

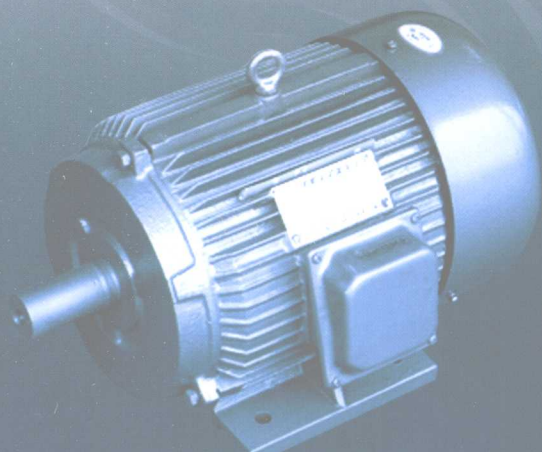
供用电企业实用节电技术丛书

电动机能效 与节电技术

中国电力企业联合会科技服务中心 组编

余龙海 主编

DIANDONGJI NENGXIAO YU JIEDIAN JISHU



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



供用电企业实用节电技术丛书

电动机能效与节电技术

中国电力企业联合会科技服务中心 组编

余龙海 主编



机械工业出版社

本书共分9章,介绍了国内外电动机及节能控制技术的发展,电动机效率与损耗分析,异步电动机的调速与节能,异步电动机的功率因数与无功补偿、电动机起动及其他节能控制技术;针对大功率风机、水泵通用机电设备的节能进行了技术经济分析,全面具体地介绍了电动机经济运行节电技术,并给出了电动机选用、更新改造的科学方法,针对具体技术方案还提供了适用案例以供参考。

本书实用性强,可供发、供、用电企业相关技术人员及高等院校师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电动机能效与节电技术/余龙海主编. —北京:机械工业出版社, 2008.6

(供用电企业实用节电技术丛书)

ISBN 978-7-111-24341-0

I. 电… II. 余… III. 电动机-节能-研究 IV. TM32

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第088097号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:赵玲丽 版式设计:张世琴 责任校对:程俊巧

封面设计:陈沛 责任印制:邓博

北京京丰印刷厂印刷

2008年8月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·12印张·293千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-24341-0

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379059

封面无防伪标均为盗版

丛书编辑委员会

主任委员：鲁俊岭

副主任委员：王益民 唐斯庆 徐继法 孔祥国 吕长江

付贵祥 师文林

委 员：邱 野 吴加新 冯立彬 吕家滨 秦文杰

孟凡中 郑保义 武卷英 李信伟 周 伟

本书编写人员

主 编：余龙海

副 主 编：王雪帆 郭云高

参 编：张韶睿 金祖勇 吴修君 杨培新 刘宗炜

杨 伟 童建平

丛 书 序

“建设节约型社会，实现可持续发展”已经被明确为我国的基本国策。资源与环境的双重压力，迫切要求各领域（尤其是产能和耗能单位）落实国家既定的发展目标。随着一次能源转换为电能的比重、电能占终端能源消费量的比重不断提高以及电力行业固有的资源密集型、资金密集型的特点，使电力行业成为我国环境资源工作的关键所在，建设节约型电力企业的重任摆在了所有电力工作者面前。

电力工业是技术密集型工业，专业性强，能量的转化和传输是一个关联性强、比较复杂的系统，节能工作实施的效果往往不能通过单独的一个环节来认定，也不能片面强调节约而忽略安全。电力企业在某些节能工作方面的谨慎态度以及前些年误把窃电、电量转移、牺牲电能质量的做法当成节约就说明了推动电力行业节能工作的艰巨性和复杂性。因此电力行业节能工作应该遵循科学、系统、实践、推广的规律，既不能畏难不前，也不能求快冒进。

为有效地配合电力企业推进节能工作的开展，发挥电力行业技术服务部门的作用，中国电力企业联合会科技服务中心在认真分析了电力企业节能工作特点的基础上，有针对性地组织编写了供用电企业实用节电技术丛书。丛书突出强调三个方面：

（1）实用性：强调应用、借鉴和参考价值。以电力企业生产过程中涉及到的能量转化原理、能量传输过程为理论基础，以存在的节电环节统计分析为展开线索，以节电手段为落脚点的三重结构。

（2）开放性：强调积聚全行业的智慧和经验。丛书的编写不局限于某几个人的思路，面向全行业所有相关人员开放，长期向电力行业开展电力节能案例征集工作。

（3）长期性：强调在继承总结的基础上，与时俱进地跟踪反映电力节能技术的发展。随着认识水平的提升、技术的进步，会产生很多新的、实用的节能措施和手段，有些已有节能措施可能不再是最佳选择，丛书将根据电力行业节能技术的进展情况实时再版；相信在大家的关注和支持下，随着时间的推移、认识的加深、经验的累积，丛书一定会为促进电力企业的节能工作发挥积极的作用。

