机的通风冷却提出了一些新的要求。为此,继续开展同步电机冷却技术的研究,进一步提高冷却分析技术水平,改进冷却方式,提高冷却效果,仍然是同步电机发展的一个重要方面。

近 20 多年来,世界各工业发达国家都在对超导同步发电机进行研究。半超导发电机的研究性样机,单机容量已从几千伏安发展到了 300 和 400MVA^[4],但是由于材料、冷却系统及财政等原因,研究工作的进程时快时慢。只有当超导材料的性能得到改进,样机试制经验的逐步积累和可靠性、经济性得到相应提高之后,超导发电机的应用才具有优势。

(4) 发展变频调速同步电机。近年来,由于现代控制理论和微机技术的广泛应用以及大功率电力电子器件的发展,促进了交流变频调速电机的发展。

变频调速同步电动机不仅具有直流电机那样优良的调速特性,且结构比直流电机的简单,运行维护方便,可靠性高,加之它的功率因数、效率比异步电机的

高,所需起动容量小,有独立的励磁绕组便于控制等优点。因此,这种电机,尤其是大型低转速的和高转速(3000r/min以上)的调速同步电动机,目前得到了越来越广泛的应用^[6]。

为了满足潮汐电站、风力发电站等中小发电机组及大型抽水蓄能电站发电电动机变转速运行的需要,目前已出现了一种用交-交变频器向同步电机转子励磁绕组馈电的同步发电机。这种双馈电机可以用改变交流励磁电流的频率来达到改变发电机的转速。同时这种电机有调节电网功率因数和提高稳定性的功能。在抽水蓄能机组中的应用表明,它可使水轮机、水泵常在最佳工况下运行,从而可提高机组效率,减轻水轮机或水泵的空蚀和泥沙磨损^[6]。目前,国外已研制出的这种发电机,最大单机容量达395MVA,已用作抽水蓄能电站的发电电动机。

(5)积极开发在线监测技术。为使电机的事故防患于未然和记录事故的历史过程,以利一旦电机出现事故时分析事故的性质及查明事故的原因,积极开发大型发电机和电动机的在线监测技术及装置,对提高机组的可靠性、可用性具有十分重要的作用。

(6)继续深入研究大型同步电机的电磁、机械等关键技术问题。电机运行时,在它的内部空间,包括铜与铁所占的空间,存在着由定、转子电流产生的电磁场。电机中电磁场在不同媒质中的分布、变化以及与电流的交链情况,决定着电机的运行状态与性能。近年来,应用电磁场理论相继解决了一些电机的实际问题。但

是,随着同步电机尺寸和容量的增大、有效材料利用率的提高,电机运行中出现的某些局部问题和瞬态问题比较突出。这些问题将直接影响大型同步电机,尤其是大型汽轮发电机和水轮发电机的运行性能和可靠性。因此,从电磁场理论入手,利用现代分析计算方法,继续深入研究大型同步电机中的三维场和瞬态场,对提高电机设计的经济性、合理性、可靠性和电机的总的技术水平具有十分重要的意义。此外,分析计算方法随着离散数学的进展将不断发展。各种用途电机(如短路发电机)及电机的特殊运行方式中的电磁场计算仍是广泛研究的课题。三维场动态位的选择以及场路结合解决电机电磁问题等都值得进一步探索^[7]。

实践表明,大型电机运行的可靠性,在很大程度上取决于结构部件的力学特性。随着电机单机容量的提高,结构件的利用率也在提高,强度储备相应降低,加之大型电机在各种工况下的作用力、应力及变形状态的分析比较复杂,往往与材料性能、边界条件、耦合特性、接触状态、环境因素以及外部作用力的性质与分布等多因子系统有关。有时还必须考虑由不同物理性质的材料组合成的特殊形状构件的性能,才能正确反映电机的负载状态和应力、变形特点,使结构优化。因此,进一步加强电机结构部件的承载能力、强度、刚度和稳定性等的研究,仍然是关键性的问题。

在上述问题的研究中,尽管可广泛应用现代的数字计算方法,但直接测量仍十分重要,因为它能提供分析计算中的准确性和可信度的信息反馈。

第2章 基本工作原理及特性^{[7]~[17]}

1 同步电机稳态运行的基本数学模型

三相同步电机的三个电枢绕组分别以A、B、C三个轴线表示其空间位置。对于对称三相绕组彼此之间在空间成120°(电角)交角。磁极的极中心线定为直轴(d轴),极间中心线定为交轴(q轴)。

在稳态运行时,磁极上的所有绕组均不受来自电枢的电磁感应影响,励磁电流恒定不变。它产生的磁场是一个由转子带动而与转子同转速的旋转磁场。在它的作用下,在电枢绕组中感生一个定幅定频的电动势。为此,将磁极磁场的作用以一个三相对称电动势引入电枢绕组的电动势平衡方程中,称为励磁电动势。

1.1 隐极同步电机的稳态数学模型

1.1.1 磁动势方程

在气隙中有两个同步旋转的幅值不变的磁动势:一个为励磁电流产生的励磁磁动势 F_{Ω} ,只考虑基波分量;另一个为电枢三相对称电流产生的电枢反应磁动势 F_a ,同样只考虑基波分量(参见第1篇第2章4.1.2节)。因两者同步,故可合成为基波气隙磁动势 F_{δ} ,于是有

$$\dot{F}_a + \dot{F}_{\Omega} = \dot{F}_{\delta} \quad (2.2-1)$$

式(2·2-1)中的 $F_{f1} = K_{f1} F_f$, 其中 F_f 为励磁磁动势的峰值, K_{f1} 为磁场中基波磁通密度的幅值系数, K_{f1} 的计算参见第1篇第2章4节。

若将电枢空间轴(一般取 A 相相轴 \bar{A})与时间轴 \bar{t} 重合, 将电流 \bar{i} 和电枢反应磁动势 \bar{F}_a 相重合, 并均以同步转速旋转, 从而构成如图 2·2-1 表示的时空相量图。

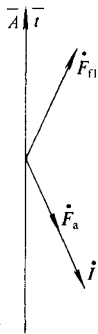


图 2·2-1 时空相量图

1·1·2 电动势方程

除了电枢电流在绕组中产生的电阻压降 $\dot{I}R_a$ 和漏抗电动势 \dot{E}_l 这两个次要项之外, 主要的电动势有: 由励磁磁动势产生的励磁电动势 \dot{E}_0 和由电枢反应磁动势产生的电枢反应电动势 \dot{E}_a 。它们与电枢端电压构成平衡关系。当采用发电机参考方向时, 有

