

考虑牵引负荷接入的薄弱电网 风光储选址定容规划

姜晓锋^{1,2}, 王豪^{1,2}, 潘鹏宇^{1,2}, 陈刚^{1,2}, 王曦^{1,2}, 韩晓言³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:针对西部山区电气化铁路面临外部电网薄弱的问题,考虑将铁路沿线的风光发电接入薄弱电网,并接入储能为牵引负荷提供可靠的电能。因此,建立了考虑牵引负荷接入的电网两阶段协调优化的选址定容规划模型。第一阶段建立了以年综合费用最少的单目标分布式电源选址定容优化模型,采用粒子群优化算法求解分布式电源接入位置,为第二阶段储能的选址提供参考;第二阶段以储能费用、节点电压波动和功率波动为目标建立了储能选址定容优化模型,采用多目标粒子群优化算法进行求解。研究表明,分布式电源的接入提高了电网的供电容量,保障了牵引负荷的供电,而储能的接入降低了分布式电源和牵引负荷的功率波动,保障了电网的安全与牵引负荷的可靠供电。

关键词:选址定容; 牵引负荷; 分布式电源; 储能系统

中图分类号: TM 715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2025)02-0008-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250202

Planning for Siting and Sizing of Wind-Solar-Storage in Weak Power Grid Considering Traction Load Access

JIANG Xiaofeng^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, PAN Pengyu^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}, WANG Xi^{1,2}, HAN Xiaoyan³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In view of the problems that the electrified railway in the western mountainous area is faced with the weak external power grid, it is considered to connect the wind and solar power generation along the railway to the weak power grid, and integrate energy storage to provide reliable power for traction load. Therefore, a planning model of siting and sizing with two-stage coordinated optimization for power grid is established considering traction load access. In the first stage, a single-objective distributed generation siting and sizing optimization model with the lowest annual comprehensive cost is established, and the particle swarm optimization algorithm is used to solve the access location of distributed generation, which provides a reference for the location of energy storage in the second stage. In the second stage, the optimization model of siting and sizing for energy storage is established with the objectives of energy storage cost, node voltage fluctuation and power fluctuation, and the multi-objective particle swarm optimization algorithm is used to solve the model. The results show that the access of distributed generation improves the power supply capacity of power grid and ensures the power supply of traction load, while the access of energy storage reduces the power fluctuation of distributed generation and traction load, and ensures the safety of power grid and the reliable power supply of traction load.

Key words: siting and sizing; traction load; distributed generation; energy storage system

0 引言

随着高速铁路的迅猛发展,西部高海拔山区的电气化铁路也在不断规划和建设中。然而西部山区电气化铁路面临外部电网极端薄弱的难点^[1],如电网的电源薄弱、短路容量小、供电能力不足。在接入牵引负荷时,线路电压损失大,会导致供电臂末端网压偏低,影响电力机车的运行^[2]。西部山区铁路沿线地形和气候环境复杂,电气化铁路牵引负荷在大长坡道和隧道的情形下,具有更强的冲击性和波动性,这对薄弱电网条件下牵引负荷的可靠供电带来了巨大挑战。

西部山区铁路沿线存在丰富的风能和太阳能等可再生资源。因此,可以考虑将分布式电源(distributed generation, DG)接入系统以提高外部电网的供电能力,为牵引负荷提供稳定可靠的电能。这既有助于提升薄弱电网的供电容量,又能实现节能减排、低碳发展的目标^[3]。但具有间歇性、随机性等特点的 DG 发电系统大量接入电网,对电网安全控制带来了不利影响^[4]。DG 安装位置和容量的不同,导致电网潮流分布也不同,可能会引起节点电压或线路传输功率越限等问题^[5]。目前已有许多文献对其进行了研究,如文献[6]通过计算等效网损微增率来确定 DG 最优安装位置,并考虑网损、电压和环境进行了多目标定容优化;文献[7]考虑了分布式电源的不确定性,建立了计及环境因素在内的年综合费用最小的目标函数,对分布式电源进行选址定容。

储能系统(energy storage system, ESS)是解决 DG 发电波动性的有效途径,其具有灵活的充放电功率调节能力,可以用于抑制 DG 的波动性^[8],同时能有效缓解 DG 出力与牵引负荷需求间的时序不匹配性。因此考虑将 ESS 接入电网抑制输出波动和削峰填谷,以应对 DG 出力的波动性、间歇性和列车负荷的冲击特性的影响。然而,ESS 接入电网位置与容量的不同对 DG 和牵引负荷波动的抑制效果的影响很大^[9]。文献[9]以电网节点电压波动、负荷波动以及 ESS 总容量为目标建立了 ESS 多目标选址定容优化模型;文献[10]兼顾经济性与功角稳定性,建立了 ESS 选址定容的双层优化模型。目前针对 DG 和 ESS 的单一规划问题已有大量的研究成果,而 DG 和 ESS 的联合规划研究是近年的热点问

