

DRSCS自动化闭环控制方案

针对地市局提出的“分布式光伏大批量接入导致倒送电（反向出力）、线路和变压器功率过载及电压越限”等核心痛点，结合科研任务分解要求，我为你设计了一套**高渗透率分布式新能源接入下“源-网-荷-储”协同监控与自动化闭环控制技术**方案。

该方案贯穿“多源感知预测 → 三级承载力动态计算 → 多时间尺度分级预警 → 边云协同闭环控制”全流程，具备高可靠性、高实时性与工程可落地性。

一、总体方案架构

系统采用“**四层三纵**”的边缘计算与云端协同架构，实现从数据采集、算法分析到现场控制的秒级/分钟级闭环。



4. 物理设备与感知执行层

- 光伏逆变器 - 储能PCS - 柔性负荷/开关 - 拓扑节点测量仪（智能电表/TTU）

架构分层职责

- 物理设备与感知执行层：**包含分布式光伏逆变器、储能变流器（PCS）、智能开关及台区终端（TTU）。支持接收边缘终端下发的限幅、充放电或跳闸指令。
- 边缘智能预警控制终端层：**部署于10kV线路干线、分支节点及关键台区。集成低功耗嵌入式芯片，具备本地数据预处理、秒级风险识别与直接闭环控制能力，防止通信中断导致失控。
- 核心算法与预测平台层：**依托电力局部署的云平台，集成时空图神经网络（STGCN）、三级承载力推演与多源预测模型，负责中长期规划与分钟级控制调度。
- 业务应用与管控决策层：**对接SCADA/DMS系统，提供全景监控、预警展示、容量开放评估与防过载闭环管理可视化。

二、核心子系统设计与工程实现

1. 多源数据融合与多时间尺度功率预测子系统

为解决源荷双侧波动性叠加及异构数据噪声问题：

- 数据清洗与特征提取：**
 - 针对SCADA与智能电表采集数据，采用 **3 σ 准则** 剔除功率异常值，通过线性插值补充缺失项，并采用 **Z-Score 标准化** 统一数据量纲。
 - 采用 **主成分分析（PCA）** 降低多源气象（光照、温度、湿度）与历史出力的特征维度。
- 多时间尺度差异化建模：**
 - 超短期预测（15min级）：**采用 **GRU（门控循环单元）子模型**，实时输入高频气象及逆变器状态数据，保障预测实时性。
 - 短期预测（小时/日级）：**采用 **LSTM-XGBoost 组合模型**，融合中长期气象预报与历史时序特征，学习潮流趋势。

- 节点功率预测：**基于 **STGCN（时空图卷积神经网络）**，将配电网拓扑抽象为图结构。通过图卷积（GCN）捕捉物理拓扑的空间相关性，结合时间卷积（TCN）捕捉功率演化的时序关联，输出各节点的有功/无功预测值。

2. “变电站-线路-台区”三级动态承载力计算子系统

传统方法多依赖静态经验评估，无法适应高渗透率下的反向潮流变化。本方案建立 **三级联动动态模型**：

变电站级（区域限额：主变反向过载约束）

└─ 线路级（干线限额：热稳定热极限 & 节点电压上限约束）

└─ 台区级（用户限额：配变过载 & 低压越限约束）

- 计算机制：**

- 静态基础模型：**采用牛顿-拉夫逊法/PQ分解法求解节点潮流，获得网损、电压与支路功率的理论映射。
- 动态滑动窗口修正：**引入滑动时间窗口，结合实时SCADA潮流与超短期预测数据，实时更新各节点可接纳的新能源最大容量 $P_{HC,max}$ 。

- 反向出力传递机理：**量化台区光伏倒送给线路、线路倒送给主变时的电压抬升量，将电压上限（例如 **1.07 p.u.**）与线路允许载流量（ I_{max} ）作为硬约束反推临界接入容量。

3. 多时间尺度分级预警与自动化控制子系统

构建“**日级规划-分钟级调节-秒级应急响应**”的三级联动防过载机制：

预警与控制策略表

风险等级	触发条件（多指标融合）	对应时间尺度	自动化控制与响应逻辑
黄色（一般风险）	线路负载率 $70\% \leq \eta < 85\%$ 或 节点电压 $V \geq 1.05 \text{ p.u.}$	日级 / 小时级	提示与预判： 推送告警至主站，输出次日/下一小时光伏出力建议限额，调整分布式储能预充放电计划。
橙色（较严重风险）	线路负载率 $85\% \leq \eta < 98\%$ 或 节点	分钟级	本地平滑控制： 边缘终端向分布式光伏逆变器下发 P-Q 协同