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_l = \dot{U} + \dot{I}R_a \quad (2·2-2)$$

1·2 凸极同步电机的稳态数学模型

为解决气隙不均匀带来的困难, 将电枢电流 I 和电枢反应磁动势 F_a 分解为直轴和交轴两个分量(图 2·2-2)

$$\left. \begin{aligned} I_d &= I \sin \psi_0 \\ I_q &= I \cos \psi_0 \end{aligned} \right\} \quad (2·2-3)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{ad} &= F_a \sin \psi_0 \\ F_{aq} &= F_a \cos \psi_0 \end{aligned} \right\} \quad (2·2-4)$$

当 ψ_0 为正时, F_{ad} 对励磁磁动势起去磁作用; ψ_0 为负时, 则起助磁作用。 F_{aq} 起交磁作用, 表现为在发电机状态时, 对前极边去磁, 而对后极边助磁; 在电动机状态时, 则对前极边助磁, 而对后极边去磁。

磁动势平衡方程和电动势平衡方程为

$$\dot{F}_{ad} + \dot{F}_{aq} + \dot{F}_{f1} = \dot{F}_\delta \quad (2·2-5)$$

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{ld} + \dot{E}_{lq} = \dot{U} + \dot{I}R_a \quad (2·2-6)$$

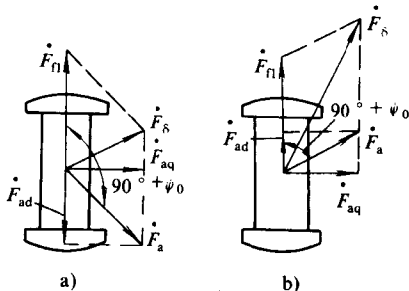


图 2·2-2 磁动势空间相量图及电枢反应磁动势的分解
a) $\psi_0 > 0^\circ$ b) $\psi_0 < 0^\circ$

1·3 电枢反应磁动势的折算

上述磁动势平衡关系还不能直接被用来计算负载下的励磁磁动势或励磁电流。为了确定励磁电流, 必须将电枢反应磁动势折算到转子一侧。

1·3·1 折算原则及折算系数

任一大小的电枢反应磁动势可以折算为与其等效的励磁磁动势。折算原则是: 折算前后的磁动势在定子绕组中感生的基波电动势是相等的, 即电枢反应磁动势产生的基波磁通密度和等效的励磁磁动势产生的基波磁通密度应相等。其折算公式见表 2·2-1。

表 2·2-1 电枢反应磁动势的折算公式及折算系数

	按折算原则所得的关系	折算为励磁磁动势的值	折算系数
隐极电机	$K_{f1} F'_a = F_a$	$F'_a = k_a F_a$	$k_a = 1/K_{f1}$
凸极电机	$K_{f1} F'_{ad} = K_d F_{ad}$	$F'_{ad} = K_{ad} F_{ad}$	$K_{ad} = K_d/K_{f1}$
	$K_{f1} F'_{aq} = K_q F_{aq}$	$F'_{aq} = K_{aq} F_{aq}$	$K_{aq} = K_q/K_{f1}$

注: 表中 $K_{f1} = B_{f1}/B_f$, 为磁场中基波磁通密度的幅值系数。对凸极电机, $K_{f1} = A \times B$ (参见第1篇第2章4节)。对隐极电机 $K_{f1} = (8 \sin \frac{\pi}{2} \gamma) / (\pi^2 \gamma)$, γ 为转子嵌线槽数对槽分度数的比。 K_d 、 K_q 见图 2·2-4。

1·3·2 电枢反应磁场基波幅值系数 K_d 、 K_q

当电机磁路处于不饱和状态时, 凸极电机的电枢反应磁动势在气隙内建立的磁通密度波形如图 2·2-3 所示。

图中 $B_{ad1} = K_d B_{ad}$, $B_{aq1} = K_q B_{aq}$, 但 B_{aq} 并非实际磁通密度曲线的幅值, 而是假想幅值, 其值为 $B_{aq} = \mu_0 F_{aq} / \delta$ 。 K_d 、 K_q 是从电枢反应磁通密度波形用傅里叶级数分解所得的基波幅值系数。其值见图 2·2-4。

当忽略磁路饱和及齿槽效应时, 隐极电机的电枢

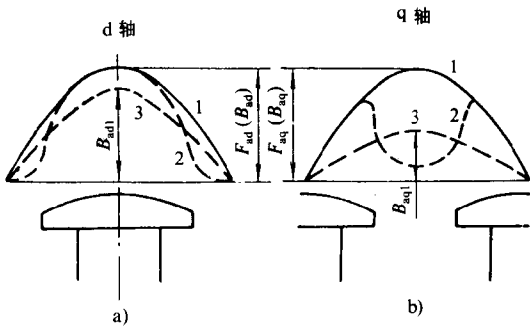


图 2·2-3 凸极电机电枢反应磁通密度波形
a) 直轴 b) 交轴

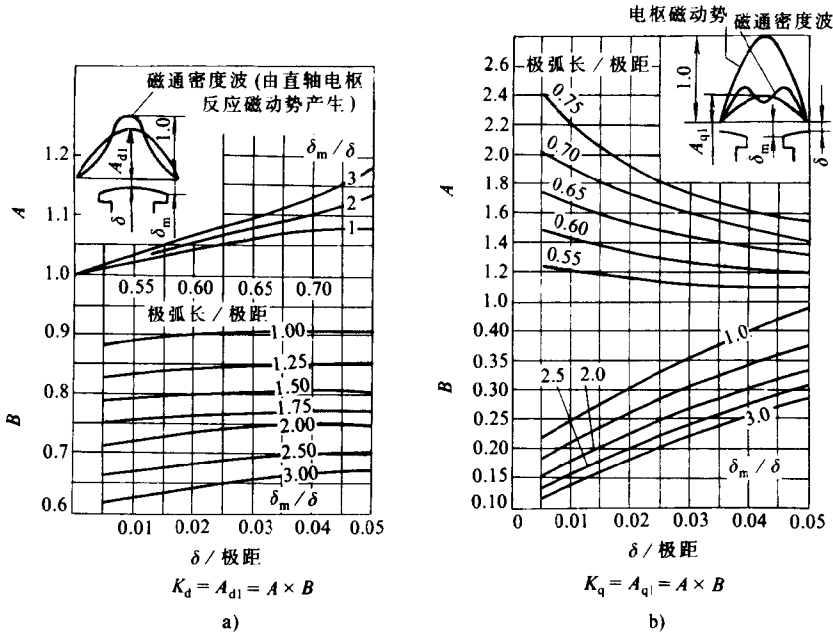


图 2·2-4 电枢反应磁通密度基波幅值系数
a) 直轴 b) 交轴

表 2·2-2 电枢绕组中的感应电动势(有效值)