题。文献[11]对配电网进行集群划分,建立了光伏与储能双层协调选址定容规划模型;文献[12]提出了一种考虑电网安全约束的风光联合储能系统规划方法,用于求解风光联合储能系统的安装位置、额定功率和容量。

上述文献都是针对电网的 DG 和 ESS 进行的选址定容研究,鲜有对一些特殊负荷(如牵引负荷)在接入薄弱电网条件下进行 DG 和 ESS 选址定容研究,而西部山区电气化铁路接入薄弱电网对其有更高的要求。因此,下面考虑牵引负荷接入薄弱电网条件下,对电网进行 DG 和 ESS 选址定容研究。以电气化铁路接入的西部山区薄弱电网为例,建立了两阶段协调优化的风光储选址定容规划模型,为提升薄弱电网的供电容量、抑制 DG 与牵引负荷的波动性以及保障牵引负荷的稳定供电,提供了符合实际的规划方案。

1 牵引负荷及风光储模型

1.1 牵引负荷模型

1.1.1 牵引负荷概率模型

牵引负荷的不确定性体现在负荷功率的间歇性和波动性。牵引负荷功率与列车消耗功率和数量有关,列车功率可认为与列车的位置有关,可以通过位置-功率曲线获得;而列车数量可根据首辆车的位置,由发车时间和停站时间推算获得^[13-14]。因此,列车运行时的位置不断变化,体现了牵引负荷的随机性。建立牵引负荷的列车位置概率密度函数,如式(1)所示^[14],用于表征列车在 x_1 位置上出现的概率。

$$F(x_1) = P(x \leq x_1) = P(t \leq T_{x_1}) = \frac{T_{x_1}}{T} \quad (1)$$

式中: $F(x_1)$ 为列车位置的累计分布函数; P 为概率; T 为列车运行的总时间; T_{x_1} 为列车运行到 x_1 位置花费的时间。

1.1.2 牵引负荷确定性模型

由于列车位置具有一定的时序性,可根据抽样的列车的位置进行排序,根据列车的运行图得到牵引负荷的时序功率曲线。同时根据如图 1 所示的列车全天平行运行图^[14],可以绘制出牵引负荷的全天功率曲线,如图 2 所示。图 1 中列车中途经过 3 个站到终点站,其中 a、b、c、d 分别表示列车的非运营、首发车运行、稳定运行、末班车运行 4 个时间段^[14]。

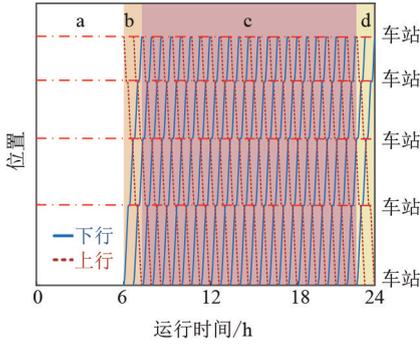


图 1 列车全天平行运行

图 2 为以 1 min 为步长抽取的牵引负荷全天有功功率曲线图,从图中能反映出牵引负荷全天的波动性与冲击性。

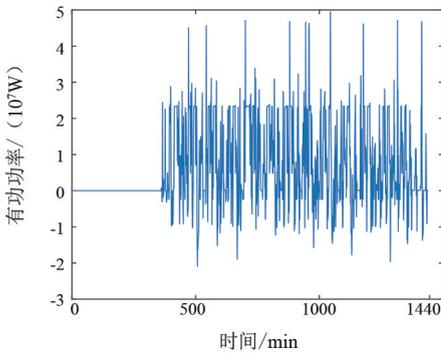


图 2 牵引负荷全天有功功率曲线

1.2 DG 模型

1.2.1 风电机组出力时序模型

风电机组的输出功率与风速有关,常用式(2)的分段函数表示^[15]。

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \text{ or } v_{co} \leq v \\ P_{wr} \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_{wr} & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_w 为风电机组的功率输出; v 为风速; v_{ci} 为风电机组切入风速; v_{co} 为风电机组切出风速; v_r 为额定风速; P_{wr} 为额定输出功率。图 3 为根据典型日风速对风电机组出力建模得到的风电机组出力曲线^[9]。

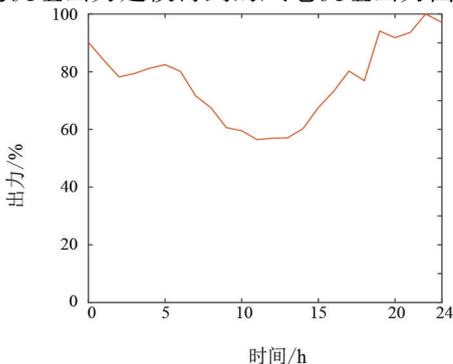


图 3 风电机组典型日出力曲线

1.2.2 光伏机组出力时序模型

光伏机组发电主要与光照强度有关,光伏机组出力与光照强度关系如式(3)所示^[15]。

$$P_s = \begin{cases} P_{sr} \frac{I}{I_r} & I \leq I_r \\ P_{sr} & I > I_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_s 为光伏机组功率输出; P_{sr} 为光伏机组额定输出功率; I 为光伏机组光照强度; I_r 为额定输出对应的光照强度。