风险等级	触发条件（多指标融合）	对应时间尺度	自动化控制与响应逻辑
	电压 $V \geq 1.07$ p.u.		控制指令，阶梯式执行 逆变器有功限幅 。
红色（紧急风险）	线路负载率 $\eta \geq 98\%$ 或 节点电压 $V \geq 1.10$ p.u.（面临跳闸或烧线）	秒级 / 毫秒级	快速闭环应急： 1. 触发边缘终端本地控制，联动储能 PCS 满功率充电消纳； 2. 柔性切除部分光伏或非关键负荷； 3. 同步上报远程调度中心。

4. 边缘智能预警控制终端（硬件实现）

针对电杆安装与恶劣户外环境要求，研发轻量化边缘终端：

- **硬件架构：**
- **核心控单：** 采用了工业级 ARM 处理器（或 STM32 微控制器），搭载 FreeRTOS 实时操作系统，确保任务调度时延 $< 10\text{ms}$ 。
- **采集与采样：** 配备高精度霍尔电流/电压传感器，交流采样精度达 0.2S 级。
- **通信与隔离：** 支持 4G/5G、LoRa 及 RS485 接口，采用光耦隔离设计以抵御现场强电磁干扰。
- **软件逻辑与边缘计算：**
- 终端内嵌入基于 **LSTM 的轻量化过载风险预测模型** 与 **简化版潮流迭代算法**。
- **离线自主闭环：** 当网络中断时，终端自动切换至本地运行模式，依据硬编码的 $I(t)$ 曲线与 $V(t)$ 极值自主执行逆变器限幅或继电器动作，确保系统防过载“底线不失”。

三、核心算法与数学模型

1. 源荷概率不确定性模型 (Beta/Weibull 分布)

针对光伏出力的随机性，采用 Beta 分布建模光伏功率的概率密度函数：

$$f(P_{PV}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{PV}}{P_{PV,max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{PV}}{P_{PV,max}} \right)^{\beta-1}$$

其中 α 和 β 为形状参数，由历史气象与辐射度数据拟合确定。通过 Copula 函数构建“光伏-风电-负荷”的联合概率分布，量化源荷双侧波动的非线性协同关系。

2. 配电网节点功率预测 (STGCN 模型)

将配电网拓扑抽象为无向图 $G = (V, E, A)$ ， V 为节点集合， E 为线路集合， A 为邻接矩阵。

空间图卷积操作定义为：

$$Z = \sigma \left(\sum_{k=0}^{K-1} \theta_k T_k(\tilde{L}) X \right)$$

其中 $\tilde{L} = \frac{2}{\lambda_{max}} L - I_N$ 为拉普拉斯矩阵的标准化形式， T_k 为切比雪夫多项式， X 为历史节点功率特征。STGCN 结合时间卷积模块 (TCN)，实现高精度的节点功率预判。

3. 动态承载力计算与防过载优化模型

以区域内光伏允许接入总量最大化为目标函数：

$$\max \sum_{i \in \Omega_{PV}} P_{PV,i}$$

约束条件：

1. 潮流平衡约束：

$$P_{G,i} + P_{PV,i} - P_{L,i} = V_i \sum_{j \in \Omega} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

2. 线路热稳定极限约束（防过载核心）：

$$I_l^2 = \frac{P_l^2 + Q_l^2}{V_i^2} \leq I_{l,max}^2, \quad \forall l \in \Omega_{Line}$$

3. 节点电压上限约束（防反向抬升）：

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max}, \quad \forall i \in \Omega_{Node}$$

4. 节点过载风险演化模型 (LSTM 时间序列)