电动势名称	表达式①	以电抗压降形式表示	说明
励磁电动势 E_0	$E_0 = 4.44fNK_{\phi 1}\Phi_0$		由励磁磁动势 F_f 在气隙内建立的基本磁通 Φ_0 所感生
电枢反应电动势 E_a	$E_a = 4.44fNK_{\phi 1}\Phi_a$	$\dot{E}_a = -j\dot{I}X_a$	隐极电机中由电枢反应磁通 Φ_a 所感生, X_a 称为电枢反应电抗
电枢漏磁通电动势 E_s	$E_s \approx 4.44fN\Phi_{s0}$	$\dot{E}_s = -j\dot{I}X_s$ $= -j(\dot{I}_d + \dot{I}_q)X_s$	由电枢电流建立的漏磁通 Φ_{s0} (包括槽漏磁通、谐波漏磁通和端部漏磁通) 所感生, X_s 称为漏电抗

反应磁动势在气隙内建立的磁通密度波形十分接近正弦波。故隐极电机的电枢反应磁动势一般不加折算。

2 磁路不饱和时的电动势及饱和时的电动势

2.1 磁路不饱和时电枢绕组中的感应电动势

磁路不饱和时,电机内各种磁动势,可分别线性地产生各种磁通,它们在电枢绕组中感生相应的电动势。表 2·2-2 中的 E_0 、 E_a 、 E_{ad} 、 E_{aq} 就是分别根据 F_f 和表 2·2-1 中的 F'_a 、 F'_{ad} 、 F'_{aq} , 从电机空载特性的气隙线上查得。除励磁电动势 E_0 之外,其他电动势均可用相应的电抗压降表示。

(续)

电动势名称	表达式①	以电抗压降形式表示	说明
直轴电枢反应电动势 E_{ad}	$E_{ad} = 4.44fNK_{dp1}\Phi_{ad1}$	$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d X_{ad}$	由 F_{ad} 建立的 B_{ad1} 所对应的 Φ_{ad1} 感生, X_{ad} 称为直轴电枢反应电抗, I_d 见式(2·2-3)
交轴电枢反应电动势 E_{aq}	$E_{aq} = 4.44fNK_{dp1}\Phi_{aq1}$	$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q X_{aq}$	由 F_{aq} 建立的 B_{aq1} 所对应的 Φ_{aq1} 感生, X_{aq} 称为交轴电枢反应电抗, I_q 见式(2·2-3)

注: N —定子绕组每相串联匝数; K_{dp1} —定子绕组的基波绕组因数。

① 表中表达式一栏内未考虑斜槽(或斜槽)因数。

2.2 磁路不饱和时发电机的电动势平衡方程和同步电抗

由表 2·2-2 与式(2·2-2)和式(2·2-4)可得:

(1) 对于隐极同步发电机:

$$\begin{aligned} \dot{E}_0 &= \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_l & (2\cdot2-7) \\ X_l &= X_s + X_a \end{aligned}$$

式中 X_l ——隐极同步电机的同步电抗。

(2) 对于凸极同步发电机

$$\begin{aligned} \dot{E}_0 &= \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q & (2\cdot2-8) \\ X_d &= X_s + X_{ad} \\ X_q &= X_s + X_{aq} \end{aligned}$$

式中 X_d, X_q ——凸极同步电机的不饱和直轴同步电抗和交轴同步电抗。

2.3 同步发电机的电动势-磁动势相量图和内功率因数角 ψ_0

根据式(2·2-1)~式(2·2-4)和式(2·2-7)~式(2·2-8)可分别画出隐极和凸极同步发电机的电动势-磁动势相量图,如图 2·2-5 及图 2·2-6 所示。

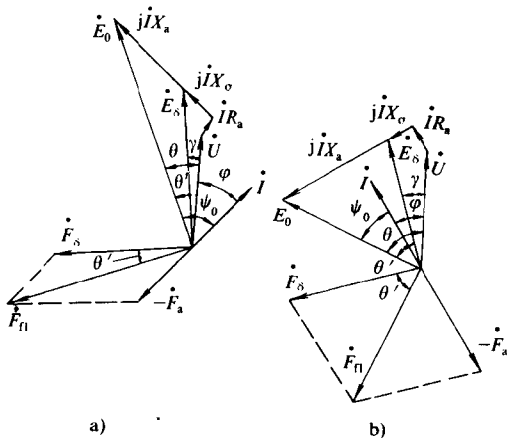


图 2·2-5 隐极同步发电机的电动势-磁动势相量图
a) I 滞后于 U b) I 超前于 U

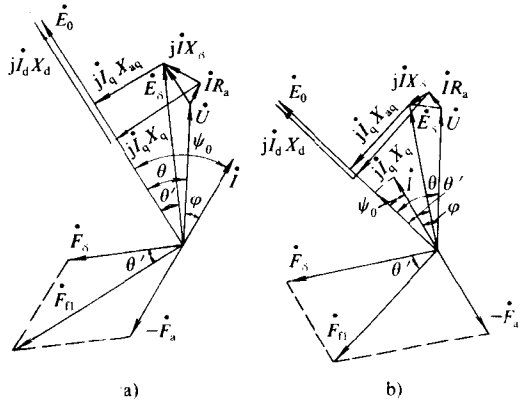


图 2·2-6 凸极同步发电机的电动势-磁动势相量图
a) I 滞后于 U b) I 超前于 U

图中, φ 为功率因数角, θ' 为内电动势 E_s 与励磁电动势 E_0 之间的相位差角, 也就是 F_s 与 F_{r1} 在空间上的相位差角, θ' 的大小决定了电磁功率的大小。 ψ_0 为 E_0 与 I 之间的相位差角, 称为内功率因数角

$$\left. \begin{aligned} \psi_0 &= \arctan \frac{U \sin \varphi + I X_s}{U \cos \varphi + I R_a} \text{ (凸极机)} \\ \psi_0 &= \arctan \frac{U \sin \varphi + I X_l}{U \cos \varphi + I R_a} \text{ (隐极机)} \end{aligned} \right\} (2\cdot2-9)$$

