

DIANQI SHEBEI
ANZHUANG YUNXING YU JIANXIU



电气设备 安装运行与检修

主 编 单文培 单欣安 王 兵
副主编 邱玉林 李建平 姚国辉



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TM05/6

2008

电气设备 安装运行与检修

主 编 单文培 单欣安 王 兵

副主编 邱玉林 李建平 姚国辉

中国水利水电出版社 地址：北京市三里河路6号 100044 电话：(010) 88383994, 88383993 E-mail: sales@waterpub.com.cn 网址：www.waterpub.com.cn	主 编 单文培 单欣安 王 兵 副主编 邱玉林 李建平 姚国辉	书 号 出 版 行 作 者 姓 名
中国水利水电出版社 地址：北京市三里河路6号 100044 电话：(010) 88383994, 88383993 E-mail: sales@waterpub.com.cn 网址：www.waterpub.com.cn	主 编 单文培 单欣安 王 兵 副主编 邱玉林 李建平 姚国辉	书 号 出 版 行 作 者 姓 名



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

北京三里河路6号 100044

电话：(010) 88383994, 88383993

内 容 提 要

本书是根据目前国家及行业的最新标准、规程、规范以及当前电气设备的技术发展实际,精心编写而成的。本书内容广泛新颖、言简意赅、图文并茂、深入浅出,具有较强的实用性。

本书共分14章,内容包括:同步电动机及励磁装置,异步电动机的检修与运行,电力变压器,高压配电装置,低压电器,互感器和电力电容器,母线、电缆、绝缘子、套管,接地装置与防雷设备,二次回路,电工仪表,直流设备运行及故障处理,照明,电气线路,电气防火与防爆等。

本书可供发电厂、变电站、工矿企业等电气设备安装、运行、检修、维护的工程技术人员和管理人员查阅、使用,也可作为职工的岗位培训教材,还可供大中专院校相关专业师生学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气设备安装运行与检修/单文培,单欣安,王兵主
编. —北京:中国水利水电出版社,2008
ISBN 978-7-5084-5642-3

I. 电… II. ①单…②单…③王… III. ①电气设备—设
备安装②电气设备—运行③电气设备—检修 IV. TM0

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第085497号

书 名	电气设备安装运行与检修
作 者	主 编 单文培 单欣安 王 兵 副主编 邱玉林 李建平 姚国辉
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 32.75印张 777千字
版 次	2008年7月第1版 2008年7月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	65.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《电气设备安装运行与检修》

编写人员名单

主 编 单文培 单欣安 王 兵

副主编 邱玉林 李建平 姚国辉

参 编 王 笑 王红才 刘 强 刘茂福 刘建平
徐子和 余 倩 李桂钧 吴成林 肖海平
陈良根 金选钧 唐 强 黄 燕 黄洪生
黄启坤 谢敏文 曾冠杰 詹 磊 华克夫
侯荣升 史俊华 欧阳微频 柯 磊 张 晶
尹利强 朱 丽 李美坤

前言

电气设备是发电厂、变电站、大型排灌泵站等的重要组成部分，它直接影响发电厂、变电站及电力系统的安全运行。随着我国发电厂、变电站、大型泵站的大量建设，电网不断拓展，电力行业队伍不断壮大。同时随着我国各行各业的电气化程度日益提高，涉及电工领域的人员也越来越多。要保持我国国民经济高速健康发展，保证电力系统安全可靠运行与不断提高电能质量均具有极为重要的意义。要求从事电工领域人员熟悉与掌握电气设备安装运行与维护的技能，目前市场尚缺少此类书籍，为满足广大技术人员的实际需要，作者根据多年从事电气设备安装、运行、维护、检修的实际工作经验，并参考最新国家及行业的标准、规范、规程，较系统地介绍了电气设备安装、运行与检修的技能与工艺。同时还介绍了一些基本知识与新产品，以便广大电力职工和电力专业学生加深对电气设备的理解与掌握。

在取材方面，对新的电气设备作了全面系统的介绍，对淘汰设备（如跌落保险、管型避雷器）不介绍，例如高压断路器中，详细介绍真空断路器、SF₆断路器，油断路器考虑目前有些单位还使用它，对运行维护作了介绍，对目前采用的新工艺和新产品作了介绍。

本书在编写过程中，参考了大量的文献资料，进一步丰富了本书内容，谨在此向相关作者表示衷心感谢。

本书由单文培、单欣安、王兵任主编，邱玉林、李建平、姚国辉任副主编，参加编写的还有：王笑、王红才、刘强、刘茂福、刘建平、徐子和、余倩、李桂钧、吴成林、肖海平、陈良根、金选钧、唐强、黄燕、黄洪生、黄启坤、谢敏文、曾冠杰、詹磊、华克夫、侯荣升、史俊华、欧阳微频、柯磊、张晶、尹利强、朱丽、李美坤。王智园负责全书的插图工作。

