[自适应]

新能源场站主动支撑电网的自适应控制技术

文/李勇　刘儒超　达瓦索朗　王垢光
华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司新能源分公司

介绍新能源场站主动支撑系统的功能需求、总体架构设计、自适应控制策略、系统实现方案与工程应用效果。自适应控制方式在频率调节准确度与电压调节准确度等关键性能指标上较传统控制方式实现了显著提升。新能源场站主动支撑电网的自适应控制技术为大规模新能源并网提供可靠灵活的解决方案，对促进新能源消纳与保障电网安全稳定运行具有重要意义。

新能源出力波动性强，致使电力系统频率承受较大波动风险。大规模新能源集中并网引发局部电网电压波动频繁，影响电能质量。基于电网安全稳定运行需求，新能源场站应具备主动支撑电网的能力。主动支撑系统采用自适应控制策略，在不同工况下动态调整控制参数，确保频率响应与电压支撑效果。同时，通过多目标协调控制，实现频率与电压的协同优化。实际工程应用表明，自适应控制方式在频率调节准确度与电压调节准确度等关键性能指标上实现显著提升。

新能源场站主动支撑系统设计

1. 新能源场站主动支撑的功能需求分析

随着新能源并网规模持续扩大，电网频率与电压的稳定性问题日益突出。传统同步机组占比下降导致系统惯量降低，加之新能源出力波动性强，致使电力系统频率承受较大波动风险。同时，大规模新能源集中式并网引发局部电网电压波动频繁，影响电能质量。基于电网安全稳定运行的需求，新能源场站应具备对电网频率偏差与电压波动的快速主动支撑能力。频率响应要求新能源场站通过有功功率调节实现虚拟惯量与一次调频功能，响应时间需小于2 s。电压支撑要求场站能够迅速调节无功功率输出，将并网点电压保持在额定电压的97%～107%范围内。新能源场站还应具备自适应控制能力，根据电网运行状态动态调整支撑策略与控制参数，确保在各种工况下均能提供合适的支撑作用。

2. 主动支撑系统的总体架构设计

主动支撑系统采用集中控制与分散控制相结合的层级架构，场站级层面配置综合管理终端，负责监测并网点频率与电压的变化，计算有功与无功功率的目标值，实现多目标协调控制；设备级层面由风机控制器或光伏逆变器执行功率调节指令，完成实际的支撑动作。

系统架构包含快速采集单元、控制策略单元与执行控制单元三大功能模块。快速采集单元实时获取场站并网点的电压电流信息，计算频率与频率变化率等控制参量；控制策略单元根据采集的数据动态生成控制指令，包括虚拟惯量控制、一次调频控制与电压调节控制等多个子模块；执行控制单元接收控制指令并转化为设备的功率调节指令，同时具备AGC/AVC功能的协调处理能力。系统各功能单元间通过快速通信网络实现数据交互，确保控制指令的及时传递与执行。

自适应控制策略

1. 频率响应的自适应控制方法

新能源场站的频率响应过程需要根据电网频率变化进行快速功率调节，基于频率-有功特性的自适应控制策略将频率响应划分为虚拟惯性响应与一次调频响应两个阶段，实现对频率扰动的快速支撑。虚拟惯性响应阶段通过跟踪频率变化率调节功率输出，抑制频率快速变化；一次调频响应阶段则根据频率偏差的大小进行功率补偿，将频率拉回目标区间。图1所示的控制框图展示了这一自适应控制过程。

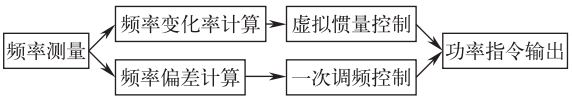

图1　频率−有功自适应控制框图

图1采用双闭环结构实现频率响应控制，外环通过频率变化率反馈实现虚拟惯量控制，当频率变化率超过预设阈值时，根据变化率大小动态调整功率输出增量，模拟同步机组的转动惯量特性；内环基于频率偏差实现一次调频控制，采用自适应下垂系数进行功率补偿，下垂系数随频率偏差动态变化，偏差越大补偿越强。双闭环结构在保证控制稳定性的同时，通过自适应参数调整提高了响应速度，实现对电网频率的快速有效支撑。

