

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108445

基于改进和声搜索算法与二阶锥松弛的储能优化配置

姜宏伟 汪庆年 尚宝 任轩
(南昌大学信息工程学院 南昌 330036)

摘要: 配电网中分布式电源的大量接入加剧了电网功率波动,为稳定电网功率及消纳新能源发电功率,需在电网中合理配置储能。基于双层规划模型将储能配置划分为规划层与运行层,并提出了基于趋向移动的全局和声搜索算法和二阶锥松弛理论相结合的储能优化配置混合算法。规划层采用以储能年投资成本与配电网年运行成本之和最小为目标函数,研究了储能配置位置、功率、容量等方面的经济效益;运行层以电网有功网损以及电压偏移之和最小为目标函数,研究了储能各时段最优充放电功率。基于某地实际数据,以33节点配电网为例进行了仿真分析,研究了不同场景下储能的配置方式以及探讨了本文混合算法的优异性。结果表明所提出的混合算法可以顺利求解该场景下的储能配置问题,证明了该混合算法有效性。同时,探讨了多场景下的储能配置方式,证明采用双层规划模型对储能进行配置有利于降低配电网综合成本。最后,将该混合算法与传统智能优化算法求解此类问题进行了比较分析,证明了该混合算法在求解此类问题上的快速性与准确性。

关键词: 储能系统;双层规划模型;和声搜索算法;二阶锥松弛

中图分类号: TP18;TM734 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

Optimal configuration of energy storage based on improved harmony search algorithm and second-order cone relaxation

Jiang Hongwei Wang Qingnian Shang Bao Ren Xuan
(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330036, China)

Abstract: The large-scale access of distributed power sources in the distribution network aggravates the power fluctuation of the power grid. In order to stabilize the power of the power grid and absorb the power generated by new energy, it is necessary to reasonably allocate energy storage in the power grid. The energy storage configuration is divided into the planning layer and the operation layer based on the two-layer programming model, and a hybrid algorithm for energy storage optimization configuration combining the global harmony search algorithm based on trend movement and the second-order cone relaxation theory is proposed. The planning layer uses the minimum sum of the annual investment cost of energy storage and the annual operating cost of the distribution network as the objective function, and studies the economic benefits of energy storage configuration location, power, capacity, etc. The minimum sum is the objective function, and the optimal charging and discharging power of energy storage in each period is studied. Based on the actual data of a certain place, a 33-node distribution network is taken as an example to conduct a simulation analysis, and the configuration methods of energy storage in different scenarios are studied and the excellence of the hybrid algorithm in this paper is discussed. The results show that the hybrid algorithm proposed can successfully solve the energy storage configuration problem in this scenario, which proves the effectiveness of the hybrid algorithm. At the same time, the energy storage configuration method in multiple scenarios is discussed, and it is proved that the use of the two-tier planning model to configure the energy storage is beneficial to reduce the comprehensive cost of the distribution network. Finally, the hybrid algorithm is compared with the traditional intelligent optimization algorithm to solve such problems, which proves the speed and accuracy of the hybrid algorithm in solving such problems.

Keywords: energy storage system; bi-level programming model; harmony search algorithm; second-order cone relaxation

0 引言

随着电网负荷持续增长,可再生能源的大量接入,加大

了配电网调峰、调压难度^[1]。同时,随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,可再生能源接入比例势必会进一步提高。储能系统尤其是以锂电池为主的电池储能系统,随着其成本

收稿日期:2021-11-25

的逐渐降低,将会在电网中得到更为广泛运用。

近年来,国内外学者针对含可再生能源的配电网中储能优化配置问题展开了一系列研究。针对配电网储能配置,大量学者从不同角度入手对其进行论证。文献[2]针对含有高渗透率可再生能源的配电网,结合广义储能理论,将储能系统、可控负荷等进行统一规划,提出了广义储能配置的双层优化模型。但对虚拟储能可调度容量的研究仍然过于简略。文献[3]针对储能系统运行过程中损耗过快、成本过大的问题,基于对储能寿命循环损耗模型的分析,提出了基于双储能系统的主动配电网储能优化配置方法。但双储能系统实质上增加了成本。文献[4]针对高渗透率光伏接入下主动配电网随机功率波动问题,基于灵活性规划理论,提出一种计及灵活性不足风险的储能优化配置方法。但仅考虑了单一分布式发电装置。

配电网储能规划一直以来都是一个较为困难的问题,不仅其优化模型考虑因素众多、分析困难,而且其模型的求解十分复杂,具有强非凸非线性特点。针对这一问题,学者进行了相应研究。文献[5]基于等效负荷曲线,采用启发式数学方法,产生储能系统充放电策略,再采用遗传算法对该模型进行求解,简化了算法的运行时间,但未考虑储能最优安装位置问题。文献[6]提出了一种混合粒子群算法对含分布式电源的主动配电网进行规划,但未考虑分布式电源功率的随机性。文献[7]针对配电网储能优化规划问题,分别考虑了短期优化与长期优化目标,采用禁忌搜索-粒子群混合算法进行求解,验证了该模型与求解方法的可行性。

