

李 青 高 山 薛彦廷 编著

火力发电厂 节能技术及其应用



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

8-8

火力发电厂 节能技术及其应用

李 青 高 山 薛彦廷 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书详细论述了火力发电厂的各种节能技术,并且结合实际讲述了节能改造技术、运行调整技术和节能管理技术。全书共分四篇十八章,以节能为主线,主要介绍了火力发电厂节能基本原理、经济运行方法,火力发电厂锅炉、汽轮机、电气设备节能技术改造原理与方法,火力发电厂节能项目改造经济效益评价方法等。

本书涉及面广,内容丰富,通俗易懂,紧密结合实际,是大型火力发电厂运行管理、节能管理、节能改造方面的综合性专著,可供电厂检修人员、运行人员和管理人员参考,也可作为大中专院校热动和电气专业的通用教材。

图书在版编目(CIP)数据

火力发电厂节能技术及其应用/李青,高山,薛彦廷编著. —北京:中国电力出版社,2007

ISBN 978-7-5083-5297-8

I. 火… II. ①李…②高…③薛… III. 火电厂-节能 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 040589 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007年8月第一版 2007年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 31.75印张 782千字

印数 0001—3000册 定价 58.00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

前言

preface

能源开发利用的每一步进展都促进了生产的变革和人民生活水平的提高。近几个世纪的世界能源发展与经济迅猛崛起密切相关，能源的不断开发与利用极大地促进了世界经济的发展。

1765 年苏格兰修理工詹姆斯·瓦特发明了高效率的蒸汽机；1821 年英国物理学家迈克尔·法拉第发明了电动机；1832 年法国人希波吕忒·皮克希发明了发电机；1841 年英国发明家帕尔森发明了汽轮机；1859 年法国人加斯顿·普兰特发明了铅—酸蓄电池；1879 年美国大发明家爱迪生（T. A. Edison）发明了使用竹丝炭化的白炽灯；1900 年英国人帕森斯制造了 1000kW、50Hz 汽轮发电机组；1904 年意大利在比萨斜塔附近建成了一座小型地热发电厂；1905 年英国制造了世界上第一台热电联产汽轮发电机组，开始了汽轮机既发电又供热的历史；1910 年美国通用电气公司采用耐高温的金属钨丝代替竹炭丝，制造出大型白炽灯；1912 年德国建成了世界第一座潮汐电站；1920 年苏联建成第一座热电站；1925 年美国建成世界第一台 100MW 汽轮发电机组；1929 年美国建成世界第一座抽水蓄能电站；1942 年 12 月美国建成世界第一座热中子核反应堆；1954 年 6 月苏联在莫斯科附近的奥布宁斯克建成世界第一座核电站 5000kW；1957 年美国在费城附近的希宾波恩特建造了第一个压水反应堆电站；1970 年法国制成世界第一台燃气—蒸汽联合循环发电机组；1973 年法国在比利牛斯山建造了世界第一台快堆，其容量为 250MW；1985 年英国建成世界第一座垃圾发电厂；1991 年世界最大水电站——巴西和巴拉圭合建的伊泰普水电站建成 12600MW；1994 年 12 月开工的、世界最大的水电站——长江三峡工程，首台机组 2003 年 7 月投产，计划总装机容量 18200MW，2009 年竣工；1998 年世界最大燃气联合循环电站——香港龙鼓滩电站 $6 \times 320\text{MW}$ 建成投产；2000 年 3 月世界最大的抽水蓄能电站在广州建成，总装机容量 2400MW；2002 年 12 月在美国佛罗里达州 JEA 北方电站投运 2 台 300MW 循环流化床锅炉（主汽温度 540°C ，主汽压力 17.2Pa，蒸汽流量 906t/h）。

能源的开发和利用极大地促进了社会工业的发展和人民生活水平的提高。但是能源发展在给人类带来文明的同时，也给人类带来了危害。一方面由于能源的大量开发使用导致每天进入地球大气层的二氧化碳达 $5600 \times 10^4\text{t}$ ，全球平均温度比 1860 年升高了 $(0.6 \pm 0.2)^{\circ}\text{C}$ ；另一方面能源供需矛盾严重制约着经济发展和国家安全。

能源是国民经济发展的物质基础，是实现现代化的物质基础，世界各国都把建立可靠、安全、稳定的能源供应保障体系作为国民经济的主要战略问题，把节约能源、提高能源利用率作为本国的能源战略。中国是世界能源生产和消费大国，但是中国的能源利用率是发达国家的 70%，单位国民生产总值能耗是发达国家的 5 倍左右。随着中国经济的高速发展，

