

变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的应用分析

杨益

中车资阳机车有限公司，四川 资阳 641300

DOI:10.61369/EPTSM.2025050009

摘 要： 当下我们处于能源短缺的情形之中，此时电气控制与电机拖动系统的节能降耗成为了工业领域的重要课题。而变频调速技术凭借其能够动态调节电机转速以及实现按需供能的优势，在该领域展现出了显著的节能效果。本文就阐述了变频调速技术的基本原理，并分析了其在电气控制与电机拖动节能系统中的应用价值，之后重点探讨了此技术在不同场景下的应用策略，当中包括了风机、水泵类负载，机床设备以及起重机械等等，最后对此技术的未来发展进行了展望，期望能够为工业领域的节能改造提供一定的参考意义。

关 键 词： 变频调速技术；电气控制；电机拖动；节能系统；应用策略

Analysis of the Application of Variable Frequency Speed Regulation Technology in Electrical Control and Motor Drive Energy-saving Systems

Yang Pen

CRRC Ziyang Locomotive Co., LTD., Ziyang, Sichuan 641300

Abstract： At present, we are in a situation of energy shortage. At this time, energy conservation and consumption reduction of electrical control and motor drive systems have become important issues in the industrial field. Variable frequency speed regulation technology, with its advantages of dynamically adjusting motor speed and providing energy on demand, has demonstrated remarkable energy-saving effects in this field. This article expounds the basic principles of variable frequency speed regulation technology and analyzes its application value in electrical control and motor drive energy-saving systems. Then, it focuses on discussing the application strategies of this technology in different scenarios, including fan and pump loads, machine tools, and lifting machinery, etc. Finally, it looks forward to the future development of this technology. It is expected to provide certain reference significance for energy-saving renovations in the industrial field.

Keywords： variable frequency speed regulation technology; electrical control; motor drive; energy-saving system; application strategy

引言

工业化进程的不断加快使得工业用电量在全社会总用电量中所占的比例逐年地攀升，当中电机作为工业生产中的主要动力设备，其耗电量占到了工业用电总量的60%以上。然而传统的电机拖动系统，大多数都采用定速运行的方式，即通过阀门、挡板等节流装置来调节流量或者压力，该方式不仅效率低下，还会造成大量的能源浪费。

变频调速技术则是一种先进的电机调速方式，它主要改变了电机电源的频率和电压，以此实现电机转速的平滑调节，使电机输出功率与负载需求相匹配，最终达到节能的目的。与传统的调速方式相比来看，变频调速技术具有调速范围广、精度高、响应速度快、节能效果显著等众多优点，因而被广泛地应用于电气控制与电机拖动系统中。若将变频调速技术应用于电气控制与电机拖动节能系统，不单单能够大幅度地降低能源消耗，还能够提高生产过程的自动化水平和控制精度，进而减少设备的机械磨损，使设备的使用寿命得以延长，有助于降低企业的生产成本。

一、变频调速技术的基本原理

变频调速技术是基于电机转速与电源频率成正比的原理而实

现的。基于异步电动机的转速公式 $n=60f(1-s)/p$ （其中 n 为电机转速， f 为电源频率， s 为转差率， p 为电机磁极对数）可知，当改变电源频率 f 时，电机转速 n 也会随之发生改变。而变频调速技

作者简介：杨益（1997.09-），男，汉族，云南昭通人，大学本科，助理工程师，研究方向：电气控制。

术正是经由变频器将电网的工频交流电（通常为50Hz或60Hz）转换为频率可调的交流电，从而实现对于电机转速的调节。

变频器可分为整流电路、滤波电路、逆变电路和控制电路四个部分^[1]。展开来说，整流电路负责将交流电转换为直流电；滤波电路则会对整流后的直流电进行平滑滤波，以减少谐波成分；而逆变电路可以将直流电转换为频率和电压均可调的交流电，再供给电机；控制电路的任务是以设定的转速或负载需求为基础，通过脉冲宽度调制（PWM）等技术来控制逆变电路的输出，从而实现对于电机转速的精确调节^[2]。实际在变频调速的过程中，为了保证电机的磁通恒定，操作者需要遵循“电压与频率成正比”的原则，即当改变电源频率时，务必相应地调节电源电压，以避免电机磁路饱和或者欠励磁，为电机的运行效率和性能提供保障。