根据典型日光照强度对光伏机组出力建模,得到光伏机组出力曲线如图 4 所示^[9]。

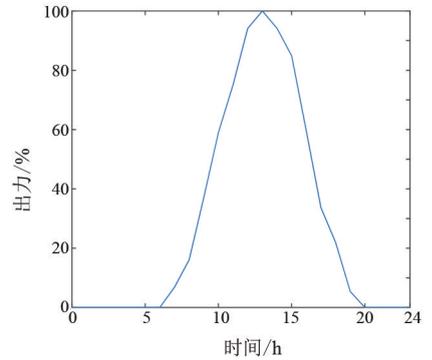


图 4 光伏机组典型日出力曲线

1.3 储能系统模型

在仿真分析中,常用 ESS 的容量和荷电状态表示储能系统模型,如式(4)、式(5)所示^[16]。

$$\begin{cases} E_{ESS,t} = E_{ESS,t-1} + \eta_c P_{c,t-1} \Delta t \\ E_{ESS,t} = E_{ESS,t-1} + \eta_f P_{f,t-1} \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_{ESS,t}$ 为 ESS 在 t 时刻的容量; $P_{c,t-1}$ 和 $P_{f,t-1}$ 分别为 ESS 在 $t-1$ 时刻的充放电功率,充电时为正,放电时为负; η_c 和 η_f 分别为 ESS 的充放电效率; Δt 为时间差。

$$S_{OC,t} = \frac{E_{ESS,t}}{E_{ESS,r}} \quad (5)$$

式中: $S_{OC,t}$ 为 ESS 在 t 时刻的荷电状态; $E_{ESS,r}$ 为 ESS 的额定容量。

2 两阶段选址定容优化模型

2.1 两阶段规划架构

针对考虑牵引负荷接入的薄弱电网风光储联合规划问题,建立了两阶段协调优化的风光储选址规划模型,模型架构如图 5 所示。



图5 两阶段规划架构

第一阶段规划模型: 规划目标是电网年综合费用最小; 约束条件包括潮流方程约束、节点电压约束、支路功率约束、新能源安装容量约束; 决策变量是各节点是否安装 DG 及 DG 容量; 采用粒子群算法进行求解。

第二阶段规划模型: 规划目标是 ESS 综合费用最小、电压波动最小和功率波动最小; 约束条件包括 ESS 充放电功率约束、ESS 能量平衡约束、ESS 安装容量约束、潮流方程约束、节点电压约束、支路功率约束; 决策变量是各节点是否安装 ESS、ESS 容量及 ESS 每时刻出力; 采用多目标粒子群算法进行求解。

两阶段规划模型间的协调关系: 以综合费用最小规划 DG, 让电网接入足够的 DG 以提升电网的供电容量, 根据 DG 规划的位置以及牵引负荷的位置, 进行第二阶段 ESS 的规划。ESS 能够抑制新能源和牵引负荷的波动, 将其接入 DG 规划和牵引负荷位置附近, 能更大程度上缓解 DG 出力与牵引负荷需求间的时序不匹配性。因此, 第二阶段根据第一阶段的规划结果来进行 ESS 选址定容。

2.2 考虑牵引负荷的 DG 规划模型

2.2.1 目标函数

以电网综合年费用 C_T 最小为目标函数, 如式(6)所示。

$$\min C_T = C_I + C_{OM} + C_L - C_P - C_E \quad (6)$$

式中: C_I 为投资费用; C_{OM} 为运行维护费用; C_L 为网损费用; C_P 为减少的发电费用; C_E 为环境效益。

1) 投资费用

$$C_I = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \sum_{k=1}^{N_{type}} \sum_{j \in N_{DGk}} (C_{I, DGk} E_{DGkj}) \quad (7)$$

式中: r 为贴现率; y 为规划年限; k 为 DG 的类型; N_{type} 为 DG 类型的数量; N_{DGk} 为第 k 种 DG 可以安装的节点集合; $C_{I, DGk}$ 为第 k 种 DG 单位容量的投资成本; E_{DGkj} 为在待安装节点 j 第 k 种 DG 所安装的容量。

2) 运维费用

$$C_{OM} = \sum_{k=1}^{N_{type}} \sum_{j \in N_{DGk}} (C_{OM, DGk} P_{DGkj} T_k) \quad (8)$$

式中: $C_{OM, DGk}$ 为第 k 种 DG 单位发电量的维护费用; P_{DGkj} 为第 k 种 DG 在节点 j 的年平均有功出力; T_k 为第 k 种 DG 的年发电时长。

