

# 基于强化学习的电网调度优化与新能源消纳能力提升策略

陈思颖 李静然 卞锦豪

西安市物联网应用实验室 陕西西安 710000

**摘要:** 本文聚焦基于强化学习的电网调度优化与新能源消纳能力提升。分析了强化学习原理与电网调度适配性, 构建了电网调度优化模型, 设计状态、动作空间及奖励函数。提出将新能源发电预测与强化学习结合, 协同调度储能系统等提升新能源消纳能力的策略。通过案例分析与实验验证, 对比不同调度策略, 结果表明强化学习能有效优化电网调度, 提升新能源消纳水平, 为电网安全稳定运行提供技术支持。

**关键词:** 强化学习; 电网调度; 新能源消纳; 模型构建; 储能系统

## 引言

### (1) 电网调度现状

传统电网调度主要依赖人工经验和基于规则的调度方法, 在应对复杂多变的电网工况时, 存在一定局限性。例如, 在面对大规模新能源接入时, 由于新能源发电具有间歇性、波动性和随机性等特点, 传统调度方法难以精准平衡电力供需, 易导致电网频率和电压波动, 影响电网的安全稳定运行。

当前电网调度系统需要处理海量的实时数据, 包括发电侧的各类机组运行状态、负荷侧的用户用电信息以及电网拓扑结构等。这些数据来源广泛、格式多样, 且更新速度快, 传统调度系统在数据处理和分析能力上逐渐力不从心, 难以充分挖掘数据背后的潜在价值, 无法实现对电网运行状态的精准感知和预测。

### (2) 新能源消纳面临的挑战

近年来, 新能源发电技术取得了显著进展, 风电、光伏等新能源装机容量快速增长。然而, 新能源消纳问题却日益凸显。一方面, 新能源发电的间歇性和波动性使得其出力难以准确预测, 与常规电源的出力特性存在较大差异, 导致电网调度难度大幅增加。当新能源发电过剩时, 若不能及时消纳, 将造成弃风、弃光现象, 浪费宝贵的能源资源; 当新能源发电不足时, 又需要依赖常规电源进行补充, 增加了电网的调峰压力。

另一方面, 电网基础设施建设相对滞后, 部分地区的电网网架结构薄弱, 输电能力有限, 无法满足新能源大规模外送的需求。此外, 电力市场机制不完善, 新能源发电在市场竞争中的竞争力不足, 也制约了新能源的消纳。

### (3) 强化学习在电网调度中的潜力

强化学习作为一种智能决策方法, 具有自主学习、适应性强等优点, 为电网调度优化和新能源消纳能力提升提供了新的思路。强化学习通过智能体与环境的交互, 不断试错并学习最优策略, 能够根据电网的实时运行状态和新能源发电情况, 动态调整调度决策, 实现电力供需的精准平衡。

在处理复杂电网调度问题时, 强化学习可以充分利用海量的实时数据, 挖掘数据中的潜在规律, 提高调度决策的科学性和准确性。例如, 通过对历史数据的学习, 强化学习模型可以预测新能源发电的出力变化趋势, 提前制定调度策略, 减少弃风、弃光现象的发生。

## 1 强化学习基础与电网调度适配性分析

### 1.1 强化学习基本原理

强化学习是一种通过智能体与环境交互来学习最优策略的机器学习方法。其核心思想是智能体根据当前环境状态选择动作, 环境根据动作产生新的状态并给予智能体相应的奖励或惩罚。智能体的目标是通过不断试错, 学习到一个策略, 使得在长期交互过程中获得的累计奖励最大化。

在强化学习框架中, 状态空间描述了环境可能处于的所有状态, 动作空间定义了智能体可以执行的所有动作, 奖励函数则衡量了智能体在特定状态下执行特定动作的好坏。智能体通过感知环境状态, 选择动作并观察环境反馈的奖励, 逐步调整自身的策略, 以适应环境的变化。

### 1.2 电网调度场景的复杂性

电网调度是一个涉及多目标、多约束的复杂决策问题。它需要在满足电力供需平衡、保证电网安全稳定运行的前提

下,优化发电成本、减少环境污染、提高新能源消纳能力等。电网调度需要处理海量的实时数据,包括发电侧的机组运行状态、负荷侧的用电需求、电网拓扑结构以及新能源发电的预测信息等。

电网调度还具有实时性要求高的特点。电网运行状态时刻在变化,调度决策需要快速响应这些变化,以确保电网的安全稳定运行。此外,电网调度还面临着诸多不确定性因素,如新能源发电的间歇性和波动性、负荷需求的随机性等,这些不确定性因素增加了电网调度的难度。

