

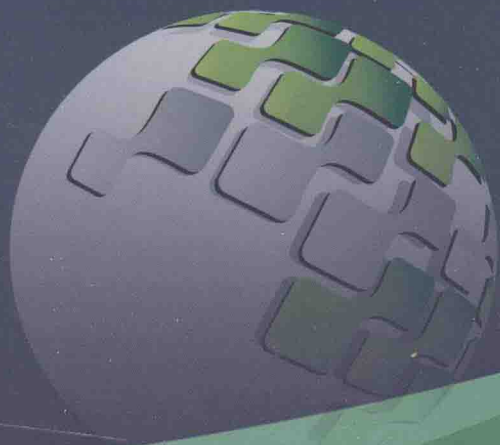
电动机 节能控制技术 及工程应用

DIANDONGJI JIENENG KONGZHISHU
JI GONGCHENG YINGYONG

湖北文理学院

余龙海 廖育武
王培元 王正强 胡晗

编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电动机节能控制技术及工程应用

湖北文理学院 余龙海 廖育武
王培元 王正强 胡 晗 编著

机械工业出版社

本书围绕电动机节能控制技术及工程应用这个主题,介绍新型高效电动机以及新型高效控制技术,这里介绍的每一项新技术都与战略性新兴产业和新型工程化应用有关。

全书共分10章。第1章对电动机节能控制技术国内外的的发展情况进行介绍,第2章对电动机效率与损耗进行了分析,第3章介绍了三相异步电动机的调速技术,第4章介绍了绕线转子三相异步电动机的节能技术,第5章介绍了同步电动机的调速技术,第6章介绍了异步电动机的功率因数与无功补偿技术,第7章介绍了电动机节能控制技术,第8章介绍了大功率风机水泵调速节能运行的技术经济分析,第9章介绍了通用机电设备节能技术,第10章介绍了新型高效节能电动机。

本书可供高等院校电气工程专业师生阅读,也可作为企业的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电动机节能控制技术及工程应用/余龙海等编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-111-55430-1

I. ①电… II. ①余… III. ①电动机-节能-研究 IV. ①TM32

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第278291号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:赵玲丽 责任编辑:赵玲丽

责任校对:刘雅娜 封面设计:马精明

责任印制:常天培

三河市国英印务有限公司印刷

2017年1月第2版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·362千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-55430-1

定价:69.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

为了贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》，湖北省组织实施了“湖北省普通高等学校战略性新兴产业（支柱）产业人才培养计划”，主要针对战略性新兴产业和支柱产业以及区域内重点产业的相关专业，特别是与《湖北省工业“十二五”发展规划》中重点支持的汽车、钢铁、石化、电子信息、装备制造、食品、纺织、建材、医药和有色十个主导优势产业以及新一代信息技术、新能源、新能源汽车、高端装备制造、节能环保、新材料和生物七个战略性新兴产业相关专业。项目直接面向战略性新兴产业（支柱）产业和区域内重点产业，培养应用型、复合型、技能型专门人才。项目与有关行业、企业联合开展专业人才培养和专业建设工作，共同制订人才培养方案和专业教学计划，共同开发课程，共建校内外实习实践基地，共建双师结构教师队伍。

电动机是电能转换为机械能的功率传递装置，电动机软起动装置是新型工业发展的基础装备，所涉及的工业控制设备、节能设备、机床电气设备、传感仪表等可广泛应用于冶金、化工、机械、建材、电力等领域，在经济发展中发挥着重要作用。电动机节能控制技术及工程应用相关产业是一个新兴的特色产业，已经先后由湖北省科学技术厅牵头，组织成立了湖北电机控制与电能质量优化产业集群；由湖北省经济和信息化委员会牵头，成立了电动机软起动创新平台；由中国电器工业协会牵头组织，依托湖北电机控制产业集群和国内多家骨干企业以及相关大学、科研院所共同发起成立了“中国电器工业软起动设备联盟”。

本书是专门针对“湖北省普通高等学校战略性新兴产业（支柱）产业人才培养计划”项目和“教育部普通高校转型发展计划试点项目”编写的，书中提供了大量的案例分析，有很强的针对性，既可作为高校教材，又可在企业员工培训时使用。