能源短缺和浪费问题越来越突出。中国对能源问题十分重视，提出“要把节约资源作为基本国策”，把“坚持开发与节约并举，把节约放在首位”作为能源发展战略总方针。为了实现中国的可持续发展，中国政府提出近期采取如下节能措施：发展水能、太阳能、海洋能、风能和核能，改善能源结构；加强节能技术改造工作，淘汰低效率、高能耗的设备和工艺，开发和推广节能新工艺、新设备和新材料，提高能源利用率；加强法制建设，完善节能法配套法规等。

本书站在火力发电厂的位置，详细论述了火力发电厂的各种节能技术。全书共分十八章，其中，第一章～第五章由华能威海电厂李青编写，第六章～第十二章由西安热工研究院薛彦廷编写，第十三章～第十八章由山东黄台火力发电厂高山编写，全书由李青统稿。

本书得到山东大学能源与动力工程学院裘烈钧教授、公维平副教授和南通电厂方超高级工程师、福州电厂陈信疆高级工程师的指导，并提出了许多中肯的意见，在此表示衷心的感谢。

作者

2007年5月

前 言

第一篇 电气节电技术

■ 第一章 电动机节电技术	1
第一节 电动机功率损耗和综合经济负载率	2
第二节 电动机功率因数	15
第三节 电动机的功率补偿	17
第四节 Δ —Y 接法转换	22
第五节 一般负载驱动电动机的选择	24
第六节 三相异步电动机负载率现场测试方法	30
第七节 电动机节能效能值	33
■ 第二章 变压器节电技术	39
第一节 变压器效率和损耗	39
第二节 变压器并联节电运行	44
第三节 节能变压器的应用	50
第四节 降低线路损耗	58
第五节 总拥有费用法选择变压器	61
■ 第三章 照明节电技术	68
第一节 绿色照明简介	68
第二节 照明基础知识	70
第三节 电光源特性及选择	71
第四节 照明节电措施	79

第二篇 风机与水泵节电技术

■ 第四章 电动机调速节电技术	90
第一节 电动机调速技术	90
第二节 高压变频调速系统的选择	103
第三节 变频调速的具体应用	110
第四节 高压变频器在风机上的节能应用	113
第五节 国产高压变频器在水泵上的节能应用	116

第六节	液力耦合器的节能应用·····	120
第七节	电磁转差离合器的节能应用·····	125
第八节	变压调速的节能应用·····	127
第九节	内反馈调速的节能应用·····	128
第十节	变极调速的节能应用·····	131
第五章	泵与风机节能改造技术 ·····	136
第一节	流量调节特性·····	136
第二节	泵与风机驱动电动机的选择·····	142
第三节	高效风机与水泵的选用·····	144
第四节	风机与泵的改造·····	152
第六章	火力发电厂的电能平衡测试 ·····	159
第一节	电能平衡的意义和要求·····	159
第二节	电能平衡的测试计算方法·····	163
第三节	测试资料汇总计算·····	174
第四节	电能平衡测试报告的编写·····	178

第三篇 锅炉节能技术

第七章	锅炉主设备的节能措施 ·····	184
第一节	锅炉的分类及其特点·····	184
第二节	锅炉炉膛参数的合理取值·····	189
第三节	锅炉燃烧器改造及其经济运行·····	191
第四节	锅炉受热面结渣及其防治·····	196
第五节	锅炉受热面的高温腐蚀及其防治·····	202
第六节	影响过热蒸汽温度的因素与超温过热的防治·····	206
第七节	锅炉省煤器磨损及其防治·····	209
第八节	受热面的低温腐蚀及其防治·····	215
第八章	锅炉燃烧反应和效率 ·····	221
第一节	燃料的燃烧条件及其影响因素·····	221
第二节	锅炉的燃烧化学反应·····	225
第三节	提高锅炉热效率的措施·····	235
第四节	煤质对锅炉燃烧和电厂生产的影响·····	244
第九章	燃煤锅炉的经济运行 ·····	250
第一节	控制锅炉氧量与漏风·····	250
第二节	锅炉排烟温度的控制·····	255
第三节	飞灰含碳量的监测与控制·····	261
第四节	气泡雾化油枪在煤粉锅炉上的应用·····	266
第五节	等离子点火装置在煤粉锅炉上的应用·····	270
第六节	煤粉浓度在线检测装置的应用·····	274
第七节	低压省煤器在火电厂中的应用·····	282