由于编者水平有限，书中疏误或不足之处在所难免，敬请专家、同仁与广大读者批评指正。

作者

2008年5月

目 录

前言

第一章 同步电动机及励磁装置	1
第一节 同步电动机的工作原理	1
第二节 同步电动机的功率因数	4
第三节 同步电动机的启动	6
第四节 同步调相机	10
第五节 同步电动机的励磁方式	14
第六节 硅整流励磁装置	15
第七节 晶闸管励磁装置	19
第八节 晶闸管励磁装置维护及常见故障处理	71
第二章 异步电动机的检修与运行	80
第一节 中小型异步电动机的拆装与组装	80
第二节 三相异步电动机定子绕组的故障检修	83
第三节 异步电动机转子的故障修理	88
第四节 交流异步电动机铁芯的故障处理	92
第五节 电动机转轴修理	94
第六节 异步电动机定子绕组重嵌	99
第七节 异步电动机的浸漆与烘干	108
第八节 异步电动机的操作	109
第九节 电动机运行中的检修维护	114
第十节 电动机空载启动时的故障处理	116
第十一节 电动机负载运行时的故障处理	118
第十二节 电动机运行中的事故停机处理	121
第十三节 电动机轴承故障处理	121
第三章 电力变压器	123
第一节 电力变压器的安装	123
第二节 电力变压器安装中出现的缺陷及其排除	128
第三节 变压器的交接试验及试运行	134
第四节 变压器的运行原则	141
第五节 变压器的操作和并列运行	146

第六节	变压器运行中的维护及检查	149
第七节	变压器故障与事故处理	150
第八节	变压器油的运行	156
第九节	变压器不吊芯检修	162
第十节	变压器吊芯检修	164
第十一节	变压器其他部件检修	169
第四章	高压配电装置	173
第一节	高压熔断器	173
第二节	隔离开关	178
第三节	油断路器	187
第四节	真空断路器	204
第五节	SF ₆ 断路器	217
第六节	断路器的操动机构	236
第七节	高压开关柜	252
第五章	低压电器	258
第一节	刀开关	258
第二节	接触器、磁力启动器	261
第三节	自动空气开关	274
第四节	低压熔断器	288
第五节	漏电保护装置	292
第六节	低压配电屏	295
第六章	互感器和电力电容器	299
第一节	互感器的安装	299
第二节	电压互感器的运行及事故处理	301
第三节	电流互感器的运行及事故处理	304
第四节	互感器的小修	306
第五节	电力电容器安装与检修	309
第六节	电容器的运行	313
第七节	电力电容器的故障处理	316
第七章	母线、电缆、绝缘子、套管	321
第一节	硬母线的安装与检修	321
第二节	软母线的安装与检修	324
第三节	绝缘子、套管	326
第四节	电缆的施工	328
第五节	电缆线路的运行与维护	336
第六节	电力电缆的修理	340

第八章 接地装置与防雷设备	343
第一节 接地装置的安装	343
第二节 接地装置的运行维护	346
第三节 接地装置的故障处理	347
第四节 防雷设备的安装	348
第五节 避雷器的检修	350
第六节 避雷器的运行维护及故障处理	353
第九章 二次回路	357
第一节 二次回路的基本知识	357
第二节 泵站测量仪表的装置	361
第三节 断路器的控制	365
第四节 信号系统	367
第五节 继电保护系统	370
第六节 大型泵站的机组控制	375
第七节 屏、柜的安装	380
第八节 控制电缆的安装	384
第九节 二次回路的试操作（传动）试验与试运行	390
第十节 二次回路的运行检查及维护	394
第十一节 在二次回路上工作的安全规定	397
第十二节 二次回路故障处理	398
第十三节 继电保护装置运行维护	402
第十四节 继电保护和自动装置的投、停操作	403
第十五节 自动装置的运行管理	404
第十章 电工仪表	406
第一节 电工仪表的运行异常处理	406
第二节 电流、电压表的故障处理	407
第三节 电能表的使用与维修	411
第四节 万用电表	416
第五节 绝缘电阻表	421
第六节 直流电桥	423
第七节 钳形电流表	425
第八节 交流电桥	426
第九节 交流功率的测量	429
第十节 MC—07 型接地电阻测量仪	430
第十一章 直流设备运行及故障处理	432
第一节 铅酸蓄电池的运行维护	432
第二节 镉镍蓄电池的运行维护	441