2.4 磁路饱和时的气隙磁场、电动势平衡方程和同步电抗

2.4.1 凸极同步电机的气隙合成磁场分布曲线

实际上, 电机运行时其铁心处于饱和状态, 这时不能将各电动势分别独立计算, 而应根据励磁磁动势与电枢反应磁动势的合成磁动势分布曲线, 按磁路实际情况求出气隙磁场分布曲线。凸极电机的气隙合成磁场分布曲线的形状是随电机的工作状况 (U 、 I 和 $\cos \varphi$)、磁极极靴表面形状, 以及电机饱和程度而异的。图 2·2-7 为凸极电机的气隙合成磁场分布曲线示例。

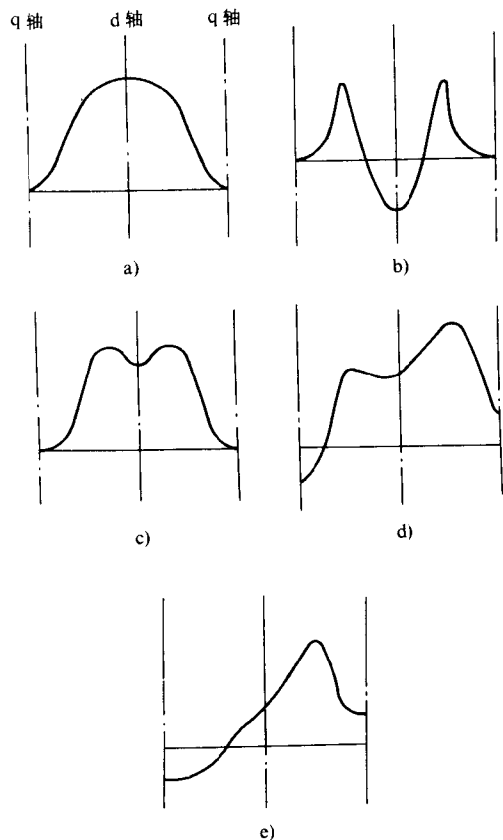


图 2-2-7 凸极同步电机(1250kW,10极水轮发电机)的气隙合成磁场曲线

- a) 空载 $U=U_N$ b) 三相稳态短路 $I=I_N$
- c) $\cos\varphi=0$ (滞后) d) $\cos\varphi=0.8$ (滞后)
- $U=U_N, I=I_N$ $U=U_N, I=I_N$
- e) $\cos\varphi=1, U=U_N, I=0.8I_N$

2.4.2 磁路饱和时的电动势平衡方程和同步电抗

磁路饱和时的电动势平衡方程为

$$\dot{E}_s = \dot{U} + \dot{I}(R_s + jX_p) \quad (2.2-10)$$

式中 \dot{E}_s ——气隙合成磁场中的基波分量在电枢绕组中感生的内电动势；

X_p ——保梯电抗，参见本章 3.2 节及见表 2.2-13。

磁路饱和时的电抗值是以额定电压所对应的饱和度来进行计算的。首先根据式(2.2-10)算出 E_s ，根据电机的空载特性曲线 $E=f(F)$ 在纵坐标上以 E_s 值作水平线得实际运行点 A，将 A 与原点 O 相连得直线 \overline{OA} ，然后以各种磁动势值到此 \overline{OA} 直线上，查取在此饱和度和下的各种电动势。

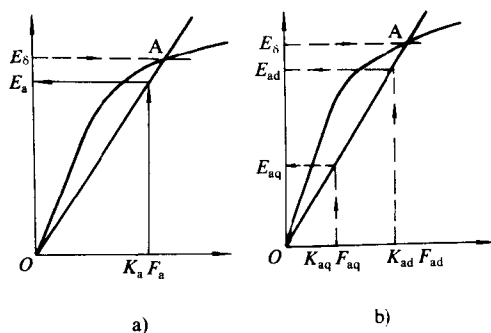


图 2-2-8 同步电机饱和时各电动势值的求取
a) 隐极电机 b) 凸极电机

1. 隐极电机饱和和同步电抗的计算 由已知电枢电流 I 确定电枢反应磁动势 F_a 及其折算值 $K_a F_a$ 。从图 2.2-8a 上，根据 $K_a F_a$ 在直线 \overline{OA} 上可查得 E_s ，则隐极同步电机的饱和和同步电抗为

$$X_s = X_\sigma + \frac{E_s}{I} \quad (2.2-11)$$

2. 凸极同步电机饱和和同步电抗的计算 已知电枢反应磁动势 F_a 及内功率因数角 φ_0 的初值，可算出交、直轴电枢反应磁动势的折算值的初值 $K_{aq} F_{aq} = K_{aq} \times F_a \cos\varphi_0$ ， $K_{ad} F_{ad} = K_{ad} F_a \sin\varphi_0$ ，从图 2.2-8b 上按 $K_{aq} \times F_{aq}$ 和 $K_{ad} F_{ad}$ 的值在 \overline{OA} 线上可查得 E_{saq} 和 E_{sad} 的初值，于是凸极同步电机的饱和和同步电抗为

$$\left. \begin{aligned} X_q &= X_\sigma + \frac{E_{sq}}{I_q} \\ X_d &= X_\sigma + \frac{E_{sd}}{I_d} \end{aligned} \right\} \quad (2.2-12)$$

把算得的 X_q 代回到式(2.2-9)中，计算出考虑饱和和影响之后的 φ_0 ，把 φ_0 的新值与 φ_0 的初值进行比较，如果其差值足够小，则计算结束，否则再设定 φ_0 重算，最后得到同步电抗的终值。

3 同步发电机

3.1 同步发电机的运行特性

同步发电机的运行特性有如表 2.2-3 所列的五种，这些特性分别示于图 2.2-9 中。

3.2 电抗三角形和保梯电抗

在不饱和段的空载特性与零功率因数负载特性之间存在着一个电抗三角形 $\triangle abc$ 的关系。其直角边

表 2·2-3 同步发电机的运行特性

名称	条件	特性曲线
空载特性 $U_0 = f(I_f)$	$n = n_N, I = 0$	见图 2·2-9a
负载特性 $U = f(I_f)$	$n = n_N, I = I_N, \cos\varphi = \text{常数}$	见图 2·2-9a
稳态短路特性 $I_k = f(I_f)$	$n = n_N, U = 0$	见图 2·2-9a
调整特性 $I_f = f(U)$	$n = n_N, U = U_N, \cos\varphi = \text{常数}$	见图 2·2-9b
外特性 $U = f(I)$	$n = n_N, I_f = \text{常数}, \cos\varphi = \text{常数}$	见图 2·2-9c

