

# 新能源发电系统的电气自动化控制策略研究

苏 敏

浙江工程设计有限公司 浙江 杭州 310000

**摘要:** 随着全球能源结构向清洁化转型, 新能源发电规模持续扩张, 但其出力波动性与并网复杂性对电气自动化控制技术提出更高要求。本文围绕新能源发电系统的电气自动化控制策略展开研究。分析了光伏、风电、储能系统的电气原理、波动及间歇特性, 明确控制核心需求; 阐述了电气自动控制原理、电力电子变换技术等基础理论; 重点研究了核心设备、并网环节及多能互补系统的控制策略, 涵盖MPPT优化、并网同步等关键技术; 最后探讨硬件选型与软件实现。研究为新能源发电系统的稳定、高效运行及并网兼容性提升提供理论与技术支撑。

**关键词:** 新能源发电系统; 电气自动化; 控制策略

**引言:** 随着能源结构转型加速, 新能源发电占比持续提升, 但其波动性、间歇性给系统稳定运行带来挑战, 电气自动化控制成为关键解决方案。目前相关研究虽取得进展, 但在多能协同、复杂工况适配等方面仍需突破。本文立足实际需求, 先分析新能源发电系统电气特性与控制需求, 再梳理基础理论, 进而深入研究核心控制策略, 同时探讨软硬件实现路径。通过系统研究, 旨在解决新能源发电系统运行中的控制难题, 为其安全高效并网与规模化应用提供保障。

## 1 新能源发电系统的电气特性与自动化控制需求

### 1.1 新能源发电系统核心类型电气原理

光伏系统基于光伏效应实现能量转换, 半导体材料受光照激发形成电子-空穴对, 经PN结电场驱动产生直流电, 再通过逆变器转换为交流电并入电网或供负载使用。风电系统通过风轮捕获风能转化为机械能, 经传动机构传递至发电机, 结合变流器完成电能频率与电压调节。储能系统作为能量缓冲单元, 通过双向DC-DC模块实现充放电状态切换, 配合电池管理系统监控电芯状态, 实现电能的存储与释放调控。三类系统均依赖电力电子装备完成能量转换与接口适配。

### 1.2 新能源发电的波动性、间歇性电气特征分析

新能源发电呈现多时间尺度的出力波动特性, 超短周期内出力可快速变化, 短周期(分钟至小时级)最大功率波动可达装机容量的15%-40%。间歇性表现为出力随自然条件周期性变化, 存在昼夜交替、季节更迭导致的出力空白期。风电存在反调峰特性, 出力高峰与用电高峰易形成时间错位, 光伏则受云层遮挡等影响出现骤升骤降, 此类特征导致系统净负荷峰谷差扩大, 增加电网调节难度。

### 1.3 电气自动化控制的核心需求

稳定性需求体现为维持系统电压、频率在允许范围, 抵御新能源出力波动与电网扰动, 避免机组大规模脱网。高效性需求聚焦能量转换与利用效率提升, 通过精准控制实现最大发电效能与储能充放电效率优化。并网兼容性需求要求系统满足"可观、可测、可调、可控"标准, 实现与电网的电压频率同步, 通过无功补偿优化电能质量, 同时具备孤岛检测与保护能力, 保障并网运行安全<sup>[1]</sup>。

## 2 新能源发电系统电气自动化控制基础理论

### 2.1 自动控制原理在新能源发电中的应用

自动控制原理是系统稳定运行的核心, 以反馈调节实现被控量精准控制。新能源发电中广泛应用闭环控制, 通过传感器采集电压、电流、功率等参数, 对比实际值与设定值后, 经控制器输出调节信号, 驱动执行机构稳定出力。PID控制算法通过比例、积分、微分环节协同, 抑制波动干扰, 提升响应速度与稳态精度; 现代控制理论的状态空间法可对多变量、非线性系统建模优化, 实现多目标控制, 支撑复杂工况稳定运行。

### 2.2 电力电子变换技术与控制逻辑

电力电子变换技术是发电单元与电网的关键纽带, 负责电能形态转换与参数调节, 控制逻辑直接影响变换效率与运行稳定性。系统中, 变换器通过开关器件通断, 完成交直流转换及电压、频率调节; 控制逻辑采用脉宽调制(PWM)技术, 调整开关导通时间比例, 精准控制输出电能参数以满足电网要求。结合变换器拓扑优化开关时序减少损耗, 并具备快速动态响应能力, 实时跟踪输入电能变化, 为并网或储能提供可靠电能基础。