第十章	磨煤机的经济运行	286
第一节	磨煤机的分类	286
第二节	筒式钢球磨煤机的经济运行	289
第三节	中速磨煤机的经济运行	294
第四节	风扇式磨煤机的经济运行	300
第十一章	煤粉分离器与制粉系统的经济运行	302
第一节	煤粉分离器的结构与效率	302
第二节	煤粉细度的选择	305
第三节	制粉系统的选择和常见故障处理	310
第四节	钢球磨煤机制粉系统优化改造	318
第五节	风扇磨煤机制粉系统改造	326
第十二章	空气预热器节能改造技术	328
第一节	空气预热器分类与特点	328
第二节	空气预热器积灰及其防治	332
第三节	空气预热器漏风与自动跟踪调整装置	336
第四节	回转式空气预热器密封系统的改造技术	340
第十三章	电除尘器改造技术	346
第一节	电除尘器设计计算	346
第二节	电除尘器改造实例	350

第四篇 汽轮机节能技术

第十四章	汽轮机的经济运行	353
第一节	汽轮机的分类与构成	353
第二节	汽轮发电机组的效率与热耗	356
第三节	汽轮机的滑压运行	365
第十五章	给水的回热加热的经济性	369
第一节	给水加热器的结构与原理	369
第二节	高压加热器设计计算	371
第三节	高压加热器的投入与停用	378
第四节	加热器端差对机组经济性影响	381
第五节	高压加热器泄漏对机组经济性影响	384
第十六章	汽轮机本体节能改造	393
第一节	汽轮机通流部分节能改造分析	393
第二节	国产引进型 300MW 汽轮机组系统优化改造	400
第三节	布莱登汽封的应用	408
第十七章	汽轮机凝汽器的经济运行与改造	413
第一节	凝汽器的作用和特性	413
第二节	凝汽器的工程热力计算	417
第三节	凝汽器真空的运行监督	431

第四节	凝汽设备真空查漏的方法	437
第五节	火电机组真空系统治理实例	439
第六节	凝结水过冷却度的运行监督	445
第七节	凝汽器端差的运行监督	448
第八节	凝汽器的脏污及其清理方法	453
第九节	胶球清洗装置的运行	458
第十节	凝汽器清洁度的判断与自动控制	461
第十一节	抽气器改造技术	465
第十二节	电站凝汽器管选材	471
第十三节	大型凝汽器改造技术	477
 第十八章	冷却水系统经济运行与改造	484
第一节	阻抑水中污垢的方法	484
第二节	冷却水泵的改造	488
第三节	循环水系统经济运行	489
参考文献		498

电能是由一次能源转换而来的二次能源，电能的特点是发电、传输和用电都在同一瞬间发生，在发电机运行中，如果用电负荷过小，则整个系统的效率会降低，造成能源浪费，如果负荷过大，发电机则会难以胜任甚至造成设备损坏。因此必须严格管理电能才能做到合理节约用电。电能的传输路径和转换效率如图 1-1 所示。

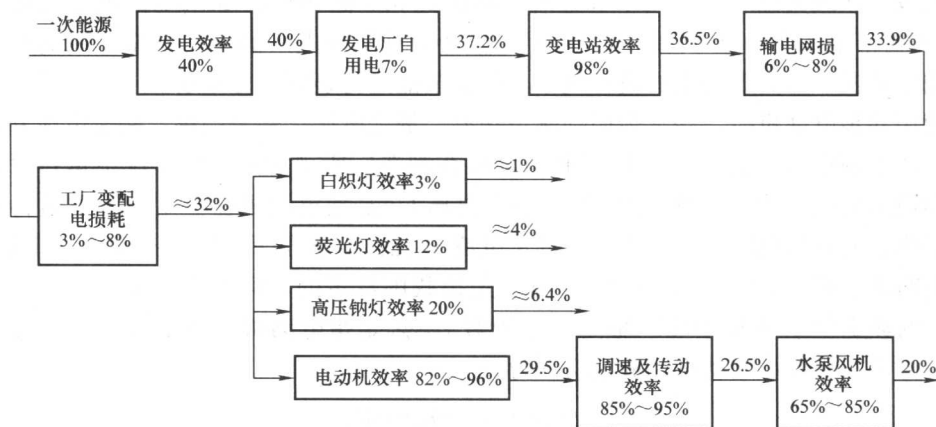


图 1-1 电能传输和使用示意框图

一次能源约有 68% 在转换和输配环节中损失掉了，在工厂内部又要损失 12%，最终只有 20% 能量转化为水泵或风机有效功。在任何一环节节约一个百分点，都会取得巨大的经济效益。例如一座 900MW 火力发电厂，如果厂用电降低 1%，则每年就可节约电能 6000 万 kWh。

