

电机系统节能关键技术及展望

李正熙^{1,2}

(1.北京市电力电子与电气传动工程研究中心,北京市100144;
2.北方工业大学,北京市100144)

[摘要]节约能源既是我国经济和社会发展的一项长远战略和基本国策,也是当前的紧迫任务。论文在深入分析国内外电机系统节能现状和介绍先进的节能关键技术的基础上,指出了现阶段我国在电机系统节能方面存在的问题,并结合国情,提出了我国实施电机系统节能工程的建议,为推动我国整体节能工作的开展提供参考。

[关键词]电机系统;节能;管网;关键技术

中图分类号:TM301 文献标识码:A 文章编号:1004-4345(2015)03-0001-05

Key Technology of Motor System Energy Saving and Expectation

LI Zhengxi^{1,2}

(1.Power Electronics and Motor Drives Engineering Research Center of Beijing, Beijing 100144, China;
2.North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract Energy saving not only is a long-term strategy and basic national policy of the economic and society development of China, but also is urgent mission at present. The paper analyzes present situation of motor system energy saving at home and abroad and introduces advanced key technology of energy saving, on the basis of which the paper points out some problems existed at energy saving of motor system in China, and then the paper provides some suggestions on implementation of motor system energy saving project in combination with national conditions for reference of development of the whole energy saving work in China.

Keywords motor system; energy saving; pipeline network; key technology

目前,我国正处于工业化、城镇化加速发展的重要阶段,业已成为能源消耗大国。在全球减排温室气体背景下,能源消费强度(单位生产总值的能源消耗量)已成为国与国之间对比减排温室气体成效的指标之一,而基于单位GDP能源消耗强度的国际间对比研究表明,我国经济发展存在很大的节能减排潜力^[1],因此节约能源既是我国经济和社会发展的一项长远战略和基本国策,也是当前的紧迫任务。为此,国家制定了《节能中长期专项规划》,在“十二五”期间的节能减排规划中,将电机系统节能列为重中之重,同时,国家抓紧实施电机系统节电工程所需的配套政策、标准、规范的制定、颁布、宣传、贯彻与落实。

1 电机系统和电机系统节能的含义

电机系统由电动机、被拖动装置(负载)、传动系统、控制(调速)系统以及管网(电源)等组成,图1所示为典型电机系统构成示意。该系统是一个典型的弱电控制强电、软件控制硬件、部件融于系统、信息能量互动的系统,也是一个涉及多学科、多专业、多领域的复杂系统,其通过电动机将电能转化为机械能,再由被拖动装置(如风机、水泵、压缩机、机床、传送带等)做功,实现所需的各种功能,满足生产工艺的需求。

收稿日期:2015-06-13

基金项目:国家自然科学基金,2013“大功率三电平PWM整流器优化控制和电网不平衡运行研究”(E070602)。北京市电力节能关键技术2011协同创新计划专项基金。

作者简介:李正熙(1955—),男,教授、博导,主要从事电力电子与电力传动等方面的研究。

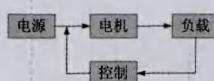


图 1 典型电机系统构成示意

电机系统应用于各行各业,涉及各种复杂多样的工况、不同的负载特性以及千差万别的工艺过程。因此电机系统节能工程技术是在满足负载要求功能的前提下,设计、制造和选用合适的系统部件,并合理组合匹配,使系统综合节能效果和系统性价比达到最佳或较佳的综合工程技术。由于电机系统的多样性,不同电机系统可采用不同的节能措施。

电机系统节能主要包括电机系统各部件自身的能效提高、电动机传动系统的节能,例如风机、泵类变频调速系统节能,采用电动机传动系统使工艺、设备条件改善,效率提高的节能等方式^[2]。表 1 列出了采用不同节能措施后达到的节能量。

表 1 不同节能措施及达到的节能量

电机系统节能措施	典型节能量/%
高效电机	2~5
正确选型、负载匹配	在国内可达 5~30
调速驱动	10~50
高效机械传动	2~10
电能质量控制	0.5~3
高效终端设备(泵、风机、压缩机等)	2~5
高效管网	有较大节能潜力,但需结合现场计算
润滑、校正、调整	1~5

