

电力节能技术丛书

用电系统节能技术

《电力节能技术丛书》编委会 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力节能技术丛书

主要内容

用电系统节能技术

《电力节能技术丛书》编委会 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内容提要

电力是经济社会发展的基础动力,开展电力节能降耗工作是促进电力工业发展、深化电力体制改革和提升电力管理水平的关键环节。由江苏省电机工程学会组织编写的《电力节能技术丛书》,旨在希望各有关行业重视电力节能工作,积极探索节电的有效途径和研究推广切实可行的节能减排的技术手段。

《电力节能技术丛书》共包括6个分册,分别为电力节能政策与管理、火力发电厂节能技术、输变电系统节能技术、配电系统节能技术、用电系统节能技术、电能质量与节能技术。

本套《电力节能技术丛书》的作者和审稿人均为工作在科研、生产一线的技术人员,有丰富的理论基础和实践经验。

本书为《用电系统节能技术》分册,包括:工业企业用电中的变频调速技术及应用、高效电动机及应用、工业电气加热与节能、企业用电的无功补偿;农村用电中的农用机械、农村电网的无功补偿及农村家庭用电与节能;城市商用建筑供用电与节能技术。

本书可供工业、农村、城市商用建筑用电系统的工程技术人员学习参考,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

用电系统节能技术/《电力节能技术丛书》编委会编.
北京:中国电力出版社,2008

(电力节能技术丛书)

ISBN 978-7-5083-7718-6

I. 用… II. 电… III. 配电系统-节能 IV. TM72

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第114139号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年10月第一版 2008年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 10印张 243千字

印数 0001—3000册 定价 20.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《电力节能技术丛书》编委会

名 誉 主 任：费圣英

主 任：马苏龙

副 主 任：周光浩 叶惟辛 李顺宗

编委会成员：费圣英 马苏龙 周光浩 叶惟辛 范正满

巢大同 李顺宗 宋宏坤 陈国年 赵彩虹

李 群

丛 书 主 编：李顺宗

本册审稿人员：李顺宗

本册编写人员：赵彩虹 胡治平 李 颖 张 晶 陈永林

王蓓蓓 刘月琴 应晓儿 严伟林

电力是社会经济发展的基础动力。尽管我国近年来电力建设得到了快速发展，但我国电力发展存在五大“软肋”不容忽视：一是人均装机水平仍严重偏低；二是电网建设投资“欠账”；三是部分地区电力“吃紧”；四是电力发展质量“堪忧”；五是用电“结构之伤”。尽管我国已是世界电力生产的第二大国，但远远不是电力生产强国。我国人均能源拥有量和人均用电水平仍低于世界平均水平，而我国国民生产总值的单位能源消耗，却大大高于世界平均水平。能源浪费和环境污染已成为制约我国经济社会发展的重要因素。

钢铁、有色、电力、化工、建材等高耗能行业是我国节能减排的重点。而电力作为各行各业、千家万户广泛利用的二次能源，其节能降耗工作潜力巨大，前景广阔；同时也是促进电力工业发展、深化电力体制改革和提升电力管理水平的关键环节。我们必须把握电力这一商品所具有的“产、供、销同时完成”、“系统网络关联性强”等特性，有针对性地开展节能降耗工作，努力提高电能利用率。

电力节能降耗工作要做到“三全”，即全民参与、全方位开展和全过程管理。我们要加大节能降耗的宣传、教育和培训力度，强化全社会的节电意识和认识，着力构建资源节约型和环境友好型社会；我们要以提高电力能源利用效率为核心，坚持市场机制作用与宏观调控相结合，努力营造有利于节电降耗的体制环境、政策环境和市场环境，认真落实发、输、变、配、用电等各个地域的电能节约方案，以电力资源的高效利用促进社会经济的全面提升和可持续发展；我们要以加快技术进步为手段，在规划、建设、运行、检修、改造等全过程的每个环节，建立严格的科学管理制度，实行有效的激励政策，推进节能、挖潜、改造和技术创新工作的健康发展。

近年来，我国在电力节能降耗方面从专业的角度做了大量工作，取得了显著的成效和丰富的实践经验。江苏省电机工程学会在江苏省电力公司、江苏省电力试验研究院、南京供电公司、泰州供电公司、常州供电公司、东南大学、河海大学、南京师范大学、华能南通电厂等单位的大力支持下，组织数十位省内外的专家学者，编写了《电力节能技术丛书》。我们期望通过该套丛书的出版与宣传，能够对各电力企业的节能降耗工作起到积极的推动作用。

该丛书共分六册，分别从电力节能政策与管理、火力发电厂节能技术、输变电系统节能技术、配电系统节能技术、用电系统（主要是工业、农业、商业和照明等）

节能技术、电能质量和节能技术六个方面，对节能政策、管理要求、技术措施和节能方法等进行了有益的研究和探索。

时代在进步、技术在发展。随着电力工业的进步和发展，电力节能降耗同样也不断提出新的课题，我们要不断总结、加强交流、积极探索、勇于实践。我们相信，经过广大电力企业员工和工程技术人员共同努力，电力节能的新技术、新产品、新工艺将不断推广应用，我国科学发展、和谐建设，大力降低能耗，环境不断改善的又好又快的经济发展态势将不断涌现！