目 录

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

第2章 电动机效率与损耗分析 4

- 2.1 电动机的损耗分类 4
- 2.2 电动机的效率和功率因数 4
- 2.3 端电压变动时电动机的损耗 5
- 2.4 三相电压不平衡时异步电动机运行
损耗分析 6
- 2.5 电源频率变化对电动机损耗的影响 6
- 2.6 非正弦波形电源下的异步电动机
损耗 7
- 2.7 电动机起停损耗 7
- 2.8 电动机的节能措施 7
- 2.9 主要节能型电动机产品介绍 9

第3章 三相异步电动机的调速 15

- 3.1 概述 15
- 3.2 电动机的变频调速 17
- 3.3 中压电动机的变频调速 19
- 3.4 功率单元串联多电平型变频调速 22
- 3.5 变频调速装置在火电厂的应用 26
- 3.6 变频调速装置在水泥厂的应用 27
- 3.7 变频调速装置在化工厂的应用 31
- 3.8 异步电动机的变极调速 33
- 3.9 火电厂循环泵电动机的变极
调速节能改造 35
- 3.10 电动机变极调速技术在抽油机
电动机节能改造上的应用 37

第4章 绕线转子三相异步

电动机的节能 39

- 4.1 概述 39
- 4.2 绕线转子三相异步电动机的
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 48

- 4.5 罗茨风机能否用转子调速器
进行节能改造 54
- 4.6 电动机的双馈调速 54
- 4.7 斩波内馈调速系统 61

第5章 同步电动机的调速 63

- 5.1 概述 63
- 5.2 同步电动机的励磁调节 64
- 5.3 同步电动机的交—交变频调速技术 66
- 5.4 同步电动机的负荷换流型
变频调速技术 68
- 5.5 同步电动机的电压源型变频调速
技术应用 69
- 5.6 同步电动机的变极调速 77
- 5.7 同步调相机 78

第6章 异步电动机的功率因数与

无功补偿 79

- 6.1 异步电动机的功率因数与无功功率的
经济当量 79
- 6.2 电动机无功补偿的分类 81
- 6.3 提高企业自然功率因数的措施 82
- 6.4 三相异步电动机无功就地
补偿的原理 84
- 6.5 三相异步电动机无功就地补偿容量的
计算方法 85
- 6.6 电动机就地补偿的技术经济效益 88
- 6.7 绕线转子异步电动机的转子进相器 89

第7章 电动机节能控制技术 93

- 7.1 异步电动机的轻载调压节能 93
- 7.2 大型电动机的起动与电力系统稳定 97
- 7.3 高压热变电阻减压软起动装置 107
- 7.4 半导体晶闸管减压软起动装置 112
- 7.5 晶闸管分级交—交变频软起动装置 117
- 7.6 降补固态软起动装置 123
- 7.7 异步电动机的变频软起动技术 125
- 7.8 大型同步电动机的变频软起动技术 128
- 7.9 绕线转子异步电动机的转子起动器 133

7.10 液体电阻转子起动器	134	9.2 提高压缩机电能利用率的途径	186
7.11 大型电动机软起动技术分类方法 及发展综述	137	9.3 风机水泵节能技术途径	190
第8章 大功率风机水泵调速节能运行的 技术经济分析	145	第10章 新型高效节能电动机	200
8.1 前言	145	10.1 小型三相异步电动机节能 技术改造	200
8.2 风机水泵调速运行的必要性和 优越性	146	10.2 电动机能效标准与能效标识制度	202
8.3 风机水泵的低效调速节能方案	151	10.3 改造电动机提高能效	208
8.4 风机水泵的高效调速节能方案	160	10.4 三相复合绕组异步电动机	209
8.5 各种调速方式的综合性能分析	179	10.5 变频调速异步电动机	213
第9章 通用机电设备节能技术	186	10.6 塔机专用变极调速电动机	219
9.1 通用机电设备节能对环保的 促进作用	186	10.7 无刷双馈调速电机	219
		10.8 永磁同步电动机	225
		参考文献	232

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快,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。

我国电机行业经过了 30 多年工业化的高速发展,取得了令世人瞩目的成就。根据中国电器工业协会中小型电机分会报告,2014 年度电动机全行业总产量达到 17 793.1 万 kW,其中中小型交流电动机 10 400 万 kW,大中型交流电动机 6 000 万 kW。中小型电机行业 75 家企业工业总产值 667 亿元。

