

基于灰狼优化算法和二阶锥规划的配电网源储双层优化配置

黄 煌,文 亮,刘佳乐*,袁 博,刘 凯

(国网江西省电力有限公司宜春供电分公司,江西 宜春 336000)

摘 要:文中探讨了分布式能源(distributed energy, DG)和储能系统(energy storage systems, ESS)在配电网中的协同优化情况,以实现经济性和电压质量的双重提升。研究构建了一个双层优化模型,上层优化目标是降低年运营成本和投资成本,包括DG和ESS的费用;下层则专注于减少电网损耗。上层问题通过改进的灰狼优化算法来确定DG和ESS的最优容量,而下层问题则利用二阶锥规划方法,计算ESS的日功率分配和最大输出功率。以某地区10 kV线路为例,证明了该模型和算法的实用性,结果显示该方法能够显著提高系统的经济性和电压水平。

关键词:分布式能源;储能;双层优化;改进灰狼算法;二阶锥规划

中图分类号:TM 744 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)06-0010-05

0 引言

随着化石燃料资源的减少和电力消耗的激增,全球能源格局发生变化,迫切需要调整能源结构,促进煤炭等传统能源与新能源的有效融合,推动配电网向实现碳排放峰值和中和的目标迈进。因此,DG和ESS的应用对于实现“双碳”目标至关重要^[1-2]。然而,以风能和光伏为代表的可再生能源存在明显的发电波动特性,其随机性、间歇式出力给电力系统的安全稳定运行带来了严峻考验^[3]。ESS可以提高系统的灵活调节能力,具备快速调节功率和储存电能的特点,能够有效增强DG的就地消纳能力,平抑可再生能源发电带来的波动^[4]。

关于DG在配电网中的最优位置选择和容量分配问题,全球的学者和专家进行了广泛的研究,积累了众多有价值的学术成果。文献[5]提出了一种组合框架,用于承载大量光伏和负载的有源配电网络进行配电网络扩展规划和储能系统分配,通过优化电网扩展、加固现有线路和储能系统配置,确保可靠运行并减少电网损失;文献[6]提出了一种计及净负荷最优

可接纳域的配电网电源规划模型,以一种无需0/1变量的线性化计算新方法简化可靠性成本计算,以应对高比例可再生能源接入带来的不确定性挑战;文献[7]提出了一种针对电动汽车充电换电站和主动配电网的协调规划优化策略,其中包括分布式发电,通过应用时空负载预测方法,建立了数学规划模型,以确定新充电换电站的位置和大小、最佳网络拓扑及所需分布式电源和变电站容量;文献[8]提出一种成本最优的配电网扩展规划方法,结合传统资产和需求响应的灵活性,通过基于现实的大规模城市网络模型案例进行研究,结果表明,采用负荷灵活性与常规加固相结合的方式,可使扩建网络总成本降低约7.5%。文中基于DG和ESS规划的特点,对DG和ESS在配电网中的协同优化展开研究。

1 源储双层优化配置模型

1.1 目标函数

1.1.1 上层优化模型

上层优化模型考虑以最小化配电网年综合成本为目标,决策变量为DG和ESS的容量配置^[9]。目标

收稿日期:2025-08-13

作者简介:黄煌(1995),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统的运行与控制。

函数的表达式如下:

$$\min F_{\text{total}} = C_{\text{DG}} + C_{\text{ESS}} + C_{\text{BUY}} + C_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

式中: C_{DG} 表示 DG 年投资和运行成本; C_{ESS} 表示 ESS 年投资和运行成本; C_{BUY} 表示购电成本; C_{CO_2} 表示碳排放成本。

1.1.2 下层优化模型

下层优化模型则考虑以最小化配电网年网损量为目标, 决策变量为 ESS 的日调度计划^[10-12]。目标函数的表达式如下:

$$\min F_{\text{loss}} = 365 \sum_{i=1}^{24} \sum_{j \in \Omega} I_{ij,t}^2 R_{ij} \Delta t \quad (2)$$