欣慰之余，是为序。

黄立英

近年来,特别是进入“十一五”以来,我国政府加强和改善宏观调控,积极推动结构调整和增长方式转变,不断加大节能减排工作力度。《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》提出了“到2010年国内生产总值(GDP)翻一番,单位生产总值能耗下降20%左右,主要污染物排放总量降低10%,单位工业增加值用水量降低30%”的目标。节能与减排这两项约束性指标已成为衡量是否实现经济社会“又好又快”发展的重要标志。

电能与其他二次能源相比,具有易于传输、方便控制、洁净环保的优点,所以电能作为二次能源,其利用越来越广泛,几乎遍及所有工、农、商领域。2006年,我国全社会用电量达 $28344 \times 10^8 \text{ kWh}$ 。目前我国正处于工业和城镇化快速发展的阶段,工业的增长、城镇化进程的加快、社会主义新农村建设、居民消费结构的升级,使我们对能源、经济资源的需求更加迫切。随着我国经济的高速发展和人们生活水平的不断提高,工业、农业以及第三产业(特别是商用建筑领域)的能源消费一直保持较高速增长,而且总量增长大于经济增长,各项能耗占全社会商品能耗的比例已逐步接近发达国家水平,成为世界第二大能源消耗国。但由于政策、机制、技术等原因,我国的能源利用率与发达国家相比还很低,人均能耗和生活质量远低于发达国家水平,说明我国工、农、商等领域用能的转换效率很低,我国在用电方面的节能潜力巨大,节能降耗已是迫在眉睫的重要任务。

为宣传我国的能源形势,提高全民节能意识,江苏省电机工程学会组织高等院校、电力研究院、供电公司等单位的专家学者编写了《电力节能技术丛书》(简称《丛书》)。本书是《用电系统节能技术》分册,对用电系统(主要是工业、农村及商用建筑等)节能技术进行了介绍。本书共三章,分别介绍了工业企业用电中的变频调速技术及应用、高效电动机及应用、工业电气加热与节能,农村用电中的农用机械、农村电网的无功补偿及农村家庭用电与节能,城市商用建筑供用电与节能技术等。本书力求叙述清楚,注重应用。书中列举了大量的应用案例,进行了节能方案的技术经济比较。本书内容丰富翔实,从技术进步和促进节能降耗工程实践角度,对工农业用电及商用建筑的用电管理与节能改造有着可取的借鉴意义。

本书由南京师范大学电气与自动化工程学院赵彩虹、南京电力公司李颖、国电机械设计研究院胡治平主编。赵彩虹负责全书的构思、编写及统稿工作。第一章由赵彩虹编写,第二章由李颖编写,第三章由胡治平、张晶、陈永林、王蓓蓓、刘月琴、应晓儿、严伟林编写。《丛书》主编李顺宗对内容编排、写作格式做了统一、校核和修改。

本书在编写过程中得到了南京师范大学电气与自动化工程学院的大力支持,南京师范大学硕士研究生陈燕萍、陈炯在书稿的最后编排中付出了辛苦,在此一并表示感谢。

因专业知识及水平所限,书中难免有不足之处,真诚希望读者及时给予批评和指正,以便使本书不断改进,编者的编写水平不断得到提高。

编者

2008年8月

目 录



序	1
前言	1
第一章 工业用电与节能技术	1
第一节 交流电动机调速与节能	1
第二节 高效电动机	21
第三节 工业电气加热与节能	34
第四节 企业用电中无功功率补偿	46
第二章 农村用电与节能	55
第一节 农村电力负荷与节能	55
第二节 农村用电与无功功率补偿	72
第三章 城市商用建筑供用电与节能技术	78
第一节 商用建筑供用电特点及主要用电设备	78
第二节 电蓄冷(热)技术	92
第三节 热泵技术	121
第四节 高效节能光源与技术	138
参考文献	151

第一章

工业用电与节能技术

第一节 交流电动机调速与节能

一、概述

交流电动机，特别是鼠笼式异步电动机，作为将电能转换为机械能的一种转换装置，由于具有体积小、质量轻、结构简单、维护方便、制造成本和运行费用低、能在恶劣环境下可靠运行等一系列优点，在现代社会的各个领域得到了广泛的应用，尤其在工业领域应用更为普遍。电动机除作为各种机械的拖动源外，也是现代化工业生产中启动、制动、控制、调速、同步运行、恒功率、恒转矩、数控操作等的必需手段，因此对电动机提出调速的要求。从节能角度考虑，对水泵、风机类负荷，若采用调速的方法来改变其流量，与传统的电动机全速运行，通过调整阀门（或挡板）的开度来改变流量、扬程、压力等过程参数的方法比较，可节电 20%~60%。但是以往由于实现交流调速困难或者某些调速方式效率较低，不够理想。因此，长期以来调速领域仍被直流调速占领，交流电动机的优点在调速传动中未能获得发挥。直到 20 世纪 70 年代初，随着电力电子、微电子（集成电路）和微机技术的飞速发展，人们长期渴望的变频调速器实现了工业化生产，为交流电动机调速提供了可能。