根据图 1-1 得知，可以采取如下措施进行电气方面的节能：

- (1) 采用高效电动机。
- (2) 采用低损耗变压器。
- (3) 采用功率补偿，改善功率因数。
- (4) 使用绿色照明。
- (5) 采用变速调节，进行辅机经济调度，降低厂用电率。
- (6) 采用高效风机和水泵。

本篇正是从上述六个方面阐述电气方面的节能技术及其应用。

第一章

电动机节电技术

电动机应用极为广泛，电动机主要负载为泵与风机，它们是通用的耗电设备，数量众多，分布面极广，耗电量巨大。目前我国各类电动机总容量约 420GW，实际运行效率比国

外先进水平低 10~30 个百分点, 全国电动机消耗的电能约占全国用电量的 55% 左右, 按 2004 年全国用电量 21735 亿 kWh 计算, 全国电动机消耗电量 12000 亿 kWh。

我国中小型电动机约占全国电动机功率的 75%, 提高中小型电动机的效率是电动机节能的主要方面。在 20 世纪 80 年代前我国大量采用 J 系列电动机; 80 年代初开发的 Y 系列电动机比 J 系列电动机性能提高许多, 启动转矩提高 30%, 体积和质量减少 10%, 但效率只提高了 0.412%; 80 年代后期又开发了 YX 系列电动机, 比 Y 系列电动机的效率提高 3%, 达到 92%, 而美国高效电动机的效率达到 94.5%。根据国际节能研究所预测, 如果中国电动机效率达到美国水平, 其年节电潜力将达到 330 亿 kWh。如果全国电动机效率提高 1%, 全年可节约 120 亿 kWh, 相当于一个 2000MW 发电厂的年发电量, 因而合理、有效地使用电动机, 提高电动机的设备效率, 使其节能运行显得十分重要。

在使用异步电动机时, 经常会遇到额定功率、额定电压、额定频率、额定电流和额定功率因数等几个额定值。额定功率 P_N 是指电动机在制造厂所规定的额定情况下运行时, 由电动机轴端输出的机械功率, 单位为 kW; 额定电压 U_N 是指电动机在额定情况下运行时, 外加于定子绕组上的线电压, 单位为 V; 额定电流 I_N 在额定电压下、轴端有额定功率输出时, 定子绕组的线电流, 单位为 A; 额定频率 f 是指我国规定的, 除外销产品外, 国内用的异步电动机的额定频率均为 50Hz。额定功率因数 $\cos\varphi_N$ 是指电动机在额定情况下运行时的功率因数。对于三相异步电动机, 额定功率为

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \eta_N \cos\varphi_N$$

式中 P_N ——电动机额定功率, W;

η_N ——电动机在额定情况下运行时的效率, %。

例如, 一台三相异步电动机额定功率 $P_N = 15\text{kW}$, 额定电压 $U_N = 380\text{V}$, 额定功率因数 $\cos\varphi_N = 0.85$, 额定效率 $\eta_N = 90\%$, 则额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N \cos\varphi_N \eta_N} = \frac{15 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.85 \times 0.90} = 29.79(\text{A})$$

第一节 电动机功率损耗和综合经济负载率

一、电动机能量损耗

电动机在能量转换过程中不可避免地存在一定的损耗, 它包括两部分损耗: 固定损耗和可变损耗。

1. 固定损耗及其降低措施

固定损耗是指电动机运行时的固有损耗, 它与电动机制造工艺、结构设计等有关, 而与负载大小无关。固定损耗包括铁芯损耗 (含空载杂散损耗) 及机械损耗。铁芯损耗 P_{Fe} 简称铁耗, 主要是由于主磁场在电动机铁芯齿部和轭部中交变所引起的涡流损耗和磁滞损耗。由于正常运行时, 转子频率很低, 一般只有 1~3Hz, 转子铁耗很小, 可以忽略不计, 因此铁芯损耗实际上仅为定子铁耗。铁耗大小取决于铁芯材料、磁场频率和磁通密度, 近似公式为