同时,随着配电网的进一步发展,电网内含有的各类用电或供电单元也越发多样化,内部实时调度也愈发复杂,其对储能配置也具有较大影响。文献[8]对电动汽车与空调负荷等柔性负荷进行建模分析,构建调度模型,并采用改进粒子群算法进行求解,研究表明该方法有助于提高电网运行的稳定性和安全性。文献[9]基于多微网系统特点,提出了一种基于预测控制的多微网协调控制策略,仿真结果显示采用该方法可有效平滑负荷曲线、降低系统网损、减轻负载波动。

综上所述,本文在充分考虑风光功率以及储能运行策略的前提下,构建了储能配置的双层优化模型,提出了基于趋向移动的全局和声搜索算法(trending mobile global harmony search, TMGHS)与二阶锥松弛(second order cone relaxation, SOCR)的混合求解算法。本文构建了3个不同的配电网场景,并采用混合算法对需进行储能配置的场景进行求解。结果表明本文混合算法可以顺利完成求解工作;配电网中进行储能配置,有利于提高配电网电能质量,使其能安全稳定运行;考虑运行层储能功率实时调度有利于降低配电网综合成本。同时,将本文混合算法与传统智能优化算法求解此类问题进行了比较分析,证明了本文混合算法在求解此类问题上的快速性与准确性。

1 有源配电网储能优化配置模型

在储能配置的研究中,满足系统安全稳定运行条件的前提下,经济因素是最为主要的考虑因素。在满足配电网正常运行的前提下,应当使配电网整体经济最优。因此,本文以储能年投资成本与配电网年运行成本之和最小为规划层目标函数,以配电网节点电压偏移、线路有功损耗之和最小为运行层目标函数。

1.1 规划层模型

1) 目标函数

本文规划层以储能年投资成本与配电网年运行成本之和最小为目标函数。同时,引入量纲统一转换比例系数将电压偏移转换为与线路有功损耗同一量纲的值,以便进行综合运行成本的计算。

$$\min F_1 = C_{invest} + C_{buy} + C_{loss} + C_{\Delta U} - D_1 - D_2 \quad (1)$$

式中: C_{invest} 、 C_{buy} 、 C_{loss} 、 $C_{\Delta U}$ 、 D_1 、 D_2 分别为储能年投资成本、上层主网年购电成本、线路损耗成本、整体节点电压偏移、储能高储低发收益、延缓电网升级改造收益。

$$\left\{ \begin{aligned} C_{invest} &= \frac{\tau(1+\tau)^T}{(1+\tau)^T - 1} (c_p P_{ess} + c_e E_{ess}) \\ C_{buy} &= \sum_{i=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} c_{gd} P_{buy} \\ C_{loss} &= c_{lo} \sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{32} \sum_{t=1}^{24} P_{loss,j,t} \\ C_{\Delta U} &= \mu c_{lo} \sum_{i=1}^{365} \sum_{n=1}^{N_{bus}} \sum_{t=1}^{24} \left| \frac{U_{n,t} - U_N}{U_N} \right| \\ D_1 &= \sum_{i=1}^{365} (c_{price} P_{dch} - c_{price} P_{ch} - c_{cost} \sum_{t=1}^{24} (P_{dch} + P_{ch})) \\ D_2 &= c_{kl} \Delta P_{load} (1 - e^{-i_0 \Delta n}) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: c_p 、 c_e 、 c_{gd} 、 c_{lo} 、 c_{price} 、 c_{cost} 、 c_{kl} 分别为储能单位功率成本、储能单位容量成本、上层电网购电成本、电网损耗成本、电网分时电价、储能单位功率运维成本、配电网单位容量扩容成本; P_{ess} 、 E_{ess} 分别为储能配置功率和容量; P_{buy} 、 $P_{loss,j,t}$ 、 P_{dch} 、 P_{ch} 、 ΔP_{load} 分别为上层电网购电功率、线路 j 在 t 时刻损耗功率、储能吸收功率、储能释放功率、储能接入后减少的峰值负荷; $U_{n,t}$ 、 U_N 分别为 n 节点在 t 时刻节点电压、节点额定电压; τ 为折现率; T 为储能使用寿命; N_{bus} 为节点个数; i_0 为年利率; Δn 为延缓时间; μ 为量纲统一转换比例系数^[10],其值为 500 kW/p. u.。

2) 约束条件

(1) 待选节点安装位置约束

$$1 \leq x_i \leq N_{max} \quad (3)$$

式中: x_i 为第 i 个储能的安装节点位置; N_{max} 为储能安装的最大节点编号。

(2) 储能配置功率和容量约束

$$\begin{aligned} P_{ess}^{\min} &\leq P_{essr} \leq P_{ess}^{\max} \\ E_{ess}^{\min} &\leq E_{essh} \leq E_{ess}^{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: P_{essr} 、 E_{essh} 为储能的安装功率及容量; P_{ess}^{\min} 、 P_{ess}^{\max} 表示储能安装功率上下限; E_{ess}^{\min} 、 E_{ess}^{\max} 表示储能安装容量上下限。

