



异步化同步电机

Ю. П. 夏卡梁 著

徐绳均 韩居学 张桂斌 译

中国电力出版社



537101



异步化同步电机

Ю. Г. 夏卡梁 著
徐绳均 韩居华 张桂娥 译

电力科技专著出版基金资助项目



中国电力出版社

内 容 提 要

异步化同步发电机可以大量发出或吸收无功功率,它和机电变频器一起可以实现机电系统的柔性连接,对提高电力系统的稳定性有巨大意义。异步化同步电动机可以在各种负荷下实现大范围的无级调速,具有显著的节能效益,还可以分别独立地调节转速和无功功率。

本书是前苏联在异步化同步电机方面理论研究、生产制造及运行经验的一个概略总结。全书共7章,全面阐述了异步化同步电机的特性、电机方程、相量图、各种参数计算、控制函数及控制系统结构、稳态和暂态工况分析、工业性试验及运行经验等各方面问题,可供我国电力及电机制造方面有关研究人员及工程技术人员参考,也可供高等学校有关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

异步化同步电机/(俄)夏卡梁编著;徐绳均等译.
-北京:中国电力出版社,1997
ISBN 7-80125-277-2

I. 异… II. ①夏… ②徐… III. 异步电机;同步电机 IV. TM343

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第25390号

本书由 A. H. 阿辽什金授权在中国大陆出版发行
中华人民共和国国家版权局著作权合同登记号
图字:01-1995-574 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路6号 邮政编码100044)
北京市地矿局印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

1997年3月第一版 1997年3月北京第一次印刷
850毫米×1168毫米 32开本 6.25印张 164千字
印数0001--2120册 定价13.30元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

译 序

异步化同步电机也称交流可控电机，其定子一般与普通同步电机没有根本区别，但其转子具有两相及两相以上可控励磁绕组，可以采用直流励磁，也可以采用交流励磁，从而使电机工作于同步或可控的异步状态。

异步化同步电机整套机组包括电机本身和转子电压自动控制系统。电机本身是绕线式转子电机或专门设计的双轴励磁同步电机和无触点电机。异步化同步电机是电机本身和大功率半导体控制技术结合的产物，它依靠转子电压自动控制系统对转子励磁电压的频率、大小和相位进行调节，以实现发电机可控制的异步化运行。

大型同步发电机实现可控异步化及采用机电变频器连接电力系统的各个部分后，可以将目前电力系统的刚性连接变为柔性连接，从而大大改善电力系统的稳定性，此项技术对现代电力系统向大容量、高电压及远距离输电的方向发展具有重要意义。同时它在低负荷时可以大量吸收无功功率，其进相运行为电力系统提供无功功率的能力也远远超过传统的同步发电机，为电力系统提供了有力的调压手段，这对整个电力系统的稳定运行也是十分重要的。

异步化同步电动机则可以在各种不同负荷下灵活地调节无功功率和转速，调速范围达到 $\pm 30\% \sim 50\%$ ，显著提高传动系统的效率，有很高的节能效果。

国外如德、日、美、前苏联等国家对此类电机进行了广泛的研究并已开始生产，如派逊斯 (Parsons) 公司生产了异步化同步发电机，西门子、AEG 等公司都在进行异步化机电变频器的研究和制造，勃朗·鲍威利 (Brown Boveri) 公司已生产了 80MW 的异步化机电变频器，用以连接工业电网和拖动系统；西门子、东