$$P_{Fe} = k f^{1.3} B^2$$

由于磁通密度 B 与输入电压 U 成正比, 因此对某一台电动机而言, 其铁耗近似与电压

的平方成正比。而空载杂散损耗 P_{ad} 是空载电流通过定子绕组的漏磁通在定子机座、端盖等金属中产生的损耗, 由于空载电流近似不变, 因此这些损耗也是恒定的。铁芯损耗一般占异步电动机总损耗的 20%。降低铁芯损耗的主要措施是: ①采用薄硅钢片铁芯降低涡流损耗; ②增长铁芯长度降低磁通密度, 从而减少磁滞损耗和涡流损耗; ③应用磁性槽泥和磁性槽楔可以降低空载杂散损耗; ④采用高导磁、低损耗的冷轧硅钢片; ⑤增加磁路截面积, 降低磁密; ⑥改进加工工艺, 减少冲片毛刺等。

机械损耗 P_{mec} 包括轴承摩擦损耗和通风系统损耗, 对绕线式转子还存在电刷摩擦损耗。轴承摩擦损耗与轴承型号、装配水平、润滑条件和电动机转速有关, 轴承摩擦损耗正比于转速的平方。通风系统损耗 (简称通风损耗) 主要取决于冷却风机效率、风道阻力和电动机转速等, 通风损耗正比于转速的三次方。电动机容量越大, 机械损耗越大, 在总损耗中所占的比重越大。2 极电动机机械损耗约占电动机容量的 2.5%~3.5%, 4 极电动机机械损耗约占电动机容量的 1.0%~1.5%。降低风摩损耗的主要措施是: ①采用优质进口轴承; ②采用优质润滑剂; ③采用高效风机以及通风结构合理的通风系统; ④改进风路结构, 使电动机绕组温升均匀; ⑤在电动机温升允许条件下, 尽量减少风扇尺寸, 例如 4 级电动机风扇外径缩小 20%, 风摩损耗可减少 10%, 噪声下降 3dB; ⑥提高加工精度, 提高装配质量。

2. 可变损耗及其降低措施

可变损耗 P_{ch} 是指电动机由负载电流引起的损耗。包括铜耗、杂散损耗等, 又称负载损耗。

铜耗 P_{Cu} 是由于定子绕组和转子绕组流过的电流所产生的电阻损耗, 并与负载电流的平方成正比。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和绕组电阻值, 铜耗约占总损耗的 30%~70%。降低定子铜耗的措施是: ①可以采用增大导线截面积、采用电导率高的铜材, 以减少绕组电阻; ②合理缩短线圈端部长度和通过增加电线股数的办法来降低绕组电阻; ③增大定子槽尺寸, 增加导线数量, 用铜线代替铝导线, 减少绕组电阻; ④改善绝缘处理工艺, 提高绕组导热性能, 降低绕组温升; ⑤采用性能好的绝缘材料, 绝缘温降小, 电动机温升可降低; ⑥减薄槽绝缘厚度, 可增大导线截面。降低转子铜耗的措施是: ①增加空气隙中的磁通; ②增大转子槽面积和端环尺寸; ③提高铸铝工艺, 增大转子导条及端环的导电率。

杂散损耗 P_{ad} 又称附加损耗, 包括附加铜耗和附加铁耗。附加铜耗主要是由于定子绕组有电流后, 产生槽漏磁通, 这部分漏磁通使槽内导线在其截面积上的电流分布不均匀, 靠近槽口的地方电流密度大, 这就是所谓的电流集肤效应。显然电流分布不均时的铜耗要比分布均匀时的大, 多出来的部分就是附加铜耗。附加铁耗主要是由于定子、转子上有齿槽存在, 当电动机旋转时使气隙磁通发生脉振, 从而在定子、转子铁芯中产生附加损耗。另外定子端部漏磁通在铁芯压板、端部支架和端盖里也要产生附加铁耗。在大容量电机里, 定子电流很大, 端部漏磁较大, 引起的附加损耗很大, 为了减少杂散损耗, 应采取: ①在线圈端部附近, 尽量少采用磁性金属件, 多采用玻璃钢之类的结构件; ②定子开口槽采用磁性槽楔; ③定子压圈最好用反磁性材料; ④选择合理的绕组形式, 如串接的正弦绕组, 改善磁势波形; ⑤适当增加气隙; ⑥选择合适的定子、转子槽配合; ⑦为了减少转子横向电流损耗, 可采用转子导条与槽绝缘处理工艺, 以增加转子导条与铁芯间的接触电阻。一般情况下, 附加损耗约占总损耗的 10%~20%。Y 系列小型电动机各种损耗与功率等级 P_N 的关系见表 1-1。