3) 网损费用

$$C_L = c_1 P_{loss} \quad (9)$$

式中: c_1 为上网电价; P_{loss} 为电网年有功损耗。

4) 减少的发电费用

$$C_P = c_p \sum_{k=1}^{N_{type}} \sum_{j \in N_{DGk}} (P_{DGkj} T_k) \quad (10)$$

式中, c_p 为发电费用。

5) 环境效益

$$C_E = c_e \sum_{k=1}^{N_{type}} \sum_{j \in N_{DGk}} (P_{DGkj} T_k) \quad (11)$$

式中, c_e 为 DG 单位发电量的环境效益。

2.2.2 约束条件

1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功注入功率和无功注入功率; U_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i, j 间支路电压相角; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i, j 间支路电导和电纳。

2) 节点电压约束

$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \quad (13)$$

式中, $U_{i, \min}$ 和 $U_{i, \max}$ 分别为节点 i 的电压下限和电压上限。

3) 支路功率约束

$$-S_{l,\max} \leq S_l \leq S_{l,\max} \quad (14)$$

式中, S_l 和 $S_{l,\max}$ 分别为支路 l 的传输功率和最大传输功率。

4) DG 安装容量约束

$$0 \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i,\max} \quad (15)$$

式中, P_{DG_i} 和 $P_{DG_i,\max}$ 分别为节点 i 安装的 DG 容量和允许安装的上限。

2.3 考虑牵引负荷的储能规划模型

2.3.1 目标函数

1) ESS 投资和运维费用

ESS 价格比较昂贵, 考虑其经济性, 以使电网在满足供电可靠性的前提下成本最低。总费用如式(16)所示。

$$f_1 = \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} (C_{1,e}E_{\text{ESS}} + C_{1,p}P_{\text{ESS}}) + \sum_{t=1}^T C_{\text{OM,ESS}} |P_{\text{ESS},t}| \quad (16)$$

式中: $C_{1,e}$ 和 $C_{1,p}$ 分别为 ESS 单位容量和单位功率投资成本; E_{ESS} 、 P_{ESS} 分别为安装的总 ESS 额定容量和额定功率; T 为运行时间, 取 8760 h; $C_{\text{OM,ESS}}$ 为 ESS 单位充放电电量运维成本; p_{ESS} 为 ESS 充放电功率。

2) 节点电压波动

节点电压波动可用于表征系统稳定性以及电能质量^[9]。而 DG 接入电网可以提高节点的电压, 但是和牵引负荷同样会导致节点电压波动加剧, 恶化电能质量。因此以各节点电压波动总和最小为目标函数。

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{t=1}^{24} |U_i(t) - \bar{U}_i| \quad (17)$$

式中: N_b 为系统中总节点数; $U_i(t)$ 为第 i 个节点在 t 时刻的电压幅值; \bar{U}_i 为第 i 个节点在 24 h 内的电压平均值。

3) 节点功率波动

由于 DG 出力具有波动性, 和牵引负荷同时接入电网时, 可能会加剧功率的波动, 给电网带来不利影响^[9]。ESS 具有削峰填谷和抑制波动的特性, 可以减小系统功率的波动, 采用式(18)计算功率波动。

$$f_3 = \sum_{t=1}^{24} |P_{\text{JL}}(t) - \bar{P}_{\text{JL}}| \quad (18)$$

式中: $P_{\text{JL}}(t)$ 为在 t 时刻系统风光荷储的净功率; P_{JL} 为 24 h 内净功率的平均值。

综合考虑 ESS 投资和运维费用、系统节点电压波动和功率波动, ESS 选址定容多目标优化函数如式(19)所示。

$$\min F = [f_1, f_2, f_3] \quad (19)$$

2.3.2 约束条件

1) 储能功率约束

$$P_{s,\min} \leq P_s \leq P_{s,\max} \quad (20)$$

式中, $P_{s,\min}$ 和 $P_{s,\max}$ 分别为储能系统功率的下限和上限。

2) 储能能量平衡约束

$$\sum_{t=1}^{24} P_s(t) \Delta t = 0 \quad (21)$$

3) 潮流方程约束、节点电压约束和支路功率约束与 DG 选址定容相同, 见式(12)一式(14)。

3 求解算法

3.1 第一阶段粒子群优化

采用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 对 DG 规划问题进行求解。并在粒子群算法的基础上对惯性权重系数 ω 进行改进, 使其可以随着迭代次数的变化而变化, 从而加强了粒子的全局搜索能力。 ω 表达式为

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})n/n_{\max} \quad (22)$$

式中: ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为惯性权重系数的最大值和最小值; n 和 n_{\max} 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