芝、三菱等公司已系列化生产异步化同步电动机，包括无触点电动机^[2]。在这方面，前苏联是走在最前列的。

前苏联于1955年在全苏电工科学研究院(ВНИИЭ)建立异步化同步电机实验室，联合许多研究机构、设计单位和工厂在异步化同步电机的理论、结构、制造及应用等各方面进行了广泛的研究，出版了《异步化同步电机》、《交流可控发电机》等多部专著，发表上百篇论文，并申请了专利。在理论上提出了异步化同步电机的分析体系和各种方程式，并应用控制理论进行了对各种状态参数分别独立进行控制的理论研究和电路设计。完成了电力系统中异步化电机稳态和暂态工况的研究及其计算机分析程序等，并在实践中制造了各种异步化同步电机。1958年制成世界上第一台50MW异步化水轮发电机，1962年投产，1972年进行异步工况工业性试验后运行至今。1972年制成400kW的潮汐电站用异步化电动-发电机组，其效率较常规机组提高5%~6%。1985年制成第一台200MW异步化汽轮发电机组，1986年投运。此外，他们还系列化生产了315~2000kW的各种异步化同步电动机，并已广泛应用于火电站及其他部门的各种传动装置中。目前他们正在进一步对大功率异步化汽轮发电机、蓄能电站和风能电站专用异步化同步电机进行设计与制造；对系统复杂故障下异步化同步电机的运行和控制，更完善的控制理论和方法，性能更好的励磁系统，微处理器和微电子技术在控制系统中的应用，定、转子回路中均装设变频装置的全可控交流电机等等进行研究。

本书是前苏联在异步化同步电机理论研究、设计制造和运行经验等方面的一个阶段性总结。第一章阐述了异步化同步电机的基本理论，第二章分析异步化同步电机的稳态运行方式，第三章介绍异步化同步电机的控制原理及如何保证其稳定性，第四章研究在使用或不使用转子角度及转速测量装置下异步化同步电机的控制系统，第五章分析异步化同步发电机在电力系统中的作用和各种运行方式，第六章讨论异步化同步电动机包括无触点电机的起动及控制系统设计等问题，第七章为各种异步化同步电机的工

业性试验及运行经验的总结,并讨论它们的一些设计及结构问题。

本书原文是在前苏联出版的,故译文正文中的苏联均指前苏联,不再一一加以说明。

我国在异步化同步电机包括双轴励磁发电机的研究方面已进行了许多工作,但迄今还没有进行生产。鉴于它特有的优越性,我们谨将本书译出,供有关研究、制造、运行单位人员参考。全书由徐绳均主持翻译及校核整理成稿,韩居华译第1、2、3、4章,张桂娥译第5、6、7章。王仁洲教授在百忙中审阅了全稿,在此表示深切谢意。

限于我们的水平,译文中可能有不少错误,谨请读者批评指正。

译 者

1994年2月

目 录

译 序

第1章 异步化同步电机的基本特性和方程式	1
1.1 异步化同步电机的结构、励磁和控制系统的 主要部件	1
1.2 异步化同步电机的工作原理和基本特性	5
1.3 异步化电机的方程式	7
第2章 异步化同步电机的正常稳态运行方式	16
2.1 方程式	16
2.2 相量图	20
2.3 正常稳态方式下的电流、电压和功率	21
2.4 不对称电机的稳态运行方式	24
2.5 异步化同步电机稳态运行方式的计算实例	38
第3章 异步化同步电机的控制	46
3.1 概论	46
3.2 控制规律的合成	46
3.3 保证异步化电机静态稳定性的一般问题	66
3.4 电机的特性与暂态过程品质	76
3.5 选择控制参数的一般原则	80
第4章 异步化同步电机控制系统的构成原理	83
4.1 正常稳态方式的平衡性	83
4.2 采用位置和速度传感器的控制系统实例	87
4.3 异步化同步电机无转子角位置传感器时控制规律的形成	90
第5章 电力系统中的异步化发电机	104
5.1 异步化电机的静态稳定性	104
5.2 吸收无功功率的运行方式及确定其稳定性范围的实例	116
5.3 异步化发电机在电力系统中的特殊运行方式	119
第6章 异步化电动机	137
6.1 异步化电动机的结构	138

6.2	异步化电动机的起动	144
6.3	定子与转子绕组并联（或串联）的电动机	147
6.4	无触点异步化电动机	153
6.5	用于火电站厂用设备的异步化电动机	156
第7章	异步化同步电机的工业运行、设计与结构问题	157
7.1	50MVA 的异步化水轮发电机	157
7.2	异步化电动机用于拖动涡轮压缩机	169
7.3	异步化电动机用于拖动火电站的厂用送风机	169
7.4	潮汐电站用的异步化电动—发电机组	171
7.5	电力工业用的大功率异步化电机	175
7.6	异步化电机的设计问题	183
结束语		186
参考文献		189