第三节	直流系统的运行故障处理	446
第十二章	照明	456
第一节	照明方式与种类	456
第二节	照明光源选择与接线	456
第三节	导线截面选择	459
第四节	照明设备的安装	459
第五节	照明电路故障的维修	463
第十三章	电气线路	467
第一节	架空线路常见故障	467
第二节	电气线路安全条件	470
第三节	线路巡视检查	475
第四节	架空配电线路施工的特点	475
第十四章	电气防火与防爆	484
第一节	电气火灾与爆炸的原因	484
第二节	危险环境	486
第三节	防爆电气设备和防爆电气线路	487
第四节	电气防爆技术	492
附录		494
附录一	控制屏(台)上模拟母线的颜色	494
附录二	控制屏上主要小母线的颜色	494
附录三	直流屏或所用屏小母线相序及涂色表	494
附录四	电气常用新旧图形符号对照表	495
附录五	电气常用新旧文字符号对照表	505
附录六	小母线新旧文字符号及其回路标号	509
附录七	二次直流回路新旧数字标号	511
参考文献		513

第一章 同步电动机及励磁装置

同步电动机的转子一般采用凸极结构，并在磁极面上装有阻尼绕组（即启动绕组）。异步启动法已经成功采用于同步电动机而且可控硅整流装置作为励磁电源。使同步电动机广泛用于拖动那些转速不需要调节的生产机械，其容量多为几百千瓦，直到 1 万 kW 以上。它与异步电动机相比有显著优点：首先，功率因数高，可以达到 $\cos\alpha=1$ ，特别在过励状态时，还可以使功率因素超前，从而提高了电网的功率因素；其次，低速同步电动机的体积重量比同容量同转速的异步电动机小，因为电动机的主要尺寸取决于额定视在功率 $S_N=P_N/(\eta_N\cos\varphi_N)$ ；另外，同步电动机的气隙较大，过载能力 k_M 值高， $k_M=2\sim3$ ，静态稳定性好，且因为气隙大使电动机结构可靠性提高，安装维护容易。因此在不需调速而功率又较大的场合，如驱动大型水泵、大型空气压缩机、球磨机、鼓风机等，多采用同步电动机作动力。

第一节 同步电动机的工作原理

一、同步发电机状态过渡到电动机状态

同步电机既能作发电机运行，也能作电动机运行。同步电动机是如何从发电机状态转变到电动机状态呢？下面讨论已经并入电网运行的同步发电机变为电动机运行的过程，主要研究其物理过程及其内部各物理量之间关系的变化。

设同步电机已向电网送去一定的有功功率，同步电动机作为发电机运行时，它的转子磁场超前合成磁场一个 θ 角，如图 1-1 (a) 所示。为了更形象地阐述问题，我们把气隙中的合成磁场用假想的等效磁极来代替，等效磁极和转子磁极一样，在空间以同步速度旋转。此时磁通是斜着穿过空气隙的，并且在气隙合成磁场和转子磁场之间产生了磁拉力，由转子磁极拖着气隙合成磁场的等效磁极以同步转速旋转。当发电机向外输出功率时，在发电机内部产生的电磁制动转矩企图阻止转子旋转。因此，必须有原动机拖动转子，克服电磁转矩制动等作用，转子才能不停地旋转。此时，我们可以把转子磁场看成是拖动者，把气隙合成磁场看成是被拖动者。

若逐步减少发动机的输入功率，转子将减速，功率角 θ 减小，发电机向电网输出的功率也减小，当功率角 θ 减小为零时，发电机的输入功率只能抵偿空载损耗，发电机处于空载运行状态。这时，两个磁场的轴线相重合，磁通垂直地通过空气隙，转子磁场和合成磁场之间不能产生磁拉力，电磁转矩为零，发电机不向电网输出功率，此时，是同步发电机过渡到电动机的中间状态，如图 1-1 (b) 所示。