1.2 运行层模型

1) 目标函数

本文运行层以配电网节点电压偏移、线路有功损耗之和最小为目标函数,由量纲统一转换比例系数将二者量纲统一。

$$\min F_2 = \sum_{j=1}^{32} \sum_{i=1}^{24} P_{loss,j,t} + \mu \sum_{n=1}^{N_{hms}} \sum_{i=1}^{24} \left| \frac{U_{n,t} - U_N}{U_N} \right| \quad (5)$$

2) 约束条件

(1) 配电网潮流约束

$$\begin{cases} P_i + P_{Gi} = P_{Di} + U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i + Q_{Gi} = Q_{Di} + U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_i 、 Q_i 为 i 节点处流入的有功和无功功率; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为 i 节点分布式电源或储能提供的功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 为 i 节点有功和无功负荷; U_i 、 U_j 为节点 i 和节点 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的电导电纳及相角差。

(2) 储能充放电功率

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_{ess}^{cha}(t) \leq P_{essn} \\ -P_{essn} &\leq P_{ess}^{dis}(t) \leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $P_{ess}^{cha}(t)$ 、 $P_{ess}^{dis}(t)$ 分别为 t 时刻储能充放电功率; P_{essn} 、 $-P_{essn}$ 分别为储能充放电功率上下限。

(3) 节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i(t) \leq U_i^{\max} \quad (8)$$

式中: $U_i(t)$ 、 U_i^{\min} 、 U_i^{\max} 分别为 t 时刻节点 i 的电压及其上下限。

(4) 储能电池荷电状态(state of charge, SOC)约束

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (9)$$

式中: $SOC(t)$ 、 SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 分别为 t 时刻储能电池荷电状态及其上下限。

2 基于 TMGHS 与 SOCR 的模型求解方法

模型求解的速度与精度是储能配置中的一个重大问题,国内外学者对此做了大量研究。求解此类问题一般采用双层智能优化算法并嵌套潮流计算的方式。此种方法存在着计算量大、计算缓慢的问题。而采用确定性方法同样计算量大且各部分约束存在耦合情况时容易发生求解错误。近年来,由于求解器软件的日趋成熟,求解速度与精度得到了大大加强,学者开始采用求解器作为运行层求解方式。本文借鉴其他学者的相关研究,充分发挥算法各自优势,提出了基于 TMGHS 与 SOCR 的联合求解算法。

2.1 基于趋向移动的全局和声搜索算法

和声搜索算法是一种新型的元启发式随机搜索智能优化算法,其诞生得益于乐队即兴演奏^[11]。学者模拟乐队即兴演奏达到美妙和声的过程,提炼出相关规律,结合数学分析方法,提出了和声搜索算法(harmony search, HS)。基本 HS 在求解部分问题时具有一定优越性,但在复杂问题的求解上存在着收敛速度慢及搜索精度低等问题^[12]。此后,不少学者提出了相关优化方式。在吸取其他学者经验的前提下,本文提出基于趋向移动全局和声搜索算法,加快算法收敛速度、提高搜索精度,对解决配电网规划这一难题具有一定意义。TMGHS 算法具体运算步骤如下。

1) 参数初始化

对如下关键参数等进行初始化:和声库规模(HMS)、种群数量(k)、记忆选择概率(HMCR)、和声变异率(Pm)、衰减因子(α)。

2) 新和声的生成与更新

初始阶段,随机生成 HMS 个新和声作为和声记忆库初始和声;迭代阶段,随机生成 k 个和声向量,对于向量内的元素:

(1) 如果 $rand \leq HMCR$, 则执行式(10):

$$\begin{aligned} xr &= 2 \times x_{best,j} - x_{worst,j} \quad (VarMin \leq xr \leq VarMax) \\ xnew_{k,j} &= x_{worst,j} - (xr - x_{worst,j}) \times rand \\ if \quad rand &\leq Pm \\ xnew_{k,j} &= VarMin + (VarMax - VarMin) \times rand \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $VarMin$ 、 $VarMax$ 分别为变量上下限; $x_{best,j}$ 、 $x_{worst,j}$ 分别为和声记忆库中最优值与最差值的第 j 维变量; $rand$ 为随机生成 $[0, 1]$ 范围内的随机数; xr 、 $xnew_{k,j}$ 分别为依据公式生成的新的值与新的第 k 个向量的第 j 维变量。

(2) 如果 $rand > HMCR$, 则先在和声库中选择 2 个向量($L1, L2$)且 $L1$ 适应度优于 $L2$, 执行式(11):

$$xnew_{k,j} = x_{L2,j} + \beta \times rand \times (x_{L1,j} - x_{L2,j}) + \alpha \times (rand - 0.5) \quad (11)$$