供用电企业实用节电技术丛书围绕影响供用电系统节电工作的三个重点展开，即变压器能效与节电技术、电网无功功率补偿与降损、电动机能效与节电技术。丛书在遵循上述编写特点的基础上，牢牢把握电力是二次能源、生产与消费必须同时完成、具有网络性（系统性）的特点（这种特点使节电效果的考核工作相对困难），强调节电技术和手段的效果必须能够经得起各个方面的考核，注重从理论分析和实际应用的角度客观评价节电措施的实施情况，既强调从节电的角度完善相关理论，也强调节电手段和技术的现场可操作性。

本丛书由《变压器能效与节电技术》、《电网无功功率补偿与降损》、《电动机能效与节电技术》三部分组成。

丛书的编写得到了国家电网公司、中国南方电网公司、中国石油天然气集团公司、中国石油化工股份有限公司、中国铝业公司等单位的指导和大力支持，我们在此表示衷心的感谢！

由于我们的水平有限，又加上电力节能技术是一个围绕实践、应用发展起来的跨专业、跨学科的技术汇总，疏漏、错误在所难免，敬请广大读者批评指正！

丛书编委会

前 言

电动机是将电能转换为机械能的功率传递装置。

目前,我国各类电动机总容量约 4.2 亿 kW,用电量约占全国用电量的 60%。预测到 2010 年,全国发电装机容量将达到 6.6 亿 kW 左右,平均每年将投产发电装机容量 3700 万 kW 以上,年均增长 7.8% 左右。而电动机的需求与发电设备的需求呈 1:3.51 的正比关系,据此分析,大型、中小型交流电动机产品在国内市场的有效需求会保持稳定增长。

“十一五”期间,国家将在煤炭、电力、有色、石化等行业实施高效节能风机、水泵、压缩机系统优化改造,重点推广高效节能电动机,推广变频调速、电动机软起动技术、自动化系统控制技术及电动机无功补偿技术等为核心的电动机节能控制技术。若全部在用电动机运行效率提高 2%,年节电约 200 亿 kW·h。由此可见,电动机的节电是全社会节约用电的重要环节。

电动机软起动技术的产业化发展为电动机的合理选用提供了技术保障。本来电动机容量应根据生产机械需要的功率决定,但实际中有时因为起动困难,必须选用较大容量的电动机,甚至还要扩大电网的容量,造成“大马拉小车”的现象。这使电动机和电网经常处于轻载状态,致使投资增大,效率和功率因数降低,增加线路损耗,造成电能的浪费。由于软起动技术的发展,使得电动机选用时可按运行效率为惟一考量,合理匹配。

电动机的调速方式是电动机节电技术的重要发展方向。特别是风机、泵类通用设备常用调节阀门或挡板开启度的方法来调节流量,电能浪费很大。而用电动机调速来调节流量,可使风机、泵长期在高效率状态运行,节电率可达 30% ~ 60%。

建设资源节约型和环境友好型社会是时代的主题,电动机的运行节能是这一伟大主题的重要组成部分。本书全面系统地介绍了高效节能电动机及其运行节电技术,为读者提供了提高电动机运行效能的科学理论及其工程案例。书中所介绍的技术方案技术成熟,投资少,见效快,可行性强。由于作者水平有限,本书难免存在缺点和错误之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2008 年 5 月

目 录

丛书序

前言

第1章 绪论..... 1

- 1.1 国内外电动机技术发展概况 1
- 1.2 国内外高效节能电动机的发展 1
- 1.3 国内外电动机节能技术的发展 3

第2章 电动机效率与损耗分析 5

- 2.1 电动机的损耗分类 5
- 2.2 电动机的效率和功率因数 6
- 2.3 端电压变动时电动机的损耗 7
- 2.4 三相电压不平衡时异步电动机运行
损耗分析 7
- 2.5 电源频率变化对电动机损耗的影响 7
- 2.6 非正弦波形电源下的异步电动机
损耗 8
- 2.7 电动机起停损耗 8
- 2.8 电动机的节能措施 8
- 2.9 主要节能型电动机产品介绍 10

第3章 笼型异步电动机的调速 14

- 3.1 概述 14
- 3.2 电动机的变频调速 16
- 3.3 中压电动机的变频调速 18
- 3.4 功率单元串联多电平型变频调速 21
- 3.5 变频调速装置在火电厂的应用 23
- 3.6 变频调速装置在水泥厂的应用 25
- 3.7 变频调速装置在化工厂的应用 28
- 3.8 变频调速装置在钢厂的应用 31
- 3.9 异步电动机的变极调速 34
- 3.10 火电厂循环泵电动机的变极调速
节能改造 36
- 3.11 电动机变极调速技术在抽油机电
动机节能改造上的应用 38