2. 电压支撑的自适应控制方法

新能源场站的电压支撑需要合理设计电压-无功特性曲线，实现无功功率的自适应调节，基于电压控制死区范围，将电压-无功特性划分为正常运行区、电压越限区与极限运行区三个区域，在不同区域采用差异化的控制策略，电压在正常运行区时保持当前无功输出，进入越限区后按照自适应斜率调节无功功率，到达极限区时输出最大无功容量。图2所示的特性曲线展示了无功调节的分区控制策略。

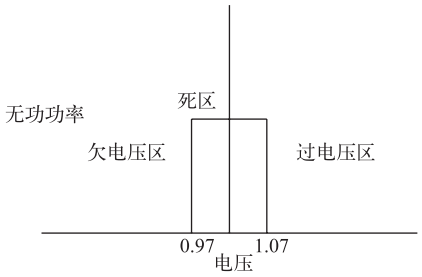

图2　电压−无功特性曲线

图2的分区控制策略实现无功功率的自适应调节，在标称电压0.97～1.07范围内设置死区，避免频繁调节造成系统振荡，当电压超出死区时，无功调节系数随偏差增大而增大，体现自适应特性。电压偏差越大，调节越强，有效抑制电压波动，特性曲线的斜率反映了无功调节的灵敏度，可根据并网点短路容量动态优化，曲线两端的水平段代表系统极限运行区域，表明场站达到最大无功调节能力，该分区控制策略通过动态调整无功响应特性，实现电压支撑能力的自适应优化。

3. 控制参数的自适应优化

控制参数的自适应优化需满足以下约束条件

$$\min J=\sum\left(\alpha\cdot\Delta P^2+\beta\cdot\Delta Q^2\right) \tag{1}$$

$$\text{s.t.}0.97U_n\leqslant U\leqslant 1.07U_n \tag{2}$$

$$\left|\Delta P\right|\leqslant\Delta P_{\max} \tag{3}$$

$$\left|\Delta Q\right|\leqslant\Delta Q_{\max} \tag{4}$$

$$\mathrm{d}f/\mathrm{d}t\leqslant 1\mathrm{Hz}/s \tag{5}$$

$$49.5\mathrm{Hz}\leqslant f\leqslant 50.5\mathrm{Hz} \tag{6}$$

式中，J为目标函数，α、β为权重系数，ΔP、ΔQ分别为有功与无功功率调整量；U_n为额定电压、U为母线电压；$\Delta P_{\max}$与$\Delta Q_{\max}$分别为最大允许有功与无功调整量；f为系统频率。

参数自适应优化基于电网运行状态动态调整控制参数，频率响应参数优化主要针对虚拟惯量时间常数与调频系数，通过最小化频率偏差与功率波动实现，电压支撑参数优化主要针对前馈控制增益与PI控制参数，基于电压恢复时间与超调量进行动态优化，优化过程引入自适应法则，根据系统响应特性实时更新参数值，有效提升控制性能[3]。参数优化过程考虑了多个运行约束，确保系统稳定运行。通过参数自适应优化，提高了新能源场站对电网扰动的适应能力。

4. 多目标协调控制策略

多目标协调控制策略通过统一协调框架，实现频率响应与电压支撑的协同配合，在频率与电压同时越限的情况下，基于功率裕度动态分配有功与无功输出，协调控制策略将控制目标分为频率稳定与电压稳定两个层次，采用分层递进方式完成功率分配。频率控制作为基础层，维持电网频率稳定，电压控制作为上层，在保证频率响应的基础上实现电