式中: α 、 β 分别为步长缩减因子与吸引度值 ($\beta = 2 \times e^{-\gamma_{(L1,L2),j}}$, $r_{(L1,L2),j}$ 为 2 个向量的第 j 维变量间的欧几里得距离); $x_{L1,j}$ 、 $x_{L2,j}$ 、 $xnew_{k,j}$ 分别为从和声记忆库中随机选择的 2 个向量的第 j 维变量以及新产生的第 k 个向量的第 j 维变量。

3) 计算适应度值

对新生成并更新后的向量进行适应度计算,并与和声库中向量进行比较并排序,选取最优的 HMS 个向量作为新的和声库。

4) 终止条件

检查是否达到最大迭代次数,如果已经达到则程序结束,如果未达到则跳转至步骤 2)。

2.2 基于 SOCR 的最优潮流计算

二阶锥规划本质上是一种凸规划^[13],相较于智能优化

算法,其求解过程十分高效与准确。现有的二阶锥规划算法包可以对其准确求解,相应建模语言的完善使其运用十分方便^[14]。

在规划层的计算中,约束条件包含二次项以及整数项,属于混合整数非线性规划问题^[15]。智能优化算法计算较为复杂,可以利用二阶锥松弛将其转换为易于求解的模型。转换过程如下所示。

首先,引入两个新的变量:

$$\begin{aligned} \alpha_{i,t} &= U_{i,t}^2 \\ \beta_{ij,t} &= I_{ij,t}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\alpha_{i,t}$ 和 $\beta_{ij,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 电压的二次方和支路 ij 电流的二次方; $U_{i,t}$ 和 $I_{ij,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 的电压和支路 ij 的电流。

潮流计算相应公式和约束可以转换为式(13):

$$\begin{cases} \alpha_{j,t} = \alpha_{i,t} - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\beta_{ij,t} \\ p_{j,t} = P_{ij,t} - r_{ij}\beta_{ij,t} - \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t}\beta_{ij,t} \\ q_{j,t} = Q_{ij,t} - x_{ij}\beta_{ij,t} - \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t} \\ \beta_{ij,t} = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\alpha_{i,t}} \\ U_{i,t,\min}^2 \leq \alpha_{i,t} \leq U_{i,t,\max}^2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: i,j 为节点编号; r_{ij} 和 x_{ij} 分别为支路 ij 的电阻和电抗; $\alpha_{i,t}$ 和 $\alpha_{j,t}$ 为 t 时刻节点 i 和 j 电压的二次方; $P_{ij,t}$ 和 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻支路 ij 的首端有功与无功功率; $P_{jk,t}$ 和 $Q_{jk,t}$ 分别为 t 时刻支路 jk 的首端有功与无功功率; $U_{i,t,\min}$ 和 $U_{i,t,\max}$ 分别为 t 时刻节点 i 的允许的电压最小值与最大值; $k:j \rightarrow k$ 为以节点 j 为父节点的子节点集合。

可知,式(13)中第4个公式为非线性等式,将其松弛化可得:

$$\beta_{ij,t} \geq \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\alpha_{i,t}} \quad (14)$$

经过等价变换,可以将式(14)写成式(15)所示的标准二阶锥形式,即:

$$\begin{cases} \left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \beta_{ij,t} - \alpha_{i,t} \end{matrix} \right\| \leq \beta_{ij,t} + \alpha_{i,t} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\| \cdot \|$ 为二范数。

通过上述变换,本文的最优潮流模型被转化为二阶锥规划问题,其他部分约束条件依据上文所述原理可以依次产生,由此得到规划层模型。

SOCR的处理实际上是为了模型的高效率求解而放宽了约束范围,会对模型产生一定误差,已有相关文献进行了充分研究,证明即使是在相当宽松的条件下,经过SOCR变换后模型仍然是准确的。