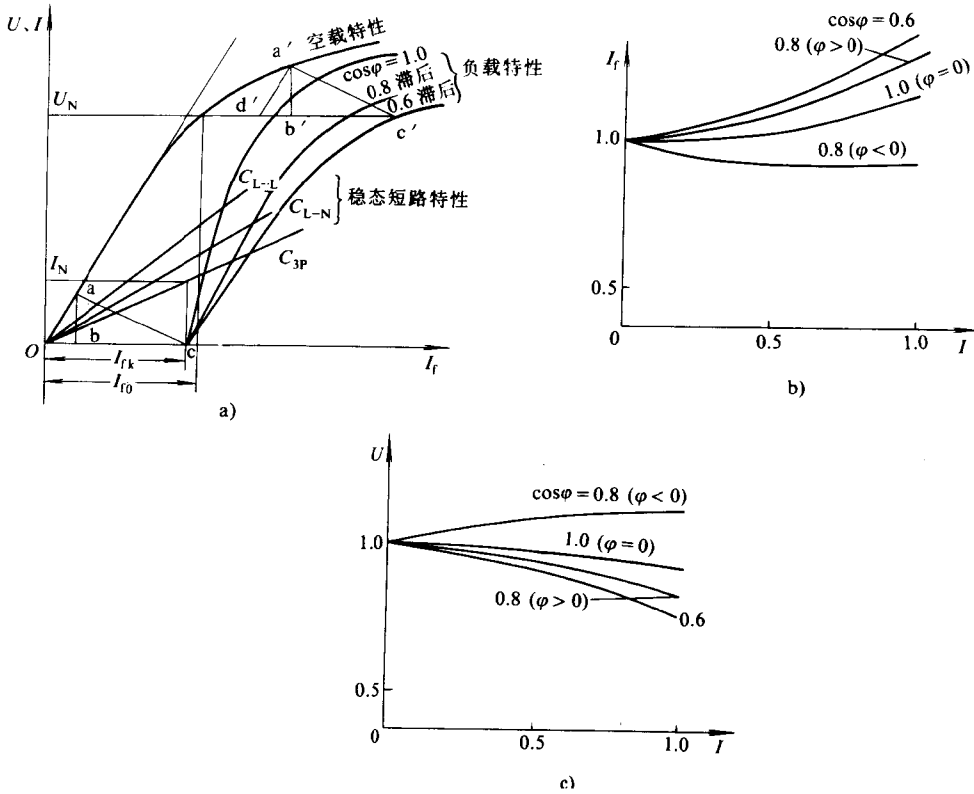


图 2·2-9 同步发电机的运行特性

a) 空载、稳态短路及负载特性 b) 调整特性 c) 外特性

C_{3P} —稳态三相短路特性 C_{L-L} —稳态线—线间短路特性 C_{L-N} —稳态线—中点间短路特性

$$\overline{bc} = K_{ad} F_a (\psi_0 = 90^\circ, F_{ad} = F_a), \overline{ab} = IX_s.$$

感性负载时, 对应于内电动势 E_0 的磁化曲线不同于空载特性曲线, 这是由于转子电流增大后, 转子漏磁增加, 转子铁磁部分的磁压降增加, 故在相同的 E_0 值下对应的励磁电流比从空载特性曲线上查得的要大。如果仍然想利用空载特性曲线, 则对 E_0 计算中用到的漏电抗应该进行修正。

若图 2·2-9 中的零功率因数负载特性曲线 cc' 是试验值, 则在电机磁路的饱和段内, 空载特性曲线与零功

率因数负载特性曲线之间也必然存在一个考虑了饱和影响之后的阻抗三角形。具体作法为, 已知零功率因数负载特性曲线上的 c' 点, 过点 c' 做水平线, 在此线上取线段 $b'c' = bc$, 自点 b' 向上做垂线交空载特性曲线得点 a' , $a'b'$ 所对应的压降记为 IX_p , 所构成的三角形 $\triangle a'b'c'$ 称为保梯三角形, X_p 称为保梯电抗, $X_p > X_s$ 。

以上是用试验和作图法得到 X_p 。也可用经验计算公式来得到 X_p 。对于凸极电机, $X_p \approx 0.8X'_d$; 对于汽轮发电机, $X_p \approx X'_d$ 。

3.3 额定励磁电流的确定

额定励磁电流用作图法确定,见图2-2-10。其方法是:

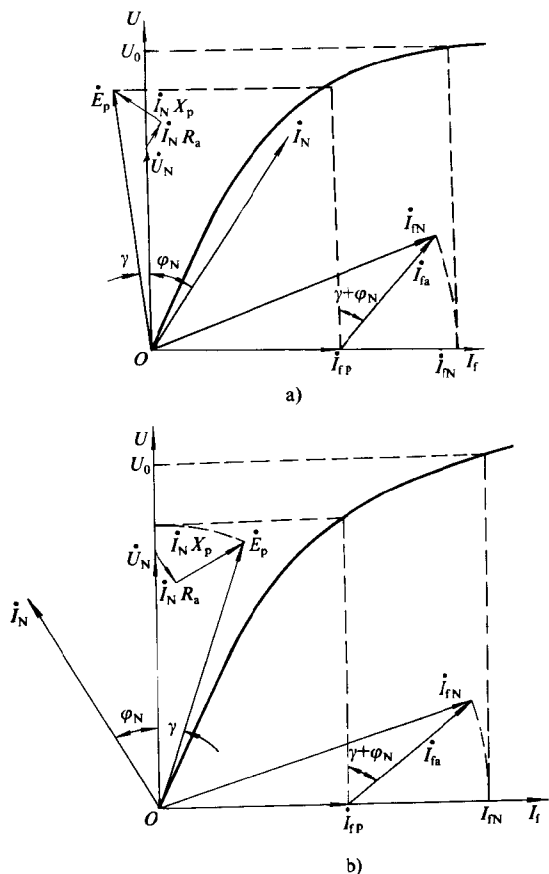


图2-2-10 用作图法确定额定励磁电流

a)发电机 b)电动机

(1) 以 I_f 为横轴做空载特性曲线,沿纵轴做额定电压相量 \dot{U}_N 。

(2) 自原点 O 做额定电枢电流相量 \dot{I}_N ,与纵轴成 φ_N 角($\cos\varphi_N$ 为额定功率因数)。

(3) 从相量 \dot{U}_N 终端做电枢绕组电阻压降相量 $\dot{I}_N R_a$ 平行于相量 \dot{I}_N , R_a 为基准工作温度时的绕组电阻(大中型电机的电枢绕组电阻压降可忽略不计),从 $\dot{I}_N R_a$ 的终端做一垂直于相量 \dot{I}_N 的保梯电抗压降相量 $\dot{I}_N X_p$, \dot{U}_N , $\dot{I}_N R_a$ 和 $\dot{I}_N X_p$ 的相量和为相量 \dot{E}_p 。 \dot{E}_p 与纵轴的夹角为 γ 。