交流变频调速的优越性早在 20 世纪 20 年代就已被人们认识，但受到元器件的限制，当时只能用闸流管构成逆变器，由于闸流管具有投资大、效率低、体积大等问题而未能得到推广。20 世纪 50 年代中期，晶闸管的研制成功，开创了电力电子技术发展的新时代。由于晶闸管具有体积小、质量轻、响应快、管压低、功耗小等优点，交流电动机调速技术有了飞跃发展，出现了交流异步电动机调压调速、串级调速等系统。20 世纪 70 年代发展起来的变频调速，比上述两种调速方式效率更高，性能更好，在近 30 年得到了迅速发展。

所谓变频调速器，是将三相工频（50Hz）交流电源（或任意电源）变换成三相电压、频率可调的交流电源的装置，有时又将变频调速器称为变压变频装置即 VVVF 装置。变频调速器主要用于交流电动机转速的调节。交流电动机变频调速系统由变频调速器驱动器、交流电动机和控制器三大部分组成。其中关键设备是变频调速器，由它来实现电动机电压和频率的平滑调节。变频调速在调频范围、静态精度、动态品质、系统效率、保护功能、自动控制和过程控制等方面，大大优于传统的调压调速、变极调速、串级调速、滑差调速和液力耦合器调速等方法。交流电动机变频调速除了有卓越的调速性能之外，还有显著的节约电能和保护环境等作用，是企业技术改造和产品更新换代的理想调速装置。因此变频调速被公认为交流电动机最理想、最有前途的调速方法，代表未来电气传动的发展方向。近年来变频调速已在钢铁、冶金、石油、化工、纺织、轻工、机械、电力等诸多行业中得到广泛应用。低压电动机变频调速的应用已非常普遍和成熟，高压电动机变频调速也正在被人们关注和逐步应用。

二、交流电动机调速技术的种类

从调速时的能耗观点来看,有高效调速技术与低效调速技术两种。高效调速时转差率不变,因此无转差损耗,如多速电动机、变频调速以及能将转差损耗回收的调速技术(如串级调速等)。有转差损耗的调速技术属低效调速,如转子串电阻调速技术,能量就消耗在转子回路中;电磁离合器的调速技术,能量消耗在离合器线圈中;液力耦合器调速,能量消耗在液力耦合器的油中。一般情况下转差损耗随调速范围扩大而增加,如果调速范围不大,能量损耗相对较小。

(一) 绕线式异步电动机转子串电阻调速

绕线式异步电动机转子串电阻调速技术的特点是:技术要求简单,易于实现,不存在电磁谐波干扰,投资费用少。但根据所串电阻不同,调速会有限制,如串铸铁电阻只能进行分级调速,串入液体电阻可进行无级调速,但其维护、管理要求较高。转子串电阻调速技术调速范围小,调速过程中附加的转差功率全部转化为所串电阻的热损耗,效率低,属于低效调速技术。

(二) 笼型异步电动机变极对数调速

笼型异步电动机变极对数调速的方法是:用改变定子绕组的接线方式来改变笼型异步电动机定子极对数达到调速目的。变极对数调速的主要特点是:具有较硬的机械特性,稳定性良好;接线简单、控制方便、价格低;为分级调速,级差较大,不能获得平滑调速。变极对数调速可与调压调速、电磁转差离合器配合使用,获得较高效率的平滑调速特性。该调速方法无转差损耗,效率高,属于高效调速技术。

(三) 绕线式电动机串级调速技术

交流电动机的串级调速是一种将绕线式异步电动机的转差功率利用起来的一种高效、经济的调速方法。它可以把转差率转变为机械功率反馈回电动机机械轴上,或把转差功率反馈至交流电网中,具有良好的调速性能和较好的功率利用性。根据转差功率吸收利用方式,串级调速可分为电动机串级调速、机械串级调速及晶闸管串级调速形式,其中晶闸管串级调速采用较多。串级调速的主要特点是:可将调速过程中的转差损耗回馈到电网或生产机械上,效率较高;装置容量与调速范围成正比,投资小,适用于调速范围在额定转速 $70\% \sim 90\%$ 的生产机械上;调速装置故障时可以切换至全速运行,从而避免停产;若使用晶闸管串级调速,功率因数偏低,谐波影响较大。

(四) 定子调压调速技术

当改变电动机的定子电压时,可以得到一组不同的机械特性曲线,从而获得不同转速。由于电动机的转矩与电压平方成正比,因此最大转矩下降很多,其调速范围较小,使一般笼型电动机难以应用。为了扩大调速范围,调压调速应采用转子电阻值大的笼型电动机(如专供调压调速用的力矩电动机),或者在绕线式电动机上串联频敏电阻。为了扩大稳定运行范围,调速在 $2:1$ 以上的场合应采用反馈控制,以达到自动调节转速的目的。