根据国家能源局发布的 2015 年全社会用电量报告,全社会用电量 55 500 亿 kW·h,全国发电装机容量已达到 15.067 亿 kW,而电动机的需求与发电设备的需求呈 1:2.5~3.5 的正比关系,据此分析,所有在用电动机的保有量在 40 亿 kW 左右。

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 为代表。目前 ABB 和西门子电动机在国内已有较多使用,实际使用最大功率为 55MW,美国西屋公司的电动机在中国电力行业应用也较多,宣称功率有 100 000hp^①等。国内的电机制造厂也不甘落后,先后有 40 000kW 的同步电动机和 33 500kW 的异步电动机问世并成功使用。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动作用。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,都有力地促使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

推广和使用高效和超高效电动机,已成为世界发达国家能源战略的重要内容。这是因为电动机的用电量平均占世界各国的总用电量的 55% 以上,占工业用电量的 70% 以上。根据参考文献【2】报道,由于推广高效电动机,2012 年全世界累计节电 764 亿 kW·h,节约电费 497 亿元,减排 7640 万 t CO₂ (排放系数:1kgCO₂/kW·h)。经预测,到 2020 年累计节电约 1 653 亿 kW·h,节约电费 7 800 亿元,减排 1.6 亿 t CO₂。

① 1hp = 745.7W。

目前，国际能源机构和美国电力研究协会正统计全球电能消耗比例和高效电动机在全球市场规模比例，如图 1-1 和图 1-2 所示。

在 IEC 60034-30 颁布以后，世界各国均按国际电工委员会（IEC）的标准对本国电动机的效率分级进行了定位，确定了进一步推广高效电动机的时间表，并制定了提高高效电动机的相关法规以及超高效电动机的市场份额，见表 1-2。其中美国、加拿大推进最快，高效电动机占全部电动机市场份额分别为 54%、60%、超高效电动机占全部电动机市场份额 16%，我国高效电动机占全部电动机市场份额仅为 5%。

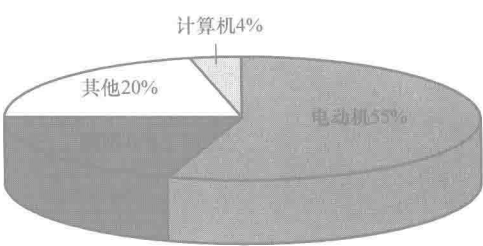


图 1-1 全球电能消耗比例

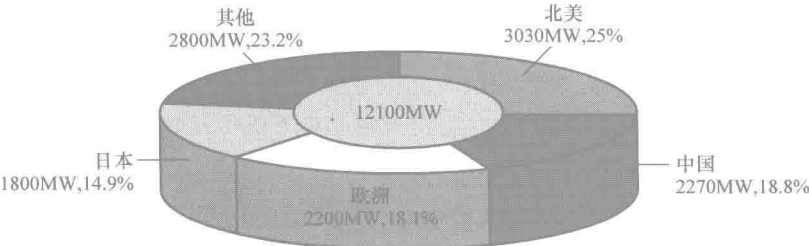


图 1-2 高效电动机在全球市场规模比例

美国、加拿大和欧盟于 2011 年把 NEMA Premium 和 IE2 标准作为最低效率标准。近几年来，欧美发达国家已经全部使用高效电动机，部分地区已经开始使用超高效电动机。从 2015 年开始，欧洲生产或进口的电动机都要符合超高效电动机 IE3 标准。

我国于 2012 年 5 月 11 日批准发布了 GB 18613—2012《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》，新标准取代 GB 18613—2006，并于 2012 年 9 月 1 日起实施。新标准将电动机效率分为 3 级（能效限定值）、2 级（目标能效限定值）和 1 级共 3 个等级，其中 1 级能效最高，节能电动机必须达到 1 级或 2 级能效。

新标准 GB 18613—2012 与 GB 18613—2006 相比主要变化如下：标准的额定功率范围从原标准的 0.55~315kW，扩大至 0.55~375kW；相应提高了各级电动机能效指标；试验方法按 GB/T 1032 中的 B 法——测量输入/输出功率的损耗分析法测量；取消了电动机在 75% 额定功率下的效率要求；取消了原标准第 6 章对能效等级标注的要求。我国新版能效标准等级见表 1-1，新旧版对比见表 1-2。