最后，若关闭气门或水门，因为电机及原动机的轴承摩擦等反转矩的作用，转子开始

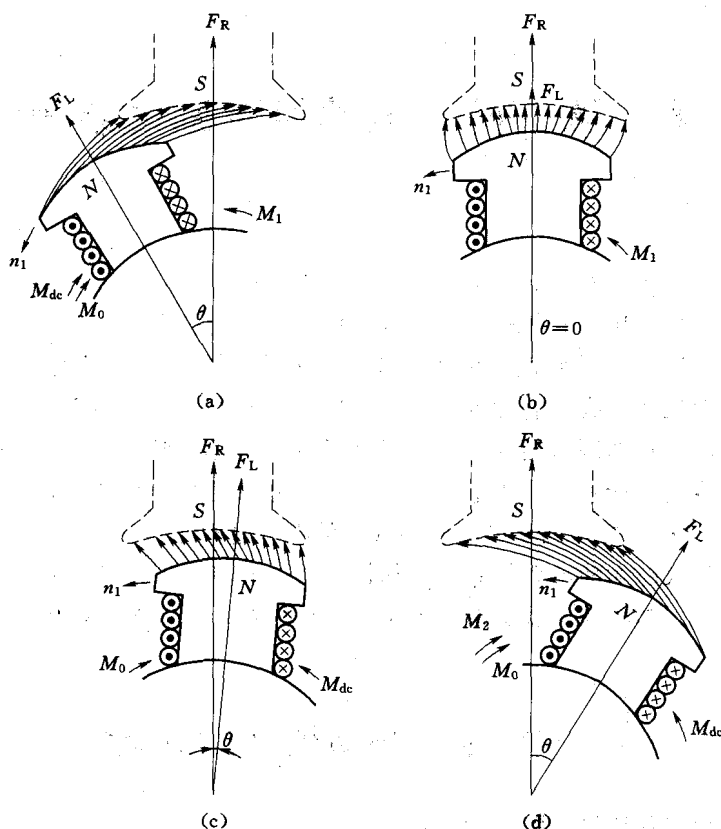


图 1-1 同步发电机转变为电动机运行的物理过程

(a) 发电机运行状态，转子磁场超前气隙合成磁场 θ 角；(b) 发电机输出功率为零 $\theta=0$ ；

(c) 撤掉原动机，同步电机处于电动机运行状态， $\theta < 0$ ；(d) 同步

电动机带机械负载以后， θ 角的绝对值增加

减速。转子磁场开始滞后气隙合成磁场，功率角 θ 变为微小负值，这时，电机开始从电网吸取功率，同步发电机转变为空载运行的同步电动机，磁通又斜着穿过空气隙，气隙磁场和转子磁场之间产生了磁拉力，不过，此时气隙磁场就变成了拖动者，如图 1-1 (c) 所示。

从以上分析可知：当同步发电机变为电动机时，功率角和相应电磁转矩、电磁功率均由正值变为负值，电磁转矩由制动的变为驱动的。

当同步电动机的三相定子绕组接通电源时，对称的三相电流就要产生一个旋转磁场，拖动已经励磁的转子以同步转速旋转，这就是同步电动机的工作原理。

二、同步电动机的功率和电动势平衡关系

同步电动机从电源输入的功率 P_1 ，一部分消耗定子绕组的铜耗 $\Delta P_{t.cu}$ 和定子铁损 $\Delta P_{t.fe}$ ，剩下的部分就是电磁功率 P_{dc} ，由定子通过气隙传送到转子，因此

$$P_{dc} = P_1 - \Delta P_{t.cu} - \Delta P_{t.fe} \quad (1-1)$$

从电磁功率 P_{dc} 中减去由于通风和摩擦引起的机械损耗 ΔP_{jj} ，以及转子表面的附加损

耗 ΔP_i ，就得到电动机轴上输出的有用机械功率 P_2 。

$$P_2 = P_{dc} - \Delta P_{ji} - \Delta P_i$$

同步电动机的功率平衡关系，可以用图 1-2 所示的能量流图来表示。

同步电动机从发电机过渡到电动机状态，只是功率角 θ 改变了符号。因此，同步发电机的电磁功率与功率之间关系对于同步电动机也是适用的。不过，同步电动机一般都是凸极式的，它的纵（直）轴同步电抗 X_d 与横（交）轴同步电抗 X_q 不相等，功角特性有一个附加分量，可以用下式表示：

$$P_{dc} = \frac{3E_0U}{X_d} \sin\theta + \frac{3U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

