

变频技术在风力发电机组及电气系统中运用分析

田同茜

新疆华电苇湖梁新能源有限公司，新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市，830000；

摘要：变频技术通过柔性电力电子控制，显著提升风能利用率、设备寿命及电网稳定性，是风电高质量发展的核心支撑。国内社会中的工业化进程发展迅速，其所消耗的能源占比也有所增加，造成非可再生能源的污染及枯竭问题更为严重，所以，清洁能源在此过程中起到至关重要的作用，使相关企业提高对风力发电机组及电气系统的重视，提高对风能等可再生能源的利用率，以实现对风力发电机组的合理设置，推进我国经济建设活动的进一步开展。

关键词：变频技术；风力发电机组；电气系统

DOI：10.69979/3041-0673.25.12.025

工作人员将变频技术应用于风电发电机组及电气系统中，是可以将直流电转变为不同频率的交流电的，其也可以让交流电转变为直流电后不再进行逆变，利用频率的变换，而非电能的变化，即可将风能转变为电能。

1 变频器结构与工作原理

1.1 核心结构组成

主电路，整流单元：采用三相桥式整流电路（二极管或可控硅），将工频交流电（如 380V/50Hz）转换为脉动直流电。滤波单元：通过大容量电解电容和平波电抗器滤除直流电中的谐波，稳定直流母线电压。电容组需并联匀压电阻以平衡电压。逆变单元：核心为 IGBT 模块，通过 PWM 脉宽调制技术将直流电转换为频率/电压可调的交流电，驱动电机运行。辅助电路，制动单元：消耗电机再生制动时产生的能量，防止过电压损坏器件（如制动电阻）。检测单元：实时监测电压、电流、温度等参数，触发过流/过压保护。控制电路：基于微处理器实现信号处理、PWM 波形生成及通信控制。外部接口，支持 485 通信接口（如 Modbus 协议），实现与 PLC 或上位机的数据交互（启停、频率设定、状态读取）。

1.2 工作原理

交-直-交能量转换流程，整流阶段：三相交流输入经整流桥输出脉动直流电（如 380V AC→540V DC）。滤波阶段：电容电感网络平滑直流电压，减少谐波波动。逆变阶段：IGBT 按 PWM 控制信号高速通断，将直流电“切割”为模拟正弦波的变频交流电（如 0~650Hz 可调）。PWM 调制技术，控制器生成高频 PWM 脉冲序列，通过调

节脉冲宽度和频率控制输出电压幅值与频率。采用 SPWM（正弦波 PWM）时，开关频率可达 10kHz 以上，输出波形逼近正弦波，减少电机谐波损耗。控制模式，V/F 控制：保持电压与频率比值恒定，适用风机、水泵等简单调速场景。矢量控制：分解电机电流为转矩/磁通分量，实现高精度转矩响应（如起重设备）。

2 变频电源工作原理及作用

2.1 工作原理（交-直-交能量转换）

整流阶段（AC→DC），输入工频交流电（如 50Hz/60Hz）通过三相桥式整流电路（二极管或可控硅）转换为脉动直流电。例如：380V 交流电整流后输出约 540V 直流电。滤波阶段（直流平滑），脉动直流电经大容量电解电容和平波电抗器滤波，消除电压谐波波动，形成稳定的直流母线电压。逆变阶段（DC→可调 AC），核心环节：IGBT 模块通过高频 PWM（脉宽调制）技术将直流电“切割”为频率、幅度可调的交流电（频率范围通常 0~650Hz）。波形优化：采用 SPWM（正弦波 PWM）技术，开关频率可达 10kHz 以上，输出近似理想正弦波，减少谐波失真。技术分支：线性放大型：输出波形纯净度高，但效率较低；SPWM 开关型：效率高且体积小，为当前主流方案。

2.2 核心作用与应用场景

提供理想供电环境，高质量输出：频率稳定（±0.1%）、电压失真度低（THD<3%）、内阻趋近于零，模拟理想交流电源特性。多国标准适配：支持 50Hz/60Hz 灵活切换，满足跨国设备测试需求。节能与设备保护，软启动减少电机电流冲击，延长设备寿命（西门子案例）

显示维护成本降 15%-20%）。精确匹配负载需求，避免电能浪费(风机/水泵类负载调速节能率可达 20%-50%)。

2.3 未来发展趋势

高频化：碳化硅(SiC)器件提升开关频率至 20kHz 以上，进一步减小体积与损耗；智能化：集成 AI 算法优化动态响应，适应新能源发电功率波动；模块化设计：标准化功率单元，支持冗余配置提升可靠性。