定子调压调速的主要装置是一个能提供电压变化的电源,目前常用的调压方式有串联饱和电抗器、自耦变压器以及晶闸管调压等几种,其中以晶闸管调压方式为最佳。调压调速的特点是:线路简单,易实现自动控制;调压过程中转差功率以发热形式消耗在转子电阻中,效率较低。定子调压调速一般适用于 100kW 以下的生产机械。

(五) 电磁转差离合器调速

电磁转差离合器调速技术是将笼型电动机与电磁转差离合器和直流励磁电源(控制器)

相结合构成调速系统。直流励磁电源功率较小,通常由单相半波或全波晶闸管整流器组成,改变晶闸管的导通角可以改变励磁电流的大小。

电磁转差离合器由电枢、磁极和励磁绕组三部分组成。电枢和后者没有机械联系,能自由转动。电枢与电动机转子同轴联接,称主动部分,由电动机带动;磁极用联轴节与负载轴对接,称从动部分。当电枢与磁极均为静止时,如励磁绕组通以直流,则沿气隙圆周表面将形成若干对 N、S 极性交替的磁极,其磁通经过电枢。当电枢随拖动电动机旋转时,由于电枢与磁极间的相对运动,使电枢感应产生涡流。此涡流与磁通相互作用产生转矩,带动有磁极的转子按同一方向旋转,但其转速恒低于电枢的转速 n_1 。这是一种转差调速方式,变动转差离合器的直流励磁电流,便可改变离合器的输出转矩和转速。电磁调速电动机的调速特点是:装置结构及控制线路简单、运行可靠、维修方便;调速平滑,属无级调速;对电网无谐波影响;效率低,属于低效调速技术。电磁转差离合器调速的方法仅适用于中、小功率,要求平滑动作、短时低速运行的生产机械。

(六) 液力耦合器调速方法

液力耦合器是一种液力传动装置,一般由泵轮和涡轮组成,统称为工作轮,放在密封壳体中。壳中充入一定量的工作液体,当泵轮在原动机带动下旋转时,处于其中的液体受叶片推动而旋转,在离心力作用下沿着泵轮外环进入涡轮时,就在同一转向上给涡轮叶片施以推力,使其带动生产机械运转。液力耦合器的动力传输能力与壳内相对充液量的大小是一致的。在工作过程中,改变充液量就可以改变耦合器的涡轮转速,做到无级调速。其特点为:功率适用范围大,能用于大容量泵与风机的变速调节,目前单台液力耦合器传递的功率已达 20MW 以上;结构简单,工作可靠,使用及维修方便,且造价低;控制调节方便,容易实现自动控制;适用于风机、水泵的调速。其缺点是:占用安装空间,大功率的液力耦合器除本体设备外,还需要一套附加的冷油器等辅助设备与管路系统;由于液力耦合器的转速比 i_n 最大在 0.97~0.98 之间,因此液力耦合器的输出最大转速要比输入转速低;调节延迟时间较长,不适于紧急事故的处理,适合于较高转速的泵与风机调速的场合;调速精度不高,不适宜在要求精确转速的场合使用;因其为无直联机构,故液力耦合器一旦发生故障,泵与风机也只能停止工作;调速效率低,属低效调速技术。

(七) 斩波内馈调速技术

斩波内馈调速技术是我国首创的一种新型交流调速技术,通过近 20 年的实践探索和理论研究,斩波内馈调速在技术和理论上都取得了很大发展。实践表明,斩波内馈调速具有效率高、成本低、功率因数高、谐波分量小等优点,不仅为我国的高压、大容量风机和泵类节能提供了一种经济、高效的调速技术和产品,也为世界的交流调速填补了一项空白。事实上,变频调速与串级调速(包括双馈调速及内馈调速)具有极为相似的调速性能,例如调速效率、机械特性等都很一致,但按传统理论,串级调速属于变转差率调速,被认为与变频调速有着本质的区别。内馈调速系统是在异步电动机的定子上附加了与原绕组相绝缘的内馈绕组(亦称调节绕组),用来接受转子移出的电转差功率。图 1-1 为内馈调速系统结构图。

内馈绕组在旋转磁场的作用下,产生频率为 f_1 、幅值恒定的感应电动势 E_s 。变流装置使内馈绕组工作在发电状态,把所接受的电转差功率又通过电磁感应反方向传输给定子原绕组,使定子的输入功率减小,与机械功率相平衡,实现了高效率的无级调速。