二、变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的应用价值

（一）显著的节能效果

在传统的电机拖动系统之中，电机通常以额定的转速运行，若负载需求发生变化时，仅通过调节阀门、挡板等方式来改变流量或压力，但这种节流调节方式会造成大量的能量损耗。基于变频调速技术，便能够通过调节电机转速来适应负载的变化，使电机的输出功率与负载需求相匹配。而根据流体力学原理可得，风机、水泵等平方转矩负载的轴功率与转速的三次方成正比，在转速降低10%时，功率消耗即可降低27%左右，表明该技术的节能效果十分显著。甚至在变转矩负载和恒转矩负载当中，变频调速技术也能通过优化电机运行状态，来减少不必要的能量消耗。

（二）提高系统控制精度

变频调速技术能够实现电机转速的连续平滑调节，其调节精度可达0.1%甚至更高，已经远高于传统的调速方式。对于电气控制而言，该技术配合PLC、传感器等设备，就能够实现对于电机拖动系统的闭环控制，此时便可以精确地控制生产过程中的流量、压力、速度等参数，助力产品质量和生产效率的提高^[3]。

（三）延长设备使用寿命

传统的电机启动方式为直接启动或者星三角启动，这两种方式在启动时都会产生较大的冲击电流，且数值可达额定电流的5-7倍，会对电机和电网造成较大的冲击，非常容易导致电机绕组过热、绝缘老化，导致电机的使用寿命缩短。但变频调速技术采用了软启动方式，应用启动时电机转速会从0逐渐地上升到额定转速，将启动电流限制在额定电流的1.5倍以内，如此在极大程度上降低了启动冲击，直接地减少了电机的机械磨损和电气故障。

（四）改善系统运行性能

基于变频调速技术，能够实现电机的无级调速，使系统的运行变得更加平稳，还减少了机械振动和噪声。实际在生产的过程中，操作者应根据工艺的要求灵活地调节电机转速，进而提高生产的灵活性和适应性。如在纺织行业中，经过变频调速技术可精确地控制织机的转速，使其适应不同品种织物的织造需求。

三、变频调速技术在不同场景下的应用策略

（一）风机、水泵类负载的应用策略

风机和水泵是工业生产当中应用最为广泛的通用机械，其耗电量占到工业电机总耗电量的40%以上，因此是变频调速技术应用的重点领域。通常在这类负载的电气控制与电机拖动节能系统中，应用变频调速技术的策略主要包括以下几个方面：

1. 根据负载特性选择合适的变频器

由于风机、水泵均属于平方转矩负载，其转矩与转速的平方成正比关系，且在低速运行时负载转矩比较小，因此工程人员应优先选择通用型的变频器。原因是通用型变频器在平方转矩负载场景下具有良好的适配性，它能够满足基本的调速需求，并且成本相对也比较低^[4]。同时工程人员还需根据电机功率和负载特性，合理地去设置变频器的参数，比如最大频率需匹配电机的额定频率，加速时间和减速时间则应根据负载的惯性大小进行调整。而对于需要频繁启停或者是调速范围较宽的场合，像化工行业的间歇式通风系统，就需要选择具有高过载能力的变频器，其过载能力通常可达150%额定电流持续60秒以上，如此才能够适应复杂的运行需求。

2. 采用闭环控制方式

为了实现对于流量、压力等参数的精确控制，系统均要采用闭环控制方式。具体来说，技术人员要在系统当中安装流量传感器、压力传感器等检测设备，利用这些设备将检测到的实际参数实时地反馈给变频器或PLC。随后变频器或PLC会将实际参数与预设的设定值进行差值计算，并且根据计算结果通过变频器输出相应的频率和电压信号，达到调节电机转速的效果，使实际参数始终稳定在设定范围之内。例如恒压供水系统，该系统中常常会将压力传感器安装在管网的关键节点，用于实时地监测管网压力。一旦压力低于设定值，变频器就会立即提高电机转速，并增加水泵的出水量，以此提升管网压力。如果压力高于设定值，变频器则会自动地降低电机转速，经由减少水泵的出水量，来降低管网压力。在实践当中应用上述这种动态调节的方式，既能保证供水压力的稳定，满足用户的用水需求，又能避免电机长期满负荷运行造成的能源浪费。