表 1-1

Y 系列小型电动机各种损耗与功率等级 P_N 的关系

P_N (kW)	2 极					4 极				
	P_{Cu1}/P_N (%)	P_{Cu2}/P_N (%)	P_{Fe}/P_N (%)	P_{mec}/P_N (%)	P_{ad}/P_N (%)	P_{Cu1}/P_N (%)	P_{Cu2}/P_N (%)	P_{Fe}/P_N (%)	P_{mec}/P_N (%)	P_{ad}/P_N (%)
0.75	11.85	6.2	4.19	4.0	1.98	15.23	8.13	4.33	1.6	2.23
1.1	11.0	6.6	3.55	2.73	2.7	13.32	7.15	3.53	1.36	1.24
1.5	10.7	6.1	3.4	3.0	1.90	12.14	7.37	3.22	1.0	1.50
2.2	8.6	5.9	2.96	2.0	2.21	9.78	5.1	3.05	1.5	1.7
3.0	6.7	4.4	2.82	2.67	2.0	8.16	5.1	3.03	1.1	1.7
4.0	5.78	3.85	2.75	2.75	2.01	6.58	4.25	2.94	1.25	1.65
5.5	5.11	3.14	2.36	4.09	2.23	5.63	3.65	2.48	1.27	2.79
7.5	4.78	3.28	2.06	3.0	2.12	4.86	3.43	2.39	0.93	3.0
11	3.04	2.29	2.51	4.1	2.11	4.08	2.71	2.31	1.45	2.67
15	2.86	2.35	2.22	3.0	2.51	3.56	2.70	2.18	1.07	2.32
18.5	2.48	2.26	2.1	2.43	2.50	3.53	2.01	2.24	1.35	1.7
22	2.74	2.06	2.27	3.18	1.16	3.17	2.06	2.14	1.13	0.95
30	2.41	1.63	2.11	3.33	1.53	2.95	1.69	1.94	1.17	1.01
37	2.15	1.62	2.0	2.7	1.60	2.52	1.35	1.90	1.22	1.60
45	1.82	1.0	2.09	2.56	1.74	2.39	1.41	1.76	1.0	1.56
55	1.64	1.03	2.08	2.73	1.84	1.98	1.34	1.77	1.09	1.75
75	1.49	0.68	1.94	3.47	0.90	1.97	0.97	1.60	1.33	1.19
90	1.39	0.78	1.90	2.89	0.75	1.58	0.86	1.68	1.11	1.03

3. 异步电动机的功率

(1) 异步电动机功率之间的关系。三相异步电动机运行时电源向定子送入功率 P_1 ，定子绕组中有铜耗 P_{Cu1} 和旋转磁场在定子铁芯中造成的磁滞涡流损耗（即铁损 P_{Fe} ），扣除这两项损耗之后，剩下的功率便是通过气隙中的旋转磁场，利用电磁感应作用传递到转子上的电磁功率 P_{em} ，即

$$P_{em}=P_1-P_{Cu1}-P_{Fe}$$

电磁功率 P_{em} 减去转子绕组铜耗 P_{Cu2} 之后，便是产生于电动机转子上的总机械功率 P_m ，即

$$P_m=P_{em}-P_{Cu2}$$

从总机械功率 P_m 中减去机械损耗 P_{mec} 和附加损耗 P_{ad} ，得到电动机轴端输出功率 P_2 ，即

$$P_2=P_m-P_{mec}-P_{ad}$$

通过电机学知识进一步分析可简便地得到各功率间的重要关系式，即

$$\frac{P_{\text{Cu2}}}{P_{\text{em}}} = s \quad (1-1)$$

$$P_{\text{Cu2}} = s P_{\text{em}}$$

$$\frac{P_{\text{m}}}{P_{\text{em}}} = 1 - s$$

$$P_{\text{m}} = (1 - s) P_{\text{em}}$$

$$\frac{P_{\text{m}}}{P_{\text{Cu2}}} = \frac{1 - s}{s}$$

式中 s ——转差率。

转差率是指转子转速 n (r/min) 与同步转速 n_0 (定子主磁场旋转速度) 的差额对同步转速的比值，即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