表 1-1 我国新版能效标准等级

额定功率/kW	效率								
	1 级			2 级			3 级		
极数	2 极	4 极	6 极	2 极	4 极	6 极	2 极	4 极	6 极
0.75	84.9%	85.6%	83.1%	80.7%	82.5%	78.9%	77.4%	79.6%	75.9%
1.1	86.7%	87.4%	84.1%	82.7%	84.1%	80.0%	79.6%	81.4%	78.1%
1.5	87.5%	88.1%	86.2%	84.2%	85.3%	82.5%	81.3%	82.8%	79.8%
2.2	89.1%	89.7%	87.1%	85.9%	86.7%	84.3%	83.2%	84.3%	81.8%

(续)

额定功率/kW	效率								
	1 级			2 级			3 级		
3	89.7%	90.3%	88.7%	87.1%	87.7%	85.6%	84.6%	85.5%	83.3%
4	90.3%	90.9%	89.7%	88.1%	88.6%	86.8%	85.8%	86.8%	84.6%
5.5	91.5%	90.9%	89.5%	89.6%	89.0%	88.0%	97.0%	87.7%	86.0%
7.5	92.1%	92.1%	90.2%	90.4%	90.4%	90.3%	89.4%	88.7%	87.2%
11	93.0%	92.6%	91.5%	91.4%	91.4%	90.3%	89.4%	89.8%	88.7%
15	93.4%	93.6%	92.5%	92.1%	92.1%	91.2%	90.3%	90.0%	89.7%
18.5	93.8%	94.0%	93.1%	92.6%	92.6%	91.7%	90.9%	91.2%	90.4%
22	94.4%	94.3%	93.9%	93.0%	93.0%	92.2%	91.3%	91.6%	90.9%
30	94.5%	94.7%	94.3%	93.6%	93.6%	92.9%	92.0%	92.3%	91.7%
37	94.8%	95.0%	94.6%	93.9%	93.9%	93.3%	92.5%	92.7%	92.2%
45	95.1%	95.3%	94.9%	94.2%	94.2%	93.7%	92.9%	93.1%	92.7%
55	95.4%	95.6%	95.2%	94.6%	94.6%	94.1%	93.2%	93.5%	93.1%
75	95.6%	95.8%	95.4%	95.0%	95.0%	94.6%	93.8%	94.0%	93.7%
90	95.8%	96.0%	95.6%	95.2%	95.2%	94.9%	94.1%	94.2%	94.0%
110	96.0%	96.2%	95.6%	95.4%	95.4%	95.1%	94.3%	94.5%	94.3%
132	96.0%	96.4%	95.8%	95.6%	95.6%	95.4%	94.6%	94.7%	94.6%
160	96.2%	96.5%	96.0%	95.8%	95.8%	95.6%	94.8%	94.9%	94.8%
200	96.3%	96.6%	96.1%	95.8%	96.0%	95.8%	95.0%	95.1%	95.0%
250	96.4%	96.7%	96.1%	95.8%	96.0%	95.8%	95.0%	95.1%	95.0%
315	96.5%	96.8%	96.1%	95.8%	96.0%	95.8%	95.0%	95.1%	95.0%
355 ~ 375	96.6%	96.8%	96.1%	95.8%	96.0%	95.8%	95.0%	95.1%	95.0%

表 1-2 我国电动机能效标准新旧版对比

项目	旧版标准 GB 18613—2006	新版标准 GB 18613—2012
参照标准	EU – CEMEP, AS/NZS1359.9	IEC60034 – 30 (2 级, 3 级) IEC60034 – 31 (1 级)
额定电压范围	690V 以下	1 000V 以下
额定功率范围	0.55 ~ 315kW	0.75 ~ 375kW
额定运行时间	无明确规定	连续运行 (S1)
能效限定值	IE3 < 1 级 < IE4 IE2 < 2 级 < IE3 IE1 < 3 级 < IE2	1 级 = IE4 (IEC 60034 – 31) 2 级 = IE3 (IEC 60034 – 30) 3 级 = IE2 (IEC 60034 – 30)
最低要求等级	2 级 (2011 年 7 月 1 日起执行)	3 级 (2012 年 9 月 1 日起执行)