### 1.3 强化学习在电网调度中的适配性

强化学习在处理复杂决策问题上具有独特优势,其自主学习和适应环境变化的能力与电网调度的需求高度契合。在电网调度场景中,可以将电网运行状态视为环境状态,将调度决策视为智能体的动作,将调度效果视为环境反馈的奖励。通过构建合适的状态空间、动作空间和奖励函数,强化学习可以学习到最优的调度策略,以应对电网调度的复杂性和不确定性。

例如,可以将电网的频率、电压、潮流等运行参数作为状态空间,将发电机组的出力调整、负荷的切减、储能系统的充放电等作为动作空间,将电网的运行成本、新能源消纳量、电网安全稳定性等作为奖励函数。通过强化学习,智能体可以学习到在不同电网运行状态下,应该采取何种调度决策,以实现电网的经济、安全、稳定运行。

强化学习与电网调度的结合,为解决电网调度面临的复杂问题提供了新的思路和方法。通过充分利用强化学习的优势,可以提升电网调度的智能化水平,提高新能源消纳能力,推动电网向更加清洁、高效、智能的方向发展。

## 2 基于强化学习的电网调度优化模型构建

### 2.1 状态空间设计

电网调度优化模型的状态空间需全面反映系统运行特征。首先纳入实时电参数,包括各节点电压幅值、相角及频率偏差,这些参数直接关联电网安全稳定边界。其次整合电源侧信息,涵盖常规机组出力、爬坡速率及备用容量,同时嵌入新能源发电功率预测值及其置信区间。负荷侧需区分不同电压等级的用电负荷,并考虑可中断负荷的调节潜力。电网拓扑信息通过节点导纳矩阵抽象表达,结合线路热稳极限与潮流分布构建约束条件。状态空间采用分层架构,将全局状态分解为区域子状态,降低维度同时保留关键拓扑关联性。

### 2.2 动作空间定义

调度指令集构成模型的动作空间,覆盖发电机组有功无功调节、无功补偿设备投切、变压器分接头调整三类基础操作。针对新能源消纳需求,增设储能系统充放电控制与需求响应资源调用指令。所有动作均设定物理执行边界:机组调节速率不超过技术铭牌值,储能系统遵循SOC(荷电状态)约束,需求响应调用量不超过事前申报容量。动作空间采用离散化编码,将连续调节量转化为有限个决策选项,通过动作掩码机制屏蔽不可行操作,确保调度指令的物理可执行性。

### 2.3 奖励函数构建

多目标优化需求驱动复合奖励函数设计。经济性指标以发电成本为核心,计入燃料费用与启停成本,通过分时电价系数反映市场信号。安全性指标构建电压越限惩罚项与频率偏移惩罚项,采用分段线性函数放大越限程度。新能源消纳指标设计弃电惩罚项,权重系数动态调整以平衡保供与消纳目标。为引导平滑调节,增设动作幅度惩罚项,抑制调度指令的剧烈波动。所有奖励分量通过归一化处理消除量纲差异,总奖励值为各分量加权,权重参数根据运行场景进行离线整定。

### 2.4 模型训练方法

采用基于历史运行数据的离线训练与在线微调结合模式。数据预处理阶段对SCADA量测数据进行质量校核,填补缺失值并过滤异常数据。训练过程构建仿真环境,模拟电网动态响应特性,采用经验回放机制打破数据时序关联。探索策略采用 $\epsilon$ -greedy方法,探索率随训练进程动态衰减。为提升训练稳定性,引入目标网络技术分离训练与决策网络参数更新。模型性能通过多场景测试集验证,涵盖典型日负荷曲线、新能源大发/欠发极端工况,根据验证结果调整网络结构与超参数,形成闭环优化流程。

## 3 提升新能源消纳能力的强化学习策略

### 3.1 新能源发电预测与调度策略协同

针对新能源发电的间歇性特征,构建双时间尺度预测-决策架构。短期预测模块采用LSTM神经网络,结合数值天气预报数据与历史发电曲线,实现未来4小时发电功率的滚动预测,预测误差控制在8%以内。超短期预测依托实时量测数据,利用卡尔曼滤波算法修正功率预测值,更新周期缩短至15分钟。预测结果直接输入强化学习调度模型,作为状态空间的重要组成部分,引导调度策略向高新能源渗透率

方向偏移。

### 3.2 储能系统与电网调度的协同控制

建立储能系统参与电网调度的数学模型，定义充放电效率、循环寿命等物理约束。在强化学习动作空间中增设储能控制指令集，包含充放电功率指令及 SOC 状态反馈。设计动态奖励子项，对储能系统削峰填谷贡献度进行量化评价，当储能调节量覆盖新能源功率波动幅值的 60% 以上时给予额外奖励。通过历史数据训练，模型可自主判断储能系统的最佳介入时机，在新能源大发时段优先充电，负荷高峰时段精准放电。

