

智能电网中的分布式电源接入与优化调度研究

张志宇 纪霞霞

广东金晖隆电气股份有限公司，广东汕头，515000；

摘要：随着全球清洁能源需求的持续激增，分布式电源在智能电网中的应用呈现爆发式增长态势。本文聚焦分布式电源接入智能电网的核心技术瓶颈与运行管理难题，从电压稳定性、电能质量、继电保护适配性等多维度系统剖析其对电网的影响机理，构建涵盖经济性、环保性与供电可靠性的多目标优化调度模型，通过对比遗传算法、粒子群优化等多种算法的适配性能，提出改进型混合优化策略。结合某工业园区微网工程案例，验证了所提模型与算法的有效性，可为分布式电源规模化接入背景下的电网安全稳定运行提供系统性解决方案与技术支持。

关键词：智能电网；分布式电源；混合算法

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.012

1 引言

1.1 研究背景与意义

在当前全球能源结构转型的背景下，高比例的化石能源消耗导致了碳排放量的增加和全球气温的上升。清洁能源的替代已成为广泛共识，分布式发电系统的装机容量迅速增长，特别是在中国，光伏装机容量的增长尤为迅猛。智能电网技术为清洁能源的高效利用提供了重要平台，尽管它能够减少能源损耗并提高能源使用效率，但其固有的随机性和间歇性也给电网的稳定运行带来了挑战。因此，研究清洁能源的接入和调度策略对于实现碳达峰和碳中和目标以及保障电网的安全稳定运行具有重要的理论和实践意义。

1.2 国内外研究现状

国际上，美国2001年启动相关研究计划，建首个全分布式电源微网测试平台，下垂控制技术提升孤网稳定性40%；欧盟资助项目在德国建成混合微网，可再生能源消纳率92%。国内2010年前后起步，近年突破显著，如苏州示范区将电压偏差控制在±2%内，浙江园区应用协同调度系统降本18%、减碳23%，但在集群控制等领域与国际仍有差距。

1.3 研究内容与方法

本研究致力于探讨三个核心议题：首先，分析分布式电源并网对配电网电压稳定性的影响，并构建相应的评估体系；其次，构建一个多目标鲁棒性优化调度模型，该模型将考虑风能和太阳能发电的不确定性；最后，对比传统优化算法与智能算法的性能，并提出一种改进的

遗传算法。研究方法遵循“理论建模-仿真验证-工程测试”的三阶段研究框架，旨在从理论到实践的不同维度进行深入研究验证。

2 分布式电源概述

2.1 定义与分类

根据GB/T33593-2017《分布式电源并网技术要求》，分布式电源指位于用户侧，以10kV及以下电压等级接入，单并网点装机容量不超过6MW的发电设施。按能源类型可分为三大类：

可再生能源类：

太阳能光伏：采用晶体硅组件（转换效率18-23%），出力受辐照度影响显著——正午时刻出力可达额定值的90%，阴雨天则降至10%以下。

小型风电：主要采用水平轴风机（单机容量10-500kW），切入风速3-4m/s，额定风速10-15m/s，在风速骤变时出力波动可达50%/min。

生物质能：包括秸秆直燃发电（效率20-25%）、沼气发电（效率30-35%），原料收集半径通常不超过50km以控制成本。

化石能源类：

微型燃气轮机：功率范围30-500kW，发电效率25-35%，若实现热电联产总效率可达80%以上，启动时间约5-10分钟。

柴油发电机：应急备用电源，功率10-2000kW，运行成本约0.8-1.2元/kWh，碳排放强度约2.6kgCO₂e/kWh。

燃料电池：氢燃料电池发电效率40-60%，近零排放，

但氢气储运成本占总运营成本的60%以上。

储能类:

电化学储能: 锂电池(能量密度150-300Wh/kg, 循环寿命1000-3000次)、铅酸电池(成本低但寿命短)。

超级电容器: 功率密度可达1000-5000W/kg, 充放电时间以秒级计, 适用于抑制高频波动。

2.2 核心特点

与传统集中式电站相比, 分布式电源呈现“四性”特征:

空间分散性: 80%的分布式电源接入配电网末梢, 形成“点多面广”的布局, 某地级市配电网接入的分布式电源超过1.2万个并网点。

出力波动性: 光伏日出力曲线呈单峰特性(正午达峰), 风电则具有随机性, 某风电场15分钟内出力最大波动达额定值的40%。

控制灵活性: 微型燃气轮机可实现10%/min的爬坡率, 储能系统响应时间小于100ms, 具备快速调节能力。

经济适配性: 投资回收期约5-8年(光伏), 度电成本0.3-0.5元(风光), 低于电网平均购电价格。

2.3 在智能电网中的作用

分布式电源是智能电网的“活性元素”, 其作用体现

表1 分布式电源接入对电网的主要影响及量化指标

影响类型	具体表现	量化指标	治理措施
电压偏差	配电网末端电压升高	5MW 光伏接入时超额定值 6.7%	配置 SVG 无功补偿设备
电压波动	风电出力波动引发电压波动	Pst 值达 1.2 (国标限值 1.0)	加装储能平抑波动
谐波污染	逆变器产生 3 次、5 次谐波	20 台并联时 THD=8.3% (国标 5%)	安装有源滤波器
三相不平衡	单相接入导致电流偏差	不平衡度达 25% (国标 10%)	动态三相平衡装置
短路电流变化	保护误动	10kV 线路短路电流从 1.2kA 增至 1.8kA	自适应保护整定值
电压稳定裕度下降	高渗透率下易引发电压崩溃	渗透率 50% 时裕度从 25% 降至 12%	配置 STATCOM 设备

