

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221864

考虑变流器四象限运行的不平衡配电网 DESS 两阶段优化配置

李英量¹, 蔡鹤鸣¹, 王德明², 白博旭¹, 武晓滕¹

(1. 西安石油大学电子工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

摘要: 分布式储能(distributed energy storage system, DESS)可通过功率四象限运行以高效服务于配电网电压管理。现有以改善电压质量为导向的 DESS 优化配置研究缺乏对储能功率四象限运行和配网三相不平衡状态的全面考虑。为此, 提出一种适用于不平衡配电网的功率四象限 DESS 两阶段优化配置方法。在选址阶段, 基于三相牛顿-拉夫逊潮流算法提出全维电压灵敏度分析方法, 从提升系统电压质量的角度深入探究 DESS 的最优选址。在定容阶段, 考虑系统运行经济效益, 以年均投运成本最低和节点电压偏差最小为优化目标建立了 DESS 经济运行模型, 通过粒子群-灰狼优化算法进行求解。以改进 IEEE33 节点三相配电网为例开展算例分析, 仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 不平衡配电网; 分布式储能; 电压质量; 功率四象限运行; 灵敏度分析

Two-stage optimal configuration of DESS for an unbalanced distribution network considering four-quadrant operation of converters

LI Yingliang¹, CAI Heming¹, WANG Deming², BAI Boxu¹, WU Xiaomeng¹

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: A distributed energy storage system (DESS) can efficiently perform voltage management of the distribution network through four-quadrant power operation. The existing DESS optimal configuration research oriented to improve the voltage profile lacks a comprehensive consideration of the power four-quadrant operation of DESSs and the three-phase imbalance of the distribution network. Therefore, a two-stage optimal configuration method of power four-quadrant DESS suitable for an unbalanced distribution network is proposed. In the placement stage, based on the three-phase Newton-Raphson power flow algorithm, a full-dimensional voltage sensitivity analysis method is proposed to explore the optimal location of DESSs from the perspective of improving system voltage quality. In the capacity allocation stage, considering the economic benefits of system operation, the DESSs economic operation model is established with the lowest average annual operation cost and the smallest voltage deviation of buses as the optimization objectives. Then the particle swarm-grey wolf algorithm is used to solve it. Taking the improved IEEE 33-bus three-phase distribution network as an example, simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the Science and Technology Basic Research Program of Shaanxi Province (No. 2021JM-404).

Key words: unbalanced distribution network; distributed energy storage system; voltage quality; power four-quadrant operation; sensitivity analysis

0 引言

随着以光伏和风电为代表的可再生能源发电在

基金项目: 陕西省科技计划基础研究项目资助(2021JM-404); 陕西省教育厅科研计划项目资助(21JK0843); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目资助(U20B2029); 陕西省重点研发计划项目资助(2021KW-33); 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划项目资助(YCS22213112)

配电网中以分布式电源(distributed generation, DG)的形式大量接入^[1-3], 网络潮流的不确定性进一步增加, 对配电网的电能质量产生了不利影响^[4], 特别是导致的馈线上电压波动、偏差和越限等电压质量问题^[5-6]。分布式储能装置(distributed energy storage system, DESS)作为配电网中重要的能量调节设备, 已成为当前的研究热点之一。其在电网侧广泛参与系统调频、调压和提高可再生能源消纳^[7-9]等调节过程。储能系统可通过储能变流器(power conversion

system, PCS)控制电力电子元件的导通和关断, 改变输出电压的大小和相位, 进而实现有功、无功功率的独立控制, 具备功率的四象限快速调节能力^[10]。对于高渗透率清洁能源并网造成的电压质量问题, DESS 可进行有功/无功协调控制, 更有利于潮流调控和电压调节, 对于改善电网不同类型的电压质量问题具有显著的技术优势^[11-12]。此外, DESS 还具有降低网络传输的电能损耗、电价套利等功能, 有助于提升系统运行的经济性。所以, 合理的 DESS 配置方案不仅可以提升供电质量, 还可以降低供电成本。因此, 配电网中 DESS 的优化配置研究必不可少且具有重要意义。