2.3 求解流程

上文中对双层规划模型的建立以及各层的求解策略进

行了充分介绍,利用基于TMGHS和SOCR的混合算法求解有源配电网中储能的双层规划模型的具体步骤如下。

1) 参数初始化及相关数据读取

读取风电、光伏典型日场景数据及基本约束数据,构建相应模型,初始化相应参数。

2) 新和声的生成与更新

规划层依据约束条件生成或更新储能配置节点、功率、容量等参数并传导至运行层。

3) GUROBI 软件建模并计算

处理相应参数并初始化模型,采用二阶锥松弛进行模型转换,GUROBI软件对模型进行计算并将结果传回规划层。

4) 计算适应度值

将运行层计算结果进行处理并计算适应度,保存相应数据。

5) 终止条件

检测是否达到最大迭代次数,若已达到最大迭代次数则程序结束,输出结果;否则重复步骤2)~5)。

本文混合算法求解流程如图1所示。

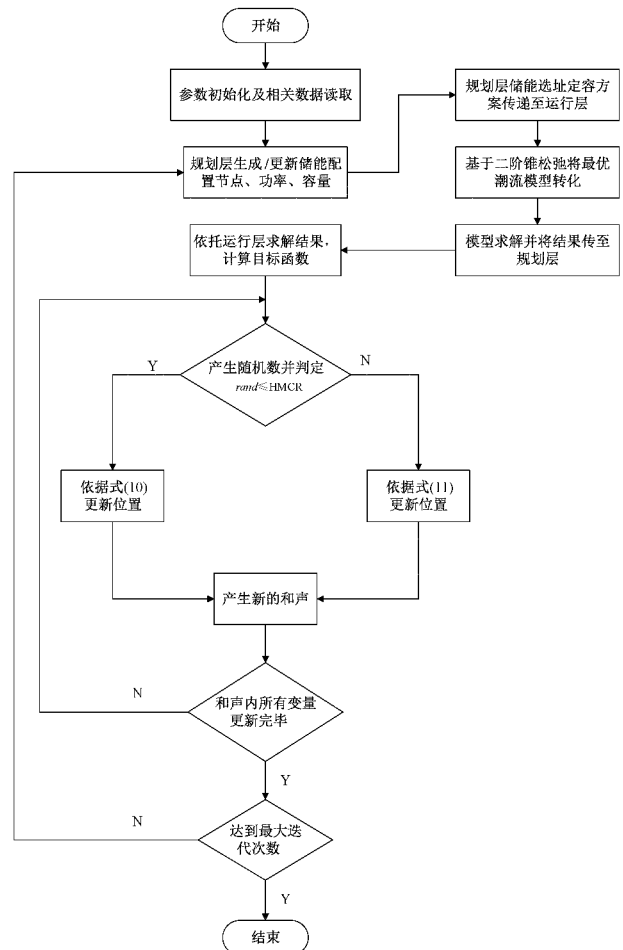


图1 求解流程

3 算例分析

为验证基于趋向移动全局和声搜索算法和二阶锥松弛的储能配置混合算法的合理性,本文通过 MATLAB 建立模型、运行层调用 GUROBI 软件进行求解。采用修改后的 33 节点配电网系统对其进行仿真测试。其节点如图 2 所示。

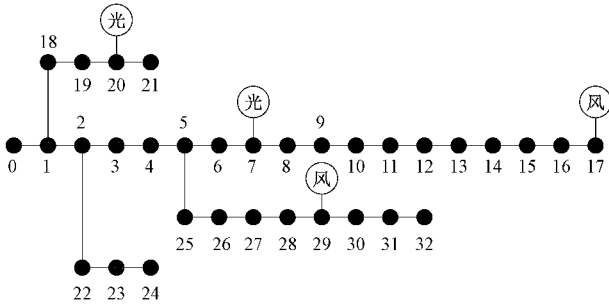


图 2 修改后的 IEEE-33 节点配电网测试系统

该配电网基准电压为 12.66 kV,网络总负荷为 (3 715+2 300j)kVA。其中,第 0 节点与上层电网连接传输功率,为平衡节点。在该配电网第 17、29 节点处安装 600 kW 风力发电系统;在第 7、20 节点处安装 500 kW 光伏发电系统。该配电网为小范围网架,为简化模型,认为不同位置的同类型分布式发电装置功率曲线相同。其功率曲线由江西某地实测得到。配电网单个风电功率、光伏功率以及负荷功率曲线如图 3 所示。

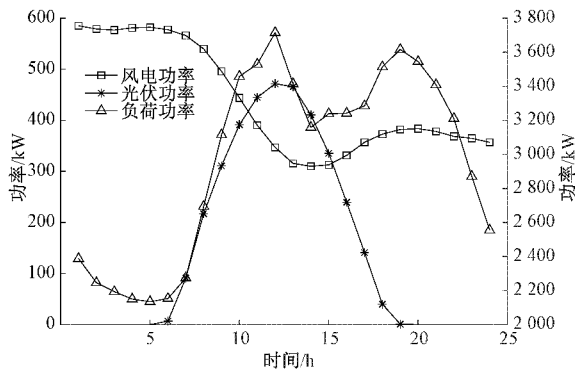


图 3 配电网风、光、负荷功率曲线

图 3 中风光功率采用左侧纵轴,负荷功率采用右侧纵轴。

为促进居民合理用电,减小电网峰谷差,同时展现储能系统高发低储收益,配电网实行如表 1 所示峰谷电价。

储能系统拟采用磷酸铁锂电池,配电网其他各项约束范围以及储能设备各项成本参数如表 2 所示。

3.1 不同场景下储能配置情况分析

为了探讨储能配置的必要性,进行双层规划的合理性,以及验证本文混合算法对求解此类问题的适用性,规划了如下 3 种场景进行仿真研究。

表 1 峰谷电价表

类型	峰谷时段	电价(元/kWh)
峰时段	10:00~13:00	1.06
	18:00~22:00	
平时段	8:00~10:00	0.62
	13:00~18:00	
谷时段	0:00~8:00	0.32
	22:00~24:00	