第1章 异步化同步电机的 基本特性和方程式

1.1 异步化同步电机的结构、励磁和 控制系统的主要部件

异步化电机是一个由普通电机、励磁机和自动励磁调节器组成的机电联合体。图 1-1 示出了异步化同步电机的结构。

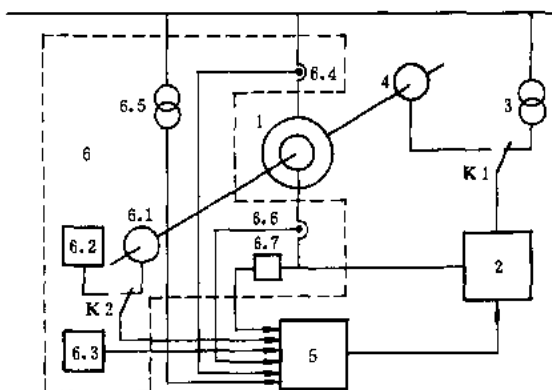


图 1-1 异步化同步电机的结构

电机 1 本身是隐极无换向器交流电机，在一般情况下，其定子绕组具有 m 相，转子绕组具有 m_t 相^①。在绝大多数的实际情况下，定子为三相对称绕组，直接或通过变压器连接到三相电网上，转子为二相或三相对称绕组，通过滑环连接到励磁机上^②。励磁机 2 与电机 1 的转子滑环连接，它或者通过变压器 3 由电网供电，或者由与电机 1 同轴的辅助电机 4（按常规为同步机）供电。电机 4

① 译注：以后将说明，凸极机及转子上具有不对称绕组的机组，也可以在异步化方式下运行。

② 译注：无触点电机方案见第 6 章。

也可以为独立的电动-发电机组。

与转子滑环连接的励磁机输出端的电压频率可以按需要的规律变化，在稳态运行时，等于电机定子磁场转速和转子转速之差（转差率），这就是说，异步化电机的励磁机在一般情况下就是一个将其电源电压频率转变为转差频率的变频器。

自动励磁调节器 5 根据电机的反馈量形成所需要的控制函数，再由励磁机放大后对电机进行控制。显然，调节器输出信号的数量与电机转子的相数一致。它根据电机工作状态各种变量的信息来构成控制函数，这些信息从传感器系统 6 获得。一般情况下，传感器系统 6 包括以下几部分：

- 6.1——转子角位置传感器；
- 6.2——外频率给定器；
- 6.3——电力系统电压相角传感器，该信息可以借助于远距离角度传送器获得；
- 6.4, 6.6——定子、转子电流传感器；
- 6.5, 6.7——定子、转子电压传感器。

图 1-1 中，开关 K1、K2 可以处于左边的位置，也可以处于右边的位置（图 1-1 中在右边）。这样，励磁机 2 既可以由变压器 3 供电，又可以由辅助电机 4 供电。在某些情况下，为了提高异步化电机的可靠性，也可以由两个电源同时向励磁机供电。

如果信号由传感器 6.1 传入调节器 5（K2 在右边位置），那么，调节器的输出信号频率是转子转速的函数，电机具有异步稳定运行特性，这一点后文将说明；如果信号从给定器 6.2 输入调节器，则调节器的输出信号频率与转子转速无关，电机具有同步稳定运行特性。

从以上所述可知，可以采用绕线式转子的异步电机作为异步化电机，该电机既可以是已系列化生产的，也可以是专门设计的。在前一种情况下电机需作一些不大的改造，如加固转子护环，以便可以在超同步速度下运行；有时引出六个集电环等等。后两种情况一般是在制造大功率异步化电机时，可以制造出具有更好技

术经济指标的电机，因为设计中还考虑到该机组其余部件的性能。

异步化电机的励磁机可以由电机或用整流装置构成，而由交流换向电机构成的励磁系统，因为具有许多众所周知的缺点，现在已经不采用了。

现代化励磁系统由晶闸管变频器构成，在众多这类变频器——电压和电流逆变器、自然换向直接变频器（НПЧЕ）等中，输出电流为正弦波的自然换向直接变频器对于异步化电机是最合适的^[12,13]。

