

DIANJI KENIXING YUANLI
YU DIANDONGJI JIENENG

电机可逆性原理
电动机节能

戴广平 韩冰 编著

中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

TM343/16

2008

电机可逆性原理与电动机节能

戴广平 韩 冰 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书从介绍异步电动机入手,通过实例分析了电机可逆性原理利用的条件,提出了电动机在势能负载的拖动运行中节能的一条重要途径。

该书思路新颖,实用性强。可供从事电机节能工作的基层专业技术人员及高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机可逆性原理与电动机节能/戴广平,韩冰编著.
北京:中国石化出版社,2007
ISBN 978-7-80229-460-8

I. 电… II. ①戴… ②韩… III. TE358 IV. TE358

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 178621 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

金圣才文化发展(北京)有限公司排版

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 32 开本 3.875 印张 83 千字

2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

定价:10.00 元

前 言

自 1833 年楞次 (Lenz) 证明了电机的可逆性原理以来, 在今天, 每一位学过电机学的人都知道: 在一定的条件下, 同一台电机可以工作在电动机状态, 亦可工作在发电机状态。

但是, 在过去, 当人们一提到电动机, 大多只是重视其电动状态的一面, 掩盖或忽视了其具有发电状态的另一面。其实, 电动机发电状态存在于所有势能变化负载的拖动中, 该部分电能的回馈利用在电动机节能中占有不容忽视的地位。作者对这个问题也有一个逐渐认识的过程。

作者曾经参与供、配电系统的节能研究与实践。为节能的需要, 一般对供电线路要进行无功补偿。在油田, 作者通过对抽取原油的重要设备——游梁式抽油机电机采用就地无功补偿时, 屡屡出现有功功率表有周期性的反转现象, 这说明电动机产生了负功率(通常规定电机输入的有功功率为正值, 电机输出的有功功率则为负值)。仪器监视和自动采集的数据进一步证实了: 抽油机在工作中电动机有发电工作状态。但一般普遍认为: 无功补偿只是降低输电线路损耗, 不会引起系统有功功率的增加。然而, 对游梁式抽油机进行无功补偿时却出现例外: 通过就地适时无功补偿, 引起异步电

动机发电状态送入电网有功功率增加。几经讨论,有关抽油机电机发电工况的存在,已是不争的事实。但此部分电能能否利用,却众说纷纭。作者认为:抽油机电机的这部分电能回馈电网是抽油机控制装置实现节能的关键,其经济效益也十分可观。

作者根据现场实测仪器自动生成的记录,在清华大学电机系及华北电力大学电力系教授们的帮助下做了一些分析。游梁式抽油机属于有杆采油装置,在工作中抽油杆上、下往复周期性的运动,其负载特性属于位能性负载。电动机输入功率的大小和时间随抽油机的实际工况不同而不同。当电机拖动机械负荷时,电机处于电动机工况,此时电机从电网吸收有功功率和无功功率;当机械负荷拖动电机运行时,电机处于发电机工作状态,此时电机从电网吸收无功功率,向电网送出有功功率(与电网同压、同频、同相序,存在一定的有功功率由电机流向电网,被网内其他用电设备,如临近的抽油机,所消耗)。通过对异步电动机发电条件的分析及现场电能质量测试,又经过反复试验研究,作者发现:充分用电机可逆性原理,创造利于可逆性原理得以实现的条件,就能实现电动机节能。因此,首次提出新参量作信号,在电动机的出线端,通过可控硅自动快速投切补偿电容器,不但可以节省无功功率,显著减小线路电流及线路损耗,而且可以减少转子损耗及增加发电机工况(与电网同压、同频、同相序)所发出的有功功率。这样,通过对可控硅投切的最佳

控制，就可以达到节省无功功率和节省有功功率双重的效果，并进一步证明了抽油机电机发电工况有功电能的可利用性。此结论不仅适用于抽油机电机节能，而且可以推广到所有拖动势能负载的电动机，如电梯、起重机、电车上下坡运行等。

该成果曾在美国电气与电子工程师协会举办的(2002年8月加拿大，蒙特利尔)“第七届关于电机、变频器及系统的模型与仿真国际会议”上发表，论文题目为《油井感应电动机的新式综合节能系统》。