式中: Ω 表示配电系统所有支路集合; $I_{ij,t}$ 表示在 t 时刻支路 ij 的电流幅值; R_{ij} 表示支路 ij 的电阻阻值。

1.2 约束条件

1.2.1 上层优化模型约束

上层优化模型的约束条件主要包括 DG 的容量约束和 ESS 的安装容量约束。通过对 DG 和 ESS 的容量计算进行精确的约束设置, 上层优化模型既可以确保系统高效运行, 又能满足各种安全标准。

1.2.2 下层优化模型约束

下层优化模型的约束条件主要包括功率平衡约束、支路潮流约束、节点电压约束、支路电流约束、ESS 的充放电功率约束以及荷电状态约束。通过设置这些约束条件, 双层优化模型能够在满足经济性的同时, 确保技术性能的最优化。

2 双层规划方法

文中采用了一种双层规划方法, 分别处理 DG 和 ESS 的容量配置, 与 ESS 的日调度策略。

2.1 改进灰狼优化算法

灰狼优化算法 (grey wolf optimization, GWO) 是一种模仿灰狼捕猎行为的智能优化算法, 由格里菲斯大学的 Mirjalili 等学者在 2014 年提出。该算法的灵感来源于灰狼的社会结构和捕食策略, 体现了群体智能在解决优化问题中的应用^[13-15]。

针对 GWO 算法在实际应用中, 可更有效地结合局部搜索与全局搜索能力的问题, 文中采用改进灰狼优化算法 (improved grey wolf optimization, IGWO)。该算法通过对收敛因子与位置更新机制这两个核心环

节进行改进, 旨在提升算法整体的寻优性能。

1) 收敛因子

为了避免传统 GWO 算法因收敛因子线性递减而可能陷入局部最优的问题, 文中采用了一种非线性递减的方法调整收敛因子。这种改进不仅增强了算法在早期阶段的全局搜索能力, 还能在后期有效地细化局部搜索, 从而平衡算法的探索与开发能力, 提高寻找全局最优解的概率。

2) 位置更新机制

文中对位置更新机制进行了深度优化, 引入了新的更新策略。通过引入个体历史极值与社会通信系数的概念, 以及动态调整惯性权重系数, 使算法能够更好地适应复杂多变的优化问题。

2.2 二阶锥规划算法

本研究利用二阶锥规划技术, 对配电网潮流分析中的非线性约束条件进行了线性化改造, 将原本难以处理的非线性问题简化为可利用二阶锥规划解决的形式。

二阶锥规划用于解决带有特定凸锥约束的优化问题。在 n 维空间内, 二阶锥由满足特定二范数限制的变量构成。二阶锥模型转化的具体步骤:

步骤 1: 变量替换。通过用新变量来表示节点电压的平方和线路电流的平方, 能够有效地去除目标函数和约束中的电压和电流的二次项, 即令 $u=U^2$, $i=I^2$ 来减少问题的非线性特征。

步骤 2: 约束条件转化。采用变量替换方法后, 原潮流优化模型中的关键约束条件转变为更易于处理的新形式。经转化后表达式如下:

$$\sum_{j \in \Psi_j} P_{ij,t} = \sum_{k \in \Phi_k} (P_{ki,t} - R_{ki} i_{ki,t}) - P_{i,t} \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \Psi_j} Q_{ij,t} = \sum_{k \in \Phi_k} (Q_{ki,t} - X_{ki} i_{ki,t}) - Q_{i,t} \quad (4)$$

$$u_{j,t} = u_{j,t} - 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) \quad (5)$$

步骤 3: 锥松弛处理。经过变量替换, 约束条件中仍存在二次非线性成分。应用锥松弛处理这些二次非线性约束, 转化过程如下:

综上, 配电网潮流优化问题被转化为二阶锥规划问题, 显著提升了配电网潮流优化的求解速度。

该双层优化模型的求解流程包含以下步骤:

步骤 1: 参数设置。设置配电系统的原始数据, 包括网络结构、负荷需求以及 DG 等相关参数。

步骤2:初始化变量。初始化DG和ESS的容量种群,包括各自的可能容量范围。设置环境变量参数,包括算法的控制参数。

步骤3:设置迭代条件。确定迭代次数的上限,作为算法终止的一个条件。

步骤4:适应度评价。计算当前种群中每个个体的适应度值,适应度函数基于上层模型的目标函数,即配电网的年综合成本最小化,同时考虑ESS的日调度情况,ESS的日调度情况通过调用二阶锥规划计算获得。