这样看来，同步电动机的功角特性曲线就不是一条正弦曲线，如图 1-3 所示。

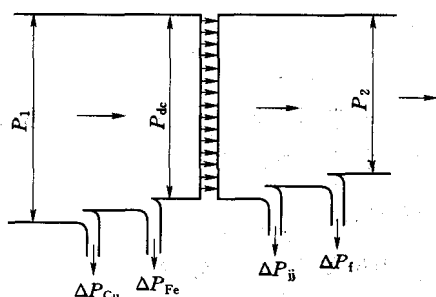


图 1-2 同步电动机的能量流图

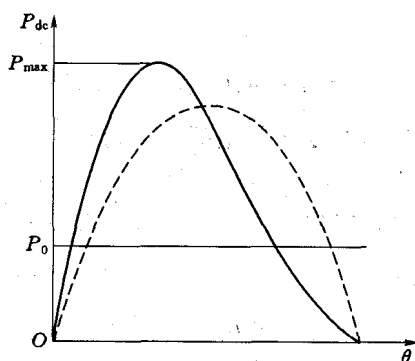


图 1-3 凸极式同步电动机的功率特性曲线

同步电动机的最大电磁转矩 P_{max} 与额定转矩 P_t 之比叫做过载能力，用 K_M 表示。

$$K_M = \frac{P_{max}}{P_t} \quad (1-2)$$

一般情况，同步电动机功角 $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ 时，过载能力 $K_M = 2 \sim 3$ 。同步电动机中的电磁关系和同步发电机类似。主磁极励磁磁动势和定子绕组中的电枢磁动势分别在定子绕组中产生感应电动势 E_0 和电枢反应电动势 E_s ，如果不考虑磁路的饱和， E_0 与 E_s 的向量和就可以看成是气隙合成磁动势产生的感应电动势 E ，即

$$E = E_0 + E_s \quad (1-3)$$

像发电机一样，电枢反应电动势 E_s 也可以表示为电枢反应电抗压降。对于隐极式同步电动机， E_s 可以表示为

$$E_s = jI_s X_s \quad (1-4)$$

式中 X_s ——电枢反应电抗；

I_s ——定子电流。

同步电动机定子漏磁通所产生的漏感电动势 E_l ，可以用漏抗压降来表示，即

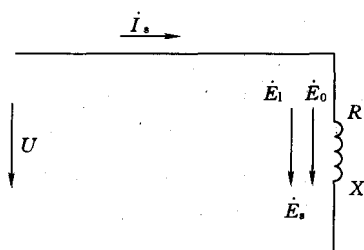


图 1-4 同步电动机的一相定子绕组电路

$$\dot{E}_1 = -j\dot{I}_s X_1 \quad (1-5)$$

式中 X_1 ——漏电抗。

根据图 1-4 中所假设的电压、电流正方向，同步电动机一组定子绕组中的电压平衡关系（忽略定子绕组电阻）为

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 - \dot{E}_1 = -\dot{E}_0 - \dot{E}_s - \dot{E}_1 \quad (1-6)$$

将式 (1-4) 与式 (1-5) 代入式 (1-6) 得到

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_s X_s + j\dot{I}_s X_1$$

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_s (X_s + X_1)$$

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_s X_t \quad (1-7)$$

式中 X_t ——同步电抗， $X_t = X_s + X_1$ ；

$-\dot{E}_0$ ——定子绕组的反电动势。

同步电动机一般是凸极式的，凸极式同步电机的气隙不均匀，它的直轴电枢反应电抗不等于交轴电枢反应电抗。凸极式同步电动机的电压平衡方程式为

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q \quad (1-8)$$

式中 $\dot{I}_d$ ——定子电流的直轴分量，它是与 $-\dot{E}_0$ 的相位差为 90° 的分量；

X_d ——纵轴同步电抗；

$\dot{I}_q$ ——定子电流 $\dot{I}_s$ 的横轴分量，它是与 $-\dot{E}_0$ 同相位的分量；

X_q ——横轴同步电抗。

第二节 同步电动机的功率因数

并联在电网上的同步发电机能够通过调节励磁电流的方法改变它的输出无功功率。同步电动机也是这样，如果增加它的励磁电流，电动势 $\dot{E}_0$ 就增大，同步电动机就会在过励状态下运行。

根据式 (1-8)，可以画出同步电动机在过励状态下的向量图，如图 1-5 (a) 所示，此时，同步电动机定子电流 $\dot{I}_s$ 超前端电压 $\dot{U}$ （即为容性），反电动势 $-\dot{E}_0$ 比较大。电动机从电网吸取容性电流和容性无功功率，或者说，向电网输出感性电流和感性无功功率，正好补偿了附近电感性负载的需要，使整个电网功率因数得到了提高。

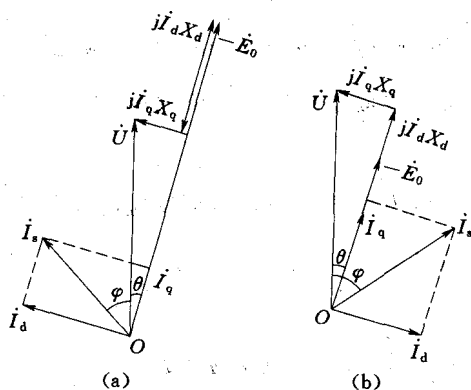


图 1-5 同步电动机的向量图
(a) 过励状态；(b) 欠励状态

如果减少同步电动机的励磁电流， E_0 就减小，同步电动机就在欠励情况下运行，如图 1-5 (b) 所示。这时同步电动机从电网吸收电感性电流 I_s 。对电网来说，此时增加了电感性负载，使负载需要的感性无功电流增加，降低了整个电网的功率因数。因此，同步电动机一般不在欠励情况下运行。同步电动机一般按照过励 ($\cos\varphi=0.9$ 超前) 的运行条件设计时，要特别注意其励磁电流不能过分加大，因为励磁电流太大会引起定子电流增大，定子与转子的损耗都要增加，使电机的温升增高。