文献[13, 14]已对该变频器作了论述。作者在此不再详细叙述它的作用原理和控制方法，只需指出一点：异步化电机采用该变频器的决定因素是这种变频器可以保证输出电流稳定换向而获得直流电流，这使异步化电机可以在同步转速、高于或低于同步转速下运行，并保证电机从一种转速平稳地转变为另一种转速。另外，这种变频器的缺点是最大输出频率较小（不大于电源频率的一半）和无功功率消耗较大，这对于异步化电机不起决定性的作用，尽管在一定条件下也会产生某些问题。

当然，现在采用的方法还可以改进。同时，也应该继续找寻其它更完善的励磁系统，例如采用半导体器件的系统。

图 1-2 (a)、(b) 画出了两相和三相绕组转子的异步化电机采用自然换向直接变频器时，励磁机的结构框图。图 1-3 (a)、(b) 则为这种变频器每相的两种主要电气接线图——中性线式和桥式电路。它的各相可以由同一个匹配变压器或辅助电机的一个绕组系统集中供电，也可以分别供电，即每一相绕组的 НПЧЕ 由各自的匹配变压器（或辅助电机的绕组系统）供电。

在双绕组转子和有四个集电环的情况下，当绕组间无电气连接时，可以采用任何方式供电。

对于有三个集电环的三相转子，仅按中性线接线方式的自然换向直接变频器，可以用上述两种方式对它的各相供电。如果采用桥式接线，只允许采用对 НПЧЕ 各相分别供电的方式。例如，由

三个三相变压器或一个有三个二次绕组的变压器供电。只有在转子上有六个集电环时，才允许由一个变压器的一个绕组供电。

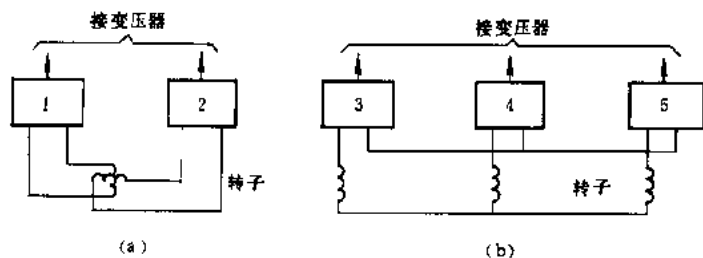


图 1-2 异步化电机的励磁机结构框图

(a) 两相绕组转子；(b) 三相绕组转子

1~5—自然换向直接变频器 (НПЧЕ) ①

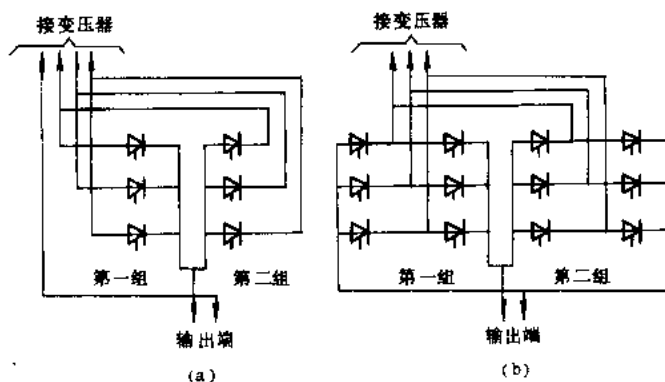


图 1-3 变频器一相的电路图

(a) 中性线式；(b) 桥式

可以在模拟集成元件和分立式微模块技术的基础上制造异步化电机的调节器，还可以把微处理器用于异步化电机的控制，目前，这些工作已在进行。

① 译注：此注为译者加。

1.2 异步化同步电机的工作原理 和基本特性

电机的正常稳态，是指电机在这种工况下，其定子和转子回路的有功功率和无功功率是不随时间而变化的恒定值，轴上的机械转矩恒定，转子的角速度也不变^[15]。

对于任何电机，处于正常稳态的条件是：转子角速度为任意值时，由定子电流和转子电流在空间产生的磁通量互相之间没有相对的移动。由此得出：产生上述磁通量的磁动势或者定子与转子的电流、电压矢量也应该没有相对运动，该条件可写成以下形式：