为了使更多的同行从上述实践中得到启发，作者编写了这本《电机可逆性原理与电动机节能》。该书从电机学基本理论着手，分析了电机构造及运行状态，着重分析了异步电动机电动/发电两种工作状态，并以游梁式抽油机电机为例就异步电动机供电节能方面的理论与装置进行了研究和试验。在此过程中，曾得到华北电力大学罗应立教授、张建华教授及清华大学电机系徐云教授的通力合作、指导和帮助，深表感谢。另外，在工程实践中也曾多次得到大庆油田、中原油田等单位领导及工作人员的大力支持，在此一并表示谢意。

由于作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

目 录

第一章 概述	(1)
第二章 异步电动机	(5)
第一节 三相异步电动机的结构	(6)
第二节 异步电动机工作原理	(9)
第三节 异步电动机的四象限运行	(13)
第三章 电机可逆性原理	(20)
第一节 异步电机的发电工作状态	(22)
第二节 游梁式抽油机电机的电动/发电状态 技术分析	(29)
一、抽油机负载的特点	(31)
二、游梁式抽油机电机的电动/发电状态	(33)
三、游梁式抽油机电机就地无功补偿	(36)
四、电动机输入功率测试	(42)
第四章 四象限变频器	(53)
第一节 传统使用的变频器	(54)
第二节 四象限变频器及控制技术	(59)
一、PWM 控制技术	(59)
二、四象限变频器的工作原理	(64)
第五章 电机可逆性原理的实际应用	(67)
第一节 抽油机电机的节能技术与设备	(67)
一、电动机出线端 TSC(晶闸管投切电容器) ...	(68)

二、电动机出线端 Δ/Y 转换 + TSC	(71)
三、OP - MD - A 型游梁式抽油机四象限变频 控制箱	(76)
第二节 回馈制动在电梯上的应用	(98)
第三节 回馈制动在离心机上的应用	(103)
一、设备机械参数	(104)
二、离心机设备制动	(104)
三、反馈制动原理	(105)
四、节能分析	(107)
第四节 回馈制动在矿井中的应用	(109)
一、节能测试	(110)
二、矿井专用变频系统	(111)
参考文献	(114)

第一章 概 述

电能是现代最主要的能源之一。电动机作为将电能转换为机械能的一种转换装置，在各个领域得到了广泛应用。据统计，电动机消耗的电能约占全国总用电量的 60% ~ 70%。因此，电机节能技术是节约能源的重要途径之一。目前，在一些企业中，由于管理水平低、技术落后，多数电动机处于轻载、低效、高耗能的运行状态，电能浪费十分严重。为此，搞好电动机的节电工作是当务之急。电动机节电应以节约电能和提高电动机的综合效益为原则，合理选择电动机，使其处于经济运行状态。同时，应对在用电动机进行节能技术改造，降低电动机的能量损耗，提高电动机的运行效率。

通常把旋转电机按它所产生或耗用的电能种类不同，分为直流电机和交流电机。交流电机又按它的转子转速与旋转磁场转速的关系不同，分为同步电机和异步电机。在电力拖动中，驱动设备普遍采用异步电动机，是由于它具有结构简单、制造容易、价格低廉、运行可靠、维护方便和效率较高等一系列优点。和同容量的直流电动机相比，异步电动机的重量约为直流电动机的一半，其价格仅为直流电动机的 1/3 左右。且异步电动机的交流电源可直接取自电网，用电既方便又经济。为此，本书对相关问题的讨论也限制在异步电动机范围之内。

油田是用电大户，一般位于电网末端，油区面积大，配电线路长，输电的线路损失不可忽视。又由于每一口油井的

参数都不一样，在选配抽油机时，不可能做到恰好和抽油机的功率档次相匹配，为了保证抽油机在各种工况下正常运行，选配电机都留有一定的功率余量。随着油井由浅入深地抽取，油井的产液量越来越少，抽油机的负荷也相应减小。由于上述原因，就造成了抽油机的实际负载率普遍偏低，大部分抽油机的负载率在 20% ~ 30% 之间，形成“大马拉小车”的现象。各种类型抽油机在配用电动机时，普遍采用异步电动机，对于异步电动机而言，节能的关键是提高负荷率。油田基层供电一般是由配电变压器经低压电缆辐射配电至抽油机电机，而当电动机处于轻载运行时，其效率和功率因数都较低，油田配电系统的功率因数长期偏低，低压配电线路线损过大，因此适宜采取电动机就地无功补偿方式。

