

高压变频器在风机系统中的节能计算与应用分析

焦志春

北京金自天正智能控制股份有限公司 北京丰台 100070

DOI:10.12238/ems.v7i6.13832

[摘 要] 随着工业生产规模的不断扩大, 风机作为一种广泛应用于各个领域的通用设备, 其能耗问题日益受到关注。高压变频器作为一种高效的调速装置, 在风机系统中得到了越来越多的应用, 能够显著降低风机的能耗, 提高系统运行效率。本文详细阐述了高压变频器的工作原理, 深入分析了其在风机系统中的节能计算方法, 并结合实际案例探讨了应用效果, 旨在为高压变频器在风机系统中的进一步推广和优化应用提供理论支持与实践参考。

[关键词] 高压变频器; 风机系统; 节能计算; 应用分析

1 高压变频器工作原理

1.1 基本原理

高压变频器的运行原理是借助电力半导体器件的开关功能, 把工业频率的电源转换为其他频率电能的调控设备。其原理依托于交流异步电动机转速同电源频率之间的关联特性。由电机原理可知, 交流异步电动机的实际转速 n 为:

$$n = n_0 (1 - s) = p60f (1 - s)$$

其中, n_0 为电动机的同步转速, p 为电动机的极对数, f 为电动机的运行频率, s 为电动机的转差率。由于转速调节范围较宽, 因此只要连续改变电动机的供电频率 f , 就可以连续改变电动机的同步转速, 从而实现电动机转速在较宽范围内的连续调节。

在风机系统中, 通过高压变频器改变风机电机的供电频率, 即可灵活调节风机转速, 满足不同工况下对风量的需求。与传统调节风门挡板开度来控制风量的方式相比, 改变转速来控制风量更为高效省能, 因为可以避免因节流而带来的能量损失。

1.2 常见类型及特点

使用了升高降低技术的 HVF (High Voltage Frequency) 设备是针对中等和高等压力环境而设计的。它的运作方式如下所述: 先利用下降式电源将其从主网路接收到的高功率输送到较低电力需求的环境下; 接着经过调整后产生可调节振动幅度及波形的交替流体能量源; 最后用上升式的能源装置提升到电机需要的工作级别上。该类型的显著优势在于能灵活适配电网与电动机的电压规格, 尤其在小容量场景 (<500KW) 中, 改造成本低于直接采用高压变频器的方案。但不足也较为突出: 升降压变压器体积庞大且重量较大, 频率调节范围受变压器特性限制, 且因变压器的介入导致系统效率有所下降。

高-电流类型的高压变频器: 这种类型的设备在低压变频器的直流部分中使用了电感元素。它的输入端采用了可控硅的移相控制整流技术, 并利用调整电机电流来实施操作管理; 而输出的端则应用强制切换的方式, 以精确地操纵电机的频率与相位。该类型设备的核心特性是支持电机四象限运行, 适用于需要能量双向流动 (如正反转、制动回馈) 的复杂工况。

对于高-电压型的高速变频设备而言, 前段是通过降压变压器来调整电网电压, 而后段则联接了低压变频设备。在低压变频设备的输入部分可以选择使用可控硅移相控制整流或者二极管的三相桥式直接整流方式, 同时也可以借助电容实现平波和平稳储存能量的功能。一般情况下, 我们会在逆变电路中选用电压型 IGBT 元件, 并经过 SPWM 调制产生可以调节频率和幅度的高频交流信号, 然后将其通过升压变压器转化为适

合电动机使用的电压级别。需要注意的一点是在变流电路和升压变压器间需要安装正弦波滤波器 (F), 这样能够有效地减少输入谐波对升压变压器造成的不良影响, 防止因为热效应导致的线圈绝缘破损问题。但是, 这种滤波器的价格相对较高, 往往占据着整个低压变频设备价格的 1/3 到 1/2 左右。

IGBT 的应用于此类型的电力电子装置被称为“直接器件串连式的高压交流调速驱动”, 也常被简称为“DDS-HVDC” (Direct Device Serial High Voltage DC Converter), 它是一种利用了 IGBT 技术的新型高效、节能和环保型的交—直—交逆变换方式来替代传统的工频感应电机供电的一种方式的一种新的电气传动控制方案; 它的主要特点是具有较高的输入频率范围宽且可以根据需要灵活调整运行速度等优点而受到广泛关注并得到迅速发展。功能特性方面, 由于与低压变频器拓扑结构一致, 此类变频器具备四象限运行能力, 同时支持矢量控制技术。主要的技术难题在于如何处理器件均匀电压的问题, 这需要针对驱动系统和缓冲系统的独特设计方案。此外, 对于 IGBT 驱动的延迟准确性的需求也极为苛刻。如果 IGBT 的开启/关断时间和上升/下落斜率出现较大误差, 可能会导致功率元器件受损。

