

[电机]

现代电机系统节能措施分析研究

文/王志雄¹，王文良²，段彦敏¹，蒋晓健³
1. 机械工业技术发展基金会；2. 上海电器科学研究院；3. 中国机械工业联合会

电机系统节能的环节与影响因素多，措施应用或环节间匹配不当，是造成电机系统节能效果不佳的关键原因之一。针对该问题，在分析比较现有电机系统节能手段及节能效果的基础上，通过机理分析与数据对比，从高效电机设计、智能控制策略和系统匹配优化三个层面，对电机系统节能进行深入研究，揭示各种技术措施对电机系统节能的作用与潜力，提出现代电机系统节能的措施选用原则与建议。

电机系统广泛应用于工业、交通和家电等领域，能耗占全球总能耗的40%以上，是现代社会的节能、降碳及可持续发展的重要途径之一。

已有电机系统节能手段众多，效果、作用机理与适用对象各不相同。长期以来，人们对电机系统节能的理解与措施实施混乱，多数场景下仍采用更换高效电机、高效水泵等相对落后的单一手段，节能效果不明显，个别案例还出现能耗不降反升的情况^[1-2]。

近年来，随着技术的进步和政策的推动，电机系统节能技术得到快速发展，新型节能技术及装备不断涌现。现已逐步形成包括高效电机设计、控制策略和系统匹配优化三个层面的电机系统节能技术体系，为电机系统节能提供新的方法与措施。不同电机系统节能措施的典型节能量比较见表1。

表1 不同节能措施的节能量

电机系统节能措施		典型节能量
高效电机	新型电磁材料	0.5%~3%
	新型高效电机拓扑	2%~8%
	工艺制造	0.2%~1.5%
智能控制	变频调速驱动	10%~50%
	电能质量控制（含微电网）	0.5%~3%
	智能控制算法	0.5%~5%
系统优化	高效机械传动/变速器	0.2%~4%
	正确选型、负载匹配	节能量较大
	高效终端设备（如风机、泵、压缩机等）	节能量较大
	高效管网	节能量较大
	润滑、校正、调整	1%~5%

注：实际工程中往往综合采用以上节能措施中的几种。

针对不同的系统特征与场景需求，科学选择合理的节能技术措施，或几种措施的匹配组合，实现以最小的价格代价，获得最佳的系统节能效果，成为现代电机系统节能的研究热点与发展趋势^[3-5]。

高效电机设计

高效电机是电机系统节能的动力中枢、信息中枢与能量转换中枢，我国新产工业电机已普遍达到3级能效，材料结构优化、新型电机拓扑与新型工艺装备是未来高效电机设计的核心任务。

1. 材料与结构精细化设计

电机是电能与机械能相互转化的工程机械，电磁材料是这种能量转化的核心功能性材料。在当代电气工程领域，关于提升电机系统能量转换效率的核心研究课题意义重大，主要集中于研发和应用高性能磁性材料，以及优化和改进电机体内的细微构造两方面工作。

在新型材料开发与应用方面，烧结钕铁硼稀土永磁材料等高性能磁性材料，凭借其卓越的磁导性能和优异的能量密度，对于电机效率的提升起着重要作用。利用这些材料在小范围内产生强大磁场的特性，使电机在运行过程中减少能量损耗，提高能源转换效率。同时使用高性能低损耗电工钢、非晶合金、纳米晶、SMC粉末铁心、高加工适应性的取

向钢材料、扁线绕组和液冷系统等新型材料与零部件，可进一步提升高效电机的能效水平。

在电机局部构造的精细化仿真设计方面，采用先进的电磁场研究手段，例如有限元分析（FEA），可以精确地模拟电机内部的电磁场分布，进而优化电机的定子、转子表面，以及其他影响气隙磁场及磁场谐波组分与含量的关键部件设计。同时，为了提高电机的整体性能，优化措施一般会涉及线圈绕组方法的调整、磁极形状和分布的优化，以及冷却系统的升级，以达到降低电磁材料涡流损耗和磁滞损耗的目的。