### 3.3 需求响应资源整合策略

构建可中断负荷资源池，将工业大用户、电动汽车充电桩纳入可控负荷范畴。设计分级响应机制，根据负荷重要性划分响应优先级，在电网紧急状态下按序调用。将用户参与意愿、补偿电价等市场因素量化为状态变量，强化学习模型通过学习历史响应数据，动态调整需求响应调用策略。实验表明，合理配置需求响应资源可使区域电网新能源消纳能力提升 12%–15%。

### 3.4 多时间尺度协调控制机制

建立日内调度 - 实时调度的双层优化框架。日内调度层以 15 分钟为周期，基于新能源超短期预测制定基础调度计划，重点解决机组组合与备用配置问题。实时调度层执行周期缩短至 5 分钟，强化学习模型根据最新量测数据微调调度指令，重点处理新能源功率波动与负荷突变。通过时间尺度解耦，在保证计算效率的同时，将新能源功率波动对电网的影响降低至 3% 以下。

### 3.5 极端工况应对策略

针对新能源出力骤降、线路过载等极端场景，设计应急响应动作集。在状态空间中嵌入安全裕度指标，当系统接近稳定极限时触发紧急控制模式。强化学习模型通过预置的专家规则库进行快速决策，优先执行切机、切负荷等保护性动作，待系统恢复稳定后，再通过价值函数引导回归经济调度模式。历史案例回放测试证实，该策略可使系统在 95% 的极端工况下保持稳定运行。

## 4 案例分析与实验验证

### 4.1 实验环境搭建

选取某省级电网作为研究对象，构建包含火电、水电、风电、光伏的多元电源结构仿真模型。实验数据采用该电网

夏季大负荷时段连续 7 日的运行数据，时间分辨率 15 分钟。搭建基于 OpenAI Gym 框架的电网调度仿真环境，集成潮流计算模块与安全约束校验功能。实验设置三组对比策略：传统基于规则的调度策略、考虑新能源预测的改进调度策略、本文提出的强化学习调度策略。

### 4.2 调度效果对比分析

在新能源消纳能力维度，强化学习策略日均弃风弃光率较传统策略降低 9.2%，较改进策略降低 4.7%。在调度经济性方面，强化学习策略日均运行成本减少 12.8 万元，主要得益于机组启停次数减少与爬坡率优化。电网安全指标显示，强化学习策略使线路过载次数下降 63%，电压合格率提升至 99.2%。特别在新能源大发时段，强化学习模型通过储能系统与需求响应的协同控制，成功化解了 3 次潜在的功率越限风险。

### 4.3 模型泛化能力验证

为检验模型适应性，设计极端场景测试集：包括新能源出力骤降 50%、联络线故障退出、连续高温负荷激增等工况。实验结果表明，在未参与训练的测试场景中，模型仍能保持 85% 以上的策略有效性，证明其具备跨场景迁移能力。通过在线增量学习机制，模型可在 24 小时内完成对新场景的特征提取与策略适配。

## 5 结论与展望

本文构建的基于强化学习的电网调度优化模型，通过状态空间重构与多目标奖励函数设计，实现了调度策略的自主优化。实验证明，该模型可提升新能源消纳能力 9% 以上，降低运行成本 12%，显著改善电网安全指标。模型展现的跨场景适应性与在线学习能力，为解决电网调度复杂性提供了新路径。

后续研究将聚焦三方面：一是拓展模型在特高压交直流混联电网的应用场景；二是探索多智能体强化学习架构在区域电网协同调度中的应用；三是融合数字孪生技术，构建电网调度策略的虚实交互验证平台。最终目标是构建具备自进化能力的智能电网调度决策系统，支撑新型电力系统建设。

### 参考文献：

- [1] 梁志鹏. 智能配电网自动化应用实践的几点探析 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 自然科学, 2018(6):00085–00085.
- [2] 刘江. 城市 10kV 配网规划建设探析 [J]. 中文科技期

刊数据库 (全文版) 工程技术 ,2016(11):00267-00267.

[3] 陈得荣 . 基于智能电网的配电自动化建设 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术 ,2017(6):00036-00036.

[4] 赖建文 . 探讨智能配电网自动化技术及其应用 [J]. 中

国科技期刊数据库 工业 A,2020(9):00437-00438.

**作者简介:** 陈思颖(2006—),女,苗族,贵州省黔西南州,本科生,研究方向为数据科学与大数据技术。