第4章 绕线转子异步电动机的节能..... 39

- 4.1 概述 39
- 4.2 绕线转子异步电动机用转子调速器 39
- 4.3 离心风机采用转子调速器的节能
分析 42

- 4.4 转子调速器在电厂脱硫增压风机改
造上的应用 46

- 4.5 罗茨风机能否用转子调速器进行节
能改造 52

- 4.6 电动机的双馈调速 53

- 4.7 斩波内馈调速系统 56

第5章 异步电动机的功率因数与 无功补偿 58

- 5.1 异步电动机的功率因数与无功功率
的经济当量 58
- 5.2 电动机无功补偿的分类 59
- 5.3 提高企业自然功率因数的措施 59
- 5.4 三相异步电动机无功就地补偿的
原理 62
- 5.5 三相异步电动机无功就地补偿容量的
计算方法 63
- 5.6 电动机就地补偿的技术经济效益 66
- 5.7 绕线转子异步电动机用转子进相器 68

第6章 电动机节能控制技术 71

- 6.1 异步电动机的轻载调压节能 71
- 6.2 大型电动机的起动与电力系统稳定 75
- 6.3 高压热变电阻软起动装置 84
- 6.4 晶闸管移相减压固态软起动装置 89
- 6.5 晶闸管分级交-交变频固态软起动
装置 92
- 6.6 同步电动机的变频软起动技术 97
- 6.7 降补固态软起动 100
- 6.8 绕线转子异步电动机用转子起
动器 103
- 6.9 液体电阻转子起动器 104
- 6.10 国内外大中型电动机软起动技术
比较 107

第7章 新型高效节能电动机..... 108

- 7.1 提高三相异步电动机能效的原理及
措施 108
- 7.2 国际推动电动机节能降耗的经验
做法 111

7.3 改造电动机提高能效	113	8.2 风机、水泵调速运行的必要性和 优越性	129
7.4 三相复合绕组异步电动机原理简述及 应用	114	8.3 风机、水泵的低效调速节能方案	134
7.5 球磨机采用三相复合绕组异步电动机 的节能改造	118	8.4 风机、水泵的高效调速节能方案	143
7.6 塔机专用变极调速电动机	122	8.5 各种调速方式的综合性能分析	161
7.7 变频调速异步电动机	122	第9章 通用机电设备节能技术	168
7.8 双馈调速电动机	123	9.1 通用机电设备节能对环保的促进 作用	168
第8章 大功率风机水泵调速节能 运行的技术经济分析	128	9.2 提高压缩机电能利用率的途径	169
8.1 概述	128	9.3 风机水泵节能技术途径	172
		参考文献	181

第 1 章 绪 论

1.1 国内外电动机技术发展概况

电动机是将电能转换为机械能的功率传递装置。国民经济工业化及生产规模化进程的不断加强,伴随着能源的逐年匮乏等因素,决定了电动机技术必将朝着高效率、专用途及大容量三个方向发展。

我国电机行业经过改革开放 30 多年的发展,特别是近 10 年的发展,有了长足的进步,令世人瞩目。1998 年交流电动机产量为 5250 万 kW,2002 年产量为 7005 万 kW,2003 年产量达到 8920.03 万 kW,同比增长 26.2%,2004 年 1~5 月交流电动机产量为 4280.86 万 kW,比上年同期增长 31.4%,电动机制造行业前 5 个月的产品销售收入达到 128 亿元,比上年同期增长 50.6%。目前,我国各类电动机总容量约 4.2 亿 kW,实际运行效率比国外低 10%~30%,用电量约占全国用电量的 60%。“十一五”期间将重点推广高效节能电动机、稀土永磁电动机,在煤炭、电力、有色、石化等行业实施高效节能风机、水泵、压缩机系统优化改造,推广变频调速、自动化系统控制技术,使运行效率提高 2%,年节电 200 亿 kW·h。由此可见,电动机的节电是全社会节约用电的重要环节。

预计到 2010 年,全国发电装机容量将达到 6.6 亿 kW 左右,平均每年将投产发电装机容量 3700 万 kW 以上,年均增长 7.8% 左右。而电动机的需求与发电设备的需求呈 1:3.51 的正比关系,据此分析,大型、中小型交流电动机产品在国内市场的有效需求会保持稳定增长。