目前, 国内外有关通过储能以提升配电网电压质量的研究成果斐然。文献[13-14]研究了含储能的配电网电压控制策略, 结果表明通过对储能运行方案的决策可有效减少节点电压越限和电压波动; 文献[15]以降低配电网电压偏差为目标, 提出一种压缩空气储能的多状态运行决策模型, 并使用二阶锥规划予以求解。上述研究以提升系统电压质量为目标讨论了储能装置的运行决策方法, 但未考虑储能并网位置对其电压调节能力的影响。

文献[16]利用骑手优化算法(rider optimization algorithm, ROA)得到了 DG 和电池储能的选址定容方案, 通过配置储能提升了系统的低电压稳定性。文献[17]建立了 DESS 双层规划模型, 上层为配置层, 以系统运行经济性为目标; 下层为运行层, 以电压偏移最小为目标。文献[18]根据电压灵敏度分析设计了一种事件触发的混合电压调节方法, 并据此得到了电池储能系统的最佳配置容量。文献[19-20]基于电压灵敏度分析结果确定了储能服务于电压调节的最佳并网位置, 减小了算法的求解空间。文献[21-22]基于三相网络模型, 分析了含 DG 的不平衡配电网中储能设备的运行特征, 并以提高电压质量为目标建立了不平衡配电网储能优化配置模型。上述研究仅考虑了储能与电网的有功功率交互, 忽略了其无功调节能力。由于配电网中线路 R/X 值较大的特性, 线路有功功率和无功功率流动的变化均会对系统节点电压、网损等产生较大影响^[23]。

文献[24]考虑储能系统功率四象限运行策略, 给出了主动配电网最优调度策略, 结果表明储能的无功出力可以显著提升系统的调压能力。文献[25]以储能无功功率等为控制变量, 利用原始对偶内点法解决了住宅区配电网的凸二次规划最优潮流问题。仿真分析验证了具备无功输出能力的储能系统可以作为电能质量补偿问题的优秀解决方案。但文献[24-25]未在选址阶段考虑储能并网位置对其电压

调节能力的影响, 且计及储能的功率四象限运行策略, 也会对其选址方案的决策产生影响。文献[26]计及储能系统的无功调节能力, 以提高配电网经济效益和提升电压质量为目标建立了储能选址定容模型, 并使用混合整数二阶锥规划方法进行求解, 但该研究基于理想的平衡网络模型展开, 未讨论配电网中普遍存在的三相不平衡现象。

综上所述, 现有服务于配电网电压调节的 DESS 优化配置研究, 缺乏对储能功率四象限运行和配电网三相不平衡状态的全面考虑。针对这一不足, 本文考虑 PCS 功率四象限运行方式, 基于三相网络模型提出了面向高 DG 渗透率的不平衡配电网 DESS 选址——定容两阶段优化配置方法。相对于使用平衡网络模型, 该方法更贴近配电网实际运行状态; 同时考虑了储能的无功输出, 可更全面、有效地发挥配电网 DESS 的电压调节能力, 具有更高的实际参考价值。在选址阶段, 同时考虑有功和无功功率与电压幅值的耦合元素, 通过改进电压灵敏度分析以确定 DESS 并网位置; 在定容阶段, 基于三相潮流计算并计及三相不平衡度等约束条件, 以最小化年均运行成本为优化目标建立了 DESS 容量优化配置模型, 然后使用粒子群-灰狼优化算法进行求解。以改进 IEEE33 节点三相配电网系统为例进行算例分析, 仿真验证了本文所提的不平衡配电网 DESS 两阶段优化配置方法的有效性和优越性。

1 基于全维电压灵敏度的 DESS 选址模型

传统基于电压灵敏度分析的分布式储能选址方法通常建立在储能仅与电网交互有功功率的前提下, 只考虑了灵敏度矩阵中的 $P-U$ 耦合元素。当考虑储能无功功率运行时, 传统方法则不再适用。