4 分布式电源接入关键技术

4.1 拓扑结构设计的分类

在拓扑结构设计领域, 存在三种主要的网络布局模式。放射式拓扑结构因其成本低廉而特别适用于农村地区, 但其可靠性相对较差; 环网式拓扑结构则因其高可靠性成为城市核心区的首选, 尽管其成本较高; 微网式拓扑结构则因其出色的稳定性, 特别适合海岛和工业园区的应用。在选择拓扑结构时, 应遵循与负荷密度、电

在:

能源结构转型: 2023年中国分布式电源发电量占比达8.7%, 替代标准煤约2.3亿吨, 减少碳排放5.6亿吨。

供电可靠性提升: 在台风“利奇马”期间, 浙江某海岛微网依靠分布式电源实现连续供电, 较传统电网减少停电28小时。

电网运行优化: 江苏某工业园区通过分布式电源就地消纳, 使配电网线损率从6.2%降至4.8%, 年节电120万kWh。

电力市场创新: 广东试点分布式电源参与现货市场交易, 某企业通过峰谷套利年增收超50万元。

3 分布式电源接入对智能电网的影响

分布式电源接入对电网的影响主要体现在两方面。电压与电能质量上, 渗透率超30%时末端电压升高, 5MW光伏接入使正午电压超额定值6.7%; 风电导致电压波动超标, 影响生产; 多台光伏逆变器并联谐波叠加, 缩短变压器寿命; 农村单相接入造成三相不平衡, 增加电机损耗。继电保护与稳定性上, 故障电流变化致保护误动; 保护范围收缩延长故障切除时间; 大扰动下电源脱网加剧功率失衡; 高渗透率时电压稳定裕度下降, 需配置无功设备。

源类型及可靠性要求相匹配的原则。

4.2 并网控制技术的分类

在并网控制技术领域, V/F控制技术是确保微网在孤网状态下稳定运行的关键技术; PQ控制技术作为并网操作的主流方案, 以其高调节精度而著称; 下垂控制技术则实现了多电源系统中功率的自主分配; VSG控制技术则通过提升电网惯量, 有效改善了电网在故障状态下的表现。

表 2 并网控制技术性能对比

控制技术	适用场景	核心参数指标	优势	局限性
V/F 控制	微网孤岛运行	频率波动 < 0.5Hz (负荷突变 50%)	无需通信, 独立维持电压频率	并网时需切换控制模式
PQ 控制	并网运行	无功响应时间 < 100ms	有功 / 无功解耦调节, 精度高	对电网扰动敏感
下垂控制	多电源并联	功率分配误差 3% (优化后)	自主协同, 扩展性强	存在稳态误差
VSG 控制	高渗透率电网	惯性时间常数 2-5s	提升电网惯量, 故障适应性好	控制算法复杂

4.3 保护与通信技术的分类

在保护与通信技术领域, 双重保护配置技术通过提高正确率来确保系统的安全性; 混合通信网络技术满足了实时控制的需求; 电力专用加密芯片技术则能够抵御大多数网络攻击, 保障了电力系统的安全稳定运行。

5 优化调度模型构建

5.1 目标函数

经济性目标:

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^{24} [C_{\text{gen}}(t) + C_{\text{grid}}(t) + C_{\text{storage}}(t) + C_{\text{loss}}(t)]$$

其中:

$C_{\text{gen}}(t)$: 燃气轮机燃料成本 (0.5 元/kWh)

$C_{\text{grid}}(t)$: 购电成本 (峰段 0.8 元/kWh, 谷段 0.4 元/kWh)

$C_{\text{storage}}(t)$: 储能折旧成本 (0.12 元/kWh)

$C_{\text{loss}}(t)$: 网损成本 (0.3 元/kWh)

环保性目标:

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^{24} [E_{\text{gas}}(t) \times 0.2 + E_{\text{grid}}(t) \times 0.15]$$

(单位: 元) 其中燃气轮机碳排放系数 0.6kgCO₂ / kWh, 电网平均碳排放系数 0.5kgCO₂ / kWh。

可靠性目标:

$$\max F_3 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{24} P_{\text{loss}}(t) \times \Delta t}{\sum_{t=1}^{24} P_{\text{load}}(t) \times \Delta t}$$

(供电可靠率)

5.2 约束条件

功率平衡约束:

$$P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{gas}}(t) + P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{disch}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{ch}}(t) + P_{\text{loss}}(t)$$

设备约束:

光伏: $0 \leq P_{\text{pv}}(t) \leq P_{\text{pv,max}}(t)$ (受辐照度限制)