同步电动机接入无穷大电网运行，电网电压 U 为常数，频率为常数，同步电动机从电网吸取的有功功率的大小，由它所带动的机械负载大小决定。如果同步电动机的机械负载保持不变，那么调节同步电动机的励磁电流，就会使定子电流也发生变化。和同步发电机一样，励磁电流和电枢电流之间的关系可用 U 形曲线来表示，如图 1-6 所示。每条曲线的最低点是定子电流最小 ($\cos\varphi=1$) 的情况，把这些点连接起来，就得到一条稍微向右倾斜的曲线。它的右边是电动机的过励运行区。对于电网来说，电动机相当于一个电容性负载，它的定子电流 I_s 超前电压 U ，从

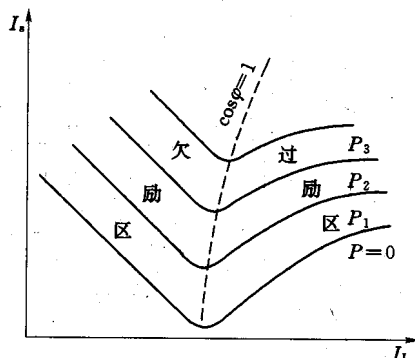


图 1-6 同步电动机的 U 形曲线

电网吸收电容性无功功率。曲线的左边是欠励运行区，电动机电流 I_s 滞后电压 U ，从电网中吸收电感性无功功率。

同步发电机在过励状态下运行时，它的功率因数是滞后的，电流 I_s 滞后电压 U ，发电机向电网输出感性的无功功率；同步电动机在过励状态下运行时，它的功率因数是超前的，电流 I_s 超前电压 U ，电动机从电网吸收容性的无功功率。这两种情况，看起来似乎有矛盾，同样是过励状态，为什么发电机的功率因数滞后，而电动机的功率因数却超前呢？

其实这里并没有矛盾，因为发电机是一个电源，把它向电网输出的电流看作是正电

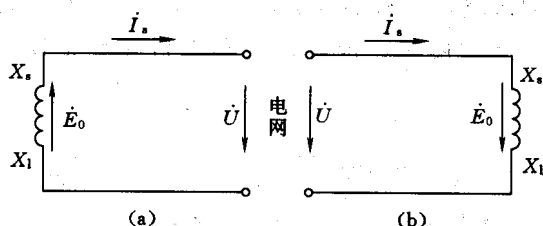


图 1-7 同步电机电流正方向的规定

(a) 发电机惯例；(b) 电动机惯例

流，如图 1-7 (a) 所示；而电动机是一个负载，把它从电网中输入的电流看作是正电流，如图 1-7 (b) 所示。在两种情况下，电流的正方向规定得正好相反，相位差 180° 。因此，电动机从电网吸收电容性的电流和容性无功功率，也就相当于向电网送出电感性电流和感性无功功率，这和发电机是一样的。

由于同步发电机具有能够提高电网的功率因数这一优点，对于某些大容量、转速不变的机械负载，如轴流式水泵，可以用同步电动机来带动。当采用同步电动机时，一般是使它在过励情况下运行，以便从电网中吸收

超前的无功电流（也就是向电网输出感性电流），这时电动机的功率因数是超前的。有时可使同步电动机接近正常励磁状态下运行，这时电动机功率因数就接近于1。

第三节 同步电动机的启动

当同步电动机的定子绕组和三相电源接通时，定子绕组中的三相对称电流就产生一个旋转磁场，虽然转子已被励磁，但是却不能转动，这是什么原因呢？用一对等效磁极来代

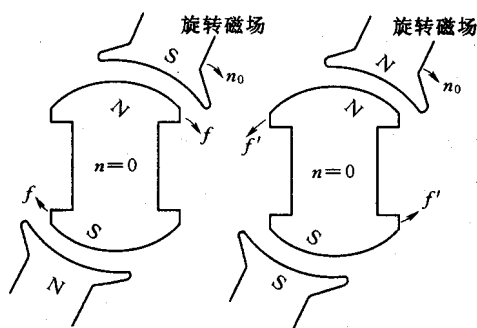


图 1-8 同步电动机接电源
启动时，启动转矩为零

替旋转磁场，如图 1-8 所示。在启动时，转子是静止的（ $n=0$ ），等效磁极在空间中以同步转速 n_0 旋转。从图 1-8 可以看出，当旋转磁场的 S 极经过转子的 N 极时，转子受到与旋转磁场同方向（在图 1-8 中为顺时针方向）的吸力 f ，但是转子本身有惯性，而旋转磁场又转得很快，转子还没来得及转动时，旋转磁场的 N 极已经转过来了，于是转子 N 极又受到与 n_0 相反方向的排斥力 f' （即逆时针方向推力）；这样一来，旋转磁场虽然旋转一周，但是转子受到的平均转矩却为零。也就是说，同步电动机自己不能