大容量交流异步电动机是工业规模化的必然产物,代表电动机技术发展的一个重要方向。在国外,主要以 ABB、西门子、西屋及 ALSTOM 公司的产品为代表。目前,ABB 和西门子公司电动机在国内已有较多的使用,宣称最大功率达 48MW。美国西屋公司的电动机在中国电力行业应用也较多,宣称功率达 100000hp[⊖] 等等。国内的电动机制造厂也不甘落后,先后有 16500kW 的同步电动机(兰电)和 18000kW 的异步电动机(上电)问世并成功使用。工业生产规模化,强有力地带动着电动机制造业向大容量方向高速发展。大容量交流异步电动机是目前工业装备用的耗能最多的原动机。

大型电动机控制技术的发展对电动机向大容量方向发展起到了推波助澜的作用。比如高压热变电阻减压软起动装置等各种减压软起动技术的产生和应用,高压变频软起动软停车技术的产生与发展,大型电动机的交-交变频传动技术的产生与发展等等,都有力地促进了工矿企业采用大型电动机代替汽轮机等作为重型工业装备的原动机。

1.2 国内外高效节能电动机的发展

考虑到能源节约和环境保护,当前世界上包括我国在内的很多国家对电动机系统的节能

⊖ 1hp = 745.700W

都给予了高度重视,均把电动机节能的重点放在 0.75 kW 以上的电动机上。

1. 美国高效率电动机

由于节约能源的重要性,国内外对电动机的节能均颇为重视,其中比较突出的是美国于 1992 年 10 月 24 日正式通过了能源政策及节能法令,规定在 60 个月以后,即 1997 年 10 月 24 日以后,凡制造和进口一般用途电动机的效率必须满足所规定的指标(所谓 EPACT 指标),达到该效率指标的电动机与原来一般效率的电动机相比,其损耗下降 20%~30%,效率提高 1.5%~5%。为了贯彻这一法令,美国政府与电动机行业采取了下列措施:

(1) 效率值 对于 1~200hp, 2、4、6 极各种规格电动机规定了满载效率名义值。并考虑到制造和试验的差异规定了最小效率值。同时对每一效率值规定以英文字母作为标志,须在名牌上明显表示。机座号范围为 143T~449T,相当于 IEC 机座中心高 90~280mm。

(2) 试验方法的规定 由于效率实际数值的重要性,对原效率试验方法进行了验证和修订,提出了负载杂耗由输入输出法求取的损耗分析法。为减少测试中的随机误差,对于测得的杂耗数据进行数据平滑处理,从而使最终求得的效率具有较高的真实性和重复性。

(3) 实验室认证的规定 为保证试验数据准确可靠,规定承担认证检测任务的试验室必须经过国家实验室认可委员会(NVLAP)的认可。该认可组织对申请效率认证的实验室提出了具体要求,包括人员、仪器设备和管理等方面的要求。规定测量电压、电流、功率和转矩的仪器的精度要达到 $\pm 0.2\%$ 。

(4) NEMAE 系列设计 为了进一步节能,美国 NEMA 又制订了更高效率水平的电动机标准,称为 NEMAE 设计。该系列设计效率水平较高,效率指标再提高 2%~3%,但其起动电流较一般用途的 A 设计、B 设计要大,主要用于一些长期满负载运行而对电动机起动要求不高的场合。

(5) 广泛进行宣传贯彻 鼓励电力公司对采用高效率电动机的用户进行奖励。

2. 欧洲高效率电动机

欧洲在过去也曾有工厂生产高效率电动机,但没有统一的标准,生产应用的量也不大。随着欧洲经济一体化的加强,欧洲的节能以及降低大气中 CO_2 含量也提到了议事日程上。1999 年召开了高效率电动机会议,欧洲电动机和功率电子制造商协会(CEMEP)、欧洲委员会(EU)能源组织联合提出了欧洲电动机效率方案,即 CEMEP-EU 协议(参加 CEMEP 低压电动机效率标准制订工作组的有 ABB、AEG、Brook Hansen 和 Siemens 等主要电机制造厂)。该方案适用于 1.1~90kW、2 极与 4 极的电动机。每一规格电动机分成低指标和高指标两挡效率指标,效率值低于低指标的称为 eff3 电动机,介于低指标和高指标之间的称为 eff2 电动机,高于高指标的称为 eff1 电动机。以 7.5kW、4 极电动机为例,其效率指标,第一挡为 87。第二挡为 90.1,则相应的电动机按效率分成:

eff3: 低于 87%;

eff2: 87%~90.1%;

eff1: 高于 90.1%。

CEMEP-EU 协议要求今后生产的电动机在铭牌上必须有效率标志,其标志为:

eff3: 当前生产的电动机;

eff2: 高效电动机,应降低损耗 20% 以上,年运行时间在 2000h 以上;

eff1: 高效电动机,应降低损耗 40% 以上,年运行时间在 4000h 以上。

据称, eff3 的电动机到 2006 年就不能再生产。对应于 7.5kW 电动机, 美国相应规格高效率电动机的效率为 89.5%, 欧洲 eff1 为 90.1%, 略高于美国 EPACT 指标。由于欧洲效率试验方法是假定负载杂耗为输入功率的 0.5%, 因此欧洲的 eff1 高效率电动机实际上要低于美国 EPACT 规定的效率水平。