在油田进行无功补偿的实践中，屡屡发现采油现场抽油机电机的有功功率表出现周期性的反转现象，即说明电动机产生了负功率。在计量时，习惯规定：电网输给电动机消耗的有功功率为正值，而电机的发电机工况发出的有功功率为负值（即电机向电网送电）。油田供电大多采用 35kV 直配的供电方式，配电变压器和低压配电装置安装在计量站，再由计量站经低压电缆辐射配电至油井的抽油机电机。由变压器一般向 7 ~ 8 台游梁式抽油机供电，供电距离通常在百米至数百米之间，每台抽油机随机工作在循环工况中不同的瞬时工况，处于发电工况的抽油机发出的电能被临近处于电动机工况的抽油机所利用，从而节约了电网系统的能量。（每个计量站配电自成子系统，这部分能量一般在子系统内流动，大多不会传输给上一级电网。）抽油机电机发电属于异步电机发电，至今仍是在小型水力、风力发电站广泛采用的一种形式，这是由于它与同步发电机相比有如下优点：不需

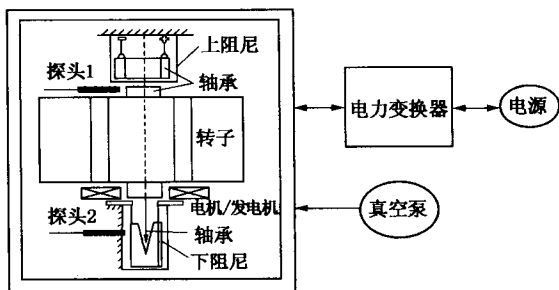
直流激励；结构简单、坚固（自激异步发电机一般用鼠笼型转子）；运行可靠，易于维护修理；投入电网简单容易，且易于采用自动控制，造价较廉。

对于抽油机异步电动机的电动/发电状态，经过反复试验研究发现：在电源电压一定的情况下，不同运行工况、不同负载下的激磁电势会有明显差别，而激磁支路所需的无功功率不同运行工况、不同负载下有效适时补偿无功功率，采用电容器动态快速补偿是很有必要的。充分利用电机可逆性原理，创造利于可逆性原理得以实现的条件，首次提出新参量作信号在电动机的出线端通过可控硅自动快速投切补偿电容器（以前的无功补偿大多采用功率因数 $\cos\varphi$ 作信号，且采用延时控制策略，不能适时跟踪，故效果不好）。不但可以节省无功功率，显著减小线路电流及线路损耗，而且可以减少转子损耗及增加发电机工况（与电网同压、同频、同相序）所发出的有功功率。这样，通过对可控硅投切的最佳控制，就可以达到节省无功功率和节省有功功率双重的效果。

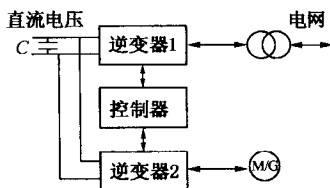
在过去，一提到异步电动机，人们大多只是重视其电动状态的一面，掩盖或忽视了其具有发电状态的另一面。其实，异步电动机发电状态存在于所有势能变化负载的拖动中（电力机车下坡，电梯降速、停层等），该部分电能的回馈利用在电动机节能中占有不容忽视的地位。

国外电力系统中已经采用的飞轮储能装置，就是电机可逆性原理具体应用的实例。飞轮储能装置具有三个核心部分：一个飞轮，一台电机（电动机/发电机），一套电力电子变换装置。其中电动机和发电机用同一台电机来实现。储能时，电力电子装置从外部输入电能驱动电动机带动飞轮高速旋转，飞轮储存动能（机械能），即由电能转化为机械能；当外部负载需要电能