1.1 含 DESS 的配电网功率-电压灵敏度分析

简单的 n 节点辐射式配电网结构示意图如图 1 所示。则注入任意节点 k 的支路有功、无功功率为

$$\begin{cases} P_k = P_{\text{Load},k} - P_{\text{DG},k} - P_{\text{DESS},k} + \sum_{i \in \phi_k} P_{ki} \\ Q_k = Q_{\text{Load},k} - Q_{\text{DESS},k} + \sum_{i \in \phi_k} Q_{ki} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{DESS},k} + jQ_{\text{DESS},k}$ 为 k 节点并网的 DESS 运行功率; $P_k + jQ_k$ 为 k 节点的注入功率; $P_{ki} + jQ_{ki}$ 为流出 k 节点的功率; ϕ_k 为所有与 k 节点直接相连的下级支路末端节点的集合; $P_{\text{Load},k} + jQ_{\text{Load},k}$ 为 k 节点处的负载功率; $P_{\text{DG},k}$ 为 k 节点并网的分布式电源输出功率。

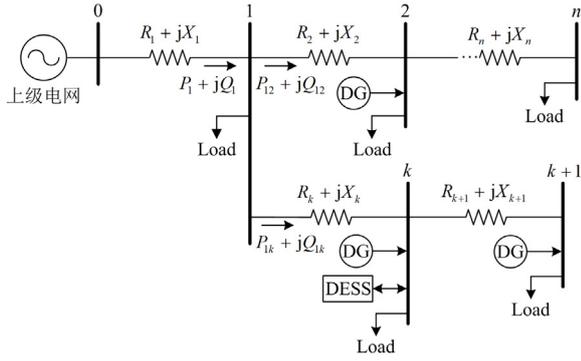


图 1 配电网结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distribution network structure

同一馈线上任意两节点间电压降落纵分量为

$$\Delta U_k = U_{k-1} - U_k = \frac{P_k R_k + Q_k X_k}{U_k} \quad (2)$$

式中: U_k 为 k 节点电压幅值; $R_k + jX_k$ 为 $k-1$ 节点至 k 节点间的线路阻抗。联立式(1)、式(2)可得

$$U_0 U_k - U_k^2 = \sum_{i \in \Omega_k} [R_i (P_{\text{Load},k} - P_{\text{DG},k} - P_{\text{DESS},k} + \sum_{j \in \Omega_k} P_{kj}) + X_i (Q_{\text{Load},k} - Q_{\text{DESS},k} + \sum_{j \in \Omega_k} Q_{kj})] \quad (3)$$

式中, Ω_k 为 k 节点至上级变电站或具有调压功能的变压器节点路径中节点的集合。为衡量并网 DESS 功率变化对节点电压 U_k 的影响程度, 对式(3)求导, 即

$$(2U_k - U_0) \frac{\partial U_k}{\partial P_{\text{DESS},y}} = \sum_{i \in \Omega_k} R_i \cdot \frac{\partial \sum_{k \in [i,n]} P_{\text{DESS},k}}{\partial P_{\text{DESS},y}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_{\text{DESS},k}}{\partial P_{\text{DESS},y}} = \begin{cases} 1, & y = k \\ 0, & y \neq k \end{cases}$$

$$S_{k,y}^{P-U} = \frac{\partial U_k}{\partial P_{\text{DESS},y}} = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \Omega_k} R_i}{2U_k - U_0}, & j \geq k \\ \frac{\sum_{i \in \Omega_j} R_i}{2U_k - U_0}, & j < k \end{cases} \quad (5)$$