步骤5:判断收敛性。检查改进灰狼优化算法是否收敛,如果算法达到预设的收敛条件,或迭代次数达到上限,则输出当前最优的DG和ESS容量配置方案,并终止算法。否则,继续执行后续步骤。

步骤6:更新种群。通过改进灰狼优化算法更新种群。这一步涉及生成新的狼群,计算新的目标函数值,并选择表现最好的灰狼更新所有狼群的位置。在更新后的狼群中,保留那些适应度较高的个体。

步骤7:迭代次数更新。更新迭代次数,并返回步骤4进行新一轮的适应度评价和种群更新。

步骤8:日调度计算。基于步骤4中确定的DG和ESS配置方案,利用二阶锥规划计算ESS的具体日调度策略。计算结果将反馈到步骤4,用于适应度函数的计算。

双层优化模型求解步骤流程图如图1所示。

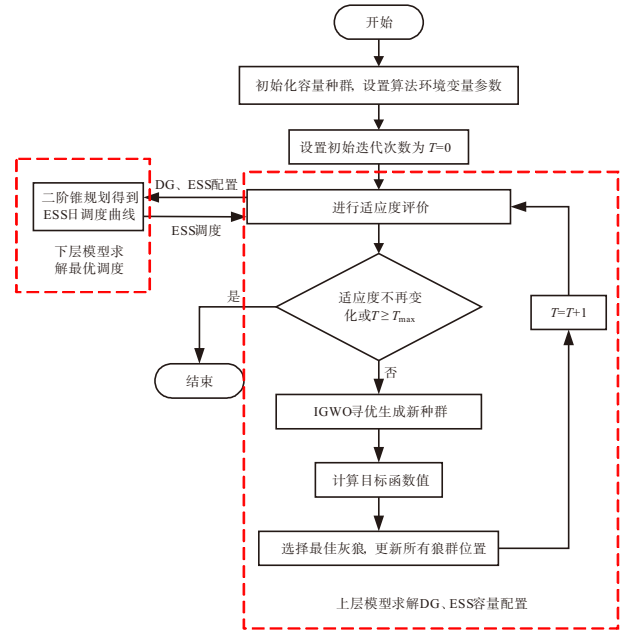


图1 模型求解流程图

3 算例分析

图2所示为宜春地区某10 kV锂电池节点拓扑结构,在节点12处接入光伏,节点10处接入风电,同时把储能接入对应的位置。

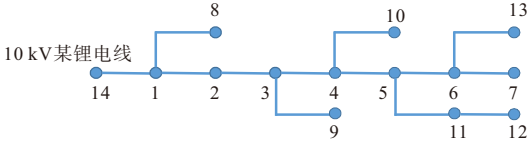


图2 10 kV某锂电池拓扑

计算时,假设全年各季节的分时电价保持不变。DG和ESS的相关参数如表1和表2所示。

表1 DG参数表

参数设置	DG
固定年化率	0.1
使用年限/年	20
单位容量的投资成本/(元/kW)	1700
单位容量的运行成本/(元/kW)	500

表2 ESS参数设置

系数/变量	ESS
固定年化率	0.08
使用年限/年	15
单位容量的投资成本/(元/kW·h)	1270
单位功率的投资成本/(元/kW)	1650
SOC的上下限	0.1-0.9
初始时刻SOC	0.2
充放效率/(%)	90

表3 分布式电源和储能共同配置方案

光伏位置(kW)	风电位置(kW)	储能位置(kW,kW·h)
节点12:159	节点10:206	节点12:96,580 节点10:105,625

为了验证所提出模型和算法的合理性和有效性,文中构建了两种不同的方案,用以对比分析两个主要性能指标:经济效益和电压质量。

方案1:仅考虑DG接入的双层规划模型。

方案2:考虑DG和ESS协同优化的双层规划模型。

1) 经济效益分析

表4 两种方案经济指标对比

目标函数	方案1	方案2
DG年投资和运行成本	25.38	25.38
ESS年投资和运行成本	0	20.16
购电成本	625.64	563.54
碳排放成本	28.48	26.59
总成本	679.58	615.41