3. 我国高效率电动机

我国政府对于电动机的节能一直比较重视, 在 Y 系列定型生产后, 原机械工业部即组织上海电器科学研究所、北京电机总厂、上海电机公司、大连电机厂等单位设计试制了 YX 高效率电动机系列。该系列电动机与 Y 系列的功率等级与安装尺寸对应关系相同, 效率比 Y 系列平均提高 3%, 与当时美国高效率电动机水平相当。所采用的效率试验方法考虑到当时国内的试验条件, 用反转实测负载杂耗的损耗分析法, 相当于应用 IEEE 标准 112 方法 E, 此方法所测结果与 IEEE-112B 接近, 能较真实地反映电动机实际的效率水平。应该指出, 虽然高效率电动机的总费用(电动机价格与运行费用之和)要比普通电动机低, 但是由于初始投资增加, 主机厂支出增加, 再加上宣传贯彻和鼓励措施未跟上, 使该系列电动机未能得到很好的推广应用。

在 20 世纪 90 年代中期, 设计 Y2 系列电动机的同时, 对于应用在运行时间较长, 负载率较高的场合, 设计了一个提高效率的 Y2-E 系列电动机。该系列与 Y2 系列功率等级与安装尺寸相同, 比 Y2 系列效率平均要提高 2% 左右。由于当时考虑到电动机是国际市场营销数额大的产品, 为便于企业管理, 保证质量, 要求将国内产品标准和出口主要国家的产品标准统一。鉴于欧洲、东南亚和中东市场采用 IEC 标准, 而国内技术政策也要求积极采用 IEC 标准, 为此 Y2 和 Y2-E 系列电动机的效率试验方法是按 IEC34-2 的方法, 假定负载杂耗为输入功率 0.5% 的损耗分析法。

从有关数据分析, YX 效率与美国 EPACT 效率相当, 而 Y2 效率与欧洲的 eff2 效率相当, Y2E 效率略低于 eff1。从而说明我国电动机制造业已初具设计和制造高效率电动机的能力。实际上我国近年来已有每年 100 万 kW 以上按 EPACT 标准生产的高效率电动机出口北美市场, 为国内今后发展高效率电动机打下了较好基础。

目前, 我国中小型电动机约有 300 个系列, 1500 个品种, 产品量大面广, 应用于工业、农业、国防、公共设施、家用电器等各个领域, 广泛用于驱动各类风机、水泵、压缩机、机床、起重运输机械、城市交通及采矿机动车辆、建筑机械、冶金、有色金属、纺织、印刷、造纸、石油化工、橡胶、食品等工业设备和农业机械, 以电动机作为驱动的动力源, 其耗用的电能占全国总发电量相当高的比例。由于我国正处在深化经济体制改革和国家经济高速发展时期, 企业面临宏观经济调控、能源与环保政策的规范问题。检验机构出台的法规明确了节电产品技术标准, 企业通过政府制定的节能技术产品的标准生产产品。同时, 政府对节能产业实施政策引导, 加强执法管理力度, 为企业建立良好的市场环境。目前, 电动机行业已形成比较完整的科技开发和生产体系, 中小型电动机产品的品种、规格、性能和产量都在逐年提高。

1.3 国内外电动机节能技术的发展

除了从电动机本体出发提高功率传递效率、降低损耗外, 以电动机软起动技术、调速技

术、电动机无功补偿技术等为核心的电动机节能控制技术发展非常迅速。

电动机软起动技术的产业化发展为电动机的合理选用提供了技术保障。本来,电动机容量应根据生产机械需要的功率决定,但实际中有时因为起动困难问题,必须选用较大容量的电动机,甚至还要扩大电网的容量,造成“大马拉小车”的现象。这使电动机和电网经常处于轻载状态,致使投资增大,效率和功率因数降低,增加线路损耗,造成电能的浪费。更有甚者,竟有容量达上万千瓦的电动机,在本应停机的情况下因担心起动困难而被迫使其空转数小时甚至数日,白白浪费大量能源。现在,由于软起动技术的成功,选用电动机时可按运行功率为惟一考量,合理匹配。个别大功率电动机迫于起动和困难而空转的问题得以解决,也给各种节能型电动机和专用电动机提供了更多的应用机会。