最近出现的电路架构之一是单元串联型高压变频器, 主要由输入变压器、功率单元和控制单元组成。该设计采用模块化理念, 并通过功率单元串联技术来解决高压应用难题, 可直接驱动交流电机, 无需输出变压器或滤波器。例如, 6KV 机型通常由 15 至 18 个功率单元组成, 每相电路由 5 至 6 个功率单元串联成 Y 形连接, 直接连接到电机驱动回路。所有功率单元的电路设计与物理结构完全一致, 具备互换性且支持互为备用, 显著提升了系统维护的便捷性与运行冗余性。该设备的输入端由一台旋转变压器组成, 它的初级使用 Y 型接法, 次级则采用了延长边的三角形设计, 总共有 15 到 18 个三相线圈被分配给每个功率单元以供应电力。这所有的线圈均被平分成分 I、II 和 III 三个区域, 每一个区域都包括了 5 到 6 个三相的小线圈, 并且它们之间的相位错开度保持在 8.5° 或者 10° 之间。这种移相接法能够有效抑制 35 次以下谐波, 大幅降低对电网的谐波污染。

2 高压变频器在风机系统中的节能计算方法

2.1 风机的工作特性及传统调节方式的能耗分析

风机工作特性曲线, 风机的工作特性通常用风量 (Q)、风压 (H)、轴功率 (P) 之间的关系来描述。在额定转速下, 风量与风压的关系曲线 (H-Q 曲线)、风量与轴功率的关系曲线 (P-Q 曲线) 以及风量与效率的关系曲线 (η -Q 曲线) 构成了风机的工作特性曲线。一般来说, H-Q 曲线呈下降趋势, 即随着风量的增加, 风压逐渐减小; P-Q 曲线呈上升趋势, 风量增大时轴功率增大; 而 η -Q 曲线存在一个最高点, 此点

对应的风量为风机的最佳工作点, 此时风机效率最高。

传统调节方式(阀门控制)的能耗原理, 传统风机系统常采用阀门控制方式来调节风量, 即通过改变出口阀门开度大小来改变管道中流体阻力, 从而实现流量调节。当阀门开度改变时, 管阻特性曲线发生变化。举例来说, 假设阀门完全开启, 那么管路阻抗特性和风机压力特性会在点 A 相遇, 此时的流体通过量是 Q_a , 而风机出力的压强则是 H_a 。然而, 如果我们稍微关闭阀门, 则会形成新的管路阻抗特性线 R_2-Q , 并使其和风机压力曲线的交叉点移动至点 B, 这时流体的流动速度降低到了 Q_b , 同时风机输出的压强也相应提升至 H_b 。因此, 压强的上升幅度可以被计算为 $\Delta H_b = H_b - H_a$, 这个过程带来了额外能耗的产生, 即 $\Delta P_b = \Delta H_b \times Q_b$ (参考论文中的图表描述)。在这个调整过程中, 风机的旋转频率并未发生变化, 但是因为管道阻力增强, 为了保证减少后流速的风机正常运转, 必须提供更大的压强, 这样就增加了额外的能耗, 这些能耗主要用于抵消因阀门阻力增加带来的影响, 最终造成资源的不必要损耗。

2.2 基于高压变频器调速的节能原理

风机相似定律与节能关系: 根据风机的相似定律, 风机的风量 (Q)、风压 (H) 和轴功率 (P) 与转速 (n) 之间存在如下关系:

$$\begin{aligned} Q_2 & Q_1 = n_2 / n_1 \\ H_2 & H_1 = (n_2 / n_1)^2 \\ P_2 & P_1 = (n_2 / n_1)^3 \end{aligned}$$

换句话说, 随着风机的速度减慢, 其输送的风量和压力会以相应的比例减少, 同时, 它的动力消耗也会按照三倍于速度的比例递增。举例来说, 如果我们把风机的运行速度下调到原始值的 80% ($n_1 = 0.8 n_2$), 那么它所产生的风量就会相应地减少至原本的 80% ($Q_1 = 0.8 Q_2$), 与此同时, 风压也将会缩小至原始值的 64% ($H_1 = 0.64 H_2$), 最后, 它的总耗能也将被削弱到原始水平的 51.2% ($P_1 = 0.512 P_2$)。由此可见, 通过降低风机转速来调节风量, 轴功率的下降幅度远大于风量的下降幅度, 这就是高压变频器在风机系统中实现节能的理论基础。