(4) 由空载特性确定的对应于 \dot{E}_p 的励磁电流为

\dot{I}_{fp} 。在相量 \dot{I}_{fp} 终端上与纵轴成 $\gamma + \varphi_N$ 角做相量 \dot{I}_{fa} (其值等于图2-2-9a中的 $b'c'$)。

(5) \dot{I}_{fp} 与 \dot{I}_{fa} 的相量和为额定励磁电流 \dot{I}_{fN} 。

3.4 同步电机的准同步并网和自同步并网

1. 准同步并网时的条件 同步电机并入电网时具备规定的全部并网条件者,称为准确同步并网,如果允许其中的电压与频率存在一定偏差时的并网,称为准同步并网。运行部门的发电机运行规程规定,当发电机频率与系统频率之差在1Hz以内时,始可将同步鉴定器接入。

2. 自同步并网时的条件 在特殊情况下,允许将未加励磁的同步电机加速到接近同步转速时并网,并网后立即供给励磁的过程,称为自同步并网。能否采用自同步并网的条件为并网合闸时的冲击电流小于 $0.74/X_d^*$,其中 X_d^* 为直轴初始瞬态电抗的标么值。

4 同步电机的电磁功率和静态稳定条件

4.1 电磁功率和电磁转矩

4.1.1 电磁功率

转轴上的机械功率中通过气隙合成磁场转换为电枢回路的全部有功电功率(发电机),或者是电枢回路的全部有功电功率通过气隙合成磁场转换为轴上的全部机械功率(电动机),称为电磁功率,并称为内功率或计算功率,可用下式表示:

$$P_{em} = mUI\cos\varphi + mI^2 R_a \text{ (发电机)} \quad (2.2-13)$$

$$P_{em} = mUI\cos\varphi - mI^2 R_a \text{ (电动机)} \quad (2.2-14)$$

式中 m ——相数。

4.1.2 功角特性、电磁转矩

由式(2.2-13)或式(2.2-14),并根据图2-2-5或图2-2-6可得表2-2-4中的 P_{em} 的表达式,按此表达式作出的 $P_{em} = f(\theta)$ 或 $P_{em} = f(\theta')$,称为功角特性,见图2-2-11。

电磁转矩 $T_{em} = P_{em}/\Omega_1$,其中 Ω_1 为同步机械角速度(rad/s)。

(1) 功角 θ' 为 E_0 与 E_s 之间的时间相位差角。从空间意义上, θ' 也就是气隙合成磁场基波分量的轴线与磁极直轴在空间的相位差角(电角)。 θ' 为正值时表示励磁磁场超前于气隙合成磁场,电磁转矩是制动的,

电机处于发电机运行状态。 θ' 为负值时,表示励磁磁场滞后于气隙合成磁场,电磁转矩是驱动的,电机处于电

动机运行状态。通常定子电阻可以略去不计,因此,把 E_0 与 U 之间的相位角差 θ 称为功角或功率角。

表 2-2-4 电磁功率与电磁转矩

	隐极电机	凸极电机
不计定子绕组电阻时 (即 $R_a=0$)	$P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_t} \sin\theta$ $T_{em} = \frac{m}{\Omega_1} \frac{E_0 U}{X_t} \sin\theta$	$P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin\theta + \frac{m U^2}{2 X_d X_q} (X_d - X_q) \sin 2\theta$ $T_{em} = \frac{m}{\Omega_1} \frac{E_0 U}{X_d} \sin\theta + \frac{m}{\Omega_1} \frac{U^2}{2 X_d X_q} (X_d - X_q) \sin 2\theta$
计及定子绕组电阻时	$P_{em} = m \frac{E_c E_\delta}{X_s} \sin\theta'$ $T_{em} = \frac{m}{\Omega_1} \frac{E_c E_\delta}{X_s} \sin\theta'$	$P_{em} = m \frac{E_0 E_\delta}{X_{ad}} \sin\theta' + \frac{m E_\delta^2}{2 X_{ad} X_{aq}} (X_{ad} - X_{aq}) \sin 2\theta'$ $T_{em} = \frac{m}{\Omega_1} \frac{E_0 E_\delta}{X_{ad}} \sin\theta' + \frac{m}{\Omega_1} \frac{E_\delta^2}{X_{ad} X_{aq}} (X_{ad} - X_{aq}) \sin 2\theta'$

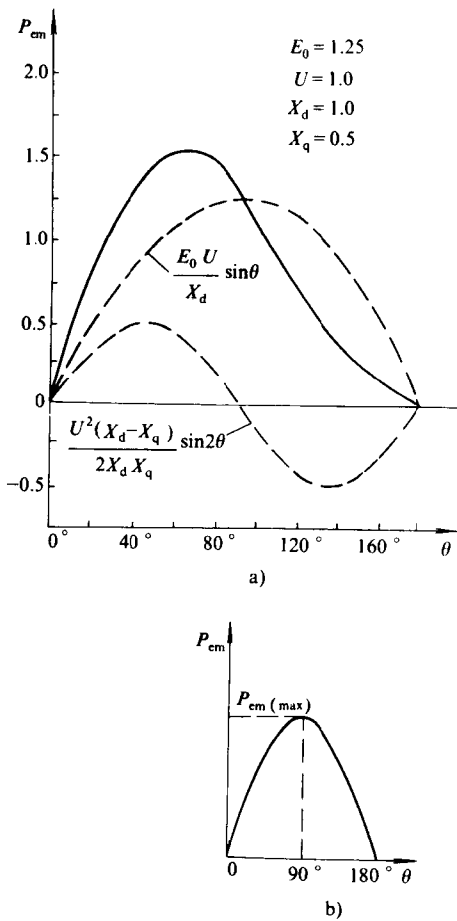


图 2-2-11 功角特性

a) 凸极电机 b) 隐极电机

(2) 凸极电机的电磁转矩有两个分量。表 2-2-4 中公式右边的第 1 项为基本分量,需要励磁磁场才能产生;第 2 项为附加分量,是交、直轴磁阻不等引起的,又称为磁阻功率(转矩),它不依赖于励磁而存在,只要 $X_d \neq X_q$,且电机定子接上外电压 U 即能产生,所以凸