通过对表4所示的具体经济指标对比,观察配电网在仅接入分布式电源的双层规划模型中,DG的年投资和运行费用为25.38万元,由于没有ESS的参与,其年投资和运行费用为0。从上级电网购买电力的

成本为625.64万元,碳排放成本为28.48万元。当储能加入配电网之后,虽然ESS的年投资和运行费用增加了20.16万元,但是购电成本从625.64万元减少到543.54万元,降幅为9.92%。碳排放成本也从28.48万元减少到26.59万元,降幅为6.64%。综上所述,通过引入ESS并进行DG与ESS的联合优化,不仅可以优化成本,还能减少环境污染。

2) 电压质量分析

配电系统的电压控制是确保电网稳定运行的关键要素之一。图3展示了仅考虑DG接入的配电系统的电压水平,图4展示了DG与ESS协同优化后的电压水平。在方案1中,即仅考虑DG接入情况下,电网各节点电压水平的最低点位于第12节点,此时的电压幅值标幺值为0.8989 p.u.,电网各节点电压水平的最高点位于第14节点,此时的电压幅值标幺值为1.1240 p.u.;在方案2中,DG与ESS协同作用之下,电网各节点电压水平的最低点位于第8节点,此时的电压幅值标幺值为0.9796 p.u.。电网各节点电压水平的最高点位于第12节点,此时的电压幅值标幺值为1.0250 p.u.。分析得出,方案2下的电压偏差小于方案1,电压波动范围更小。

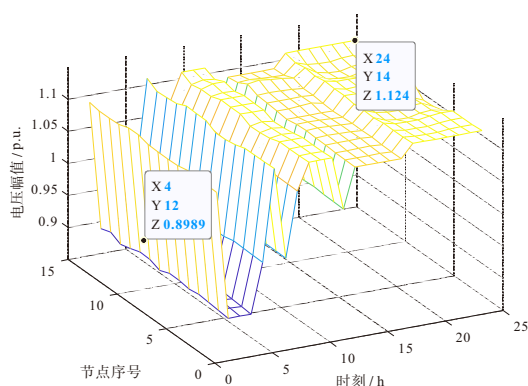


图3 方案1各节点电压水平

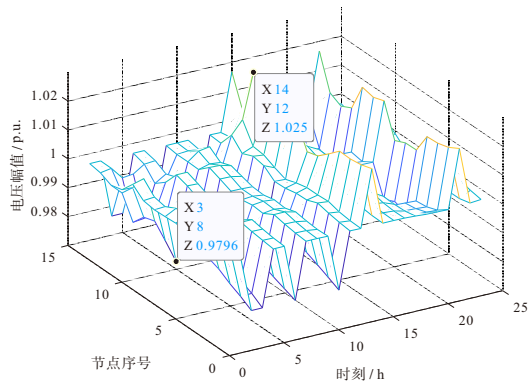


图4 方案2各节点电压水平

为了进一步探究ESS引入对节点电压的具体影响,文中选取节点10为例,评估在DG与ESS联合优化后对电压稳定性的作用。节点10配置ESS前后24 h的电压幅值情况如图5所示,节点10配置ESS前后24 h内的电压波动率如图6所示。通过对比可以发现,在没有配置ESS的情况下,系统在低负荷时电压偏高,而在高负荷时电压偏低,导致电压波动较大。引入ESS之后,节点10的电压稳定性得到了提升。优化之后,该节点的电压基本维持在1.0 p.u.上下,全天的电压波动更加平稳,显著提高了电压质量。