2. 新型电机拓扑

在现代电气工程行业中，探索新型电机结构逐渐变为提高能源利用效率的重要方法。以目前应用最多的两类具有典型特征的电机产品为例，永磁同步电机（PMSM）与开关磁阻电机（SRM）因其独特的设计和运行原理，在提高能源效率方面展现出巨大潜能^[6]。

备受关注的永磁同步电机，以其卓越的功率密度、高效的运行效率以及出色的动态响应特性，成为关注的焦点。核心竞争力是借助永磁体创造磁场，与传统的感应电机相比，降低了励磁损耗，因此提升能源利用率。然而，PMSM的设计与控制策略相当繁琐，只有精准的磁场定向控制技术，才能保证电机在各种环境下持续稳定运行，包含控制器硬件与控制策略，系统性地设计永磁同步电机，成为高效永磁电机设计的趋势。

开关磁阻电机因其结构简洁、成本经济以及稳定性高，在业内享有良好声誉。SRM的运作机制是依靠磁阻变化来产生转矩，转子部位无需安装线圈和永久磁铁，从而减少了铜损和铁损，也大幅提升了电机的可靠性。尽管SRM的转矩波动和噪声难题非常突出，但通过改进定子绕组设计并应用先进控制算法，这些问题得到大幅度的缓解。

新型电机拓扑结构的创新，除在电机磁路设计方面优化与简化外，研究考量电机电磁热力特性及负荷的平衡与匹配规律，在有限空间内利用电磁材料，是新型电机拓扑开发的关键。同时，运用仿真模拟、实验验证和数据分析方法，寻找新型拓扑电机参数的最优解，成为优化新型电机性能，达到最大能效转化效率的新方法。此外，伴随着新型拓扑

电机的出现，以及电力电子科技与微处理器技术的持续进步，新型电机控制方法及新型电机控制器的开发匹配，成为提高新型拓扑电机能效与应用比例的关键。

3. 制造工艺改进

在电机制造业领域，改进生产流程对于提高设备运作效率具有举足轻重的作用。通过深入研究电机生产工艺并不断优化，减小对电机电磁材料损耗性能的影响，从而提高电机效率（0.2%~1.5%）与整体性能。通过优化材料选择、加工方式与准确度、装配校准方法等，提升高效电机的制造工艺水平。

首先，不断发展的材料加工及技术，为电机制造提供应用更加优质丰富材料的可能。例如对高磁导率磁材的无损与低损加工成型技术，进一步提高电机的磁场强度以及减少磁滞损耗；计及高频趋肤效应与邻近效应的高导电绕组技术，进一步增强组件的导电性能，显著降低电阻能耗；新型复合材料的应用与加工技术，在使电机重量负担减少的同时，整机散热效果也有所增强。

其次，提高加工准确度在降低电机能耗方面也起到越来越显著的作用。高准确度机械加工有助于确保电机零部件的精确尺寸和形状，从而减少因摩擦与间隙产生的能量损耗。电机高效运行的核心因素之一是装配技术，这种技术能够确保电机内部各个部件的精确组装，从而防止因组装失误引发的多余能源消耗。尤其是未来电机设计越来越精细，材料及尺寸不断逼近极限的背景下，高加工与装配准确度将成为高品质高效电机领域角逐的重要技术手段之一。

再次，通过工艺优化设计，消除电机结构件的关键薄弱区，减少毛刺与撕裂点数量与量级，提高电机可靠性及耐用性。同时借助计算机辅助设计和有限元素分析等先进技术方法，对电机架构进行精确模拟与优化，靶向提升电机的力学和热学性能。在电机研发阶段，全面充分地考虑工艺制造过程及对性能的影响作用，采取恰当的防护措施，延长电机的使用寿命。

智能控制策略

以变频器为代表的电机控制器，是实现电机变速与伺服运行的必要装置。随着现代功率型开关器

件的发展,变频器等电机控制器的工作效率最高已接近99%。同时,电机控制器使用成本的下降,不断推动变频调速电机系统的广泛应用^[7-8]。考虑传动系统与负载,基于智能控制策略的变频调速电机系统在很多应用场景下可以获得更高的系统效率与运行品质,其中变频调速技术、预测控制算法与自适应控制技术是现代电机智能控制策略的核心内容。