风电: $0 \leq P_{\text{wind}}(t) \leq P_{\text{wind,max}}(t)$ (受风速限制)

燃气轮机: $0 \leq P_{\text{gas},N} \leq P_{\text{gas}}(t) \leq P_{\text{gas},N}$, 爬坡率 $\leq 1\text{MW/h}$

储能: $\text{SOC}_{\text{min}} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\text{max}}$ (20%–80%), 充放电功率 $\leq 0.5\text{MW}$

电网约束:

电压: $0.95U_N \leq U(t) \leq 1.05U_N$

线路功率: $P_{\text{line}}(t) \leq 0.8P_{\text{line},N}$ (留 20%裕度)

6 优化调度算法研究

6.1 传统优化算法

线性规划: 适用于简化模型, 某案例采用单纯形法求解, 计算时间 0.1s, 但未考虑网损非线性特性, 优化结果偏差约 5%。

非线性规划: 采用内点法处理网损非线性, 某系统优化精度提升至 2%, 但计算时间增至 1.5s, 难以满足实时调度需求。

6.2 智能优化算法

遗传算法: 全局搜索能力强, 某项目采用实数编码, 交叉概率 0.7, 变异概率 0.01, 迭代 50 次收敛, 成本优化率 12%。

粒子群优化: 收敛速度快, 参数设置为: 惯性权重 0.7, 学习因子 2.0, 迭代 30 次即可接近最优解, 但易陷入局部最优 (约 8%概率)。

模拟退火: 初始温度 1000K, 降温系数 0.95, 能跳出局部最优, 某案例优化结果较遗传算法优 3%, 但计算时间增加 2 倍。

蚁群算法: 鲁棒性强, 信息挥发系数 0.1, 启发因子 2.0, 适用于路径优化, 但在多目标场景下收敛慢。

6.3 算法改进

提出遗传-粒子群混合算法：
前期用粒子群算法快速搜索（迭代20次）

后期用遗传算法精细寻优（交叉概率自适应调整：
0.4-0.9）
测试表明，混合算法计算时间1.2s，优化效果较单一算法提升5-8%，在风光波动场景下稳定性更优。

表3 不同优化算法性能对比

算法类型	求解时间	成本优化率	全局寻优能力	适用场景
线性规划	0.1s	5%	弱	简化线性模型
非线性规划	1.5s	8%	中	小规模非线性问题
遗传算法	2.3s	12%	强	多目标复杂问题
粒子群优化	1.8s	10%	中	快速收敛场景
模拟退火	4.5s	15%	强	避免局部最优需求
遗传-粒子群混合	1.2s	18%	强	风光波动场景

7 案例分析

7.1 案例背景

某省级工业园区（负荷特性：早8点-晚8点为高峰，约8MW；凌晨为低谷，约3MW）接入：

- 5MW 光伏（效率19%）
- 3MW 风电（切入风速3.5m/s）
- 2MW 燃气轮机（热电联产）
- 1MW·h 锂电池储能（充放电效率90%/85%）

7.2 优化结果

采用改进遗传算法调度，典型日优化结果：

高峰时段（10:00-12:00）：光伏出力4.5MW，风电1.2MW，燃气轮机满发2MW，储能放电0.5MW，购电0.8MW，满足8MW负荷需求。

平段（14:00-16:00）：光伏5MW，风电2MW，多余电量为储能充电0.5MW，购电0。

低谷（2:00-4:00）：风光出力0，储能放电0.3MW，购电2.7MW，燃气轮机停机。

7.3 效益分析

与传统调度对比：

经济性：日运行成本从1.2万元降至1.02万元，降幅15%

环保性：日碳排放从8.5吨降至6.8吨，减幅20%

技术性：电压偏差从±7%收窄至±3%，频率波动≤0.2Hz

8 结论与展望

研究结论：分布式电源的并网对电力系统产生了深远的影响，尤其在高渗透率条件下，特定的设备配置成为必要。三种主要的网络拓扑结构各有其适用的场景。通过构建多目标优化模型并结合改进的算法，可以有效地降低系统成本、减少碳排放并增强系统的稳定性。案例分析验证了该优化策略的有效性。

未来展望：在技术层面，应致力于开发集群控制技术以提升分布式电源的管理效率；在算法研究方面，深度学习技术的引入有望进一步优化控制策略；在应用领域，探索分布式电源参与辅助服务市场，将有助于其在电力系统中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1]程站立. 计及分布式电源的配电网潮流计算及其无功优化研究[D]. 西南交通大学, 2011. DOI: 10.7666/d.y1957580.
- [2]苟宝宝. 分布式电源节能调度的优化模型研究[J]. 电工电气, 2010(12): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2010.12.002.
- [3]崔弘. 智能电网中分布式电源的优化配置[J]. 电气应用, 2013(11): 2.
- [4]蒲涓浩. 基于多目标优化的智能电网分布式电源规划布局研究[C]//人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集. 2025.
- [5]杨鹏. 分布式电源在配电网接入点及容量决策的优化运行研究[D]. 湖南大学, 2015.