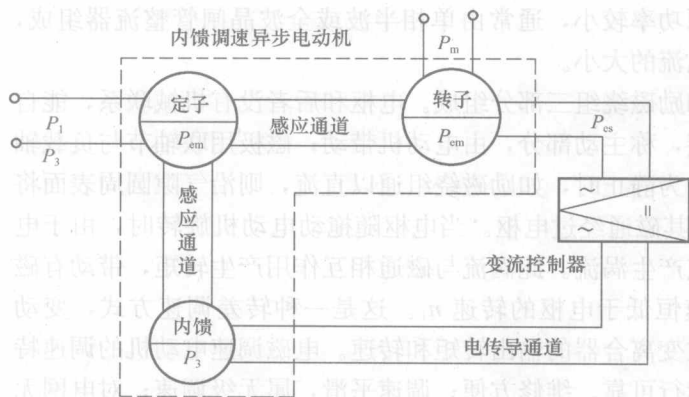


图 1-1 内馈调速系统结构图

(八) 变频调速

变频调速电动机的转速与电源频率成正比，通过变频器可任意改变电源输出频率从而任意调节电动机转速，实现平滑的无级调速。变频调速系统的主要设备是提供变频电源的变频器，变频器可分成交—直—交变频器和交—交变频器两大类，目前国内大都使用交—直—交变频器。变频调速的特点：效率高，调速过程中没有附加损耗；应用范围广，

可用于笼型异步电动机；调速范围大，特性硬，精度高；技术复杂，造价高，维护检修困难。

三、变频调速的基本原理及分类

(一) 变频调速的工作原理

根据电机学原理，交流电动机转速公式为

$$n = (1-s)n_0 = 60f(1-s)/p \quad (1-1)$$

式中 n ——电动机转速，r/min；

n_0 ——同步转速，r/min；

f ——电源频率，Hz；

p ——电动机磁极对数；

s ——转差率。

由式 (1-1) 可知，当电动机磁极对数 p 和转差率 s 不变时，电动机转子转速 n 与定子电源频率 f 成正比，连续改变异步电动机供电电源的频率，则可连续平滑地调节电动机的转速，这即是变频调速的工作原理。事实上，仅仅改变电源的频率并不能获得良好的调速特性。

根据电机学原理，电动机气隙磁通为

$$\Phi_m = \frac{E_1}{\sqrt{2}\pi N_1 k_{r1} f_1} \approx \frac{U_1}{\sqrt{2}\pi N_1 k_{r1} f_1} = K \frac{U_1}{f_1} \quad (1-2)$$

式中 Φ_m ——电动机气隙磁通，Wb；

E_1 ——定子感应电动势，V；

N_1 ——定子绕组匝数；

k_{r1} ——定子绕组系数；

f_1 ——频率，Hz；

U_1 ——定子感应电压，V。

例如：标准设计的三相异步电动机，额定电压 380V，频率 50Hz。如果电压不变，只改变频率，当频率下调 ($<50\text{Hz}$) 时，会使电动机气隙磁通 Φ_m (正比于 U_1/f_1) 饱和；反之，当频率向上调 ($>50\text{Hz}$)，则使磁通减弱。所以真正应用变频调速时，一般需要同时改变电

压和频率,以保持磁通基本恒定。

通用型变频器基本上采用 U/f 控制方式,即变频器输出电压的频率 f 和输出电压幅值 U 同时得到控制;并保证 U/f 的值恒定。工作时,变频器主电路实现交流—直流—交流的变换过程,内部微控制器根据现场设定信号调节 PWM (Pulse Width Modulation, 脉冲宽度调制) 输出频率,控制 MOSFET 管的导通时间,从而改变主电路的输出频率,实现调节电动机转速的目的。图 1-2 为异步电动机变频调速的控制原理示意图。

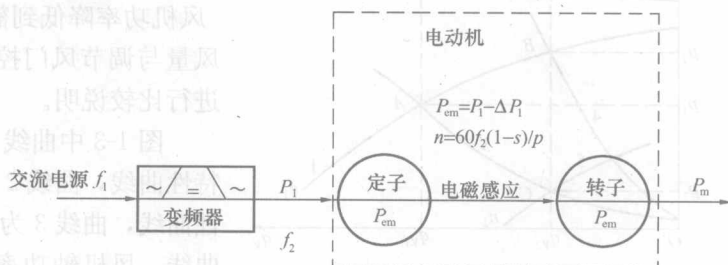


图 1-2 异步电动机变频调速的控制原理示意图

转子的电磁功率等于定子电磁功率,定子的电磁功率为

$$P_{em} = P_1 - \Delta P_1 \quad (1-3)$$

式中 P_{em} ——定子电磁功率, W;

P_1 ——定子输入功率, W;

ΔP_1 ——定子损耗功率, W。

电动机的转速为

$$n = 60f_2(1-s)/p \quad (1-4)$$

式中 f_2 ——变频器输出交流电源频率, Hz。

变频调速的实质是通过变频器把工频电源 (50Hz 或 60Hz) 变换成各种频率的交流电源,以实现电动机的变速运行。变频器的控制电路完成对主电路的控制。整流电路将固定频率的交流电变换成直流电,直流中间电路对整流电路的输出进行平滑滤波,逆变电路将直流电再逆变成频率可调的交流电。对于矢量控制变频器这种需要大量运算的变频器,有时还需要一个进行转矩计算的 CPU 以及一些相应的电路。

(二) 变频调速的节能原理

下面以风机为例分析变频调速的节能原理。由风机的基本理论可知,风机风量 q_v 、风压 p 及轴功率 P 与转速 n 的关系为

$$\left. \begin{aligned} q_{v1} &= q_{v2} \frac{n_1}{n_2} \\ p_1 &= p_2 \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \\ P_1 &= P_2 \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 n_1, n_2 ——调速前、后转速;

q_{v1}, q_{v2} ——调速前、后风量;

p_1, p_2 ——调速前、后风压;