3.1.1 编码方式

假设待安装的节点数量为 N_{DG} , 第一阶段 DG 选址定容编码由两部分组成: 1) 待安装节点是否安装, 进行 0/1 编码 (0 表示不安装, 1 表示安装); 2) 待安装节点的安装容量, 采用离散整数编码。每个粒子的维度为 $2N_{\text{DG}}$, 具体编码为

$$X = [x_i, \dots, X_{C,i}] \quad (i = 1, 2, \dots, N_{\text{DG}}) \quad (23)$$

式中: x_i 为待安装节点 i 是否安装 DG, 0/1 编码; $X_{C,i}$ 为待安装节点 i 的 DG 容量, 采用整数编码。

3.1.2 模型求解步骤

1) 初始化算法参数 (种群位置、迭代次数等), 根据 DG 待接入节点对粒子进行编码;

2) 进行初始种群的潮流计算, 计算初始种群的适应度值、个体最优值、种群最优值;

3) 更新粒子位置, 进行潮流计算, 计算适应度函数, 更新适应度值;

4)更新粒子个体最优位置和粒子种群最优位置;

5)判断迭代次数是否满足条件,不满足则返回步骤3,满足则输出种群最优位置 and 最优值。

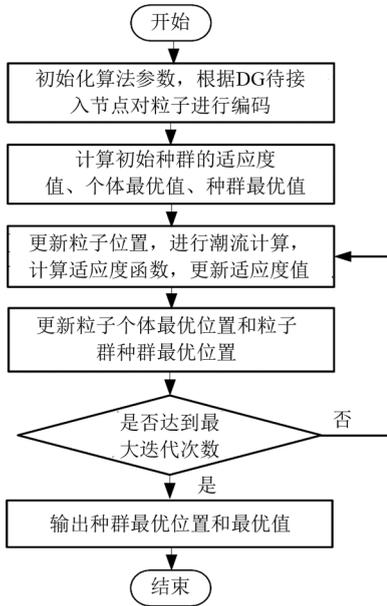


图6 PSO算法求解DG规划流程

3.2 第二阶段多目标粒子群优化

采用自适应网格策略的多目标粒子群优化算法 (adaptive grid multiple objective particle swarm optimization, AG-MOPSO)^[17-18]对储能规划问题进行求解。该方法采用自适应网格技术,对帕累托(Pareto)解集进行删减,Pareto解集即非劣解集。在目标函数空间内,进行均匀网格划分,计算每个网格中的非劣解集数量,当非劣解集的数量超过给定值时,随机删去网格中一定数量的非劣解^[18]。这解决了非劣解集数量过大且容易导致局部收敛的问题,同时也加快了计算效率。惯性权重系数同样设置为式(22)所示的表达式。

3.2.1 编码方式

根据前一阶段的优化结果,加上牵引负荷接入节点,假设ESS接入节点数量为 N_{ESS} ,对第二阶段ESS选址定容编码为

$$Y = [y_i, \dots, Y_{C,i}, \dots, Y_{i,t}] \quad (24)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N_{ESS}; t = 1, 2, \dots, T)$$

式中: y_i 为待安装节点 i 是否安装ESS,0/1编码; $Y_{C,i}$ 为待安装节点 i 的ESS容量,采用整数编码; $Y_{i,t}$ 为第 i 个节点ESS在 t 时刻的功率,取值精度为0.1。

ESS需要满足式(21)的能量平衡约束,需对ESS编码进行修正。

$$Y_{i,t} = - \sum_{t=1}^{T-1} Y_{i,t} \quad (25)$$

3.2.2 模型求解步骤

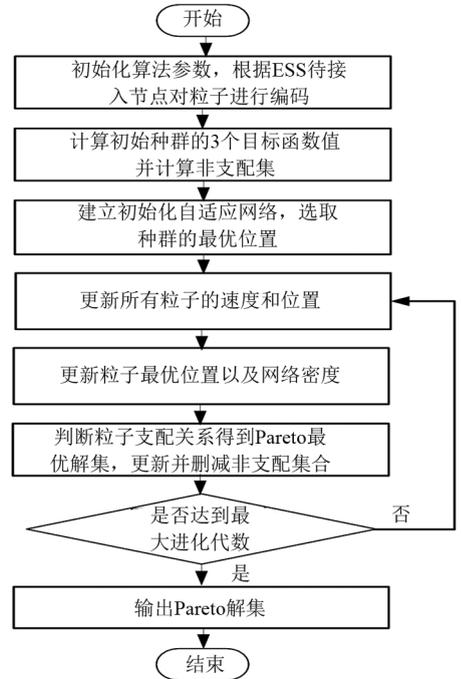


图7 多目标储能规划求解流程

1)初始化算法参数(粒子速度、位置、迭代次数、非劣解集数量),根据ESS待接入节点对粒子进行编码;

2)进行初始种群的潮流计算,计算初始种群的3个目标函数值,判断各粒子之间的支配关系,计算非支配集;

3)建立初始化自适应网络,选取种群的最优位置;

4)更新所有粒子的速度和位置,并随机变异。通过潮流计算,更新粒子最优位置以及网络密度;

5)判断粒子支配关系得到Pareto最优解集,更新并删减非支配集合;