启动，它的启动转矩为零，必须采用其他措施来启动同步电动机。

一、启动方法

1. 辅助电动机启动法

通常选用和同步电动机极数相同的异步电动机作为辅助电动机，它的容量为主机的 5%~15%，先用辅助电动机将主机拖到接近于同步转速，然后用自整法将其投入电网，再切断辅助电动机电源。也可以采用比同步电动机少一对极的异步电动机作为辅助电动机，将主机拖到超过同步转速，然后切断辅助电动机的电源，使转速下降，当降到等于同步转速时，再将同步电动机迅速投入电网，这样可获得更大的整步转矩。

此法的缺点是不能在负载下启动，否则要求辅助电机的容量很大，增加整个机组设备的投资，如主机装有足够大容量的同轴直流励磁机，也可以把励磁机兼作辅助电动机。

2. 变频启动法

变频启动法实质是设法改变定子旋转磁场的转速，利用同步转矩来启动，为此在开始启动时，必须把电源的频率调得很低，然后逐步增加电源频率直到额定频率为止。于是转子的转速必将随着定子旋转磁场的转速而同步地上升，直到额定转速。采用此法启动必须有变频电源。此外，励磁机必须是非同轴的，如同轴，则在最初转速很低时无法产生所需的励磁电压。

3. 异步启动法

现代同步电动机多数在转子上装有类似于异步电动机鼠笼绕组的启动绕组（即阻尼

绕组)，此时可采用类似于鼠笼型异步电动机的方法来启动同步电动机，这是同步电动机常用的方法，下面就对它作较详细的分析说明。

二、异步启动过程

在励磁回路串接约为励磁绕组电阻值 10 倍的附加电阻而构成闭合电路后，把同步电动机的定子直接投入电网，使它按异步电动机启动，等到转速到接近于同步转速时，再接入励磁电流，如图 1-9 所示。

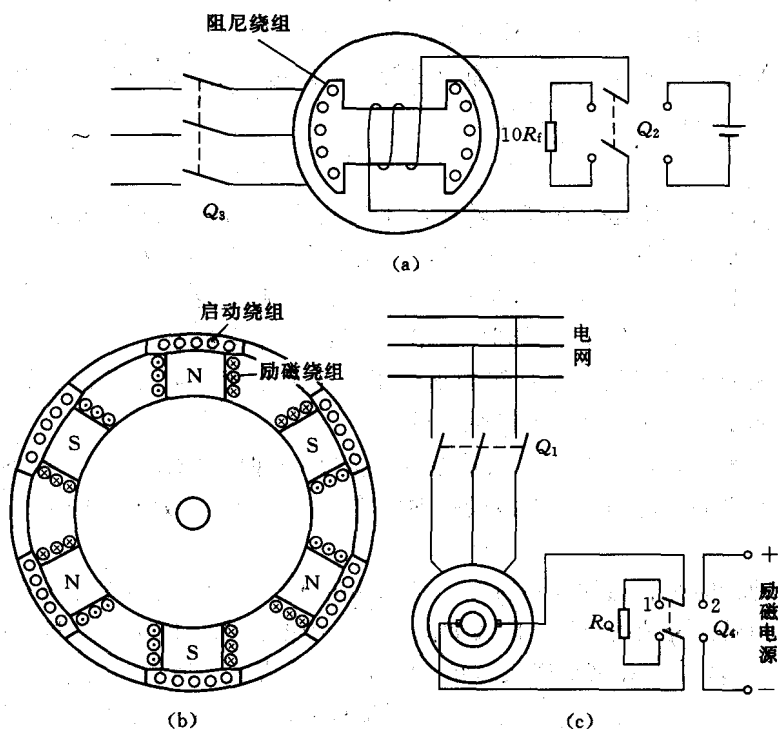


图 1-9 异步启动法

(a) 异步启动法原理线路图；(b) 同步电动机的启动绕组和鼠笼式异步电动机的转子绕组类似；(c) 同步电动机异步启动时的原理电路图

异步启动时，励磁绕组切忌开路，因为刚启动时，定子旋转磁场与转子的相对速度很大，而励磁绕组匝数又很多，将在其中感应出一个很高的电势，可能破坏励磁绕组的绝缘，造成人身安全事故。若将励磁绕组不经附加电阻直接短接也不适合，因为此时在励磁绕组的感应电流较大，它与气隙磁场作用将产生较大的附加转矩，其特点是在接近于半同步转速处产生较大的负转矩，使电动机的合成转矩曲线发生明显的下凹，可能把同步电动机“卡住”，在半同步转速附近运转，不能继续升速。