时，用飞轮带动该电机工频速度旋转，将动能转化为电能(即发电)，通过电力电子装置送给负载。见图 1-1。



(a) 飞轮储能系统



(b) 飞轮储能系统电力电子变换器

图 1-1 飞轮储能系统图

飞机发动机的启动发电机也是一个电机可逆性原理应用的实例。在飞机启动前，它作为电动机启动飞机，到一定转速后，它被发动机拖动，进入发电状态，可给飞机电网供电。

为了说明电机可逆性原理在电机节能方面的应用，必须深入了解电机的构造和运行规律，进而把握充分利用可逆性原理的条件，创造再生电能利用的途径，达到电动机节能的目的。在本书中，作者试图按此思路，在以下各章节逐一进行叙述和分析。

第二章 异步电动机

电机的理论基础是电磁感应。电机分为变压器(不旋转电机)和旋转电机两大类。通常把旋转电机按它所产生的或耗用的电能的种类不同,分为直流电机和交流电机。交流电机又按它的转子转速与旋转磁场转速的关系不同,分为同步电机和异步电机。感应电动机的转速 n 总是小于同步转速 n_1 , 即转子转速异于旋转磁场的同步转速, 故称为异步电动机。

在工农业生产及民用的电力拖动中, 普遍采用异步电动机驱动, 异步电动机之所以广泛被采用, 是由于它具有结构简单、制造容易、价格低廉、运行可靠、坚固耐用、维护方便和运行效率较高等一系列优点。和同容量的直流电动机相比, 异步电动机的重量约为直流电动机的一半, 其价格仅为直流电动机的 $1/3$ 左右。且异步电动机的交流电源可直接取自电网, 用电既方便又经济。缺点是功率因数较差, 异步电动机运行时, 必须从电网里吸收滞后的无功功率。因此, 它的功率因数总是小于 1。由于电网的功率因数可以用别的办法进行补偿, 所以, 异步电动机仍然得到了广泛的使用。

异步电动机运行时, 定子绕组接到交流电源上, 转子绕组自身短路, 利用电磁感应在转子绕组中产生电动势、电流, 从而产生电磁转矩。所以, 异步电机也叫感应电机。

异步电动机按定子相数分为单相异步电动机、两相异步电动机、三相异步电动机。

异步电动机按转子结构分为绕线式异步电动机、鼠笼式

异步电动机。

异步电动机也可以作为发电机使用。单机使用时，常用于电网尚未到达的地区，或用于风力发电等特殊场合。在异步电动机的电力拖动中，有时利用异步电机回馈制动，运行在发电状态。

第一节 三相异步电动机的结构

图 2-1 是一台三相鼠笼式异步电动机的结构图，它主要由定子和转子两大部分组成，定、转子中间是空气间隙。图 2-2 是鼠笼式异步电动机的拆散形状。

异步电动机的定子由机座、定子铁芯和定子绕组三部分组成。定子铁芯(见图 2-3)是电动机磁路的一部分，装在机座里。在定子铁芯内圆上开有槽，槽内放有定子绕组。

在中小型异步电动机中，通常把定子三相绕组的六根出线头都引出来，根据需要接成 Y 形如图 2-4 (a)，或 Δ 形如图 2-4 (b)。

绕线式三相异步电动机的转子绕组也是三相绕组，它可以连接成 Y 形或 Δ 形。转子绕组的三条引线分别接在三个滑环上，用一套电刷装置引出来，如图 2-5 所示。这样就可以把外接电阻串联到转子回路里去，用于改善电动机的特性或是为了调速。

鼠笼式绕组与定子绕组大不相同，它是一个自己短路的绕组。如果把铁芯拿掉，绕组的形状像个松鼠笼子，如图 2-6(a)所示，因此叫鼠笼转子。导条的材料有铜、铝两种。如果是铜料，把裸铜条插入转子铁芯上的槽里，再用铜端环套在伸出两端的铜条上，最后焊在一起，如图 2-6