### 2.3 分布式发电系统的协同控制理论

该理论以实现多发电单元有序运行与能量优化分配为目标, 核心是通过信息交互与统一调度提升系统效率

与可靠性。以“全局最优”为导向，建立多单元通信网络实现运行状态实时共享，采用分层控制架构：上层控制器结合负荷需求与单元出力特性，制定功率分配方案；下层控制器按指令调控单个单元参数，确保指令执行。同时考虑单元间耦合关系，通过协调控制避免干扰，当某单元故障或出力波动时，快速调整其他单元状态，实现功率平衡，保障系统持续稳定供电<sup>[2]</sup>。

### 3 新能源发电系统电气自动化核心控制策略

#### 3.1 新能源发电系统核心电气设备自动化控制策略

核心电气设备的自动化控制要针对光伏逆变器、风电变流器、储能充放电装置等关键设备，设计精准的控制逻辑，具体策略如下：（1）光伏逆变器控制策略：采用改进型扰动观察法与电导增量法结合的复合MPPT控制，通过实时采集光伏阵列输出电压与电流，动态调整扰动步长——当功率变化率大于阈值时，采用大步长快速追踪最大功率点；当接近最大功率点时，切换为小步长避免功率振荡，同时引入温度与光照强度前馈补偿，减少环境参数突变对追踪精度的影响。在并网模式下，逆变器采用电压外环、电流内环的双闭环控制，外环根据电网电压指令调整参考电流，内环通过比例谐振控制器抑制谐波，确保输出电流与电网电压同频同相。（2）风电变流器控制策略：针对双馈感应风力发电机，变流器采用转子侧与网侧分开控制的策略。转子侧变流器通过矢量控制技术，将定子磁链定向为d轴，实现有功功率与无功功率的解耦控制，根据风速信号调整转子电流频率，控制发电机转速跟踪最优叶尖速比，最大化风能捕获效率；网侧变流器采用电压定向控制，维持直流母线电压稳定，同时控制输入功率因数，实现单位功率因数运行或按需调节无功输出。针对直驱永磁风力发电机，变流器采用全功率变换拓扑，通过定子侧矢量控制直接调节输出功率，配合转速闭环控制，确保不同风速下的功率平稳输出。（3）储能装置控制策略：储能系统采用基于SOC（State of Charge）的分段式充放电控制，根据电池实时SOC值划分不同控制区间——当SOC低于20%时，启动恒流充电模式，避免大电流损伤电池；当SOC处于20%-80%时，采用恒功率充电模式，提升充电效率；当SOC高于80%时，切换为恒压充电模式，防止过充。放电过程中，根据系统功率需求与SOC阈值，采用下垂控制或主从控制：下垂控制通过设定电压-功率、频率-功率下垂系数，实现多储能单元的自主功率分配；主从控制由主控制器统一计算各储能单元的充放电功率指令，从控制器执行指令并反馈运行状态，确保储能系统与发电、负荷的功率匹配。

#### 3.2 新能源发电并网环节电气自动化控制策略

并网环节的控制要围绕电压频率同步、电能质量优化、安全保护等核心目标，设计闭环控制策略，具体如下：（1）并网同步控制策略：采用基于锁相环（PLL）的同步控制，通过dq变换将电网三相电压转换为同步旋转坐标系下的直流量，提取电压相位与频率信息。针对电网电压畸变场景，采用双二阶广义积分器（DSOGI）锁相环，抑制谐波与负序分量干扰，提高相位检测精度；在并网合闸前，通过预同步控制调节逆变器输出电压的幅值、频率与相位，使并网开关两侧电压差值满足小于 $\pm 5\%$ 额定电压、频率差值小于 $\pm 0.2\text{Hz}$ 、相位差小于 $\pm 5^\circ$ 的条件，避免合闸冲击电流。并网后，采用下垂控制模拟同步发电机的频率-功率、电压-无功特性，当电网频率或电压波动时，自动调整输出功率，参与电网调频调压。（2）电能质量优化控制策略：针对新能源发电产生的谐波问题，采用基于瞬时无功功率理论的谐波抑制策略，通过检测负载电流中的谐波分量，生成与谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流指令，由并网逆变器或并联有源电力滤波器输出补偿电流，抵消谐波电流对电网的影响，确保并网电流总谐波畸变率（THD）低于5%。针对无功功率补偿，采用电压-无功下垂控制与功率因数控制结合的策略。（3）孤岛保护控制策略：采用主动式与被动式结合的孤岛检测策略。被动式检测通过监测电网电压幅值、频率、谐波含量、相位突变等参数，当参数超出设定阈值时，判定为孤岛状态并触发保护；主动式检测通过向并网逆变器注入微小的频率或电压扰动，若电网正常，扰动被电网抑制，参数维持稳定；若发生孤岛，扰动会逐渐累积，使频率或电压超出阈值，实现孤岛检测。检测到孤岛后，控制策略立即触发逆变器停机指令，断开并网开关，同时切断储能系统向负荷的供电，防止孤岛运行对检修人员与设备造成安全隐患。