1. 变频调速技术

精确控制电机转速,对于提升工业领域动力系统品质及节约能源具有重要意义。变频器(Frequency Converter)作为一种现代化的电力电子设备,其关键功能是通过调节电机供电频率和电压的调节,让电机转速大小无限无极调整。电机系统效率大幅改善的机理在于:既确保了电机在最佳工作效率点的运行(电机高效区与低效区的效率相差在20%以上),同时可根据实际负荷需求控制转速大小,进一步减少能量的损耗^[9-10]。

在电机运行过程中,转速和频率紧密相连,与极对数(p)成反比。转速(n)与频率(f)呈正相关,而与极对数(p)呈负相关。通过精确控制变频器的输出频率,可以精确地控制电机转速。此外,使用变频器的软启动特性,能够进一步减小电机启动时电流的冲击,从而延长电机驱动设备的寿命。

在现实操作中,变频器的操控策略大致可分为开环调控与闭环调控两类。开环控制方式便捷,适用于对转速要求不太严格的情境;而闭环控制则基于实时监测电机转速的反馈系统,根据预设值进行实时调整,以提高电机控制准确度。无论哪种调控方法,变频器都有能力精确调控电机转速,保障生产效益,并同时达成能源的节约和高效利用。

此外,在电机变频控制过程中,适当优化电机操控方式可进一步提高电机系统的能源利用率。运用前沿的控制策略,比如电动机的速度控制方式,可以精准地调整电机转矩和转速,从而在各种环境下,确保电机的顺畅运行。根据电机的工作状态变化,实时调整电流、电压波形,降低电机的能量损耗,保证电机在各种工况下均能实现最优的能量转换效能。

2. 预测控制算法

电机性能的增强,对于整体能源利用效率的提升具有重要意义。作为一项具有前瞻性的管理方

法,预测未来控制方法,依靠预估系统,了解未来一段时间内的变化,精确调控电机运转指标,达到以最小代价实现电机控制效果与提高电机系统工作效率的目的。

预测控制算法的核心在于其具备的功率预测能力。即采用数学方式展现电机动态特性,并根据该模型推测未来系统的情形。依据当前系统状况及未来控制输入,通过求解一个优化问题,找出最优控制方案,并以此类预测为主导参与控制策略。预测控制的关键在于对电机参数的精细调整,即对转速、转矩和电流等关键参数实现精准管理,以达成能源利用效率的最优化。

在实际应用环境中,预测控制器需综合考虑电机系统的非线性、高耦合、时变特性以及外部影响因素。为确保操控方法的时效性和稳固性,算法一般会整合先进的数值优化技巧,例如线性矩阵不等式(LMI)和凸优化等。此外,为提高预测的准确性,该算法配备自动调整的参数优化方法,依据即时反馈来调整参数设置。

通过应用预测控制策略,电机系统能够针对各种工作状况实现动态响应的优化,以减少能源消耗,并提高运行效率。如现代新能源汽车领域,通过优化电机驱动策略,预测性控制策略有助于降低能量流失,从而提高动力电池的续航能力。在现代制造业的驱动系统中,运用预测控制策略有助于提高电机的负载应对能力,同时降低能源消耗和维护成本。

3. 自适应控制技术

以自适应控制为代表的电机智能控制手段,作为一种高效的控制方式,其主要过程是精准调控动态运动系统。尤其是在系统变量不可靠或外部环境变化的情况下,根据负荷变化情况自动调节运行参数,实现以电机系统效率为目标的自适应调控,是传统电机控制技术的重要补充。

自适应控制技术的核心在于实时监测电机的工作状态,例如电流、电压和转速等关键指标,并根据预先设计的控制策略,对电机运行参数进行即时修正。这种优化过程目的是改善电机的性能表现,让其能在各种情况下都保持最佳运转状态,同时节省能源和减轻设备损耗。