国内外电动机软起动技术的发展相当活跃,已经是根据电动机不同容量、不同的电压等级、不同的机械负载而有不同的产品;对于中型低压笼型异步电动机,可选用低压固态软起动装置起动,即采用大功率的晶闸管模块作为主电路的开关器件,通过控制它的导通角来实现软起动特性的电压爬升。它具有对电网冲击弱,对电动机机械传动系统振动小,起动转矩平滑稳定等优点,起动电流一般在 $2.5 \sim 3.5$ 倍额定电流之间可调,起动时间也可以调节。对于中型高压笼型异步电动机的减压起动,仍多选用电抗器、自耦变压器等方式。目前国内生产的热变电阻器软起动装置能较好地满足大中型高压笼型异步电动机的减压起动要求。热变电阻器由具有负温度系数的电阻材料制成,当电动机起动时,电阻体通过起动电流,其温度升高,阻值随之减小,从而使电动机端电压逐步升高,起动转矩逐步增加,以实现电动机的平稳起动。根据电动机参数和负载要求的起动转矩,能方便地配制适当的起动电阻值,以获得最佳起动参数,即在较小的起动电流下,获得足够大的起动转矩。此种起动方式不仅有节能效果,而且还延长了电动机的使用寿命,减少了对机械设备的冲击。由于起动装置热容量大,几乎无须维修。目前高压热变电阻器软起动装置已经有 22000kW 电动机软起动的应用业绩。

对于大容量电动机来说,高压变频软起动装置代表着软起动技术的发展方向,起动电流小,对电网无冲击,性能稳定。但目前投资依然太高,维护技术难度很大,因此推荐在其他软起动技术解决不了的场合使用。

对于大容量绕线转子电动机的起动,目前国内外主要采用转子起动器。它已取代了20世纪末出现的性能极差的频敏变阻起动器。使用频敏变阻起动器,起动电流仍然很大,有的竟达额定电流的 $3.5 \sim 4.5$ 倍。这不仅给电动机造成电磁力的冲击,而且在集电环上造成火花点蚀,两者都缩短了电动机的使用寿命。转子起动器是在转子回路串接液体电阻来实现无级软起动,特点是起动电流小,起动转矩高,平稳无冲击,是绕线转子电动机起动的首选设备。

电动机的调速方式是电动机节电技术的重要发展方向。目前,风机、泵类设备常用调节阀门或挡板开启度的方法来调节流量,电能浪费很大。而用电动机调速来调节流量,可使风机、泵长期在高效率状态下运行,节电率可达 $30\% \sim 60\%$ 。在实际应用中,可根据电动机、场地、调速要求等情况选择合适的调速方案。本书将重点讲解各种电动机的调速节能原理和实践。

第2章 电动机效率与损耗分析

2.1 电动机的损耗分类

异步电动机输入电功率, 输出机械功率, 在运行过程中产生恒定损耗和负载损耗。恒定损耗包含风摩擦损耗和铁心损耗, 是不随负载大小变化的损耗。负载损耗包含定子绕组损耗、转子绕组损耗和负载附加损耗 (或称负载杂散损耗), 对绕线转子电动机还包含电刷及转子外接电路的电损耗。

恒定损耗是电动机运行时的固有损耗, 它与电动机材料、制造工艺、结构设计、转速等参数有关, 而与负载大小无关。

1. 铁心损耗 P_{Fe} (含空载杂散损耗)

亦简称铁耗, 是恒定损耗的一种, 由主磁场在电动机铁心中交变所引起的涡流损耗和磁滞损耗组成。铁心损耗大小取决于铁心材料、频率及磁通密度, 近似地表示为

$$P_{Fe} \approx kf^{1.3}B^2$$

磁通密度 B 与输入电压 U 成正比, 对某一台电动机而言, 其铁耗近似与电压的二次方成正比。铁耗一般占电动机总损耗的 20% ~ 25%。

2. 风摩擦损耗也称机械损耗 P_{fw}

是另一种恒定损耗, 通常包括轴承摩擦损耗及通风系统损耗, 对绕线转子电动机还存在电刷摩擦损耗及转子外接电路的电损耗。

机械损耗一般占总损耗的 10% ~ 50%, 电动机容量越大, 由于通风损耗变大, 在总损耗中所占比重也增大。

3. 负载损耗

主要是指电动机运行时, 定子、转子绕组通过电流而引起的损耗, 亦称铜耗。它包括定子铜耗 P_{Cu1} 和转子铜耗 P_{Cu2} , 其大小取决于负载电流及绕组电阻值。铜耗约占总损耗的 20% ~ 70%。