考虑到能源节约和环境保护，当前世界上包括我国在内的不少国家对电动机系统的节能都给予了高度重视，均把电动机节能的重点放在 0.75kW 以上的电动机上。

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，其铁耗近似于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，对绕线转子还存在电刷摩擦损耗。

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%。

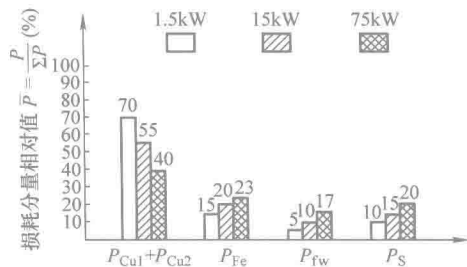


图 2-1 典型小功率电动机的额定损耗分布

图 2-1 是几种典型的小功率电动机的额定损耗分布情况，读者可以从概念上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。

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：

$$\eta = 1 - \sum P$$

式中 $\sum P$ ——电动机总损耗。

$$\sum P = (P_{\text{Fe}} + P_{\text{fw}} + P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Cu2}} + P_{\text{S}}) / P_1$$

式中 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%。并由此可见, 如一通用系列电动机的效率平均值为 0.87, 作为高效电动机系列, 其损耗如平均下降 20% 以上, 则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 $\cos\varphi$ ——电动机的功率因数;

P_1 ——电动机有功输入功率 (kW);

S ——电动机的视在功率 (kVA)。

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 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, 不同类型的电动机效率、功率因数也不相同。通常同容量的电动机, 笼型电动机的效率、功率因数均比绕线转子电动机高; 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、功率因数比小容量的电动机高。电动机的效率、功率因数和负载率的关系见表 2-1。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, 采用有效措施减少损耗, 力求电动机在拖动中效率最高。

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

电动机铭牌上的电压值是电动机设计时的依据, 实际运行时电网上电压是波动的, 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，降低配电压 $2\% \sim 3\%$ ，无论对住宅、商业、工业负荷都起到节电的效果。工厂降压运行（ -5% 左右）同样能够节电，而升压（ $+5\%$ 左右）则增加电能消耗。当然降压范围不能太大，否则引起电动机过负荷能力降低及某些重载负荷过电流等问题。但 -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。在重载时在一定范围内提高电压（从 342V 提到 380V ）可以提高效率，再提（ 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调整个别电动机端电压，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 ± 0.01 周/s，而我国许多缺电系统有时频率偏差超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ 。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,停止部分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—负载运行节约大量能耗(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都有规定。

采用高转子电阻电机,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要多,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的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。此外,电力系统长时间的运行在相对较低的负荷率,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选择。

2.8 电动机的节能措施

电动机的节能是一项涉及设计制造、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上,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% 以上的统称高效率电动机。高效率电动机比标准电动机（指级数相同、功率相等）的效率提高 3% 左右，但不以高于 $\times \times \%$ 来定义高效率电动机，这是因为不同级数、不同功率电动机的功率相差较大的缘故。目前我国企业普遍在用的 Y 系列电动机，虽然比老系列的 JO2 系列电动机功率平均提高 1% ~ 3%，但 Y 系列电动机还是低于国外一般电动机的平均效率。高效率 YX 电动机效率比 Y 系列电动机提高 3% 左右，损耗降低 20% ~ 30%，起动转矩提高 30%；噪声小，振动小，温升高，寿命长，且结构先进，几何尺寸与标准 Y 系列相同，互换性强，符合 IEC 标准。如果一年推广 200 万 kW，年运行时间大于 3 000h，负载率大于 50%，则每年可节电 1 亿 kWh 左右；如果年运行时间为 6 000h，则每年可节电 2 亿 kWh 以上。

2. 高效率电动机的应用场合

《三相异步电动机经济运行》（GB/T 12497—2006）中规定：“对于年运行时间大于 3 000h，负载率大于 50% 的场合，应选用高效率电动机”。具体应用的场合为：

1) 适用于长期连续运行的场合。但不宜应用于机床或排灌设备上。运行时间在 3 000h 以上最好，运行时间越长，效果越显著。

2) 适用于水泵、风机、压缩机配套或需要有高起动转矩的场合。由于 YX 高效率电动机功率等级密、起动转矩高，有利于减少过安装容量（防止大马拉小车），有助于提高电动机运行效率和功率因数。