表 2 仿真参数设置

参数/变量	值/范围
储能使用寿命/年	8
储能折现率/%	6
额定功率成本/(元/kW)	1 000
容量成本/(元/kWh)	2 500
运维成本/(元/kWh)	0.05
荷电状态 SOC 范围	[0.1,0.9]
额定功率选择范围/kW	[0,200]
额定容量选择范围/kWh	[0,800]
上层电网购电成本/(元/kWh)	0.62
扩容成本/(元/kW)	1 000
扩容年利率/%	8
负荷年增长率/%	1.5
节点电压偏移允许范围	[-0.05,0.05]

场景 1:不配置储能系统,分布式电源功率处于全消纳的情况下。

场景 2:配置储能系统,但不考虑储能充放电功率的实时调度,仅根据负荷曲线在规定时间内进行恒功率充放电。规划层采用本文 TMGHS 算法。

场景 3:采用本文双层规划模型,考虑储能装置实时充放电功率调度。采用本文混合算法。

文中场景采用本文所述的相关算法进行求解,规划层基于趋向移动的全局和声搜索算法设定迭代代数 100,和声记忆库大小为 30,种群数量为 20,其他参数 HMCR=0.4, Pm=0.005, α=0.2。为节省求解时间,加快算法运行,运行层设定求解约束时间为 30 s。

依据以上设定,对各场景进行仿真计算,其结果如表 3、4 所示。其中表 3 所示为储能配置节点位置、功率、容量结果,表 4 所示为各场景下配电网投资运行成本。通过表 3、4 所示的数据分析可知,在场景 1 不配置储能、分布式电源在全消纳的情况下,配电网有着较高的线路有功损耗与电压偏移量。同时,由于分布式电源的接入,在一定时间段内,配电网的支路电压有所抬升。但在分布式电源供电不足的情况下,配电网电压将会越限,不能满足供电要求。而在考虑了储能配置的场景 2 和场景 3 中,都可以满足配电网供电要求。并且场景 3 中考虑储能功率实时调度的情

况下,虽然线路损耗略有上升,但是却有着更为低廉的储能投资成本,配电网总体投资运行的成本更低,年综合成本下降了170.95万元,具有更高的经济性。且由于运行层储能功率实时调度,具有一定的功率调度空间,可以实现在紧急情况下的应急响应,具有更高的隐性价值。

表3 储能装置配置结果

场景	节点	功率容量	能量容量
场景1	—	—	—
场景2	15,17,31	96,128,180	384,512,720
场景3	13,17,30	32,159,118	161,491,204

表4 3种场景下投资运行费用 年

名称	场景1	场景2	场景3
储能年均投资成本/万元	—	715.64	394.38
高储低发收益/万元	—	316.63	168.14
线路损耗/MW	636.27	584.95	592.43
电压偏移/p.u.	7 030.38	3 308.91	3 304.35
主网购电/万元	10 120.79	10 118.22	10 109.14
延缓升级收益/万元	—	101.21	71.43
总费用/万元	—	11 851.62	11 680.67

为了进一步分析储能对电网电压质量的影响,图4和5所示为场景1和场景3情况下的电网全天电压情况。由图4和5分析可知,场景1中全天电压波动幅度更大,随着负荷的增大,电压下降幅度越大。更为严重的情况在于20:00左右电压发生越限,低于0.95 p.u.,不符合电网运行要求。场景3中电压波动幅度相较于场景1明显更为平缓,在负荷较大时电压虽然有所下降,但仍在规定运行范围之内,电压全天处于0.97~1.01 p.u.之间,电压质量良好,电网运行稳定可靠。