由表 1 可见,电机系统节能工程需要综合考虑电动机本体、电动机拖动设备、控制电动机的装置、管网系统、实现的负载功能等多种因素,因此,它是一个复杂的系统节能工程。

2 实施电机系统节能工程的重要意义

2.1 我国电机节能的意义

我国近期的能源政策是注重能源资源的节约和合理利用,而缓解我国能源资源与经济社会发展之间的矛盾,必须立足国情,显著提高能源资源利用效率,坚决实行开发和节约并举,把节约放在首位的方针,鼓励开发和应用节能降耗的新技术。

据统计,2004 年我国为电力、煤炭、石油等能源价格上涨而付出的代价高达百亿美元,而能源短缺间接对国民经济造成的经济损失更难以用具体的数值来估量。据不完全统计,工业作为我国的能源消费主体,其用电消费量占全国电力总消费量的 70% 以上,而电动机又是工业电能消耗的最大户,因此,电

动机是节电潜力最大的用户。2008 年 IEC 发布的 IEC60034-30《单速三相笼型感应电动机的能效分级》标准指出:提高电机系统的效率是节能工程关注的重点,通过系统优化其节能潜力可达到 30%~60%^[3]。我国电动机总装机容量 4 亿多千瓦,其年用电量约为 $1.5 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$,约占年全国总发电量 $2.187 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的 65%~70%。节约电能意味着发电所需一次能源的节约,也就意味着有害气体排放量的减少,温室效应的削弱,有利于环境与气候的改善。

在国外,电机系统节能技术受到各国政府的普遍关注。先进国家和地区都非常重视电机系统节能对实现节能降耗战略目标的重要作用,采用政府立法,制定能效标准,政府出资资助公共服务机构开展共性关键技术研究,制定节能导则,通过宣传、培训、信息化服务、技术推广、检测服务等各种手段和措施,促使电机系统合理匹配、优化设计等,达到提高系统效率的目的。为此,美国于 1998 年提出了“电动机挑战计划”,采用高效电机及采用调速等方法来提高电机系统效率,节能潜力达 14.8%,拟年节电 $8 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

我国电机系统的能源利用率约比国际先进水平低 20% 左右,节电潜力更加巨大。近年来,交流电机变频调速技术在传动系统中普遍应用,风机泵类采用变频调速技术,可节约电能 30%~50%;大型传动系统如轧钢、牵引、油气输送、船舶推进等采用交流电机变频调速,大大提高设备和工艺的效能,例如轧钢传动采用交流调速电耗可减少 30% 以上,船舶推进采用交流电机变频调速可提高效率超过 20%,可见节能技术的应用具有重要的节能效果,同时还将节约建电站的投资和相应配套设施的投资,大大减少温室气体排放^[4]。因此,电机系统节能对维护我国能源安全,促进环境保护,实现我国电机系统节能的跨越式和可持续发展,提高我国电机系统节能的核心竞争力具有重要的意义。

2.2 大城市和大型厂矿电机节能问题

以北京市为例,年消耗电能 1 千亿度电,其中电机耗能大约占 30%。北京与发达国家首都电机用电比大约有 20% 的节能空间,主要体现在电机本身效率,电力电子变换器的效率与总体能效管理方面。关键技术瓶颈是高效电机和电力电子变换器的基于电、磁、机、热等综合参数的优化设计模型,缺少基于人工智能控制的能效管理与控制模型和系统,仍处于属于粗放式设计和管理状态。

3 国内外电机系统节能发展现状

3.1 电机系统节能发展现状

电机系统随着电力电子器件、功率变换器、电机制造、现代控制理论及计算机技术的进步而迅速发展。国际上交流电机变频调速是电动机传动系统的主流,并形成电力电子、电动机及其控制系统的集成,从设计、制造到运行紧密地融为一体^[5]。

电机系统节能技术促使常规电机的设计、制造和应用发生变化。国际上高效电机、变频调速电机已形成系列,机电一体化将功率变换器和控制系统集成到电机上,形成智能电机、网络电机等,广泛应用于中小功率传动和家用电器。同时,永磁同步电机、开关磁阻电机、磁悬浮直线电机等新型调速电机应运而生,在机车牵引、电动汽车、大型舰船驱动以及磁悬浮交通等领域中得到应用。它们的共同特点是:突破了原来圆形旋转磁场的概念,电机本体与控制集成一体,高效,高可靠性,多个电磁力矩混合作用,高功率密度。