P_1, P_2 ——调速前、后轴功率。

当系统需减少风量时,调低转速可使风机功率快速降低。例如:当风量与转速均下降到

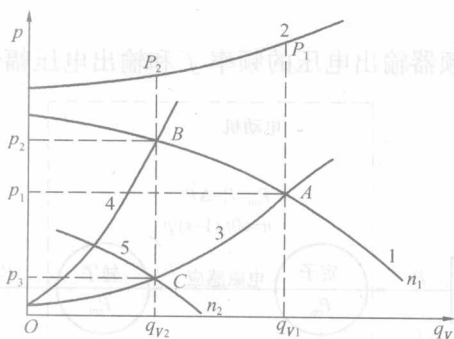


图 1-3 风机的风压—风量特性

额定值的 80% 时, 风机功率降低到额定功率的 51%; 当风量与转速均下降到额定值的 60% 时, 风机功率降低到额定功率的 21%。变频调速控制风量与调节风门控制风量的节电原理可通过图 1-3 进行比较说明。

图 1-3 中曲线 1 为风机在恒速下的风压—风量特性曲线, 曲线 2 为风机在恒速下的功率—风量特性曲线, 曲线 3 为风机风门全开时的管网阻力特性曲线。风机轴功率正比于管网阻力曲线上的点对应的风压值 p 与风量值 q_v 的乘积。点 A 为额定工

- 6 作点, 此时输出风量 q_{v1} 为 100%, 效率最高。轴功率 P_1 正比于 p_1 与 q_{v1} 的乘积, 相当于图 1-3 中 $A p_1 O q_{v1}$ 的面积。根据生产的需要, 当风量从 q_{v1} 减少到 q_{v2} 时, 若减小风门开度, 则管网阻力增加, 管网阻力特性曲线变为曲线 4, 工况点 A 移至新的工况点 B。可以看出, 风量降低, 风压增加, 轴功率 P_2 (正比于 p_2 与 q_{v2} 的乘积, 相当于图 1-3 中 $B p_2 O q_{v2}$ 的面积) 和轴功率 P_1 相比减少不多。如果通过变频调速技术来控制风量, 由于风门全开, 只改变风机转速而不改变管网阻力, 风机风量由 q_{v1} 变到 q_{v2} 时, 风机转速由 n_1 降到 n_2 , 风压—风量曲线下移。如图 1-3 中曲线 5 所示, 工况点 A 沿管网阻力曲线 3 移至工况点 C, 即风量减少时风压 p_2 降低明显, 轴功率 P_3 (正比于 p_3 与 q_{v2} 的乘积, 相当于图中面积 $C p_3 O q_{v2}$) 和轴功率 P_1 相比显著减少, 节省的功耗 ΔP 正比于 Δp ($\Delta p = p_2 - p_3$) 与 q_{v2} 的乘积, 相当于图中面积 $B p_2 p_3 C$, 节能效果明显。

(三) 变频器分类

1. 根据变流环节分类

(1) 交—直—交变频器。这种变频装置能够把频率固定的三相交流电整流为直流电, 然后经逆变将直流电变换成频率连续可调的三相交流电, 是目前应用较多的一种变频器。它的电路主要包括整流、逆变、控制和继电保护电路。

(2) 交—交变频器。这种变频器是利用自然换相, 基于可逆整流原理把频率固定的三相交流电直接变换成频率连续可调的三相交流电。

2. 根据储能环节分类 (滤波方式)

(1) 电压型变频器。这种变频器以电容器作为储能元件, 多数中、小容量变频器属于此类型。

(2) 电流型变频器。这种变频器以电感线圈作为储能元件。

3. 根据电压调制方式分类

(1) 正弦脉宽调制 (SPWM) 变频器。这种变频器的电压是由调节脉冲宽度和脉冲占空比来控制的。多数中、小容量变频器属于此类型。

(2) 脉冲幅度调制 (PAM) 变频器。这种变频器的电压是由调节直流电压幅值来控制的。

4. 根据输入电源的相数分类

(1) 三进三出变频器。这种变频器的输入端为固定频率的三相交流电, 输出端为频率可调的三相交流电。绝大多数变频器属于此类型。

(2) 一进三出变频器。这种变频器的输入端为固定频率的单相交流电, 输出端为频率可

调的三相交流电。家用电器中使用的变频器属于此类型。

5. 根据工作原理分类

(1) U/f 控制。 U/f 控制是为了得到理想的转矩—转速特性, 基于在改变电源频率进行调速的同时, 又要保证电动机的磁通不变的思想而提出的, 通用型变频器基本上都采用这种控制方式。 U/f 控制变频器结构非常简单, 但是这种变频器采用开环控制方式, 不能达到较高的控制性能, 而且, 在低频时必须进行转矩补偿, 以改变低频转矩特性。