3) 适用于负载率较高的场合。因为电动机运行的经济效益与负载率和运行时间的乘积有关。

4) 在运行时间相同的条件下，负载率越大，节电效益越好。例如纺织行业的细纱机负载率很大，因此推荐采用 FX 纺织专用高效率电动机；织布机负载率也很大且有冲击负荷，则推荐采用 FXPY 型高效率永磁电动机（0.8kW）。

3. 对电动机进行节能改造

利用新技术、新材料对在役老式电动机进行改造，同样也能起到提高电动机效率、降低损耗、减少运行费用的作用，这是目前电动机节能的重要措施之一。常用的改造方法有绕组安装、定子绕组重绕、采用新型节能风扇、新型磁性材料及综合技术改造等。

（1）电动机绕组改接 改进电动机的绕组形式，可减少电动机的杂散损耗与铜耗，提高电动机效率。选用合适的绕组形式及槽配合，能削弱电动机的高次谐波，提高基波分布系数，提高绕组利用率，改善电动机的电磁性能；从而达到减少部分附加损耗、有功损耗的目的。目前节电效果较好的绕组改接方法有改同心绕组为等距绕组或叉式链形绕组；改单层绕组为双层绕组；缩小定子绕组端部长度等。

（2）定子绕组重组 对老式电动机定子线圈重组时，可加粗导线线径，以减少电阻，降低铜耗，节电效益可观。经计算电动机效率可提高 1.5% ~ 4%。关于老式电动机的重组或改绕工艺详细资料，读者可查阅有关专业参考书。

（3）采用新型节能风扇 电动机风扇的功耗与转速接近三次方的关系，在大型高压电动机或全封闭风扇冷却型电动机中，其通风损耗在总机械耗中占有相当大的比例。因此，当电动机功率超过 22kW 时，用新型节能风扇改造老式电动机，可使通风损耗减少到原来的 1/3 以下，通风噪声随之降低，是行之有效的节电措施之一。

（4）采用新型磁性材料 应用新型磁性槽楔（低压中小功率电动机）和磁性槽楔（高

压大功率电动机)对异步电动机节能改造,主要是消灭由电动机定子、转子槽齿效应发生的高频涡流损耗和磁滞损耗,从而起到节电作用。实践证明,应用新型磁性槽泥和磁性槽楔对异步电动机进行改造,由于气隙磁势波形的改善,减少了空载电流,改善了功率因数,降低了铁耗及温升,并减少了电磁噪声和振动,延长了电动机寿命,其节能效果显著。可塑性磁性槽泥(CC材料)适用于大中小型异步电动机(包括绕线转子)、同步电动机(包括隐极式),也适用于开口槽直流电动机(抹转子槽)。5kW以上的异步电动机在起动性能允许的条件下可用磁泥进行节能改造。铝线电动机或电动机定子铁心用火烧过的磁性槽泥进行节能改造效果不显著。对重载起动、频繁起动、正反转起动或对起动时间有特殊要求的电动机不宜用磁泥进行改造。

(5) 综合技术改造 降低电动机损耗,提高其效率是一个系统工程,要从设计、材料、合理使用等诸多方面努力。由于电动机的一些节能措施往往会受到电动机技术性能、起动性能、损耗指标及材料成本等因素的影响,因此,在确定某一特定电动机的改造方案时,要进行具体的技术经济分析,兼顾电动机技术性能、改造成本、改造投资回收年限等各个方面,找出最佳成本效益的综合节能技术改造方案。

电动机的节电技术还包括电动机无功补偿、绕线转子异步电动机同步化运行、降压节能运行、软起动节电及调速运行等等。

4. 电动机的节能潜力

1) 根据统计数据可知,37kW以上电动机数量虽少,但要承担一半以上总的电动机用电量。因为这些功率较大的电动机大部分工作在高负荷、长期连续运行的状态,因此这部分电动机的效率历来受到一定的重视,电动机的效率水平也相应地处于较高的水平,电动机功率为90kW时效率已达0.94左右。但是应该看到小功率电动机,比如1.1kW电动机的效率仅为0.77左右,由于其数量庞大,所以37kW以下的电动机也传递了近一半的电能,因此通过降低损耗提高电动机的效率对于小功率电动机来说更具节能潜力。