电机系统应用遍及工业、国防和家用电器等国民经济各领域^[6],主要有:1)高精度、高性能的交流调速应用于钢铁、煤炭、造纸、起重等工业机械调速,提高工艺设备能效;2)高性能、高效率、高集成的交流调速应用于电动汽车、电力机车牵引、磁浮交通、船舶电驱动等,取代传统交通运输的燃机直接驱动,实现快捷、安全、节能;3)风机、泵类机械变速节能系统;4)机电一体化、智能电动机等家用电器节能传动。

3.2 相关领域产业发展现状

电机系统节能最主要的相关领域产业是电力电子及电气传动,特别是交流电机变频调速产业。2004年全世界电力电子及电气传动的市场销售额约940亿美元。我国交流电机变频调速市场发展迅速,每年以12%的速度迅速增长。国内大量的基础设施建设,冶金、煤炭、化工、石油等制造业领域的大量投资为我国电机系统市场创造了巨大的需求,市场前景广阔。

电力电子器件正向大功率、高电压、高频化和智能模块化方向发展。普通晶闸管逐步让位于新型可关断电力电子器件。近几年出现的集成门极换流晶闸管(IGCT)已取代可关断晶闸管(GTO)成为大功率高压变频的主流器件;绝缘栅双极晶体管(IGBT)在中小功率交流调速中普遍应用;电子促进绝缘栅双极晶体管(IEGT)研制成功,并开始应用于大功率高

压变频领域。此外,将微电子集成电路与电力电子器件组合在一起形成的功率集成电路(power IC)、智能功率模块(IPM)、功率电力电子集成模块(PEBB)等广泛应用于中小功率变频和家用电器的电机调速。该领域进一步发展的革命性研究课题是碳化硅材料电力电子器件。

中小功率电机调速普遍应用IGBT电压型脉宽调制(PWM)变频器,而在大功率高压变频领域,由于供电与电机的多样性,交交变频、H桥级联变频器、IGBT和IGCT多电平变频器、IGCT元件串联的变频器等都有其应用场合。

交流电机矢量控制与直接转矩控制理论已成熟并应用到交流电机调速系统中。同时,自适应、模糊控制、人工神经元网络等现代智能控制理论与方法已开始运用于电机调速系统中。

3.3 存在的主要问题

目前在电机系统节能存在的主要问题有:

1)我国电机系统节能技术与装备水平距离节能的目标相差很远,变频电机数量少,性能不高,不到总量的10%;我国电力电子及电气传动产业的技术水平落后,规模小,成本高,产品可靠性差,技术与产品的落后与迅速发展的节能市场需求反差巨大,严重制约了我国电机系统节能目标的实现。

2)我国中小电机基本是通用常规类型,还没能形成变频调速电机系列,变频器电机集成、智能电机、机电一体化技术差距很大。

3)国产中小功率变频器多为U/f比控制方式,很少采用先进的矢量控制及直接转矩控制方式,其控制性能、保护技术、可靠性等方面与国外产品差距很大,只能采取低成本、低价格的市场策略,占据低端市场。

4)新型可关断电力电子器件取代普通晶闸管已成为趋势,而采用IGBT/IGCT等新型电力电子器件的变频器已成为电机系统节能的主流。但我国电力电子器件技术及制造水平与国际水平差距很大,除普通晶闸管外还不能制造IGBT/IGCT等新型电力电子器件,因此国产变频器的IGBT/IGCT电力电子器件及电容等配套部件绝大部分依赖进口。

5)国产普通晶闸管的交交变频器虽已经成熟,但应用范围局限。国外变频调速技术与产品占我国电机系统节能市场的主导地位。特别是国家重大工程项目的高性能、大功率变频调速系统基本上被国外产品占据。采用新型电力电子器件的国产大功率

高性能变频调速系统还是空白。

6)在电机系统节能领域缺少系统节能的设计方法和评估手段,变频调速还没有完善的技术标准、测试规范和测试手段。

7)电力电子及变频调速技术是高新技术,先进国家在该领域的研究开发投入很大。我国该领域技术在总体上与国际水平相差5~10年。尽管我国政府对电动机系统节能十分重视,但在该领域的基础,即电力电子及变频调速技术的科研投入少,且有限的投入也大多是低水平的重复开发。国家还没有形成电力电子及变频调速领域技术和产品研发的平台,无法形成产业规模。