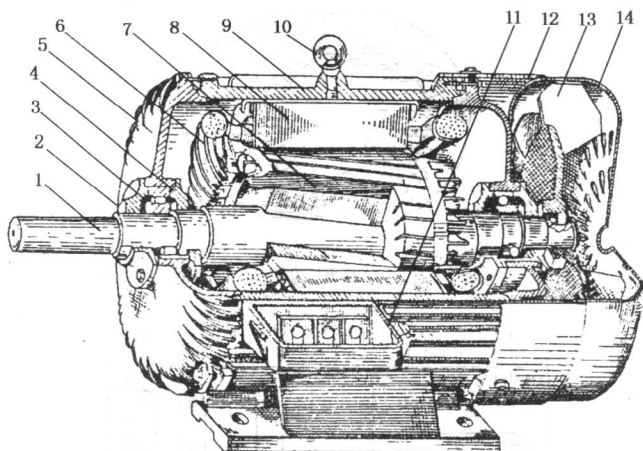


图 2-1 三相鼠笼式异步电动机的结构图

- 1—轴；2—轴承盖；3—轴承；4—端盖；
6—定子绕组；7—转子；8—定子铁芯；9—机座；10—吊环；
11—出线盒；12—端盖；13—风扇；14—风罩

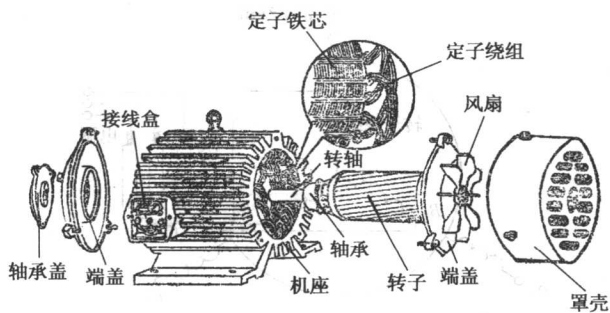


图 2-2 鼠笼式异步电动机的拆散形状

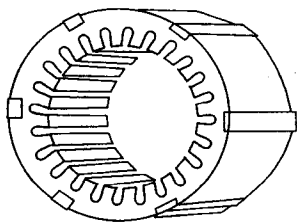


图 2-3 异步电动机定子铁芯

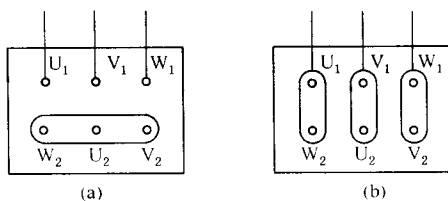


图 2-4 三相异步电动机引出线

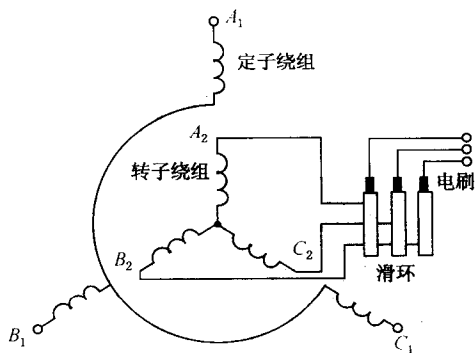


图 2-5 绕线式异步电动机定、转子绕组接线方式

(b)。如果用铝料，就将熔化了的铝液直接浇铸在转子铁芯上的槽里，连同端环、风扇一次铸成，如图 2-6(c) 所示。

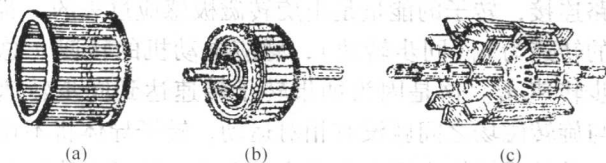


图 2-6 异步电动机鼠笼转子

第二节 异步电动机工作原理

三相异步电动机的定子接上三相电源后，机内便产生圆形旋转磁通势，转子导体中有感应电动势 e ，方向由右手定则确定。由于转子导条彼此在端部短路，于是导条中有电流 I ，这样，导条就在磁场中受力 f ，用左手定则确定受力方向。如图 2-7 所示。转子受力，产生转矩 T ，方向与旋转磁通势相同。转子便在该方向上旋转起来。电动机轴的转矩即电磁转矩，是“电生磁，磁生电，电磁互相作

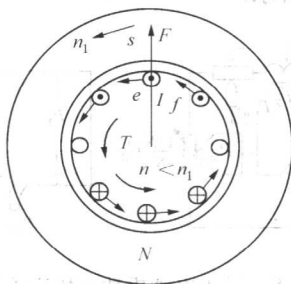


图 2-7 异步电动机工作原理