2.3 节能计算的具体公式及参数说明

公式推导: 设风机在工频运行时的功率为 P_e , 转速为 n_e ; 采用高压变频器调速后的实际运行功率为 P_1 , 实际运行转速为 n_1 。

根据风机相似定律中轴功率与转速的关系 $P_e / P_1 = (n_e / n_1)^3$, 可得 $P_1 = P_e (n_e / n_1)^3$ 。

则节能率 η 的计算公式为:

$$\eta = (1 - P_e / P_1) \times 100\% = [1 - (n_e / n_1)^3] \times 100\%$$

单位时间节能 $\Delta P = P_e - P_1 = P_e - P_e (n_e / n_1)^3 = P_e [1 - (n_e / n_1)^3]$ 。

若运行时间为 t (h), 则节能量 $E = \Delta P \times t = P_e [1 - (n_e / n_1)^3] t$ (kW·h)。

在实际操作中, 我们通常可以从风机的铭牌或产品技术文档中获取到风机的额定功率 p_e 和额定转速 n_e 这两个参数。而实际运行转速 n_1 可通过转速测量设备(如转速传感器)直接测量, 或者根据高压变频器的输出频率等参数进行计算(因为电机转速与电源频率近似成正比关系)。

我们必须明确, 上述的节能计算是在理想条件下进行的理论推导。然而, 在实际操作中, 还有一些因素会对节能效果产生影响。例如, 高压变频器自身存在一定的功率损耗, 其效率并非 100%, 一般在 95%-98% 之间, 这会使实际节能效

果略低于理论计算值; 风机的运行工况可能较为复杂, 并非始终处于稳定的某一转速运行, 而是在不同转速间频繁切换, 此时需根据实际运行工况的时间占比, 对不同转速下的节能量进行加权平均计算; 此外, 风机系统中的管道特性、负载变化等因素也会对节能效果产生影响。在进行节能计算和项目实施时, 应综合考虑这些因素, 以获得更为准确的节能评估结果。

3 高压变频器在风机系统中的应用案例分析-某钢铁厂烧结主抽风机节能改造

项目的起始点是: 一家大型钢铁公司的烧结车间的核心排气设备拥有强大的动力, 其规格为 10kV/8400kW 的电励磁同步马达。然而, 在此前的改建过程中, 通过使用进料隔板来调整流量的方式仅对通路的流动阻力进行了调整, 而未影响到驱动的能量供应, 这使得减压损耗和能源消耗变得极为显著。为降低能耗, 提高生产效益, 该厂决定对烧结主抽风机进行节能改造, 采用高压变频器调速控制。

方案升级已进行: 所选用的高压变频器型号为 GD5000-A11200-10, 应用了一对一直驱方案。电机励磁电流由励磁柜输出, 励磁柜与变频器之间实现了控制联锁。在控制方式上, 设置了就地控制和远方控制两种模式。在现场操作箱进行现场控制时, 可启停风机并通过旋钮来调节频率; 而在远程控制时, 则可以通过中控室 DCS 系统来启停风机并调节频率, 通过调节频率从而改变电机的转速, 以实现调节风量的目的。另外, 为了满足风机机械方面的润滑需求, 设定了下限频率为 30Hz, 并设置较快的加速时间, 确保风机在启动后能迅速达到 30Hz, 以确保机械部分形成润滑油膜, 从而保障润滑系统的正常运转。

能源节约的评价结果显示, 经过改良的主抽风机在初始阶段以大约 35Hz 的频率运转, 而在最大的负载条件下其工作频率约为 46Hz。与传统的风门和挡板用于调整风量的工频模式相比, 通过使用变频技术来调控风量可以实现超过 30% 的平均电力节省。节能效果显著, 不仅降低了企业的用电成本, 而且提高了设备的运行稳定性和自动化程度, 减少了设备维护工作量。

4 结语

本文系统阐述了高压变频器的工作原理, 深入解析了其在风机系统中的节能计算方法, 并通过工程案例验证了实际应用效果。研究揭示, 高压变频器能够通过调整电机的供电频率来控制转速。相较于传统的风门控制方法, 它能有效地减少风机轴的功耗。理论上, 节能效果与转速的三次方成正比, 实际应用中, 平均节省的电力可以超过 30%。其模块化设计、谐波抑制能力及可靠的散热方案, 有效提升了系统运行稳定性与自动化水平。未来, 随着工业智能化与绿色制造的推进, 高压变频器在风机系统中的应用将更趋广泛, 需进一步结合物联网技术与能效管理策略, 实现全生命周期的节能优化与精准控制, 为“双碳”目标的达成提供技术支撑。

【参考文献】

- [1] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术(第五版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 215-230.
- [2] 李华德, 王志强. 电机控制技术与节能应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019: 187-202.
- [3] 陈永校, 诸自强. 风机水泵节能调速技术及应用案例[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5218-5226.