(2) 转差频率控制。转差频率控制是一种直接控制转矩的控制方式, 它是在 U/f 控制的基础上, 按照已知的异步电动机的实际转速对应的电源频率, 根据希望得到的转矩来调节变频器的输出频率, 就可以使电动机具有对应的输出转矩。这种控制方式, 在控制系统中需要安装速度传感器, 有时还加有电流反馈, 对频率和电流进行控制, 因此是一种闭环控制方式, 可以使变频器具有良好的稳定性, 并对急速的加减速和负载变动有良好的响应特性。

(3) 矢量控制。矢量控制是通过矢量坐标电路控制电动机定子电流的大小和相位, 以达到对电动机在 d 、 q 、 O 坐标系中的励磁电流和转矩电流分别进行控制, 进而达到控制电动机转矩的目的, 通过控制各矢量的作用顺序和时间及零矢量的作用时间, 又可以形成各种 PWM 波, 达到各种不同的控制目的, 如形成开关次数最少的 PWM 波以减少开关损耗。目前在变频器中实际应用的矢量控制方式主要有基于转差频率控制的矢量控制方式和无速度传感器的矢量控制方式两种。

基于转差频率的矢量控制方式与转差频率控制方式两者的定常特性一致, 但是基于转差频率的矢量控制还要经过坐标变换对电动机定子电流的相位进行控制, 使之满足一定的条件, 以消除转矩电流过渡过程中的波动。因此, 基于转差频率的矢量控制方式比转差频率控制方式在输出特性方面能得到较大的改善。但是这种控制方式属于闭环控制方式, 需要在电动机上安装速度传感器, 因此应用范围受到限制。

无速度传感器矢量控制是通过坐标变换原理分别对励磁电流和转矩电流进行控制, 然后通过控制电动机定子绕组上的电压、电流辨识转速, 以达到控制励磁电流和转矩电流的目的。这种控制方式调速范围宽, 启动转矩大, 工作可靠, 操作方便, 但计算比较复杂, 一般需要专门的处理器来进行计算, 因此实时性不是太理想, 控制精度受到计算精度的影响。

(4) 直接转矩控制。直接转矩控制是利用空间矢量坐标的概念, 在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型, 控制电动机的磁链和转矩, 通过检测定子电阻来达到观测定子磁链的目的, 因此省去了矢量控制等复杂的变换计算, 系统直观、简洁, 计算速度和精度都比矢量控制方式有所提高。即使在开环的状态下, 也能输出 100% 的额定转矩, 对于多拖动系统具有负荷平衡功能。

(5) 最优控制。最优控制的应用根据实际要求的不同而有所不同, 可以根据最优控制的理论对某一个控制要求进行个别参数的最优化。例如在高压变频器的控制应用中, 就成功地采用了时间分段控制和相位平移控制两种策略, 以实现一定条件下的电压最优波形。

(6) 其他控制方式。在实际应用中, 还有一些控制方式在变频器的控制中得以实现, 例如自适应控制、滑模变结构控制、差频控制、环流控制、频率控制等。

6. 按照用途分类

(1) 通用变频器。通用变频器是指适用于工业通用电动机和一般变频电动机, 并由一般电网供电, 作调速控制的变频器。此类变频器在工业领域广泛使用, 已成为变频器的主流。

(2) 高性能专用变频器。专用变频器是指对特定的使用对象而设计的变频器,如电梯专业变频器、水泵专业变频器、家电专业变频器等。

(3) 高频变频器。高频变频器广泛应用于电子、模具、雕铣等领域。要求变频器控制高速电动机,输出速度精确,控制速度范围在 $0\sim 80000\text{r/min}$,对变频器控制高速电动机的跳动、噪声也有严格指标。高频变频器是变频器家族中相对高端的一类。

四、交流变频调速技术应用

变频器在民用及工业领域都得到了日益广泛的应用,交流电动机与变频器结合可以针对不同的负荷类型,通过交流变频调速技术获得可观的节能效果。

(一) 变频技术在生产线的液压系统上的应用

1. 工艺过程的分析

防爆带自动焊接线的工艺过程分为带料的切断、一次成型焊接、二次焊接成型、耳环焊接等工序,整个工艺过程由 PLC 程序控制,气动与液压提供各动作的动力源。其中切断、一次成型焊接、二次焊接成型这三道工序主要由液压系统提供动力源,其原理如图 1-4 所示。防爆带自动焊接线的电能主要消耗在焊接变压器、液压系统的电动机油泵两个方面,其中电动机油泵的电能利用率很低。根据自动焊接线的实际工艺过程的要求,利用变频调速原理对液压系统的电动机转速进行控制,可以提高用电效率,达到节能的目的。