$$\omega_i = \omega - \omega_R = -s\omega \quad (1-1)$$

式中 ω ——定子的电压、磁通量和电流矢量相对于定子的角速度；

ω_i ——转子的电压、磁通量和电流矢量相对于转子本身的角速度；

ω_R ——转子的角速度。

可以用两种原则上不同的方法实现上述条件：

(1) 当 ω_i 是自变量，角速度 ω_R 是 ω 和 ω_i 的函数时；

(2) 当 ω_R 是自变量， ω_i 是 ω 和 ω_R 的函数时。

根据上述原则，B. T. 卡斯扬诺夫曾经提出把电机分为两类，这个观点在后来其他人的工作中得到发挥^[3,16]。第一类为具有同步特性的电机，或者说运行在“广义同步”状态；第二类为具有异步特性的电机，或者说运行在“广义异步”状态。对于被作者称作异步化同步电机的电机，在一定条件下，这两种运行状态都可能存在，并具有各自的优点和缺点。

图 1-4 (a)、(b) 示出了运行在“广义同步”和“广义异步”状态的异步化电机的接线图。其不同点在于：图 1-4 (a) 中，电机 1 的转子与变频器 2 连接，由于信号 ω_i 从独立的给定器 4 (与

图 1-1 中的频率给定器 6.2 相同) 送到调节器 3 的输入端, 因此, 电机 1 的自动控制系统按照转速为开环控制的方式; 图 1-4 (b) 中, 转子角速度信号 ω_R 从位置传感器 5 (与图 1-1 中的传感器 6.1 同) 输送到调节器 3 的输入端, 电机 1 的自动控制系统按照转速为闭环控制方式。

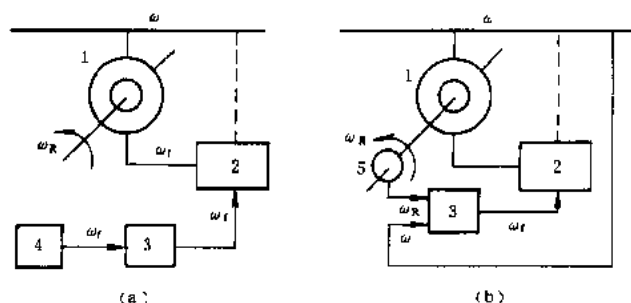


图 1-4 异步化电机接线图

(a) 运行在“广义同步”状态下; (b) 运行在“广义异步”状态下

在“广义同步”状态下, 当轴上机械转矩变化而转速 ω 、 ω_f 值不变时, 只有在 $\omega_R = \omega + \omega_f = \text{常数}$ 时, 新的稳态才会建立, 即在该条件下, 稳态时的转子速度不会随轴负荷而变化, 此时, 异步化电机和同步电机的状态完全相同。

在“广义异步”状态下, 当作用在轴上的转矩改变而角速度 ω 值不变时, 转子速度为任意值都可以达到新的稳定状态, 速度 ω_f 将会按照式 (1-1) 变化, 在新的正常稳态下, ω_R 和 ω_f 的值, 由电机的机械特性和其它因素决定, 这些将在下而作详细研究。但需指出, 此时在正常稳态运行方式下, 负荷改变时转子转速变化, 这完全与异步电机一样。

另外, 无论是“广义同步”情况 (ω 和 ω_f 不变), 还是“广义异步”情况 (ω 和 ω_R 不变), 在异步化电机中, 转子电流的变化, 都可以改变定子的无功功率, 就像同步电机一样。

对于“广义同步”状态, 可以通过改变转子绕组的电压频率

ω_r 来调节转子的角速度，而在“广义异步”状态，则是通过改变转子电压的大小和相位来改变电机转矩和轴上的机械力矩之间的关系，从而改变转子的转速。这两种情况下，当电机上的转矩和机械力矩重新相等时，将达到新的稳定状态。