6)判断迭代次数是否满足条件,不满足则返回步骤4,满足则输出Pareto解集。

4 算例分析

4.1 算例和参数设置

以中国某条在建电气化铁路接入的西部山区薄弱电网为例。网络拓扑结构如图8所示,图中牵引

负荷接入节点为 1、8、15、18, 所接区域网架结构简单, 500 kV 电压等级少, 供电容量小。

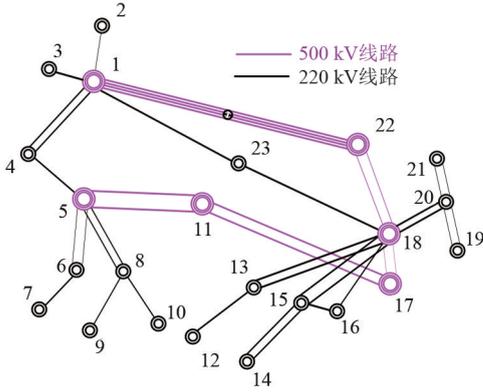


图 8 西部山区薄弱电网拓扑结构

根据西部山区的风光资源分布, 筛选出光伏机组的候选安装节点为 6、7、8、16、18, 风电机组的候选安装节点为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10。以容量 100 MVA 和电压 220 kV 为系统基准值。DG 和 ESS 的单位容量为 1 MW, 贴现率 r 为 0.1, 规划年限 y 为 20 年, ESS 充放电单位功率为 0.1 MW。DG 的功率因数为 0.85, 每个节点安装 DG 容量的上限为 60 MW, ESS 容量上限为 60 MWh, 充放电功率上限为 30 MW, 只发出有功功率。DG 和 ESS 单位成本见表 1 和表 2^[7,11]。DG 出力曲线采用典型日出力曲线, 如图 3 和图 4 所示。考虑到牵引负荷功率变化较快以及总体仿真时长与仿真步长有关, 选取步长为 0.5 h, 对 DG 和 ESS 进行选址定容规划。

表 1 DG 单位成本

参数	风电	光伏
投资成本/(元·kW ⁻¹)	10 000	13 000
维护成本/(元·kWh ⁻¹)	0.33	0.20
环境效益/(元·kWh ⁻¹)	0.083	0.083
年运行小时数/h	8760	4745
电价/(元·kWh ⁻¹)	0.50	0.50
减少的发电费用/(元·kWh ⁻¹)	0.45	0.45

表 2 ESS 单位成本

参数	ESS
单位功率投资成本/(元·kW ⁻¹)	1650
单位容量投资成本/(元·kWh ⁻¹)	1270
单位发电量运维成本/(元·kWh ⁻¹)	0.08
充放电效率	0.9

第一阶段粒子群的初始种群规模为 50 个, 最大迭代次数为 50, 学习因子均取 0.5, 最大惯性权重系数为 0.9, 最小惯性权重系数为 0.4。第二阶段多目

标粒子群, 种群数量为 100 个, 最大迭代次数为 20, 学习因子均取 1.495, 最大惯性权重系数为 0.8, 最小惯性权重系数为 0.2, 非劣解集数量上限为 200, 网格划分数量为 20。

4.2 算例仿真与分析

4.2.1 DG 规划配置

根据 DG 安装位置可知 DG 总安装数量 $N_{DG} = 15$, 则编码长度为 30。选取了两种优化结果(方案 2 和方案 3)与不安装 DG(方案 1)的结果进行对比, 如表 3 和表 4 所示。

表 3 不同方案及相应的规划结果

方案	安装节点(容量/MW)
1	—
2	光伏:18(49); 风电:1(30)、2(48)、3(20)、4(18)、5(48)、7(42)、9(35)、18(16)
3	光伏:15(16); 风电:1(48)、2(48)、4(54)、5(35)、6(48)、7(51)、8(18)、9(18)、10(49)

表 4 不同方案优化效果对比

单位: 万元

年费用	方案 1	方案 2	方案 3
投资费用	0	37 669.3	45 785.8
运维费用	0	59 431.0	82 601.7
网损费用	17 272.2	17 256.7	17 815.6
减少的发电费用	0	83 223.0	113 350.8
环境效益	0	15 345.0	20 900.2
总费用	17 223.2	15 789.0	11 952.1

由表 3 可知, 方案 3 中安装的风电机组数量较多。由于风电机组每日出力较多, 发电收益高于光伏机组。从最终的规划结果来看, 安装风电机组的效益要优于安装光伏机组。

由于所提的薄弱电网 DG 选址是先根据资源分布图筛选出待安装节点再进行优化, 同时还考虑了牵引负荷, 因此接入新能源之后, 并不一定能减少网损费用, 而更多的效益来自减少的发电和环境效益两方面。由表 4 可知, 接入新能源后总费用是降低的。其中方案 2 的网损费用降低、总费用减少, 但接入的容量较少, 且总费用仍高于方案 3。而方案 3 的安装容量多, 网损费用虽有所增加, 但减少的发电费用和环境效益更高, 总费用最少。