极电机接在电网上时,即使不加励磁,也可输出一些功率。利用这一功率产生的转矩可制成一种磁阻式同步电动机(参见第 5 篇第 3 章 3.2 节)。

4.2 静态稳定

4.2.1 整步功率

电磁功率对其相应功角 θ 的导数,称为整步功率,即

$$P_{syn} = \frac{dP_{em}}{d\theta} = m \frac{E_0 U}{X_d} \cos\theta + m \frac{U^2}{X_d X_q} (X_d - X_q) \cos 2\theta \quad (2-2-15)$$

4.2.2 静态稳定条件

当同步电机受到微小的外界干扰后,具有恢复到原来工作状态的能力,则称为是静态稳定的。其条件为

$$\frac{dP_{em}}{d\theta} > 0 \quad (2-2-16)$$

$dP_{em}/d\theta=0$ 处是静态稳定极限。对隐极电机,这是 $\theta=90^\circ$ 处,静态稳定的范围为 $0 < \theta < 90^\circ$;而对凸极电机,稳定区为 $0 < \theta < \theta_m, \theta_m < 90^\circ$ 。

4.2.3 静过载系数 K_M 与短路比

最大电磁功率 P_{emmax} 与额定电磁功率 P_{emN} 之比,称为静过载系数 K_M 。

对隐极电机或凸极电机略去磁阻功率时

$$K_M = K_c \frac{I_{fN}}{I_{f0}} \frac{1}{\cos\varphi_N} \quad (2-2-17)$$

$$K_c = \frac{\text{空载额定电压时的励磁电流}}{\text{三相稳态短路电流为额定值时的励磁电流}} = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} = k_{fN} \frac{1}{X_d^*} \quad (2-2-18)$$

式中 I_{fN} ——额定工况时的励磁电流;

I_{f0} ——空载额定电压时的励磁电流;

- $\cos\varphi_N$ ——额定功率因数；
- K_c ——短路比；
- $k_{\mu N}$ ——空载额定电压时的饱和系数， $k_{\mu N} = \text{励磁总安匝与气隙安匝的比值}$ ；
- X'_d ——直轴同步电抗的不饱和值的标么值。

当电机采用较大气隙时， I_{f0} 增大，则短路比 K_c 和静过载系数 K_M 均增大，静态稳定性高。当发电机投入空载高压长距离输电系统运行时，在一定励磁方式所能提供的最低稳定电压条件下，发电机能承担较大的充电容量，但电机的制造成本也随之增高。如果电机主要尺寸不变，又要输出相同功率，则转子励磁绕组的温升将升高。

目前发电机大多采用快速励磁系统，已不单纯从短路比来考虑静态稳定性范围。

4.3 动态稳定概念

由于负荷突变，例如线路分合或各种短路故障等，往往对电机的正常运行产生强烈的干扰，电机能否维持其稳定运转的能力，称为动态稳定性。判断发电机能否在动态情况下继续稳定运行，通常采用所谓面积法，即无论由于突加负荷或其他原因使电压下降，或者由于甩负荷或切除线路使电机外电路的总电抗增加，在这些情况下，总是使功角特性从原来的曲线 I 转到曲线 II，见图 2-2-12。如果电机原来运行于特性 I 上的 a 点，则在受到干扰后，立即运行于特性 II 的 b 点。由于原动机调速器具有惯性，其延迟动作使发电机的电磁功率 P_{em} 仍保持为 P_0 ，但因运行于特性 II 时，电机只能输出功率 P'_0 ，出现了过剩功率 ΔP 。这就使转子加速，功角增大，一直加速到 c 点（功角为 θ_c ），这时 $\Delta P = 0$ 。但因这时的转子相对角速度达到最大，在惯性作用下功角继续增大到某点 θ_c' ，于是电机输出功率大于其输入功率， ΔP 为负，使转子减速。经过几个振荡周期后，功角稳定于 θ_c 。面积 A_{abc} 称为加速面积， A_{cde} 称为减速面积。动态稳定的条件是：减速面积必须大于加速面积，否则会出现动态不稳定。减速面积与加速面积之比，称为动态稳定储备系数。

在瞬态情况下，电机电磁功率公式中的 E_0 和 X_d 都应采用瞬态值（因初始瞬态阶段时间极短），即此时 $P'_{em} = mE'_0 U \sin\theta / X'_d$ 。由于 E'_0 下降不多，又有 $X'_d < X_d$ ，如果电网电压不因突加负荷或发生短路故障而下降，且所述情况发生于离电机出线端不远处，由于 $P'_{em} > P_{em}(\theta \text{ 相同时})$ ，动态功角特性反而会高于静态特性。实际上，发生动态情况时，电网电压一般大幅度下降，此外，故障通常又出现于升压变压器之外，因此，必

须采取一定措施，以保持动态功角特性使之不过分低于静态特性。

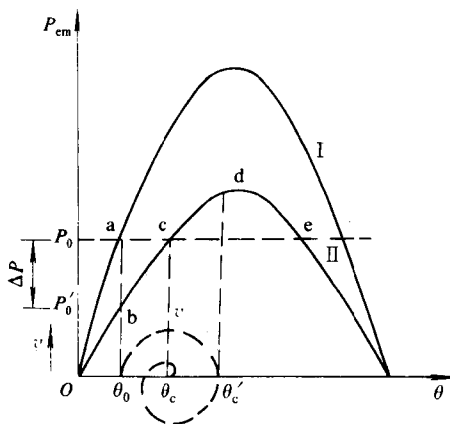


图 2-2-12 动态稳定分析

增大减速面积或减小加速面积以提高动态稳定性的主要措施有：(1) 设计电机时适当降低电机的 X'_d ；(2) 运行中出现类似情况时进行强行励磁；(3) 迅速切除故障线路。

5 同步电动机的电动势平衡方程和相量图

同步电动机是电网的负载，按习惯，电动机电流参考正方向与发电机电流的相反。电动机的 E_0 对电网而言是反电动势，故同步电动机的电动势平衡方程为

$$\dot{U}_c = \dot{E}_0 + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q \quad (2-2-19)$$