4. 杂散损耗 (附加损耗) P_s

主要由定子漏磁通和定子、转子的各种高次谐波在导线、铁心及其他金属部件内所引起的损耗。

这些损耗约占总损耗的 10% ~ 15%。

图 2-1 是几种典型的小功率电动机的额定损耗分布情况, 读者可以从概念和趋势上有一个定性的理解, 图中的数据不代表各个电动机的真实数据。

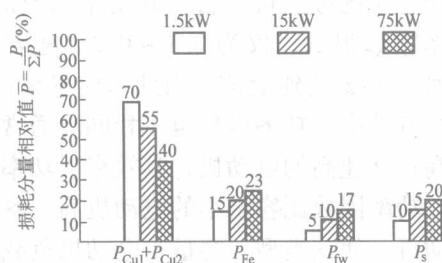


图 2-1 典型小功率电动机的额定损耗分布

2.2 电动机的效率和功率因数

1. 电动机的效率

电动机的效率 η 与损耗相对值 (P) 的关系如下式所示:

$$\eta = 1 - \Sigma P$$

式中 ΣP ——电动机总损耗, $\Sigma P = (P_{Fe} + P_{fw} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_s) / P_1$;

P_1 ——电动机输入功率。

当一台电动机效率为 0.87 时, 由上式可见, 其损耗相对值为 0.13, 如损耗下降 20%, 则由上式可求得效率为 0.896, 即效率提高了 2.6%。由此可见, 如一通用系列电动机的效率平均值为 0.87, 作为高效率电动机系列, 其损耗如平均下降 20% 以上, 则该系列电动机的效率平均值也应提高 2.6% 以上。

在实际应用中, 电动机效率有额定效率、运行效率、最高效率之分。额定效率指输出功率为额定值时的效率; 运行效率指电动机拖动某负载运行时的工作效率; 最高效率指电动机可能达到的最高运行效率。对一台电动机而言, 其额定效率、空载损耗为固定值, 因此, 电动机的效率值高低直接取决于其负载率; 当负载率低于 40% 时, 电动机效率将迅速下降。当负载率为 70% 左右时, 电动机的运行效率最高, 故人们将 60% ~ 80% 的负载率称为有功经济负载率。

2. 电动机的功率因数

电动机的功率因数指电动机输入端的有功功率与视在功率之比, 即

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S}$$

式中 P_1 ——电动机有功输入功率 (kW);

S ——电动机的视在功率 (kVA);

$\cos\varphi$ ——电动机的功率因数。

对一台特定的电动机而言, 其功率因数的大小与电动机的负载率有关, 当电动机空载时, 其功率因数很低, 仅为 0.1 ~ 0.2, 随着负载率增加, 功率因数也增大, 当负载率在 80% 以上时, $\cos\varphi$ 达到最佳, 因此, 应尽量避免电动机在轻载状态下运行。此外, 不同类型的电动机其效率、功率因数也不相同。通常同容量的电动机, 笼型的效率、功率因数均比绕线型的高; 转速高的电动机, 其效率、功率因数比转速低的高; 同一系列的电动机, 容量大的效率、功率因数比容量小的电动机高。鉴于此, 要使电动机处于经济运行状态, 必须合理选择电动机, 使其类型、容量与电动机负载机械特性相适应, 使运行效率最高。对在役的电动机要提高其负载率, 尽量避免在空载、轻载状态中长时间运行; 要加强维护检修, 采取有效措施减少损耗, 力求电动机在拖动中效率最高。表 2-1 为电动机的效率、功率因数和负载率的关系。

表 2-1 电动机的效率、功率因数和负载率的关系

负载率	0	25%	50%	75%	100%
功率因数	0.20	0.5	0.77	0.85	0.89
效率	0	0.78	0.85	0.88	0.875

2.3 端电压变动时电动机的损耗

电动机铭牌上电压值是电动机设计时的依据,实际运行时电网电压是波动的,我国规定低压系统中电压允许变化 $\pm 10\%$,在一个工厂中电压变动往往超过这一范围,电压变动对电动机各部分损耗有什么影响,电压调节在什么范围内变动能够节电,这是值得分析的问题。

国内外许多资料表明,电压低于额定值不超过 10% ,对一个系统,一个工厂往往是节电的。例如,在保证供电电压合格范围内,降低配电电压 $2\% \sim 3\%$,无论对住宅、商业、工业负载都起到节电的效果。工厂减压运行(-5% 左右)同样能够节电,而升压($+5\%$ 左右)则增加电能消耗。当然减压范围不能太大,否则会引起电动机过负载能力降低及某些重载负荷过电流等问题。但在 -5% 范围内,一般不会出现这些问题。

电压变化在负载不同时对电动机效率影响是不同的。在重载时提高电压在一定范围(从 342V 提高到 380V)可以提高效率,再提高(412V)则效率反而下降。但轻载时,电压从 342V 上升则效率越来越低。因此合理调整线路电压及个别调整电动机端电压,可以达到节能的效果。

