

电力系统无功优化调度算法研究

曾相波 511528198601256812

摘要: 电力系统无功优化调度是保障电网安全稳定运行、降低网络有功损耗、提升供电电压质量的核心环节。随着新能源发电并网规模持续扩大，电网运行结构与负荷波动特性发生显著变化，传统无功调度算法的适应性不足问题逐渐凸显。本文梳理了电力系统无功优化调度的基本模型，对比分析了传统优化算法与智能优化算法的应用特性，探讨了当前算法应用中存在的收敛稳定性与全局寻优能力不足问题，最后对无功优化调度算法的未来发展方向进行展望，为高比例新能源电网背景下的无功优化调度提供参考。

关键词: 电力系统；无功优化；调度算法；新能源并网

一、电力系统无功优化调度的内涵与模型构建

电力系统无功优化调度的核心目标，是在满足系统各类运行约束的前提下，通过调整发电机端电压、可调无功补偿容量、有载调压变压器分接头位置等可控变量，实现系统有功网损最小、电压偏差最小等预定优化目标。相较于有功调度主要关注功率供需平衡，无功调度更侧重于电压质量与运行经济性的协同，合理的无功配置能够就地平衡无功功率，减少远距离无功传输带来的有功损耗，同时避免电压越限引发的电网安全事故。

从数学模型来看，电力系统无功优化属于带约束条件的非线性多目标优化问题，其基本构成包含目标函数、约束条件两个核心部分。第一，目标函数层面，当前主流的优化目标以降低有功网损为主，可表示为系统各支路有功损耗的最小值，部分场景下也会将电压偏差、无功调节成本纳入目标函数，形成多目标优化模型。第二，约束条件层面，主要分为等式约束与不等式约束两类：等式约束主要对应系统的功率平衡方程，即每个节点的有功功率、无功功率输入输出满足功率守恒；不等式约束则涵盖各类控制变量与状态变量的运行边界，比如发电机无功出力上下限、节点电压幅值上下限、变压器分接头可调范围、无功补偿装置容量限制等，所有约束条件必须同时满足才能保证优化方案的工程可行性。

二、主流无功优化调度算法对比分析

当前电力系统无功优化调度算法主要分为传统优化算法与智能优化算法两大类，两类算法在不同电网场景中表现出不同的适配性。

（一）传统优化算法

传统优化算法中应用最为广泛的包括非线性规划法、线性规划法与二次规划法。非线性规划法是较早应用于无功优化的算法，能够直接处理无功优化问题的非线性特性，其中梯度法、牛顿法是典型代表，这类算法依托精确的数学模型推导，收敛速度较快，在小规模电网的无功优化中计算精度较高。但非线性规划法存在明显缺陷：一是对初始值的依赖性较强，初始点选择不当容易陷入局部最优解；二是当电网规模扩大、约束条件增多时，算法的计算复杂度会大幅提升，难以满足大电网实时调度的需求。线性规划法的核心思路是将非线性的无功优化问题在当前运行点进行线性化处理，将原问题转化为线性规划模型求解，该方法计算速度快、收敛性稳定，适合在线无功调度应用，但线性化过程会带来一定的模型误差，优化结果的精度受近似处理影响较大。二次规划法将目标函数处理为二次型，约束条件保持线性，结合了非线性规划与线性规划的优势，在处理中小规模无功优化问题时精度与速度都较为均衡，但同样难以适配高维度、强非线性的现代大电网优化问题。

（二）智能优化算法

随着人工智能技术的发展，以遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法为代表的智能优化算法逐渐成为无功优化领域的研究热点。这类算法不依赖问题的数学梯度信息，对目标函数的连续性、可导性没有严格要求，能够有效处理强非线性、多峰值的无功优化问题，更容易跳出局部最优解获得全局最优结果。

遗传算法通过模拟生物进化过程中的选择、交叉、变异操作实现寻优，具有较强的全局搜索能力，对初始种群没有严格要求，适合处理离散变量与连续变量混合的无功优化问题。但遗传算法也存在明显不足：一是算法参数（交叉概率、变异概率）的选择对优化结果影响较大，参数调试难度较高；二是后期收敛速度较慢，容易出现早熟收敛问题，难以获得精度很高的最优解。粒子群算法通过模拟鸟群觅食过程中的群体协作行为寻优，相较于遗传算法，粒子群算法的参数更少、实现更简单，收敛速度更快，在电力系统无功优化中得到了广泛应用。但标准粒子群算法同样存在易陷入局部最优、种群多样性后期衰减较快的问题，在高维大电网优化中稳定性不足。模拟退火算法基于热力学退火原理，能够以一定概率接受较差解，因此具有较强的跳出局部最优的能力，全局寻优性能优异，但模拟退火算法的收敛速度很慢，计算时间随问题规模扩大显著增加，难以满足在线调度的实时性要求。

为了弥补单一智能算法的缺陷，当前不少研究提出了混合优化算法，比如将粒子群算法与遗传算法的交叉变异操作结合，或者将传统牛顿法与智能算法结合，

发挥不同算法的优势：先用智能算法进行全局搜索，获得接近最优解的初始点，再用传统算法进行局部精确搜索，既保证了全局寻优能力，又提升了优化结果的精度与收敛速度，这类混合算法已经在多个实际电网的无功优化案例中验证了有效性。

三、当前算法应用存在的主要问题

尽管无功优化调度算法已经取得了大量研究成果，但在高比例新能源并网的新型电力系统背景下，现有算法仍然存在不少需要解决的问题。第一，不确定性处理能力不足，风电、光伏等新能源发电受自然条件影响，出力具有较强的随机性与波动性，传统确定性无功优化模型难以适配这种不确定特性，如何构建考虑概率分布、场景波动的鲁棒无功优化模型，对算法的适应性提出了更高要求。第二，大电网多区域协同优化的计算效率不足，当前省级电网甚至跨区大电网的节点规模已经达到数千甚至数万级别，现有智能算法在处理这种高维问题时，计算时间较长，难以满足实时调度的需求。第三，算法的工程落地性不足，不少改进算法停留在仿真验证阶段，对工程实际中的设备调节约束、调度运行规则考虑不足，优化结果往往难以直接应用于实际电网调度。

四、无功优化调度算法的发展方向展望

结合新型电力系统的发展需求，未来电力系统无功优化调度算法的发展主要围绕三个方向：一是结合机器学习的不确定性优化，依托大数据技术对新能源出力与负荷波动进行概率预测，将预测结果融入无功优化模型，结合强化学习算法实现动态无功优化调度，提升算法对不确定性的适应能力；二是多尺度分层分布式优化，将大电网按照电压等级或区域划分为多个子系统，采用分布式优化算法实现分层协同求解，降低单个子系统的计算维度，提升整体计算效率，满足大电网实时调度需求；三是算法的工程化适配，结合电网实际运行的调控规则与设备约束，优化算法的编码方式与寻优流程，开发能够直接对接现有调度系统的无功优化模块，推动研究成果的落地应用。

参考文献

- [1] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 清华大学出版社, 2007.
- [2] 颜佑清, 李庚银. 电力系统无功优化的研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 1-9.
- [3] 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安交通大学出版社, 2000.