这样，依据转子电压（及电流）频率 ω_r 不同的形成方法，异步化电机可以运行于“广义同步”和“广义异步”两种状态。这些不同的形成方法也决定了是由转子角速度还是由转差率来确定电机的稳定特性^[1,17]。

异步化同步电机可以调节无功功率，而与转子电压的形成方法无关，转子还可以以不同转速在正常稳态下运行。同时看出：异步化电机的特性、静态及动态性能都由转子电压（电流）空间矢量的大小和相位的控制规律及控制参数来确定。

1.3 异步化电机的方程式

一、电机

为了描述电机本身发生的暂态过程，需采用众所周知的派克-高列夫 (Парк-Горев) 方程式^[18,19]。因为已在文献 [10, 18, 20~22] 中对这些方程作了论述，在此不再详细推导这些方程。只需指出：方程仅适用于理想电机，即在电机中没有铁损和非线性磁饱和现象，不考虑磁滞及磁场中的高次谐波等^[23]。

为了不破坏论述的通用性，研究对象可以采用两相对称定子的双极电机，其转子在磁、电上也都是对称的，即假设转子为两相对称绕组系统^[9,22]，且不考虑在电机转子上的阻尼回路。因此，必须作以下说明：异步化电机如异步化汽轮发电机可以在转子上装有显式或隐式阻尼回路。在异步状态下，阻尼回路会导致附加损耗增加，使电机不能长时间运行在转子速度大范围变化的方式下，而这正是异步化电动机所要求的。但以同步转速或接近于同步转速运行的电机，可以装有阻尼回路。阻尼回路对异步化电机的稳定性条件和工况的影响的问题需要作专门研究，此已超出本

式中 t' ——时间, s;

T' ——时间常数, s。

对应于定子、转子绕组的电感 L 、 L_t 和它们的互感 L_a , 引入相应的电抗

$$x = \omega_0 L, \quad x_t = \omega_0 L_t, \quad x_a = \omega_0 L_a \quad (1-2)$$

式中 $x = x_d = x_q$ ——定子绕组的全感抗;

$x_t = x_{td} = x_{tq}$ ——转子绕组的全感抗;

$x_a = x_{ad} = x_{aq}$ ——取决于电枢反应的感抗。

在标么制下的电机方程式为

$$-u_x = r i_x + p \Psi_x + \omega_k \Psi_y \quad (1-3)$$

$$-u_y = r i_y + p \Psi_y - \omega_k \Psi_x \quad (1-4)$$

$$u_{tx} = r_t i_{tx} + p \Psi_{tx} + (\omega_k - \omega_R) \Psi_{ty} \quad (1-5)$$

$$u_{ty} = r_t i_{ty} + p \Psi_{ty} - (\omega_k - \omega_R) \Psi_{tx} \quad (1-6)$$

$$M_R = T_j p \omega_R + M_e \quad (1-7)$$

$$\text{其中} \quad \Psi_x = x i_x + x_a i_{tx}; \Psi_y = x i_y + x_a i_{ty} \quad (1-8)$$

$$\Psi_{tx} = x_t i_x + x_{at} i_{ty}; \Psi_{ty} = x_t i_y - x_{at} i_{tx} \quad (1-9)$$

$$M_e = i_x \Psi_y - i_y \Psi_x = x_a (i_x i_{ty} - i_y i_{tx}) \quad (1-10)$$

式中 $u_x, u_y, i_x, i_y, \Psi_x, \Psi_y$ ——定子绕组的电压、电流和磁链;

$u_{tx}, u_{ty}, i_{tx}, i_{ty}, \Psi_{tx}, \Psi_{ty}$ ——转子绕组的电压、电流和磁链;

M_R ——机械转矩;

M_e ——电机的电磁转矩;

T_j ——机电时间常数;

p ——微分符号。

定子、转子的全感抗可以表示为

$$x = x_s + x_a \quad (1-11)$$

$$x_t = x_{ts} + x_a \quad (1-12)$$