2.4 三相电压不平衡时异步电动机运行损耗分析

由于三相负载不对称,常常引起供电电压不平衡。这一不平衡电压在异步电动机中产生三相不平衡电流。用对称分量法可以分成正序、负序及零序电流。当定子绕组 Y 联结时,则零序电流为零。其中正序电流产生转矩,使电动机运转,负序电流产生一反转矩,使输出转矩有所减少,当电压不平衡值小于 10% 时,负转矩不大,一般可以不计。但对于负序磁场在转子中产生损耗以及定子电流由于不平衡而使损耗增加必须给予关注。对于额定运行的电动机,其负序电抗非常小,相当于定、转子绕组的漏抗,其负序电阻也非常小,相当于定子直流电阻与 $1/2$ 转子绕组电阻的和,因此在三相电压不平衡时,其三相负序电压将产生很大的负序电流,从而使定、转子的铜耗增加。一般情况下, $15\% \sim 20\%$ 的负序电压所产生的负序损耗与电动机额定运行时所产生的铜耗在数值上相当,负序损耗是与负序电压分量的二次方成正比的。因而保持供电电压平衡,可以节约电能。

2.5 电源频率变化对电动机损耗的影响

目前各国对于电源频率允许偏差范围的规定是不同的。在实际正常运行中,日、美控制在 $\pm 0.01\text{Hz/s}$,而我国许多供电系统有时频率偏差超过 $\pm 0.2\text{Hz/s}$ 。在电力系统网络化的今天,公共电源频率的稳定是有保证的。这里只需要考虑专用电源(比如变频电源)频率变化对电动机损耗的影响。

对于风机泵类负载,由于轴转矩与转速的二次方成正比变化,频率降低后,转速下降,转矩也下降,使定子及转子电流下降,因而电动机效率有所提高,再加上轴功率有大幅度下降,电动机输入功率同样大幅度下降,所以风机泵类负载采用变频调速,在低速时可获得好的节能效果。

2.6 非正弦波形电源下的异步电动机损耗

大多数静止变频器的输出电压波形是非正弦的,通过傅里叶级数分析,其中除基本分量外尚有大量谐波分量。这在异步电动机中产生谐波电流及谐波磁动势。与分析三相电动机磁动势空间谐波一样,可以对此分析,例如,相电流中有5次时间谐波分量,则A、B及C相5次(时间)谐波磁动势相位顺序发生了变化,变成了A、C、B。这说明5次时间谐波产生的旋转磁动势,其转速为5倍基波同步转速,方向与基波旋转方向相反。同样可以证明7次谐波磁动势转速为7倍基波同步转速,方向与基波旋转方向相同。

高次谐波电流会引起电动机铁耗的增加,在2.1节已经有相关论述。

2.7 电动机起停损耗

有些负载要求断续运行,停止时间比运行时间长得多,采用起-运-停循环运行方式(ON-OFF)有可能比负载运行-空转-负载运行降低大量能耗(即电动机空载损耗乘以停运时间)。但起-运-停方式,需多次起动电动机,使定子绕组频繁受到冲击力,笼型转子也会因发热不均匀,产生热应力,多次疲劳会使转子导条断裂。起动时电动机发热增多而散热条件较稳态运行差,多次起动也会使电动机过热。因此工程中对电动机的起动频度有所规定。

采用高转子电阻电动机,可以减少定转子起动电流,所以可减少能耗及电流冲击影响。当然,高转子电阻电动机运行时转差和损耗增加,应综合比较。

对于大中型电动机而言,起停损耗需要考虑的因素还很多,比如电动机直接起动方式时,考虑到起动困难、对相邻设备可能造成影响等因素,管理人员往往会让电动机长时间空转而减少电动机的起动次数,从而造成大量的能源浪费。另一方面,异步电动机的全电压直接起动对电力系统短路容量的要求较高,为此电力系统必须提供更高的供电能力,用户也因此必须支付更多的费用。第三方面是电力系统长时间的运行在相对较低的负载率,系统供电效率较低。因此对于大中型电动机来说,起停损耗问题要从系统角度来周全考虑,通过改变起动方式来节约电能是一种较好的选择。

2.8 电动机的节能措施

电动机的节能是一项涉及到设计制造、各类用户、各种工作制度及运行管理水平等多方面的综合性技术。电动机的原理建立在电磁理论基础,它的旋转既消耗有功功率,把电能转换成机械能;又消耗无功功率,用以产生必要的旋转磁场。因此,电动机节电一要提高其运行效率,二要提高其运行功率因数,减少无功消耗。目前,电动机节能措施主要有以下几项:

1. 大力推广使用高效节能系列电动机

推广高应用效率电动机,是贯彻国家标准《三相异步电动机经济运行》(GB/T 12497—2006)的重要任务之一,也是提高电动机运行效率和功率因数的基础。高效率电动机的定义为:凡是总损耗比标准系列电动机降低20%以上的统称为高效率电动机。高效率电动机