3 变频技术在风力发电机组的应用

3.1 变频技术如何提高风力发电效率

风能捕获优化：动态追踪最佳叶尖速比，转速自适应控制，变频器根据实时风速调整发电机转速，使叶尖速比(叶片线速度/风速)恒定维持在最优值(通常 ≈ 8)，将风能捕获效率提升 15%-25%。宽风速范围运行，传统恒速风机在超额定风速时需气动刹车限速，变频技术允许机组超同步转速运行(如 1.2 倍额定转速)，扩展有效发电风速范围至 3-25m/s。系统损耗控制：电能转换与设备保护，高效功率变换，双馈变频器采用交-直-交拓扑，转子侧变流器仅处理 20%-30%的额定功率，降低损耗；全功率变频器通过 SiC 器件提升开关频率，逆变效率达 98.5%。软启动与机械应力抑制，电机启动时变频器逐步提升输出频率，将启动电流限制在 1.5 倍额定电流内(直接启动为 6-8 倍)，减少齿轮箱冲击扭矩 40%。无功功率精准补偿，变频器自动调节励磁电流相位，向电网注入容性无功功率，将并网点功率因数稳定在 0.95 以上，减少线路损耗。电网适应性增强，低电压穿越(LVRT)，电网电压骤降时，变频器向转子注入无功电流支撑电网，维持机组并网运行，减少脱网导致的发电损失。频率主动支撑，感知电网频率波动后，变频器自动调整有功功率输出(如调差系数 3%-5%)，提升电网频率稳定性 15%。

3.2 变频技术如何保护风力发电机组设备

机械冲击抑制，软启动控制，变频器控制电机转速从 0 缓慢爬升，限制启动电流 ≤ 1.5 倍额定值(直接启动达 6-8 倍)，降低齿轮箱扭矩冲击 40%。转速自适应调节，实时匹配风速变化调整转速，避免超速运行导致的轴承过载(如 $>25m/s$ 强风时主动限速)。电气系统保护，电压波动防护，电网电压 $\pm 15\%$ 波动时自动调节励磁电流，维持定子输出电压稳定(双馈机组)。绕组绝缘防护，监测转子/定子绕组温度，超过安全阈值(如

130°C) 自动降功率运行，防止匝间短路。低电压穿越(LVRT)，电网电压骤降至 20% 额定值时，变频器注入无功电流支撑电网 0.5-2 秒，维持机组并网，避免脱网冲击。热管理系统优化，独立散热设计，配置与电机转速无关的轴流风机，确保低速运行时散热效能(如 0.5 Hz 工况仍维持额定风量)。必要性：传统自冷风扇在低速时风量锐减，导致绕组温升超标(实测低速工况温升增加 15°C)。功率器件主动冷却，IGBT 模块采用液冷散热，温控精度 $\pm 1^\circ C$ ，延长器件寿命 30%。

3.3 变频技术如何实现风力发电并网

核心目标：满足并网三要素，变频技术需确保风机输出满足电网并网条件：电压同步：输出电压幅值误差 $\leq \pm 5\%$ 电网额定电压；频率同步：输出频率稳定在 50Hz(中国)或 60Hz(欧美)，偏差 $<0.1\text{Hz}$ ；相位同步：相位角差控制 $<5^\circ$ ，避免合闸冲击电流。双馈机组并网方案(转子侧变频)，技术原理，通过调节转子励磁电流频率，补偿转速变化，使定子输出恒频电能：亚同步运行(转速 $<1500\text{rpm}$)：转子吸收电网功率，预充电：闭合预充电单元，直流母线电压升至 975V，抑制合闸涌流；转速匹配：风机达 1200-1400rpm 时，变频器注入 140A 励磁电流；参数同步：调节定子电压幅值、相位至与电网一致，闭合定子接触器。全功率变频机组并网方案(交-直-交拓扑)，工作过程，整流：将风机输出的变速交流电(如 10-60Hz) 转为直流电，消除频率波动；逆变：DC/AC 逆变单元生成 50Hz 工频交流电，采用 SPWM 调制降低谐波(THD $<4\%$)；同步检测：实时比较逆变输出与电网的电压/相位差，误差达标时触发并网。特殊场景应用，低频风机并网：20Hz 低频电经定制变频电源升频至 50Hz(如台州柔性输电工程)；弱电网支撑：逆变器主动调节功率因数 >0.95 ，增强电网稳定性。

4 变频技术在电气系统中的应用

4.1 电气系统中变频器的应用

工业机械控制，矿井提升机改造(新科瑞 C500 变频器)，问题：传统绕线电机转子串电阻调速导致接触器烧毁、制动闸磨损(冲击力达额定值 180%)。方案：改用变频驱动鼠笼电机，实现转矩控制软启动。效果：冲击电流降低 70%，闸皮寿命延长 3 倍，年维护成本下降 40%。起重机精准定位(西门子 MM440 变频器)，闭