2) 对于风机泵类负荷,通过电动机调速运行可以节约大量的能源。这正是目前变频器等调速装置热卖的原因。

3) 改善电力环境,适当降低电压、消除电力谐波和三相不平衡也可以节约大量的电能。就目前情况来看,比如冶金企业、机械工业企业等,大量非线性负荷的应用对电力环境已经造成严重影响,电动机因此产生附加发热甚至频繁烧毁。

4) 合理选择电动机的起动方式,因此进一步合理选择电动机,实现电动机乃至电力系统的节能。

2.9 主要节能型电动机产品介绍

我国推广高效电动机的历程,也是一个对能效的认识提升过程。先是通过材料优化、结构优化、标准化提升电动机效率的过程;然后是最求负荷匹配性和系统节能的认识过程;之间还有一个全生命周期能效考核系统思想对电动机的优化过程起到了一定的推动作用;再就是针对不同机械的专用化提升能效的过程。

最早是Y和Y2两个低压异步电动机系列取代老式JO2、J2系列电动机,可用于起动性能、调速性能及转差均无特殊要求的设备配套。这个过程最主要的技术进步特征在于标准

化、绕组结构优化、材料优化等。Y 系列电动机根据几大类机械的不同要求,又派生出的 YD 变极多速异步电动机, YH 系列高转差率异步电动机, YR 系列绕线转子三相异步电动机, YZ、YZR 冶金起重电动机等。

考虑到机械设备的不同工作制式, 20 世纪 90 年代中期又研制出 Y2 系列产品, 以适应不同负荷率和运行时间的场合, 同时还设计了 Y2—E 系列。Y2 系列电动机用于一般机械驱动场合, Y2—E 系列电动机可用于负载率较高和运行时间较长的场合。

YX 系列高效率三相异步电动机是 Y (IP44) 系列电动机的派生系列, 该系列由于采用槽配合优化和正弦波绕组技术, 同时增加定子槽数, 用较好的导磁材料及冲片退火处理, 采用正弦绕组和合理设计风扇, 使该系列电动机的总损耗与 Y (IP44) 系列相应规格比较平均下降 28.8%、效率平均提高 3%、功率因数平均提高约 0.04 (堵转电流倍数稍有增加)。其加绕组损耗约下降 20%、铁耗约下降 10%、杂散损耗约下降 30%、风摩损耗约下降 40%。该系列电动机在负载率为 0.5~1.0 范围内, 具有比较平坦的效率特性, 有利于经济运行。最高效率与额定负载率时的效率相比, 约提高 0.25%~0.7%。全系列电动机最高效率平均提高 0.4%。适用于不含易燃易爆或腐蚀性气体的一般场所和无特殊要求且年运行在 2 000h 以上的工况。

“十一五”期间, 针对电机本体如何降低各项损耗的设计与工艺技术研究, 开发了一批通用高效节能电机系列产品, 如 YE2 系列高效、YE3 系列超高效三相异步电动机 (IP54), 该系列电机于 2008~2010 年开发, 是国内首个符合 IEC 6003430 标准规定的 IE2、IE3 效率等级的高效、超高效电机系列产品, 已在行业内实现产业化, 是目前国内高效电机推广的主导产品。YE2 系列高效率三相异步电动机效率平均值为 90%, 比普通产品高 3%; YE3 系列超高效率三相异步电动机效率平均值为 91.5%, 比普通产品高 4.5%。系列产品机座号范围: H80~H355; 极数: 2、4、6 极; 功率范围: 0.75~375kW; 额定电压: 380V; 防护等级: IP55。

YE3 系列超高效三相异步电动机 (IP23): 产品符合 IEC 6003430 标准规定的 IE3 效率等级, 防护等级为 IP23。系列产品机座号范围: H160~H355; 极数: 2、4、6 极; 功率范围: 11~375kW; 额定电压: 380V。YE3 系列 (IP23) 电动机的安装尺寸、功率等级在同机座号范围内与 YE3 系列 (IP55) 完全相同。在部分使用环境下, 它们可以互换使用。IP23 电动机比 IP55 电动机用铜量平均减少 15%, 用铁量平均减少 13%, 用铝量平均减少 13%。

YX 系列 (YXKK 系列、YXKS 系列) 高压高效三相异步电动机: 效率达到 GB 30254—2013《高压电动机能效限定值及能效等级》规定的 2 级能效, 总损耗在 Y 系列的基础上降低 20%。YX 系列 (YXKK 系列、YXKS 系列) 电动机参数如表 2-2 所示。