采用滑动窗口分析风险的“潜在-累积-爆发”阶段。风险值 $R(t) \in [0, 1]$ 建模为：

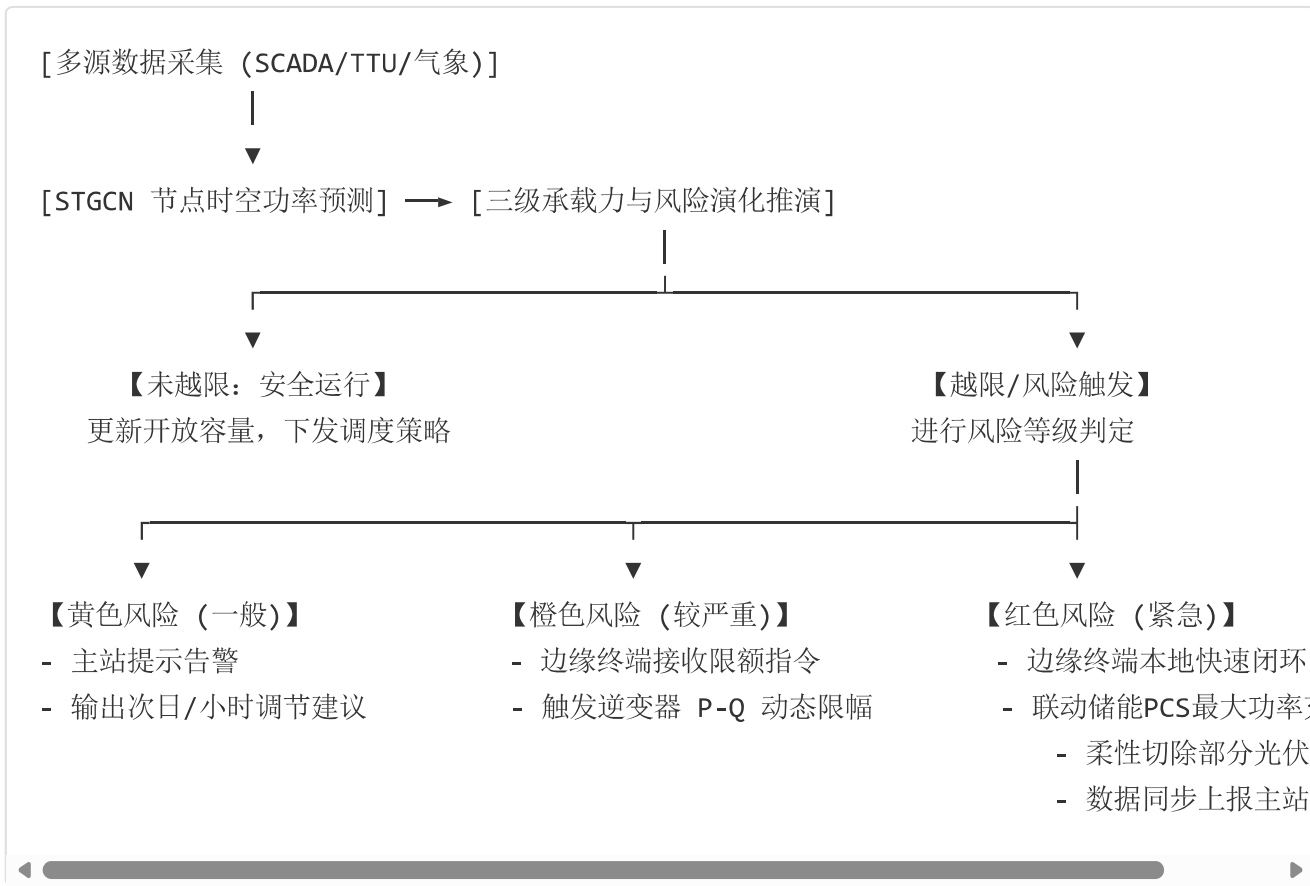
$$R(t) = \sigma(\mathbf{W}_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f)$$

特征向量 $x_t = \left[\frac{P_{\text{line}}(t)}{P_{\text{rated}}}, \frac{dP_{\text{line}}}{dt}, \Delta V_i(t), \frac{P_{\text{PV}}(t)}{P_{\text{Load}}(t)} \right]^T$ 。

- 当 $R(t) < 0.3$ 时，处于**潜在期**（绿色）；
- 当 $0.3 \leq R(t) < 0.7$ 且 $\frac{dR}{dt} > 0$ 时，处于**累积期**（黄色/橙色）；
- 当 $R(t) \geq 0.7$ 时，进入**爆发期**（红色），毫秒级触发边缘响应。

四、部署与闭环管控工作流程

全流程的闭环运行逻辑如下：



- 感知与预测：**终端与主站实时同步电参量，主站 STGCN 模型按 15 分钟周期滚动预测全网节点功率。
- 承载力评估与风险识别：**结合潮流计算，实时推演反向功率传输下的线路负载率 η 。当检测到倒送功率超过干线临界阈值时，触发预警。

3. **协同控制执行**：根据预警等级，依次触发云端调度建议、边缘端逆变器平滑限幅或毫秒级储能/开关切除控制，确保线路潮流迅速回归安全区间内。
-

五、 方案特色与工程落地价值

1. **防过载控制时延极低**：将传统“数据上传-云端分析-指令下发”的时延（数十秒级）缩短至“边缘感知-本地控制”的**秒级/毫秒级**，有效避免过载导致的设备损坏或保护误动。
2. **高容错性与离线自主性**：基于FreeRTOS的智能控制终端在通信中断时仍可依靠本地算法防范过载风险，极大提升高可靠性。
3. **精准分级，减少无谓弃光**：打破传统的“一刀切”硬切光伏模式，优先通过储能消纳和逆变器动态限幅降低反向功率，兼顾配电网安全运行与新能源的高效消纳。