同步转速 n_0 与电动机极对数 p 的关系为

$$n_0 = \frac{60 f_0}{p}$$

式 (1-1) 说明：转子铜耗，或者广泛地说，消耗在转子电路中的电功率等于电磁功率与转差率 s 的乘积。转差率 s 越大，则电磁功率消耗在转子铜耗上的分量就越大，正因为这样，异步电动机正常运行时的转差率 s 都很小， $s = 0.01 \sim 0.05$ ，以提高效率。

(2) 异步电动机的转矩。作用在异步电动机上有三个转矩：电磁转矩 M_{em} 、空载制动转矩 M_0 、负载制动转矩 M_2 。

电磁转矩 M_{em} 是由转子电流与气隙磁通（严格说是主磁通）相互作用引起的电磁力所产生的；空载制动转矩 M_0 是由电动机的机械损耗 P_{mec} 和附加损耗 P_{ad} 所引起的；而负载制动转矩 M_2 则是转子所拖动的负载反作用于转子的力矩。

当转子以机械角速度 $\omega = 2\pi \frac{n}{60} \text{ rad/s}$ 旋转时，转子在电磁转矩 M_{em} 的作用下获得的总机械功率为

$$P_{\text{m}} = M_{\text{em}} \omega = M_{\text{em}} 2\pi \frac{n}{60}$$

从 M_0 产生的原因可知：

$$P_{\text{mec}} + P_{\text{ad}} = M_0 \omega = M_0 2\pi \frac{n}{60}$$

转子在克服负载转矩 M_2 的情况下以角速度 ω 旋转，因此转子对负载输出的机械功率为

$$P_2 = M_2 \omega = M_2 2\pi \frac{n}{60}$$

电磁功率 P_{em} 与转矩的关系式为

$$P_{em} = \frac{P_m}{1-s} = \frac{M_{em}\omega}{1-s}$$

所以

$$M_{em} = \frac{(1-s)P_{em}}{\omega} = \frac{P_{em}}{\omega_0} = \frac{P_m}{\omega} \quad (1-2)$$

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}$$

$$M_0 = \frac{P_{mec} + P_{ad}}{\omega}$$

$$\omega_0 = 2\pi \frac{n_0}{60} = \frac{\omega}{1-s}$$

式中 ω_0 ——同步角速度, rad/s。

式 (1-2) 说明: 电磁转矩等于电磁功率除以同步角速度, 也等于总机械功率除以转子的机械角速度。

电磁转矩极大值即为最大电磁转矩, 以 M_{max} 表示, 最大电磁转矩 M_{max} 对应的转差率称为临界转差率, 以 s_m 表示。最大电磁转矩与额定电磁转矩的比值称为过载能力或最大转矩倍数, 以 λ 表示, 即 $\lambda = \frac{M_{max}}{M_N}$, 一般的三相异步电动机的过载能力 $\lambda = 1.6 \sim 2.2$, 冶金机械用的三相异步电动机的过载能力 $\lambda = 2.2 \sim 2.8$ 。过载能力 λ 可以从电动机产品目录中的额定参数查到。

额定负载时的机械制动转矩就是额定转矩 M_N , 即

$$M_N = M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{P_N}{2\pi \frac{n_N}{60}} = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$

式中 P_N ——异步电动机额定功率, W;

M_N ——异步电动机额定转矩, N·m。

而临界转差率 s_m 可以从下面公式推导出来, 电机学知识告诉我们

$$s_m = s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$$

$$s_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \quad (1-3)$$

根据式 (1-3) 可以知道任意转差率 s 下的电磁转矩 M , 其计算公式为

$$M = \frac{2\lambda M_N}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (1-4)$$

【例 1-1】 一台三相异步电动机的数据为 $P_N = 150\text{kW}$, $U_N = 380\text{V}$, 同步转速 $n_0 = 1500\text{r/min}$ 额定转速 $n_N = 1460\text{r/min}$, 过载能力 $\lambda = 2.2$, 定子 Y 接法, 请计算此电动机在转差率 $s = 0.02$ 时的电磁转矩和负载转矩恒等于 $860\text{N} \cdot \text{m}$ 时的转速。

解 额定转差率为

$$s_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0} = \frac{1500 - 1460}{1500} = 0.027$$

临界转差率为

$$s_m = s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.027 \times (2.2 + \sqrt{2.2^2 - 1}) = 0.1123$$