3. 实现多泵联动控制

由于大型的供水、通风系统中单台设备的容量有限，其难以满足大范围变化的负载需求，使得系统需要多台水泵或者风机联合运行。基于上述情况，控制团队应当通过PLC与变频器的配合，构建起多泵联动控制系统^[5]。此系统的当中PLC作为控制核心，负责实时地采集系统流量、压力等负载信号，并且要根据负载需求的大小，自动地判断投入运行的泵（风机）数量和单台泵（风机）的最优转速，使系统始终能够运行在最佳效率状态。

（二）机床设备中的应用策略

因为机床设备的电机拖动系统对于调速精度和动态响应要求都比较高，所以需要利用变频调速技术来提高加工精度和生产效率^[6]。实践当中具体的应用策略如下：

1. 主轴驱动系统的变频调速

机床主轴需要实现宽范围的转速调节，才能适应不同材料和刀具的加工要求。若采用变频调速技术，就可以实现主轴的无级调速，且调速范围可达1:100以上。一方面是在高速加工中，工程人员可以选用高速变频器和电机，进而实现主轴的高速运转，使加工效率得以提升；另一方面是在精密加工中，通过精确地控制变频器的输出频率，能够保证主轴的转速稳定性，进而提高加工的精度。此外变频器的快速响应特性还能够实现主轴的快速启停和正反转切换，有助于缩短辅助加工的时间。

2. 进给驱动系统的变频调速

一般在进给系统之中需要实现精确的位置控制和速度控制。对此，可将变频器与伺服系统相结合，使其构成闭环调速系统。即利用光栅尺、编码器等位置检测设备，实时地检测工作台的位置和速度，并且反馈给控制系统，然后通过调节变频器的输出频率，来实现工作台的精确进给^[7]。另外，工程人员设置不同的进给速度，还可以满足不同加工工序的要求，比如粗加工时应当采用较高的进给速度，精加工时则要采用较低的进给速度。

3. 辅助电机的变频控制

在机床设备中的冷却泵、润滑泵等辅助电机之中采用变频调速技术，即可根据加工需求来调节其转速。例如，实际在加工的过程中，该技术可以根据切削量的大小自动地调节冷却泵的转速，有效地控制了冷却液的流量，这样一来不仅保证了冷却的效果，还减少了能源的消耗。

（三）起重机械中的应用策略

起重机械的电机拖动系统的职责在于实现重载启动、平稳运行、精准定位等功能，在变频调速技术的助力之下，能够有效地提高其运行的安全性和可靠性，同时还能实现节能^[8]。

1. 起升机构的变频调速

起升机构在起重机械的电机拖动系统当中是核心的部分，其性能会直接地关系到起重作业的安全。因此需要采用变频调速技术，来实现起升机构的软启动和软停止，进而避免启动和停止时的冲击载荷，目的是保护钢丝绳、吊钩等部件。就实际运行情况来说，在起升过程中，工程人员通过调节电机的转速，能够实现重物的平稳上升和下降；而在重物悬停时，基于变频器的零速抱闸功能，可以确保重物可靠停留在空中。

2. 运行机构的变频调速

运行机构包括了大车运行和小车运行两种情况，它们都需要实现平稳的调速和换向。由于变频调速技术能够实现运行机构的无级调速，因此该技术能使起重机根据作业的需求灵活地调整运行速度，有利于提高作业的效率。举个例子，换向时借助变频器的制动功能可以实现平滑换向，以此减少了机械冲击。

3. 变频与制动单元的配合

在所有的起重机械之中，若电机处于减速或者下放重物状态时，均会处于再生发电状态，此时产生的再生电能需要及时地进行处理，否则将会导致变频器直流母线电压升高，影响到系统的正常运行。结合变频调速系统来看，应当在该系统当中配置制动单元和制动电阻，即将再生电能消耗在制动电阻上，以确保系统

的稳定运行。如果面对大型的起重机械，则可以采用能量回馈装置，此装置能够将再生电能反馈到电网，进而实现能量的回收利用。

四、变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的发展趋势

（一）智能化水平不断提高

往后随着人工智能、物联网等技术的发展，变频调速技术将朝向智能化方向发展。结合当前现状来看，未来的变频器将具备更强的自学习、自适应能力，终将能够根据电机和负载的特性自动地优化运行参数，达到系统的最佳运行状态^[9]。而通过与物联网平台的对接，还可以实现对于变频调速系统的远程监控、故障诊断和预测性维护，直接地提高了系统的可靠性和运维效率。