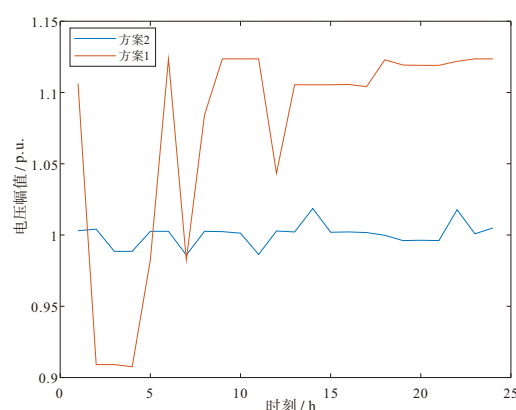


图5 节点10配置ESS前后24小时电压幅值对比

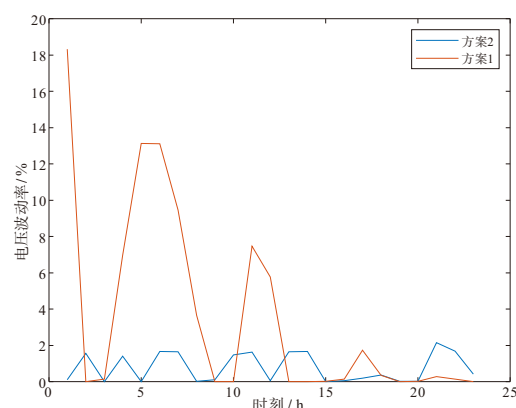


图6 节点10配置ESS前后24小时电压波动率对比

综上所述,对比分析仅接入DG的方案和DG与ESS协同优化的方案,可以看到,后者不仅在经济性上更优,对配电网电压质量的提升也有明显优势,可以有效减轻电网电压低谷和DG输出波动性带来的不利影响,进而提高配电系统的供电可靠性。

4 结语

文中构建了一个双层优化模型,旨在从经济效益

和网损两个维度提高配电网的指标。在上层中,模型以最小化配电网的年度综合成本为目标,兼顾了投资者的长期利益和系统的经济运行,并利用改进的灰狼优化算法来确定 DG 和 ESS 的最优配置。下层模型在顶层经济优化的基础上,进一步减少配电网年损耗。该模型通过二阶锥规划方法求解,以确定 ESS 的日常调度策略。为了验证模型和算法的有效性,文中选择了某地区 10 kV 线路作为案例进行仿真分析。仿真结果证实,DG 与 ESS 的协同优化不仅提高了经济效益,还减少了网络损耗。此外,这种优化还显著提升了电压质量,从而大幅提高了配电网的供电可靠性。

参考文献:

[1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(07):1893-1904.

[2] 李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.

[3] 王晨宇,卢志刚,李彦琳,等.考虑混合储能和需求响应的城市综合能源系统协同规划方法[J].高电压技术,2025,51(01):191-199.

[4] 吴晨曦,倪索引,郑静,等.虑能碳溯源的风储协同调度研究[J].电网与清洁能源,2025,41(02):84-92.

[5] Yi Ji Hyun, Cherkaoui Rachid, Paolone Mario, et al. Expansion planning of active distribution networks achieving their dispatchability via energy storage systems[J]. Applied Energy,

2022,326:119942-119957.

[6] 刘帅,王明强,丁天池,等.考虑净负荷最佳可接纳域的主动配电网电源规划[J].电网技术,2023,47(06):2239-2254.

[7] He Chenke, Zhu Jizhong, Borghetti Alberto, et al. Coordinated planning of charging swapping stations and active distribution network based on EV spatial-temporal load forecasting[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2024,18(06):1184-1204.

[8] Ziegler David Ulrich, Prettico Giuseppe, Mateo Carlos, et al. Methodology for integrating flexibility into realistic large-scale distribution network planning using Tabu search[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023,152:109201-109214.

[9] 郝文斌,孟志高,张勇,等.新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(14):23-33.

[10] 毕皓淳,祁琪,刘向军,等.计及 5G 基站运行协同的分布式储能优化配置方法[J].电工技术学报,2024,39(21):6819-6833.

[11] 柴园园,赵晓波,吕超贤,等.基于 Fisher 时段划分的配电网源-网-荷-储多时间尺度协调优化调控策略[J].电网技术,2024,48(04):1593-1606.

[12] 门茂琛,赵睿,张金帅,等.基于改进模拟退火-粒子群的配电网分布式光伏承载力评估[J].浙江大学学报(工学版),2024,58(06):1255-1265.

[13] 张煜,牟龙华,王蕴敏,等.计及可控负荷动态调节的主动配电网优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(04):104-110.

[14] 刘柳,赵俊勇,马亮.于改进蝴蝶算法的分布式光伏选址定容[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(08):152-158.

[15] 伍峻杭,刘继春,吴沂洋.偏远地区能源自洽系统源储容量协同配置方法[J].电网技术,2024,48(05):2031-2042.