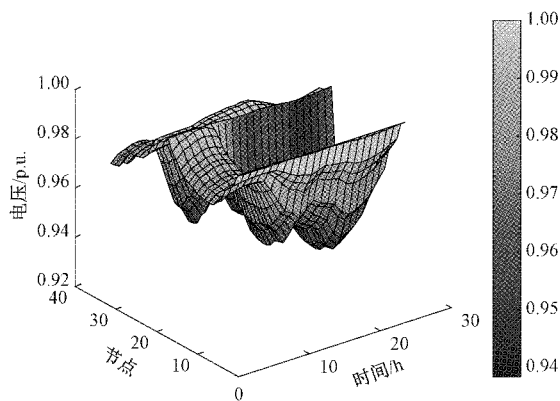


图4 场景1下的节点电压曲线

为了更为直观地体现储能运行对电网整体的影响,图6所示为3个场景下,配电网与上层电网的交换功率曲线。由图6分析可知,在场景1不配置储能系统的情形下,

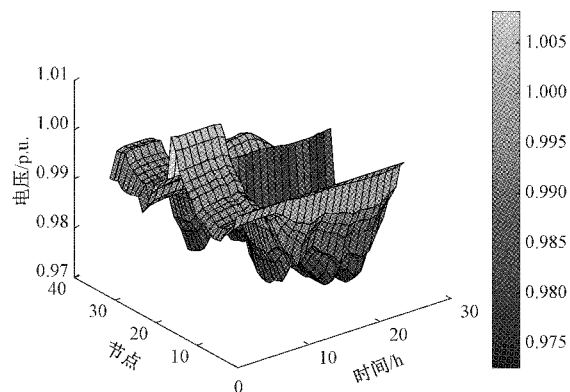


图5 场景3下的节点电压曲线

分布式电源的接入将会导致电网负荷峰谷差的进一步扩大,峰谷差约为2 MW,不利于电网的稳定运行。在配置储能的两种情况下,场景2不考虑储能实时功率调度,只在固定时间充放电,不仅具有较高的投资成本,而且在一定程度上加剧了负荷的波动。场景3则实现了较低投资成本的同时,减小了负荷峰谷差,使得负荷曲线波动趋于平缓,有利于电网的稳定运行。

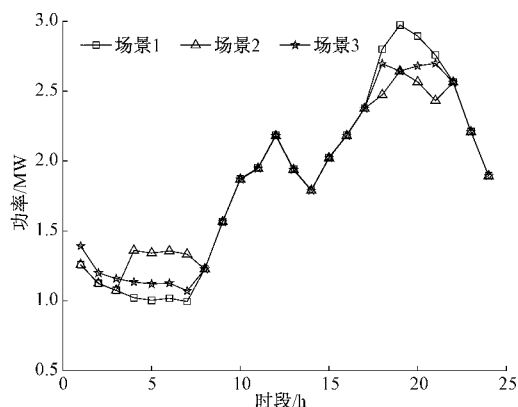


图6 交换功率曲线

3.2 算法对比情况分析

在本文3.1节中进行了不同场景下储能配置情况分析,在本节中,将着重探讨本文所提出的基于TMGHS算法和二阶锥松弛的混合算法的优越性。提出了如下3种对比项。

对比项1:运行层优化调度算法对比。不考虑规划层储能选址定容问题,给出储能配置情况,采用本文运行层算法与传统智能优化算法进行对比。

对比项2:规划层选址定容算法对比。不考虑运行层储能优化调度问题,仅在固定时段充放电,采用本文TMGHS算法与其他智能算法进行对比。

对比项3:整体储能配置算法对比。考虑储能双层规划模型,运行层采用二阶锥松弛,规划层采用本文TMGHS算法与其他智能算法进行对比。

本文拟采用基本和声搜索算法(HS)、改进的和声搜索

算法(improved harmony search, IHS)、新颖的全局和声搜索算法(novel global harmony search, NGHS)、参数自适应和声搜索算法(parameter adaptive harmony search, PAHS)等算法与本文算法进行对比分析, 本文 TMGHS 算法参数与 3.1 节相同, 其他算法参数配置如表 5 所示。

表 5 算法参数配置

算法	参数
HS	HMS=30, HMCR=0.9, PAR=0.3, BW=0.01
IHS	HMS=30, HMCR=0.9, PAR _{min} =0.01, PAR _{max} =0.99, BW _{min} =0.001, BW _{max} =1/(20×(UB-LB))
NGHS	P _m =0.005
PAHS	HMS=30, HMCR _{min} =0.7, HMCR _{max} =0.99, PAR _{min} =0.01, PAR _{max} =0.99, BW _{min} =0.001, BW _{max} =1/(20×(UB-LB))

对比项 1 中, 设定智能算法最大迭代代数为 200 代, 种群数量为 30 个, 设定在 13、17、30 节点分别接入功率为 200 kW、容量为 800 kWh 的储能, 配电网储能调度运行结果如表 6 所示。

表 6 对比项 1 运算结果

算法	有功网损/ MW	电压偏移/ p. u.	时间/ s
HS	1.685 2	19.332 7	1 691
IHS	1.693 8	19.344 7	1 694
NGHS	1.716 2	19.453 5	1 690
PAHS	1.701 9	19.432 2	1 702
本文算法	1.617 9	9.400 6	20

由表 6 数据结果可以明显了解到, 本文运行层算法具有明显的优异性, 在对配电网储能的优化运行中, 本文算法可以迅速求解, 仅需 20 s, 远远小于其他传统智能算法求解方式的约 1 700 s。同时, 本文方法的运算结果也远远优于其他方式, 有功网损与电压偏移值分别为 1.617 9 MW 与 9.400 6 p. u.。

本文运行层算法优于其他算法的原因在于: 一方面, 传统的智能算法求解方式在对储能实时功率进行迭代时需要进行多次尝试, 而每次迭代都需要进行内部潮流计算, 计算量大, 因此需要大量时间且存在很大偶然性。另一方面, 本文运行层算法基于 SOCR 将模型转化, 得到包含整数变量的二阶锥规划问题, 该问题可以采用 GUROBI 软件进行求解, 在允许一定松弛误差的前提下, 求解迅速并且精度较高。