（二）模块化和集成化设计

为了适应不同应用场景的需求，变频调速技术相关的研究者应注重对其模块化和集成化的研究。基于模块化设计，该技术即可根据实际需求灵活地组合不同功能的模块，如功率模块、控制模块、通信模块等等，能够提高系统的扩展性和通用性。集成化设计则是将变频器、电机、传感器等部件集成在一起，使其形成一体化的驱动系统，如此便能减少系统的安装空间和接线复杂度，从而提高系统的可靠性和效率。

（三）绿色节能技术进一步发展

在节能要求日益严格的背景下，变频调速技术也需要更加注重绿色节能。一方面，需要不断地优化变频器的拓扑结构和控制算法，旨在提高变频器的转换效率，以降低自身的能耗；另一方面，应当加强该技术与能量回馈、储能等技术的结合，进而实现能源的高效利用和回收。如起重机械、电梯等具有再生发电工况的设备当中，广泛地应用能量回馈装置，通过将再生电能反馈到电网，来提高能源的利用率。

（四）与新能源技术的融合

由于新能源产业的快速发展，变频调速技术终将与新能源技术进行深度地融合^[10]。以风力发电、光伏发电等领域为例，变频调速技术可用于调节发电机的转速，可以实现最大功率的跟踪控制，最终提高新能源的利用效率。而在电动汽车领域，变频调速技术则成为了驱动电机的核心控制技术，往后将不断地向高功率密度、高效率、高可靠性方向发展，推动着电动汽车的普及和发展。

五、结语

基于本次研究来看，变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的应用，为工业领域的节能降耗提供了有效的途径。此技术通过动态地调节电机转速，实现了电机输出功率与负载需求的精准匹配，在实践当中不只显著地降低了能源消耗，还提高了系统的控制精度、运行稳定性和设备使用寿命。尤其是从风机、水泵类负载到机床设备、起重机械等不同场景的应用策略可以看

出，变频调速技术具备广泛的适用性和显著的应用效果。以后随着智能化、模块化、绿色化等技术趋势的发展，变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的应用还将更加深入和广泛。因

此未来，相关研究在应进一步地加强技术研发和创新，结合实际情况不断地优化应用策略，以推动变频调速技术与新兴技术的融合！

参考文献

- [1] 钟逸飞, 陆铭, 范孟超, 等. 变频调速技术在工业电气自动化控制中的应用 [J]. 四川建材, 2024, 50(09): 198-200. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2024.09.072.
- [2] 李业林. 浅谈变频调速节能控制技术在水泵电机中的应用 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(11)[2024-11-01]. <https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228831022089216>.
- [3] 滕萃, 文湘霖. 变频调速技术在电机拖动中的应用研究 [J]. 模具制造, 2024, 24(06): 142-144. DOI: 10.13596/j.cnki.44-1542/th.2024.06.045.
- [4] 李朋, 程振飞, 赵红伟. 变频技术在风力发电机组及电气系统中运用分析 [J]. 电力设备管理, 2024, (06): 104-106.
- [5] 司莉莉, 项克训. 变频调速技术在电气自动化中的应用与研究 [J]. 安家, 2024, (7): 0040-0042.
- [6] 黎亚. 变频调速技术在给水系统中的节能控制应用分析 [J/OL]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2021(12)[2021-11-16]. <https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228865979974656>.
- [7] 魏连超. 变频调速技术在工业电气自动化控制中的应用分析 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2023(12)[2023-12-01]. <https://www.cqvip.com/doc/journal/201022888047419905>.
- [8] 胡俊鹏, 李欣凤. 电气自动化系统中的节能设计技术分析与应用研究 [J]. 前卫, 2024, (1): 0168-0170.
- [9] 王燕飞. 变频调速节能控制在水泵电机系统中的应用研究 [J]. 机电信息, 2016, (09): 90-91.
- [10] 郑书衡. 高压变频调速技术在电气控制节能中的运用分析 [J]. 中小企业管理与科技, 2021, 5(18): 173-174.