额定转矩为

$$M_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{150 \times 10^3}{1460} = 981.2$$

$s=0.02$ 时的电磁转矩为

$$M = \frac{2\lambda M_N}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2 \times 2.2 \times 981.2}{\frac{0.02}{0.1123} + \frac{0.1123}{0.02}} = 745.2$$

负载转矩恒等于 $860 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时得

$$860 = \frac{2 \times 2.2 \times 981.2}{\frac{s}{0.1123} + \frac{0.1123}{s}}$$

整理得

$$s^2 - 0.5638s + 0.0126 = 0$$

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{0.5638 \pm \sqrt{0.5638^2 - 4 \times 1 \times 0.0126}}{2 \times 1}$$

解得 $s=0.0233$, 另一解 $s=0.540$ 不合理, 舍去。

电动机转速为

$$n = (1-s) n_0 = (1-0.0233) \times 1500 = 1465.1$$

【例 1-2】 某四极三相异步电动机的数据为 $P_N=10\text{kW}$, $U_N=380\text{V}$, $I_N=20.1\text{A}$, 定子 $\triangle$ 接法, 定子铜耗 $P_{\text{Cu1}}=500\text{W}$, 转子铜耗 $P_{\text{Cu2}}=285\text{W}$, 铁耗 $P_{\text{Fe}}=275\text{W}$, 机械损耗 $P_{\text{mec}}=75\text{W}$, 附加损耗 $P_{\text{ad}}=180\text{W}$ 。试计算此电动机额定负载时的转差率、额定转速、负载制动转矩和电磁转矩。

解 同步转速为

$$n_0 = \frac{60f_0}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500$$

总机械功率为 $P_m = P_2 + P_{\text{mec}} + P_{\text{ad}} = 10 + 0.075 + 0.18 = 10.255$

电磁功率为 $P_{\text{em}} = P_m + P_{\text{Cu2}} = 10.255 + 0.285 = 10.54$

额定转差率为 $s_N = \frac{P_{\text{Cu2}}}{P_{\text{em}}} = \frac{0.285}{10.54} = 0.02704$

额定转速为 $n_N = (1 - s_N)n_0 = (1 - 0.02704) \times 1500 = 1459.4 (\text{r/min})$

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} = 2\pi \frac{1459.4}{60} = 152.828 (\text{rad/s})$$

负载制动转矩为 $M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{10 \times 10^3}{152.828} = 65.43 (\text{N} \cdot \text{m})$

电磁转矩为 $M_{\text{em}} = \frac{P_{\text{m}}}{\omega} = \frac{10.255 \times 10^3}{152.828} = 67.10 (\text{N} \cdot \text{m})$

二、电动机的综合经济效率

1. 电动机的效率

额定参数下, 电动机的效率为

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{\text{IN}}} = \frac{P_N}{P_N + \Sigma P}$$

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \eta_N \cos \varphi_N$$

式中 P_N ——电动机额定功率, 即电动机额定运行时轴上输出的机械功率, W;

ΣP ——电动机额定负荷下的有功功率损耗, W;

P_{IN} ——电动机额定输入功率, W;

U_N ——电动机额定电压, V;

I_N ——电动机额定电流, A;

η_N ——电动机额定效率, %。

从空载运行到额定负载运行, 由于主磁通和转速变化很小, 固定损耗 (铁耗 P_{Fe} 和机械损耗 P_{mec}) 变化很小, 而且与负载电流大小基本无关, 因此固定损耗为

$$P_0 = P_{\text{mec}} + P_{\text{Fe}}$$

可变损耗 (定子铜耗 P_{Cu1} 、转子铜耗 P_{Cu2} 和杂散损耗 P_{ad}) 基本上与负载电流大小的平方成正比例, 不同负荷下的可变损耗计算公式为

$$P_{\text{ch}} = K^2 (\Sigma P - P_0) = K^2 \left[\left(\frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right]$$

式中 P_0 ——电动机的空载损耗, W;

P_N ——电动机额定功率, W;

P_{ch} ——电动机的可变损耗, W;

K ——电动机负载率, %。

有功功率损耗为

$$\Sigma P = P_0 + P_{\text{ch}} = P_0 + K^2 \left[\left(\frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right]$$

电动机的实际输入功率为

$$P_1 = P_2 + P_{\text{ch}} + P_0$$

所以不同负载下的电动机效率 η 计算公式可以写为