在实际运用中,自适应控制策略主要包括模型

参考自适应控制 (MRAC) 和自校正控制 (STC) 等方法。控制器根据实际效果和标准模型的对决, 调控器设定优化以降低差距, 让系统表现接近理想状态。STC运用在线辨识模块的数据, 依据分析出的结果, 优化控制器, 以适应系统参数的变动。

为了实现电机属性的自动校正, 通常构建一个涵盖电机模型的自适应调控系统, 包括拥有即时处理感应器传送信息的功能, 并根据控制算法生成最优控制指令等。电机调节器依据最优控制指令, 对电压、频率等调节参数进行调整, 达成预定的高效运行目标。

系统能效优化

电机、控制器和传动装置等单一装备的高效, 并不与电机系统的高效严格一致, 各环节的匹配与统一设计, 系统级设计与控制策略优化, 是实现电机系统高效不可或缺的重要措施^[11]。

1. 系统能效评估

现代工业电机传动系统, 其构成、拓扑、控制策略、负载种类及负载波动率与符合程度日益复杂。因此, 构建一个科学、完善的电机系统能效评估体系至关重要。

基于行业层面的大量电机系统的实际运行数据统计, 依托能源效率规范和评价准则, 经过定量分析和对比分析, 精确地衡量电机系统的能效等级, 即电机系统能效评估方法。该评估方法可为电机系统的优化改进提供理论依据, 也为节能改造工程明确技术指导和决策依据。执行能源效率评估有助于揭示电机系统中的能源消耗关键环节, 针对性地采取相应的节能策略, 促使电机设备向节能减排方向改进^[12]。因此, 研究和不断完善电机装置的能源效率评价系统, 对于促进节能减排和减轻环境污染具有显著的现实意义和深远的价值。

2. 系统协同设计

在实际的工业生产中, 电机系统的构建与协同优化成为提升能源效益的关键步骤。电机系统包含电机、驱动器和负载等复杂架构, 其好坏差别直接关系到整个体系的能源利用效率。电机、驱动和负载的同步协同设计实施, 能够以最小的系统代价, 获得最大的系统降耗与减排效果。

把电机系统整体视为一个有机整体, 通过精确

地匹配电机性能与负载需求, 以及优化操控方法, 以达成运行效果最佳状态。如在初始设计阶段, 全面审视电机与负载的动态交互, 同时关注驱动器对电机性能的影响。借助数学模拟、仿真分析与实证检验的深度结合, 设计电机系统在各种运行环境和变工况负载条件下实现持续高效率运转。

此外, 对电机系统能效标准的深入了解和熟练运用是协同设计的关键。如达到国际能源效益标准 IE4 等级 (中国 2 级能效), 以确保电机系统设计既能达到当前的能效标准, 也利于应对未来更加严格的能耗标准。因此, 协同设计电机系统不仅可以显著提升电机系统效率, 对工业可持续发展也将产生积极促进效果。

3. 能量回收技术

电机是电能转化为机械能的动力装备, 在能量转化与传输过程中, 能量流时刻发生着各种瞬态变化与往复流动。能量流的再利用是电机系统节能的重要举措, 其核心任务是收集电机运转时的能量流失, 将其变成可以再次利用的清洁能源。这一技术的挖掘和运用, 在减少系统整体能耗方面成果突出, 同时也有助于减少环境污染, 利于实现可持续绿色发展。

在电机系统运行过程中, 系统受到电磁转换、机械摩擦和热辐射等因素的作用, 从而产生能量消耗无法避免。能量回收的关键在于打造高效能量转换机制, 研发相应的节能减排装置。运用前沿的电力电子技术和调控策略, 快速地将电机系统的制动和惯性能量转化为有效能量, 将其储存于电池或超级电容器, 实现短时能量的“输-存-用”。

在探究能量回收技术的过程中, 应全面考虑电机系统的动态响应能力、稳定性和经济性。在研发能量回收系统时, 须保证它们与电机各个组成部分密切配合, 不影响系统的正常运行, 同时确保回收能量的纯净度和保持力, 保证能源再生的执行具有经济可行性。

结束语

本文针对现有电机系统节能设计缺乏系统性理论支撑, 节能效果不佳的现状, 通过对多项电机节能技术与效果的对比研究, 得到以下主要结论:

1) 高效电机是电机系统节能的中枢单元, 新型

高效电机可提升电机系统效率2%~10%，材料结构优化、新型电机拓扑与新型工艺装备是提升电机能效的主要手段。

2) 智能控制是电机系统节能的新趋势，智能控制策略的应用可提升电机系统效率3%~50%，变频调速、预测控制算法与自适应控制技术在提升电机系统效率的同时，也提升了电机系统的运行品质。

3) 系统能效优化是电机系统节能的重要研究方向，除传统的系统匹配技术外，系统能效评估、系统协同设计及系统能量回收，是实现更高水平电机系统节能的重要技术措施。**EA**

(收稿日期: 2024-06-15)

参考文献

[1] 陈金刚, 王强. 高效电机节能设计要点和系统节能发展趋势 [J]. 电气防爆, 2022, (6): 9-11.

[2] 吕黎, 胡卓超, 劳文杰, 等. 超高效电机节能效果测量与分析 [J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2022, 34 (4): 20-24.

[3] 左林岳, 朱嘉豪, 赵沂, 等. 高效电机节能系统推广与建议 [J]. 上海节能, 2022, (11): 1419-1422.

[4] 马小路, 王志雄, 段彦敏, 等. 高效电机及电

机系统推广效果分析 [J]. 电气传动, 2022, 52 (18): 10-16.

[5] 朱庭楼, 孙红庆. 智能高效节能电机系统应用与实践 [J]. 能源研究与利用, 2022, (4): 52-55.

[6] 陶丽楠, 王鹏凯, 李君, 等. 机泵系统节能分析方法探讨 [J]. 当代化工, 2022, 51 (7): 1709-1713.

[7] 陈伟华, 李秀英, 姚鹏, 等. 电机及其系统节能技术发展综述 [J]. 电器工业, 2008, 09 (4): 44-52.

[8] 李崇. 电机系统节能评价指标体系研究 [J]. 电机与控制应用, 2016, 43(10)74-77.

[9] 黄先锋, 宿伯萍. 电机系统节能在游梁式抽油机上的使用 [J]. 电机与控制应用, 2016, 43(10): 93-97.

[10] 张庆环, 王旭明, 王婧. 高效电机系统在节能诊断中的应用 [J]. 机电产品开发与创新, 2021, 34(5): 6-8.

[11] 秦宏波. 我国电机系统节能进展和对策 [J]. 电机与控制应用, 2010, 37(6): 1-4.

[12] 董振斌, 刘憬奇. 中国工业电机系统节能现状与展望[J]. 电力需求侧管理, 2016, (2): 1-4+20.

(上接第 86 页)

结束语

由于变电站特殊的地理位置与季节冷暖变化，变电站中野猫、老鼠和麻雀等小动物泛滥，当小动物在高压电气设备附近活动时，极易造成电气设备跳闸或故障，严重影响电网的安全稳定运行。因此，针对小动物造成的设备故障情况进行分析，制定有效的小动物防范措施具有重要意义。

本文针对一起小动物引发的变电站35 kV断路器烧毁事故进行分析，对设备故障前变电站一次设备运行情况进行介绍，描述故障发生后开关跳闸情况与母线失电情况，记录小动物造成电气设备故障时主变压器保护动作情况。针对此次事故进行分析，发现LW8-35型断路器结构设计存在固有问题，容易由小动物引发故障，对该型号断路器进行

更换。同时，为进一步确保变电站电气设备安全稳定运行，变电站运维人员应定期进行全站防小动物检查工作，将小动物隔离在变电站外，避免小动物再次造成变电站电气设备烧毁。**EA**

(收稿日期: 2023-12-19)

参考文献

[1] 胡东元. 小动物引起变电站主变压器跳闸分析 [J]. 农村电工, 2020, 28(1): 45.

[2] 侯方园, 郝力强, 韩建晖, 等. 一起10 kV高压开关柜烧毁故障分析[J]. 电气时代, 2020 (11): 51-52.

[3] 樊立攀. 110 kV变电所主变压器差动保护误动事故分析[J]. 电气时代, 2021 (2): 35-36.