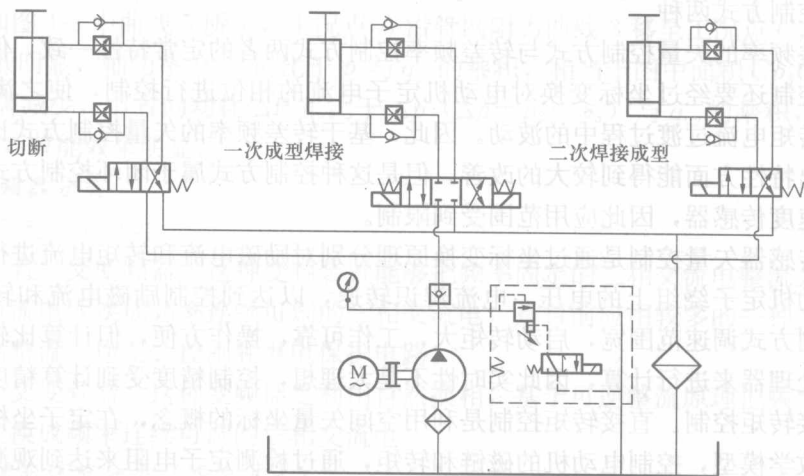


图 1-4 防爆带自动焊接线生产线的液压系统原理图

前述的三道工序中,需要的工作压力和流量又不一样,其中切断动作是高压瞬间完成,二次焊接成型也是高压瞬间动作,但时间比切断动作稍微长一点,只有一次成型焊接需要保持的时间长一点,但压力要求不高。由图 1-4 可知,液压系统为定量泵系统,其油泵电动机均以恒定的转速提供恒定的流量,当机器动作所需流量小于油泵输出流量时,多余的液压油在工作压力下通过卸荷回路流回油箱溢流,从而造成能量损失。此过程造成液压系统电能损耗高达 50%,同时由于液压油长期高速循环流动,以及液压油与液压元件的剧烈摩擦,使油温上升,液压系统的噪声增大,油泵的效率也会降低。

2. 变频调速技术的应用

针对高压溢流耗能的现象,可采用变频控制技术对泵站进行改造。变频调速技术应用示

意如图 1-5 所示。

根据自动焊接线的工艺要求，不同工序需要不同的压力与流量，其负载也不一样，变频控制的核心是通过微电脑对电动机的工作负载进行实时监控，并对负载变化作出快速响应，使电动机得到不同的转速，令系统的输出功率与负载所需功率基本一样，避免多余的能量损失，充分提高电能的利用率，达到大幅度节约电能的目的。

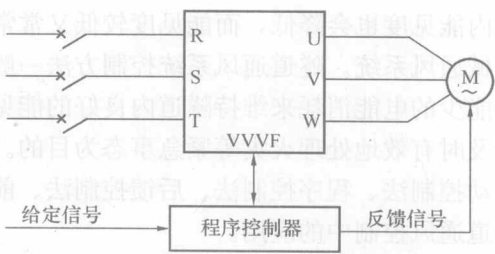


图 1-5 变频调速技术应用示意图

为明确采用变频技术的节能效果，本例选择了两条相同的生产线，在其中的一条生产线上进行了变频调速技术改造，另一条生产线暂不改造。在同样工艺条件下正常生产，分别测试它们的用电量并进行比较（每 20min 记录一次平均用电量），见表 1-1。本例中电机功率为 7.5kW。

表 1-1 采用变频节能技术与不用变频节能技术的用电量对照表

序号	采用变频节能 技术后的用电量 W_1 (kWh)	未采用变频节能 技术的用电量 W_2 (kWh)	序号	采用变频节能 技术后的用电量 W_1 (kWh)	未采用变频节能 技术的用电量 W_2 (kWh)
1	1.65	2.31	4	1.73	2.28
2	1.71	2.42	5	1.60	2.34
3	1.58	2.25	合计	8.27	11.60

分析表 1-1 中数据可以得到：采用变频调速技术改造后的焊接生产线液压系统，平均每小时耗电量为 4.96kWh；未进行改造的焊接生产线液压系统，平均每小时的耗电量为 6.96kWh；节电率达 28.7%，节电效果非常明显。

采用变频调速技术后除节电效果明显外，还带来了相关效益。由于高压溢流耗能现象大大降低，泵站的油温下降，油温冷却装置可取消；液压元件的损耗也降低了，可延长液压油的更换时间；泵站的噪声也明显下降。电动机由原来的长期高速、高压运转变为间歇性高速、高压运转，有效地防止了电动机发热，延长电动机、油泵的使用寿命，大幅度地降低了生产成本。

（二）变频调速在公路隧道通风控制中的应用

对风机的控制直接影响到通风的效果、风机的使用寿命和电能的消耗量。将变频调速技术应用到隧道通风控制中，实现风机软启动和无级调速，能延长风机的使用寿命、降低噪声和节约电能。

1. 在公路隧道中隧道通风问题分析

汽车在公路隧道中行驶会产生各种废气和粉尘。在短隧道中且交通量较小时，隧道中的废气及粉尘会被自然风和交通风带出隧道，对驾驶员和工作人员不会构成危害。但对于长大公路隧道，由于自然风和交通风对隧道内空气的置换作用相对较小，因此必须采取机械通风的方法，将隧道内的有害气体及粉尘浓度控制在容许限度之内。否则隧道内的废气浓度就会逐渐上升，达到一定浓度时就会对人体构成极大危害。另外粉尘浓度上升到一定程度时，隧