同步电动机在异步启动时共有四个转矩：①单轴转矩；②启动绕组所产生的异步转矩；③凸极转子直、交轴磁阻不相等引起的磁阻（反应）转矩；④励磁后所产生的同步转矩。

(1) 第一种转矩由于在半同步转速附近由正值变为负值，因此对启动不利，必须加以

限制。下面将简单说明，在略大于半同步转速时会有负的转矩的原因。在启动过程中，可看成是一个具有三相定子绕组和单相转子绕组的异步电动机，转子绕组所产生的频率为 sf_1 （其中 s 为转差率， f_1 为定子电流频率）的脉振磁场，可以分解为正、反两个旋转磁场，正转分量与定子旋转磁场组成一对，它们彼此相对静止，相互作用产生如异步电动机一样的异步转矩。反转分量对转子的速度为 $-sn_1$ ，对于定子的转速为

$$n - sn_1 = n_1(1 - s) - sn_1 = n_1(1 - 2s)$$

因此，在定子绕组中感应出一个频率为 $f_0 = pn_1(1 - 2s)/60 = f_1(1 - 2s)$ 的电流 I_0 ，而定子电流 I_0 产生旋转磁场 F_0 。转子磁场的反转分量和定子磁场 F_0 组成了另一对静止的磁场，也好像是一台异步电机，但原边是转子，副边是定子，它们二者联合起来产生另一异步转矩。当 $n = n_1/2$ ， $s = 0.5$ 时，有

$$f_0 = f_1(1 - 2s) = 0$$

相当于这台异步电机运行在同步转速，此时定子（副边）无感应电流，不产生转矩。

当 n 略大于 $0.5n_1$ 和略小于 $0.5n_1$ 时，产生的异步转矩方向相反。当 n 大于 $0.5n_1$ ， s 小于 0.5 时， $n_1(1 - 2s)$ 为正值，即与 n_1 同方向，这意味着这一对磁场以与 n_1 相同方向对定子旋转，因此作为副边的定子受到一个沿 n_1 方向的异步转矩。实际上定子是不转动的，从作用与反作用的原理可见，这是转子承受了一个大小相等而方向相反的转矩。由此可知，转子此时承受的转矩正好是制动性质的。

上述两种异步转矩合称为“单轴转矩”，其 $M \sim n$ 曲线如图 1-10 中的虚线。这样，由于单轴转矩的影响，电动机的合成转矩曲线将在略大于 0.5 处发生明显的下凹。形成一个“最小转矩”。

(2) 第二种转矩是普通的异步转矩，可以认为 $M \sim s$ 曲线与异步电动机完全一样。于是第一、第二两转矩合成的 $M \sim s$ 曲线如图 1-10 中的实线。同步电动机启动性能的好坏可以用最初启动转矩 M_{st} 和名义牵入转矩 M_{pi} 的大小来表示。所谓名义牵入转矩 M_{pi} 是指转速达到 $95\%n_1$ （即 $s = 0.05$ ）时，电动机的异步转矩，如图 1-11 所示。这两个启动转矩的大小与启动绕组的电阻有关。启动绕组的电阻越大，名义牵入转矩 M_{pi} 就越小，而启动转矩则变大，二者之间存在一定的矛盾。

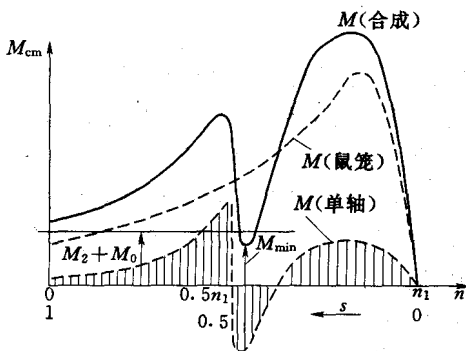


图 1-10 单轴转矩对同步电动机启动的影响

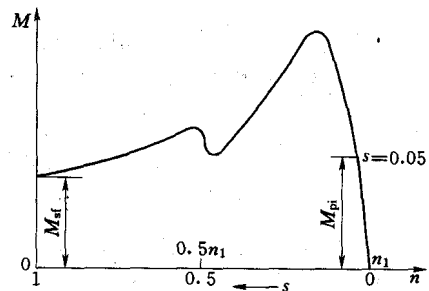


图 1-11 同步电动机启动过程中的异步转矩