压支撑，如图3所示的协调控制框图展示多目标协调控制的实现过程。

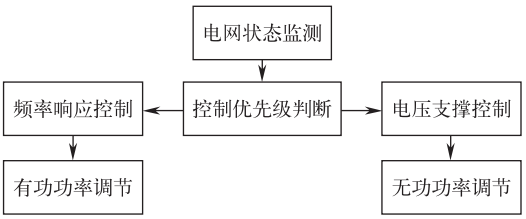

图3　多目标协调控制框图

图3展示的协调控制结构实现了控制目标的分层优化，电网状态监测模块实时获取频率与电压信息，基于偏差程度确定控制优先级，当频率偏差为主导因素时，优先保证频率响应控制，有功功率调节占用较大裕度，当电压偏差为主导因素时，优先保证电压支撑控制，无功功率调节占用较大裕度，控制优先级判断模块根据频率偏差与电压偏差的相对大小，动态调整有功与无功的分配比例，实现功率的协调优化。该协调控制策略充分利用新能源场站的调节能力，在保证系统稳定运行的同时，提高主动支撑的整体效果。

系统实现与工程应用

1. 硬件系统实现方案

硬件系统采用分层分布式架构，由场站级综合管理终端、设备级控制终端与数据采集单元组成。场站级综合管理终端基于工业服务器平台搭建，配置双冗余处理器与电源模块，运行Linux实时操作系统，负责电网状态监测与控制策略运算，设备级控制终端采用嵌入式处理器，集成DSP与FPGA，实现快速功率调节控制，数据采集单元由高准确度电压互感器、电流互感器与频率采集装置构成，采样频率达到5 kHz，各级设备间通过光纤环网互联，采用IEC 61850通信规约，实现数据的快速交互。系统配置时钟同步服务器，为全站设备提供统一时标，主控室设置工程师站与操作员站，配备大屏可视化系统，实现场站运行状态监视与人机交互功能，同时设置后台数据服务器，存储历史运行数据，支持离线分析与算法优化。

2. 软件功能实现

软件系统采用模块化设计，包含实时数据处理、状态监测、控制策略、功率调节与人机交互五大功能模块，实时数据处理模块对采集的电压电流数据进行滤波处理与频率计算，实现电网状态量的快速提取，状态监测模块基于电压电流有效值与频率变化率判断系统运行状态，触发相应的控制策略，控制策略模块包含虚拟惯量控制、一次调频控制与电压支撑控制三个子模块，通过参数自适应优化实现动态调节，功率调节模块负责功率指令的分解与下发，确保各控制设备协调运行。人机交互模块提供场站运行工况显示、控制参数整定与历史数据查询等功能，软件开发采用C++语言，控制策略算法采用实时线程执行，采样周期2 ms，控制周期20 ms，确保快速响应性能，系统配置数据采用XML格式存储，支持在线参数修改与策略调整。

3. 工程应用效果分析

主动支撑控制系统在某99 MW风电场投入运行，实际运行工况下对自适应控制策略的控制效果进行评估，通过持续监测频率响应与电压支撑等关键指标，分析系统在正常运行状态与故障扰动下的动态性能。为体现自适应控制算法的优势，采用同等电网条件与运行环境，对比分析传统控制方式与自适应控制方式的支撑效果。两种控制方式下的性能指标对比数据见表1。

表1　传统控制方式与自适应控制方式性能指标对比

性能指标	传统控制方式	自适应控制方式	性能提升率（%）
频率响应时间/s	1.85	0.36	80.5
频率调节精度/Hz	±0.15	±0.03	80.0
频率超调量（%）	12.5	2.8	77.6
电压响应时间/s	2.35	0.50	78.7
电压调节精度（%）	±0.85	±0.20	76.5
功率波动率（%）	8.5	2.3	72.9

数据显示，自适应控制方式较传统控制方式在各项性能指标上均实现显著提升。在频率响应方面，响应时间从1.85 s降至0.36 s，调节精度提高了80%；在电压支撑方面，响应时间缩短至0.5 s以内，调节准确度提升至±0.2%，功率波动率降低至2.3%，表明系统运行得更加平稳。频率与电压超调量大幅降低，反映出自适应控制策略在系统稳定性方面的优势。数据对比结果验证自适应控制算法在提升新能源场站主动支撑能力方面的技术效果，为大规模新能源并网提供可靠的控制方案。EA

（收稿日期：2025-06-28）