根据式(2-2-19)可画出其相量图，见图 2-2-13。

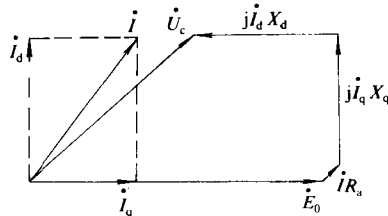


图 2-2-13 同步电动机相量图(过励)

通常电网的其他绝大多数负载都是感性的，所以同步电动机常处于正常励磁或过励磁的情况下运行，以改善电网的功率因数。

6 同步电机无功功率的调节——V 形曲线

当电网电压和频率保持恒值，利用简化相量图（即略去 R_a ，同步电抗以 X_c 表示，不区分 d、q 轴分量），并假设在有功功率不变的情况下，改变同步电机的励磁电流，即改变 E_0 ，此时它们简化的电动势平衡方程为：

对于同步发电机,当式(2·2-7)中略去电阻后有 $\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}X_s$; 对于同步电动机,式(2·2-19)可改写为 $\dot{E}_0 = \dot{U}_c - j\dot{I}X_s$ 。根据这两个公式可得调整励磁电流时的同步电机相量图,见图 2·2-14a 和图 2·2-14b。图中 \dot{E}_{01} 、 \dot{E}_{02} 、 \dot{E}_{03} 分别为三种不同励磁电流 I_{f1} 、 I_{f2} 、 I_{f3} 时的励磁电动势, I_1 、 I_2 、 I_3 是对应的负载电流, φ_1 为 I_1 时的功率因数角。图中 \dot{E}_{01} 、 \dot{E}_{02} 、 \dot{E}_{03} 、…… 之值,可从电机的空载特性曲线上根据其对应的励磁电流值 I_{f1} 、 I_{f2} 、 I_{f3} 查

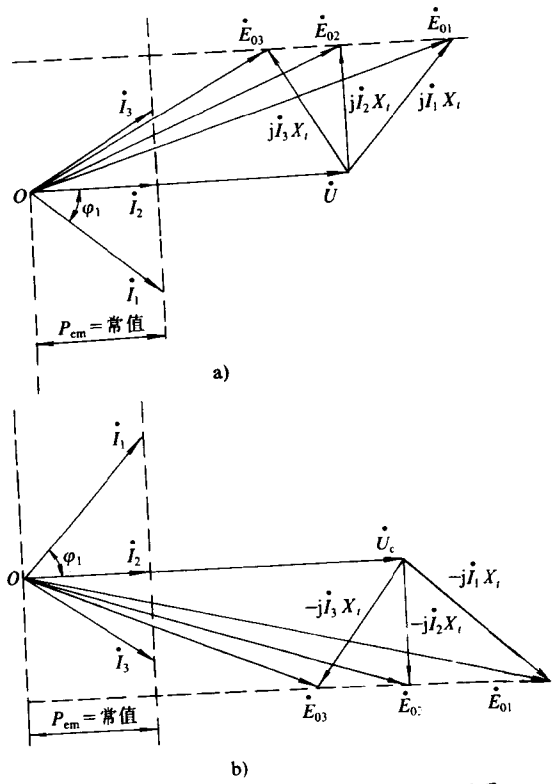


图 2·2-14 调整励磁电流时的同步电机相量图
a) 发电机 b) 电动机

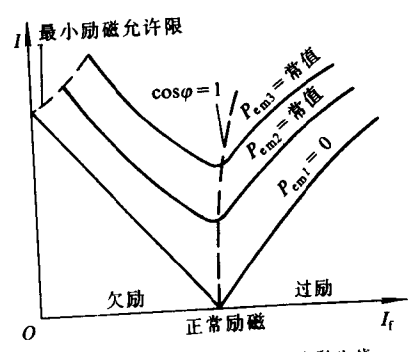


图 2·2-15 同步电机的 V 形曲线

得。据此可绘制出如图 2·2-15 所示的 V 形曲线。

V 形曲线有如下特点:

- (1) 对应于任一常值的有功功率下的 V 形曲线均有一个最低点, 此点表征该有功功率输出时的功率因数为 1.0, 此点所对应的励磁电流称为正常励磁电流。
- (2) 当过励磁, 即励磁电流大于正常励磁电流时, 发电机向电网输出的电流滞后于端电压, 电动机则自电网吸收超前于端电压的电流。
- (3) 当欠励磁, 即励磁电流小于正常励磁电流时, 负载电流与端电压的相位关系与(2)所述的相反。
- (4) 欠励有一定的限度, 其极限值为工作角 θ 接近 90° 时(凸极电机小于 90°)的励磁。如果进一步减小励磁, 则电机将失去稳定。

(5) 图 2·2-15 中 $P_{em} = 0$ 的 V 形曲线, 可看作为同步调相机的 V 形曲线。实际上, 作为调相机用的 V 形曲线, P_{em} 要略大于 0, 即须由电网输入少量有功功率以补偿其损耗。

7 同步电机的不对称负载运行

由于电网负载不对称或发生不对称故障, 而使电机处于三相不对称负载运行状态。这时电机中会出现正序、负序电流, 或还可能出现零序电流, 有时还会出现一系列的高次谐波电流。这些电流的存在, 对电机和电网会产生某些不良影响, 如导致电机局部过热、过电压以及振动等, 还可能使电网出现电磁共振现象等。

为此, 对电流不对称程度及相应运行时间要给予必要的限制。对于同步发电机, 常从转子发热的角度出发, 限制稳态负序电流 I_2 与额定电流 I_N 之比的百分值。国家标准 GB755—87 规定: 在任一相电流不超过 I_N , 且在 350MVA 以下的直接冷却转子汽轮发电机及间接冷却凸极发电机的 $I_2/I_N \leq 8\%$, 间接冷却凸极电动机及调相机 $I_2/I_N \leq 10\%$ 时, 允许电机长期工作; 而当瞬态不对称负载运行, 则对 $(I_2/I_N)^2 t$ 做了如下规定, 间接冷却凸极发电机不大于 20s, 转子直接氢冷汽轮发电机容量小于及等于 350MVA 的, 不大于 8s。详细规定见该标准。

7.1 分析方法——对称分量法

假定电机不饱和, 利用叠加原理。

用对称分量法将三相不对称电流分解为正、负、零相序分量, 并列各相序的电动势方程, 然后根据不对称的边界条件进行求解, 将解得的各相序电流进行叠加, 以求得有关电流。