#### 3.3 多能互补新能源发电系统的协同控制策略

多能互补系统要通过协同控制实现不同能源单元的功率平衡与效率优化，围绕功率分配、动态响应、调度优化等维度，设计分层协同控制策略，具体如下：（1）功率分配协同控制策略：采用“上层调度-下层执行”的分层控制架构。上层调度控制器基于短期负荷预测与各能源单元出力特性，建立以“综合发电成本最低、弃风弃光率最低”为目标的优化模型，通过线性规划或粒子群优化算法，计算光伏、风电、储能的目标出力值：当负荷较低且新能源出力充足时，增加储能充电功率，减少弃能；当负荷较高且新能源出力不足时，增加储能放电功率，补充供电缺口。下层执行控制器根据上层指

令,采用分布式控制方式,光伏逆变器跟踪目标有功功率,风电变流器调整转速以匹配目标出力,储能装置通过充放电电流闭环控制,精准跟踪目标功率,确保各单元出力与调度指令一致。(2)动态响应协同控制策略:针对新能源出力骤变或负荷突变的动态场景,采用“快速补偿-渐进调整”的协同策略。当检测到光伏出力因云层遮挡骤降或负荷骤增时,首先触发储能系统的快速响应控制,通过增大放电电流,补偿功率缺口,防止系统频率或电压大幅波动;风电系统通过变桨距角快速调节,调整风能捕获量,辅助平衡功率。待系统状态稳定后,启动渐进调整策略,上层调度控制器重新优化功率分配方案,逐步将储能功率恢复至正常水平,风电、光伏出力调整至新的目标值,实现系统从动态过渡到稳态的平稳切换。(3)运行模式协同控制策略:根据系统运行场景,设计模式自适应协同控制。并网运行时,系统以“跟踪电网调度指令、参与电网辅助服务”为目标,多能源单元按上层调度指令分配功率,储能系统配合电网进行调频调压;离网运行时,系统切换为“负荷优先供给”模式,由储能系统作为主电源维持母线电压与频率稳定,光伏、风电按最大出力运行,多余功率存储于储能装置,不足功率由储能补充;并网/离网切换时,采用无缝切换控制,切换前通过预同步控制调节离网模式下的母线电压、频率与电网参数一致<sup>[3]</sup>。

#### 4 电气自动化控制系统的硬件架构与软件实现

##### 4.1 控制器核心硬件选型

硬件架构以控制器为核心,需结合系统控制精度、响应速度与环境适应性选型。PLC适用于逻辑控制场景,抗干扰能力强、扩展性好,可满足多设备联动需求;DSP侧重数字信号处理,运算速度快,适配复杂控制算法的实时运算及功率调节等高精度场景;FPGA凭借并行处理能力,实现高频次信号采集与快速控制响应,适用于高实时性场合。同时需搭配电压、电流传感器及执行器,保障硬件系统的信号采集与控制指令执行能力。

##### 4.2 控制算法的软件编程与仿真平台搭建

软件实现先完成控制算法编程,采用C语言、MATLAB脚本等,将MPPT、并网同步等控制逻辑转化为可执行代码,确保与硬件适配。仿真平台以MATLAB/Simulink为核心,构建包含发电单元、控制器、电网的系统模型,设置不同工况参数模拟实际运行。通过仿真验证代码可行性、优化算法参数,减少实际调试成本,为硬件调试提供基础。

##### 4.3 数据采集与通信网络设计

数据采集模块选取高精度、高采样率采集卡,实时获取电压、电流、功率及设备状态数据,保障数据准确与及时。通信网络采用分层设计,底层用RS485、CAN总线实现设备短距离数据交互,上层通过以太网或4G/5G模块完成远程数据传输与监控。同时设置数据校验与容错机制,保障通信稳定,实现控制系统对新能源发电系统运行状态的实时监测与远程调控<sup>[4]</sup>。

结束语:本文系统完成新能源发电系统电气自动化控制策略研究,明确了系统电气特性与控制需求,梳理了相关基础理论,提出了核心设备、并网环节及多能互补系统的控制策略,并给出软硬件实现方案。研究成果可有效提升系统稳定性、高效性与并网兼容性。未来可进一步优化控制算法,结合人工智能技术提升系统自适应能力,同时加强与电网调度的协同,为新能源发电系统高质量发展提供更全面的技术支持。

##### 参考文献

- [1]王建鹏.新能源发电系统的电气自动化控制策略研究[J].电气技术与经济,2025(3):342-344+351.
- [2]张振.新能源接入下电气系统自动化稳定性优化策略[J].消费电子,2025(15):113-115.
- [3]高岩.新能源电力系统自动化控制技术创新[J].消费电子,2025(20):92-94.
- [4]荆六保,刘月强,刘景伟.新能源电力系统的稳定性分析与控制策略[J].现代工业工程,2025(4):16-18.