环矢量控制实现 $\pm 1\text{cm}$ 定位精度，低速满载转矩波动 $<5\%$ 。节能与过程优化，中央空调变流量控制，根据温差动态调节冷冻泵转速，相比阀门节流节能 $30\% \sim 50\%$ 。实测数据：上海某写字楼夏季空调电耗降低 42% 。空压机恒压供气（螺杆式压缩机变频改造），PID闭环控制输出压力，压力波动范围 $\pm 0.01\text{MPa}$ （工频控制 $\pm 0.1\text{MPa}$ ）。效益：消除泄载空转损耗，综合节电率 35% 。特殊场景保护，电梯曳引机驱动（台达VFD-ED系列），零速 20% 转矩启动，平层误差 $<3\text{mm}$ ；故障时自动执行安全制动（STO功能）。带式输送机软启动（煤矿井下应用），多电机功率自动平衡，张力波动减少 80% 。价值：避免皮带撕裂，延长设备寿命 50% 。新能源领域，风力发电变流系统，双馈机组转子侧变频实现 $\pm 30\%$ 转速范围内定子输出 50Hz 恒频电；低电压穿越时主动注入无功电流支撑电网。

4.2 变频技术如何优化电气控制策略

控制精度提升策略，矢量控制替代V/F控制，应用场景：起重机定位、精密机床，优化原理：通过分解转矩电流与励磁电流，实现电机转矩精准控制。效果：低速满载转矩波动 $<5\%$ ，定位精度达 $\pm 1\text{cm}$ ，电梯平层误差 $<3\text{mm}$ （传统控制 $>10\text{mm}$ ），自适应PID参数整定，动态调节：根据负载变化实时调整比例增益（K_P）、积分时间（T_I）、微分时间（T_D），高精度PWM调制优化，载波频率动态调整：安静环境：提高载波频率（ $>8\text{kHz}$ ）降低电机噪音，高温环境：降低载波频率（ $<4\text{kHz}$ ）减少变频器发热，随机PWM技术：分散谐波能量，降低电磁干扰 30% 。能耗优化策略，功率拐点跟踪技术，原理：实时检测电机功率拐点（通常 $38\text{--}42\text{Hz}$ ），自动避开高耗能区间，效果：风机/水泵类负载综合节电 $25\% \sim 40\%$ 。睡眠模式与变流量控制，中央空调系统：冷冻泵根据温差动态调速，替代阀门节流，低负载时自动进入睡眠模式（转速 $<10\text{Hz}$ ）。多电机功率平衡，矿用皮带机：主从控制算法实现多电机转矩均衡，效果：张力波动减少 80% ，皮带寿命延长 50% 。系统稳定性强化策略，低电压穿越（LVRT）技术，风电并网应用：电网电压骤降 20%

时，注入无功电流支撑 $0.5\text{--}2\text{秒}$ ，价值：弃风率降低 5% ，年发电量提升 8% ，手自动无忧切换，无缝过渡：手动设定频率与自动PID控制双向同步，应用场景：化工流程生产线启停阶段，避免压力/流量突变。

4.3 变频技术如何提高电气系统可靠性和经济性

提升系统可靠性，软启动与冲击抑制，传统问题：电机直接启动电流达额定值 $5\text{--}7$ 倍，引发电网冲击和设备机械损伤。变频方案：电压频率协同缓升（ $0 \rightarrow$ 额定值需数秒），启动电流限制在 1.5 倍额定值内。效果：接触器烧毁风险降低 90% ，机械冲击力减少 70% ，矿山提升机闸皮寿命延长 3 倍，冗余设计与降额运行，功率模块：耐压/电流额定值预留 30% 裕度，避免过载烧毁，散热保障：强制风冷/热管技术控制功率模块结温 $<$ 允许值 80% ，案例：某高压变频器模块降额使用后，故障间隔时间延长至 5 万小时。增强经济性，能耗优化核心机制，负载匹配调速：动态调整电机转速，避免工频固定转速的“大马拉小车”现象，风机/水泵类负载：功耗 \propto 转速，转速降 $20\% \rightarrow$ 能耗降 50% ，功率拐点规避：自动避开电机 $38\text{--}42\text{Hz}$ 高耗能区间，维护成本压缩，设备寿命延长：软启停+转矩平衡减少机械磨损，皮带机寿命提升 50% ，维护简化：内置PID功能省去外部PLC，硬件成本降 20% 。

总之，结合变频器结构及机理，让工作人员加强对变频技术的了解，使其可以顺利辅助风机变频系统运转、合理规划风机发电机组、提高对控制算法的关注、实现对机组的改进设计，能让风电发电机捕捉到最大的风能量，使其顺利转换成电能，以满足当前社会对电能的需要。

参考文献

- [1]许华. 光伏发电与风力发电的并网技术分析. 2022.
- [2]范和善. 变频技术在风力发电机组及电气系统中运用探讨. 2023.
- [3]刘海燕. 关于变频技术在风力发电机组及电气系统中运用分析. 2023.