4 对实施电机系统节能工程的建议

1)应鼓励制造高效电机,强制淘汰低效电机。按照目前电机效率分类及国际IEC电机标准,高效电机的效率一般定义为91%~96%,低效电机的效率一般为75%~89%。目前我国实际运行中的电机主要集中在0.55~100kW功率等级,为总运行台数的95%以上,其中70%为Y系列异步电动机,10%的为Y2系列异步电动机,20%其他各种电机,平均效率为89.3%。因此,电机节能技术目标分3个层次,即:(1)从全寿命期的费用最低、耗能最少的观点优化设计通用型高效电机,确立适合中国国情的高效电机标准,将0.55~100kW功率等级电机的平均效率提高为92%。(2)开发并应用变频调速用电机,并形成产业化。与常规电机相比,同功率、同体积、同材料的变频调速电机的效率可提高1%~3%。(3)紧跟国际发展趋势,开发和研制智能化电机,即把电动机、变频器和控制系统集成到一起的电机系统,使该系统节能达20%~30%。

2)变频器是电机系统节能中的重要部件,采用变频调速后的电机系统效率可以节能10%~15%。技术目标也分3个层次进行:(1)加速通用变频器的产业化,提高产品的技术性能和可靠性,形成规模生产,提高国产化市场占有率。目前我国通用变频器的国产化率已超过50%,但其技术性能(如变频器本身效率、控制精度、材料消耗和谐波分量等)和可靠性与国外先进通用变频器相比仍有较大差距。(2)支持对高压变频器的关键技术进行攻关,尽快提高产品可靠性,并逐步扩大市场。高压变频器(3.3~10kV)目前在国际上也正处在产业化完善阶段,国内已有少量

国外产品,但远远不能满足市场的需要。而高压电机系统是与大容量电机系统相对应的,尽管台数不多,其所占容量却不比低压电机小,是电机节能的主要部分。高压变频器技术难度大、开发周期长、资金投入大,需要重点攻关,尤其是1~5MW、6kV的高压变频器,应着重提高其可靠性和降低成本。(3)鼓励经济型变频器的研发和产业化,要求采用高新技术解决低成本、高性能、高可靠性的问题。电机调速节能潜力大,但仅仅只靠变频调速是不够的。因此,针对特殊应用和特定范围,采用其他有效调速方法将更体现经济性。

3)普通晶闸管制造和应用技术已经成熟,应进一步扩大规模和应用范围。对于IGBT/IGCT等新型电力电子器件,应以应用技术研发和推广应用为主,同时积极组织新型器件的研发。以普通晶闸管及GTO制造技术为基础,尽快研发国产IGCT及快速软恢复二极管。对于IGBT器件采取先封装集成及测试,再过渡到芯片制造的思路,积极引导和支持国内微电子制造技术和电力电子制造技术相结合,逐步形成和提高我国新型电力电子器件的研发和制造能力。对配套元器件,如无感电阻、钳位吸收及高压直流电容、层叠无感母线等进行研究开发,并逐步形成批量供货能力,确保电动机系统节能产品的产业化需要。可先从封装、测试开始,再逐步过渡到开发、生产芯片。

4)重点研究开发采用新型电力电子器件研制高性能、污染小的大功率变频调速系统,在钢铁、煤炭、机车牵引等行业中树立一批国产化样板工程,替代进口,带动电机系统节能国产化装备技术的发展。

5)应对电机系统节能技术和应用技术进行研究,建立电机系统节能的技术标准、测试标准和测试规范。

6)支持电机系统节能领域的技术、新方法,鼓励自主创新、原始创新、集成创新,形成电机系统节能技术创新平台;支持电机节能控制系统的开发。

要全面推广应用电机系统节能技术,大幅度提高我国电机系统的能效,应强化能力建设,建立电机系统节能技术创新和产业化的基础支撑条件。应以企业为主体,以具有市场前景的技术为核心,吸引高等院校、科研单位等相关机构,通过技术、资本和资产的重组,形成与产业紧密结合的科研和工程化开发条件,解决电机系统节能技术的共性、关键技术问题,并为行业的发展提供技术支撑和技术服务。