对比项 2 中, 设定智能算法最大迭代代数为 100 代, 种群数量为 20 个, 依据场景 2 中设定, 分别采用不同算法进行运算, 其结果如表 7 所示。

表 7 对比项 2 运算结果

算法	HS	IHS	NGHS	PAHS	TMGHS
结果	11 852.98	11 852.27	11 852.12	11 853.42	11 851.62

由表 7 数据可知, 在对比项 2 中, 运行层不考虑储能功率的实时调度仅做确定性潮流计算的情况下, 本文规划层 TMGHS 算法相较于其他算法表现出一定的优越性, 其结果比其他算法更为优秀, 配电网综合成本分别低 1.36 万、0.65 万、0.50 万、1.80 万元。

对比项 3 中, 设定智能算法最大迭代代数为 100 代, 种群数量为 20 个, 依据场景 3 中设定, 运行层采用本文方法计算、规划层分别采用不同算法进行运算, 其结果如表 8 所示。

表 8 对比项 3 运算结果

算法	HS	IHS	NGHS	PAHS	TMGHS
结果	11 682.67	11 681.17	11 682.90	11 683.90	11 680.67

由表 8 数据可知, 在对比项 3 中, 本文规划层 TMGHS 算法相较于其他算法表现出一定的优越性, 其结果比其他算法更为优秀, 配电网综合成本分别低 2.00 万、0.50 万、2.23 万、3.23 万元。

综上可知, 本文混合算法相较于传统双层智能算法求解储能配置问题具有明显的优越性, 较之传统求解方式具有耗时短、精度高的特点。

4 结 论

本文提出了基于趋向移动的全局和声搜索算法和二阶锥松弛的储能双层规划模型混合求解方法。算例分析结果表明, 运行层经由二阶锥松弛后模型转化为二阶锥问题, 可采用 GUROBI 软件进行求解, 加快了求解速度、提高了求解精度。规划层采用 TMGHS 算法求解, 相较于其他智能算法拥有更高的求解精度。

本文算法仅对修改后的 IEEE-33 节点配电网测试系统进行了求解分析, 未对含微电网的配电网、交直流混联电网等场景进行建模分析, 在其他场景下的应用还有待分析。

参考文献

- [1] 李正红, 安振华, 李捷, 等. 含分布式电源与储能配电网的自适应电流保护策略[J]. 电子测量技术, 2020, 43(5): 71-75.
- [2] 茆美琴, 刘云晖, 张榴晨, 等. 含高渗透率可再生能源的配电网广义储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 77-85.
- [3] 凌开元, 赵乐冰, 张新松, 等. 基于双储能系统的主动配电网储能配置[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 171-176.
- [4] 温丰瑞, 李华强, 温翔宇, 等. 主动配电网中计及灵活性

- 不足风险的储能优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(11):3952-3962.
- [5] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 考虑实际运行的配电网电池储能系统的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9):88-94.
- [6] 张铭泽, 李亦农, 李新聪, 等. 含 DG 的主动配电网规划研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20):51-57.
- [7] 刘波, 邱晓燕. 主动配电网储能优化规划[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5):1180-1186.
- [8] 孙功伟, 周克楠, 马焜非, 等. 考虑柔性负荷的智能电网调度策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(3):40-46.
- [9] 沈鑫, 曹敏, 周年荣, 等. 多微网配电系统协调优化调度和经济运行研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4):568-576.
- [10] 陈厚合, 刘丽娜, 姜涛, 等. 提升配电网电压质量的分布式储能经济优化配置方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7):2127-2135.
- [11] GHOLAMI J, GHANY K K A, ZAWBAA H M. A novel global harmony search algorithm for solving numerical optimizations [J]. *Soft Computing*, 2021, 25(4): 2837-2849.
- [12] LI H, SHIH P C, ZHOU X, et al. An improved novel global harmony search algorithm based on selective acceptance [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(6): 1910.
- [13] 陈怀毅, 胡英坤, 杨毅, 等. 二阶锥松弛在配电网最优潮流计算中的应用[J]. 电气应用, 2020, 39(1):49-54.
- [14] 谢康胜, 李华强, 王俊翔, 等. 考虑输配电网协同的源荷储资源统筹规划[J]. 电力建设, 2021, 42(9):41-52.
- [15] 刘丽军, 罗宁, 吴桐, 等. 基于混合整数二阶锥规划的考虑需求侧响应虚拟电厂优化调度[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8):96-104.

作者简介

姜宏伟(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为储能系统优化配置。

E-mail:2313484182@qq.com

汪庆年, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为智能电机、电力系统稳定性。

E-mail:2661738618@qq.com

尚宝, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统负荷预测。

E-mail:1649039714@qq.com

任轩, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统负荷预测。

E-mail:chloe1409@163.com