4.2.2 ESS 规划配置

根据 DG 接入位置优化方案 3, ESS 安装的位置有节点 1、2、4、5、6、7、8、9、10、15、18, 则 $N_{ESS} = 11$, 编码长度为 550。采用 AG-MOPSO 求解得到 Pareto 解集, 如图 9 所示。

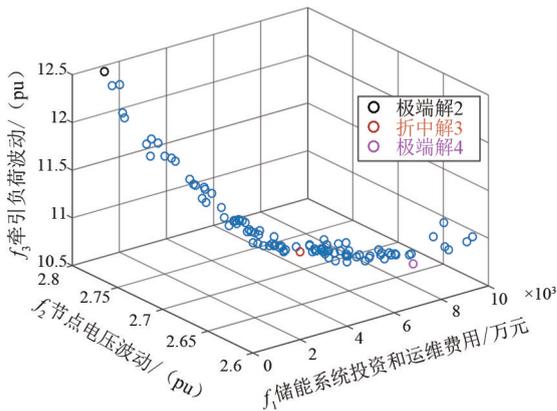


图 9 Pareto 解集情况

由图 9 可见 Pareto 解集的多样性好,解的分布均匀。选取了基于 Pareto 解集的折中解和两个极端解进行对比分析,如表 5 所示。其中:解 1 为未安装 ESS 的结果;解 2 和解 4 为极端解;解 3 为折中解。极端解是只考虑多目标函数中的某个目标最优选取的解,折中解是考虑各个目标函数选出来的一个较优的解。

表 5 不同解对应的储能规划结果

解	f_1 /万元	f_2 /(pu)	f_3 /(pu)	位置(容量/MWh)
1	0	3.17	15.71	—
2	1 226.2	2.80	12.47	5(44)
3	4 206.6	2.66	11.01	1(18);2(12);4(2);5(17); 6(7);7(11);8(7);9(15); 10(5);15(16);18(32);
4	7 810.3	2.63	10.76	1(23);2(11);4(9);5(15); 6(12);7(13);8(10);9(18); 10(4);15(19);18(51)

由表 5 可知:极端解 2 安装的 ESS 总容量较少,ESS 投资和运维费用也较低,节点电压波动和负荷波动情况比未安装 ESS 有一定的改善;极端解 4 所安装的 ESS 总容量是最多的,相应的费用也是最高的,对于节点电压波动和负荷波动的改善是最好的,但是相比其他的效果没有特别明显,一般不采用此规划方案;折中解 3 是权衡了投资运维费用和电压波动、负荷波动得到的一个较合适的规划方案,可以采用此解作为最终 ESS 的规划方案。

以 DG 规划方案 3 接入电网,绘制了安装 ESS 前后的典型日内风光接入节点和牵引负荷接入节点的电压波动,如图 10 和图 11 所示。

从图 10 和图 11 中可以明显看出,7 号和 8 号节点的电压一天内的波动减少,ESS 主要抑制了 7 号和 8 号节点的波动,其他节点波动本身并不大,ESS 抑制效果也不明显。同时从坐标轴来看,图 10 中 z

轴的电压刻度最大值为 1.05 pu,且电压在 1.03 ~ 1.04 pu 范围内有较大的波动。而图 11 中 z 轴减少到了 1.04 pu,大部分在 1.03 pu 以下。可见随着 ESS 的接入,系统部分节点在一天内的电压波动情况得到了一定的改善。

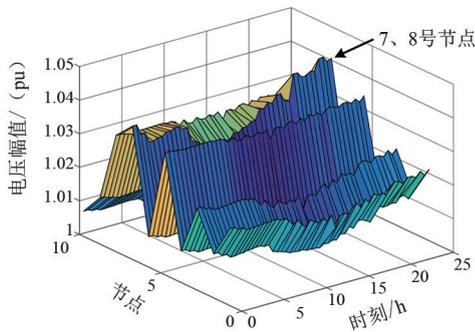


图 10 未安装 ESS 节点电

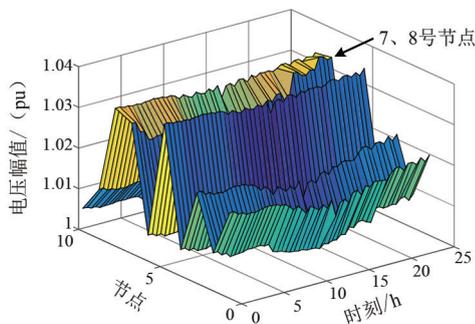


图 11 安装 ESS 后节点电压波动

从表 5 中的最优折中解数据以及图 10 和图 11 可以得到,为电网配置一定容量的 ESS,可以减小牵引负荷及新能源带来的电压和功率波动,为牵引负荷可靠供电提供保障。

5 结 论

上面基于两阶段协调规划模型,研究了考虑牵引负荷接入的薄弱电网风光储选址定容规划。研究结果表明:

1) 针对 DG 规划问题,采用惯性权重动态变化的 PSO 算法,优化了 DG 接入薄弱电网的位置和容量,提升了薄弱电网的供电容量,保障牵引负荷稳定供电的同时,还能实现节能减排以及综合支出的减少。

2) 针对 ESS 规划问题,采用 AG-MOPSO 算法进行多目标优化,平衡了 ESS 经济性和削峰填谷特性。ESS 接入薄弱电网降低了牵引负荷以及新能源带来的波动,保障了电网的安全稳定运行,同时为牵

468-476.