表 2-2 YX 系列 (YXKK 系列、YXKS 系列) 电动机参数

系列名称	电压等级	中心高/mm	功率范围/kW	极数	防护等级	冷却方式
YX	6kV	355~630	220~3 550	2~12	IP23	IC01、IC11、
	10kV	400~630	220~3 150	2~12		IC21、IC31
YXKK	6kV	355~630	185~3 150	2~12	IP44/IP54	IC611、IC616
	10kV	400~630	185~2 500	2~12		
YXKS	6kV	355~630	220~3 550	2~12	IP44/IP54	IC81W
	10kV	400~630	220~3 150	2~12		

YX 系列 (YXKK 系列、YXKS 系列) 高压高效三相异步电动机与 Y 系列 (YKK 系列、YKS 系列) 相比, 在提高效率的同时, 也提高了功率密度, 每个机座号每个极数下的最大功率提高了 2~3 个功率档。

铸铜转子超高效三相异步电动机: 该系列产品符合 IEC 6003430 标准规定的 IE3 效率等级, 转子采用纯铜压铸制造。系列产品机座号范围: H80~H200; 极数: 2、4、6 极; 功率范围: 0.75~37kW; 额定电压: 380V; 防护等级: IP55。

超高效率永磁同步电动机: 永磁同步电动机具有高效率、高功率因数、宽高效区等特点。根据抽油机、细纱机、冷冻机的负载特性, 分别开发了具有高起动转矩、高牵入转矩、高过载能力的自起动永磁同步电动机系列产品。

1) 超高效高起动转矩三相永磁同步电机。机座号范围: H180~H280; 极数: 6、8 极; 功率范围: 18.5~55kW; 额定电压: 380V; 效率指标: IEC 6003430 规定的 IE3 等级。

2) 纺织专用超高效三相永磁同步电动机。机座号范围: H90~H225; 极数: 4 极; 功率范围: 1.5~45kW; 额定电压: 380V; 效率指标: IEC6003430 规定的 IE3 等级。

3) 冷冻机用超高效三相永磁同步电动机。机座号范围: H280~H315; 极数: 4、6、8 极; 功率范围: 37~200kW; 额定电压: 380V; 效率指标: IEC 6003430 规定的 IE3 等级。

“十二五”以来, 主要是针对电动机与不同特性负载的高效匹配研究, 开发了一批典型负载设备 (风机、水泵、压缩机) 的专用高效电动机和机组产品。

YFE2 系列风机专用、YSE2 系列水泵专用、YYE2 系列压缩机专用高效电动机: 根据离心式风机、水泵的转矩与转速二次方关系特性和压缩机起动阻力矩大、环境温度高、长时间过载运行的特性, 专门开发了风机专用、水泵专用和压缩机专用高效电动机, 电动机效率达到 IEC6003430 标准规定的 IE2 等级。YFE2 系列风机专用、YSE2 系列水泵专用、YYE2 系列压缩机专用高效电动机参数见表 2-3。

表 2-3 YFE2 系列风机专用、YSE2 系列水泵专用、YYE2 系列压缩机专用高效电动机参数

产品类别	功率/kW	机座号	极数	电压/V	基准频率/Hz
YSE2 系列水泵 专用高效电动机	0.75~450	H80~H355	2、4、6	380	50
YFE2 系列风机 专用高效电动机	0.75~630	H80~H400	2、4、6	380	50
YYE2 系列压缩机 专用高效电动机	2.2~315	H90~H355	2、4	380	50

风机、水泵、压缩机专用变频调速电动机: 根据风机、水泵、压缩机一般实际运行时的调速范围, 开发了风机专用、水泵专用和压缩机专用变频调速电动机, 电动机在基准频率下的额定效率达到 IEC 6003430 标准规定的 IE2 等级。YSP 系列水泵、YFP 系列风机、YYSP 系列压缩机专用变频调速电动机参数见表 2-4。

螺杆压缩机专用直驱式永磁变频调速电动机: 针对螺杆压缩机, 取消传统驱动系统中的联轴器或带轮, 将电动机转子和螺杆转子共轴。电动机无轴承、无冷却风扇, 机组结构紧凑、体积小, 并通过变频调速, 可运行在 3 000~5 000r/min, 使电动机与螺杆同时处于高