将具有自主知识产权的电力电子及装置的关键技术进行整合,形成完善的可用于产品系列组接的电力电子功率平台,实施平台战略,突出软硬件的应用技术及工程实际经验的可复用性,使产品组成部件及技术的可组接性大为提高,形成可以满足不同用户需求的全方位的标准化、系列化电力电子及电气传动装置产品,形成产品开发、制造的可持续发展平台。同时,在重大项目和重大工程中树立国产高技术、高水平变频器系统样板工程。以市场为导向,结合先进工艺和技术改造,在若干应用领域推广应用一批技术指标先进、性能可靠实用的电机变频调速系统,以显示我国电机系统节能技术的主要品牌和竞争实力,起到示范作用,加速研究、开发、工程、产业化的一体化进程,带动整个行业的发展。

当前电机系统节能重点改造领域^[7]包括:1)电力用变频、永磁调速及计算机控制改造风机、水泵系统,重点是 2.0×10^5 kW 以上火力发电机组。2)冶金鼓风机、除尘风机、冷却水泵、加热炉风机、铸造除鳞水泵等设备的变频、永磁调速。3)有色除尘系统自动化控制及风机调速。4)煤炭矿井通风机、排水泵调速改造及计算机控制系统。5)石油、石化、化工工艺系统流程泵变频调速及自动化控制。6)机电研发制造节能型电机、电机系统及配套设备。7)轻工注塑机、液压泵的变频、永磁调速。8)其他企业空调和通风、楼宇集中空调的电机系统改造等。9)对城市电机系统和大型厂矿的电机系统节能要建立综合控制系统。要以电力能效最优为目标建立管控系统,核心技术是电机系统设备本身优化,数据处理,能效模型的建立与智能配网与负荷的动态管理。

图 2 为电力能效综合控制系统的示意图。

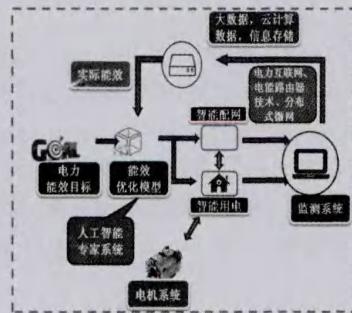


图 2 为电力能效综合控制系统的示意图

5 结语

电机系统节能是一项长期而艰巨的任务,它涉及到节能意识、节能管理、节能技术、节能标准和节能效益评估等方方面面。电机系统节能工程的实施将有力地推动我国的整体节能进步。要在我国全面推进电机系统节能工作,需要政府主管部门、企业、供应商、节能评估机构和第三方节能检测机构等多方共同努力^[8]。需要以提高能源利用效率为核心,以企业为实施主体,大力调整和优化结构,加快推进节能技术进步,建立严格的管理制度和有效的激励机制,加大政府资金的引导力度,充分发挥市场配置资源的基础性作用,调动市场主体节约能源资源的自觉性,尽快形成稳定可靠的节能能力,为实现国家节能目标奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 张晓平,孙磊.中国工业能源消费强度变化的分解分析[J].资源科学,2010,32(9):1685-1691.
- [2] 赵争鸣,李崇坚.“十一五”国家十大重点节能工程之一——电机系统节能[J].电气时代,2006(10):16-20.
- [3] IEC60034-30(2008 FDIS),Efficiency classes of single-speed,three-phase, cage-induction motors [S].
- [4] 李崇坚,赵争鸣.电子电力与电机系统节能工程[C]//中国电工技术学会:第九届全国电技术节能学术会议论文集,2007.
- [5] 张卫民.简论变频器的发展和应用[J].世界仪表与自动化,2003,7(11):16-19.
- [6] 陈伟华,李秀英,姚鹏,等.电机及系统节能技术发展综述[J].电气技术,2008(9):13-22.
- [7] 国家发改委:关于组织实施电机能效提升计划(2013-2015年)的通知 [EB/OL].(2013-06-21).<http://wap.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n12843926/n13917012/15463739.html>.
- [8] 郭春生.发展高效电机促进节能减排[C]//第十一届全国永磁电机学术交流会论文集,2011.