- [13] 张辰睿.基于机器学习的短期电力负荷预测和负荷曲线聚类研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [14] BEN NCIR C E, HAMZA A,BOUAGUEL W. Parallel and scalable Dunn Index for the validation of big data clusters[J].Parallel Computing,2021,102:102751.
- [15] 张师,李卫国,田蕾,等.分布式电源接入对配电网电压稳定性的影响[J].分布式能源,2017,2(4):36-39.
- [16] ZHONG C T, LI G, MENG Z. Beluga whale optimization: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm [J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 251:109215.
- [17] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 1989,4(2):1401-1407.

(上接第 15 页)

引负荷提供可靠稳定的电能。这为提升薄弱电网供电容量和保障牵引负荷供电提供了参考。

此外,牵引负荷和风光都具有不确定性,需进一步探究牵引负荷和风光不确定性对风光储选址定容规划的影响。

参考文献

- [1] 邓云川,林宗良.川藏铁路电气化工程面临的挑战和对策思考[J].电气化铁道,2019,30(增刊1):5-11.
- [2] 盛望群.电源薄弱地区电气化铁路关键技术与接入系统方案研究[J].电气应用,2013,32(6):18-21.
- [3] 解绍锋,方曼琪,夏国华,等.光伏接入牵引供电系统对电能质量的影响[J].电力自动化设备,2018,38(10):53-59.
- [4] 康龙云,郭红霞,吴捷,等.分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J].电网技术,2010,34(11):43-47.
- [5] 张沈习,李珂,程浩忠,等.考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J].电力系统自动化,2015,39(8):53-58.
- [6] 郑漳华,艾芊,顾承红,等.考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J].中国电机工程学报,2009,29(13):23-28.
- [7] 初壮,李钊,白望望.计及不确定性和环境因素的多类型分布式电源选址定容[J].电力系统保护与控制,2017,45(13):34-41.
- [8] 李相俊,王上行,惠东.电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J].电网技术,2017,41(10):3315-3325.
- [9] 吴小刚,刘宗歧,田立亭,等.基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J].电网技术,2014,38(12):3405-3411.

作者简介:

姚建东(1972),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网规划;

吴凡(2000),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划与稳定;

谢波(1989),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统规划;

郝文斌(1976),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统规划设计;

杨毅强(1980),男,博士,副教授,研究方向为电力系统规划与稳定;

孟志高(1990),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统规划。

(收稿日期:2024-10-31)

[10] 程浩,秦文萍,韩肖清,等.基于功角稳定性的区域电网储能选址定容方法[J].电力自动化设备,2024,44(7):21-29.

[11] 丁明,方慧,毕锐,等.基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J].中国电机工程学报,2019,39(8):2187-2201.

[12] 孟源,樊小朝,史瑞静,等.基于机会约束及 $N-1$ 安全约束的风光联合储能系统选址定容优化[J].电网技术,2021,45(5):1886-1893.

[13] 刘炜,李群湛,唐兵,等.基于蒙特卡洛模拟的城市轨道概率潮流分析[J].西南交通大学学报,2010,45(4):561-567.

[14] 朱恒恺.薄弱电源条件下的牵引供电系统供电能力评估方法研究[D].成都:西南交通大学,2022.

[15] 徐迅,陈楷,龙禹,等.考虑环境成本和时序特性的微网多类型分布式电源选址定容规划[J].电网技术,2013,37(4):914-921.

[16] 赵书强,刘大正,谢宇琪,等.基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略[J].电力系统自动化,2015,39(14):30-36.

[17] 苏福清,匡洪海,钟浩.基于AG-MOPSO的含风电配电网无功优化[J].电源学报,2024,22(4):192-199.

[18] 杨俊杰,周建中,方仍存,等.基于自适应网格的多目标粒子群优化算法[J].系统仿真学报,2008(21):5843-5847.

作者简介:

姜晓锋(1989),男,博士,高级工程师,研究方向为新型电力系统稳定控制及主动支撑关键技术;

王豪(1994),男,博士,工程师,研究方向为考虑新能源接入的新型控制保护技术及应用;

潘鹏宇(1993),男,博士,工程师,研究方向为电力电子化电力系统建模、稳定性分析及控制。

(收稿日期:2024-05-10)