式中, $S_{k,y}^{P-U}$ 为 k 节点电压幅值对 y 节点 DESS 设备输出有功功率的灵敏度值。分析式(5)可知, $S_{k,y}^{P-U}$ 与 DESS 并网位置有关: 当 DESS 位于 k 节点上游时, 其值较小, 且越靠近根节点越小; 当 DESS 位于 k 节点及其下游时, $S_{k,y}^{P-U}$ 有最大值。故当 DESS 位于本地或下游节点时, 其对本地电压水平的调节能力最强。同理可得 k 节点电压幅值对 y 节点 DESS 无功功率的灵敏度为

$$S_{k,y}^{Q-U} = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \Omega_k} X_i}{2U_k - U_0}, & j \geq k \\ \frac{\sum_{i \in \Omega_j} X_i}{2U_k - U_0}, & j < k \end{cases} \quad (6)$$

分析式(5)、式(6)可知, 有功功率和无功功率对电压幅值的耦合强弱之比等于线路阻抗比, 两式相除则有

$$\frac{S_{k,y}^{P-U}}{S_{k,y}^{Q-U}} = \frac{\sum_{i \in (\Omega_k \cap \Omega_j)} R_i}{\sum_{i \in (\Omega_k \cap \Omega_j)} X_i} \quad (7)$$

为全面考量 DESS 的四象限功率输出对节点电压幅值的影响, 需整体计及节点有功、无功与电压幅值的耦合关系。利用式(7)可在电压灵敏度分析中定量计算 $P-U$ 、 $Q-U$ 灵敏度矩阵中元素所占权重。

1.2 考虑无功耦合的电压灵敏度分析策略

由极坐标三相 N-R 潮流计算可得潮流方程为

$$\begin{cases} P_i^m = U_i^m \sum_{j=1}^n \sum_{p \in [A,B,C]} (G_{ij}^{mp} \cos \theta_{ij}^{mp} + B_{ij}^{mp} \sin \theta_{ij}^{mp}) U_j^p \\ Q_i^m = U_i^m \sum_{j=1}^n \sum_{p \in [A,B,C]} (G_{ij}^{mp} \sin \theta_{ij}^{mp} - B_{ij}^{mp} \cos \theta_{ij}^{mp}) U_j^p \end{cases} \quad (8)$$

$m \in [A,B,C]$

式中: n 为系统节点数; $P_i^m + jQ_i^m$ 为 i 节点 m 相的注入功率; U_i^m 为 i 节点 m 相的电压幅值; U_j^p 为 j 节点 p 相的电压幅值; $G_{ij}^{mp} + jB_{ij}^{mp}$ 为 i 节点 m 相和 j 节点 p 相间的支路导纳; θ_{ij}^{mp} 为 t 时刻 i 节点 m 相和 j 节点 p 相的相角差。其中, 修正方程中的雅可比子矩阵 N 与 L 分别表征了 ΔP 与 ΔU 、 ΔQ 与 ΔU 的耦合关系, 即

$$\begin{cases} \Delta U = N^{-1} \Delta P \\ \Delta U = L^{-1} \Delta Q \end{cases} \quad (9)$$

式中: N^{-1} 和 L^{-1} 分别为节点有功-电压($P-U$)、无功-电压($Q-U$)灵敏度矩阵。以 L^{-1} 为例, 其中第 i 行每个元素表示其对应的各节点注入无功功率变化 ΔQ 后, i 节点电压的变化情况; 第 i 列中每个元素表示 i 节点的注入无功功率变化 ΔQ 后, 对应各节点电压的变化情况。同样地, N^{-1} 矩阵中元素的含义此处不再赘述。

1.3 基于全维电压灵敏度的 DESS 选址策略

1.1 节中的结论表明 DESS 并网位置对其电压调节能力有直接影响, 故可通过在传统灵敏度分析

方法中引入电压偏移系数以区分不同节点的调压需求, 进而在调压需求大的节点或其下游接入 DESS, 以最大化其电压调节能力。则有^[27]

$$\begin{cases} S_{i,t}^m = \sum_{j=1}^n N_{m_{ij},t}^{-1} \times w_{j,t}^m \\ w_{j,t}^m = (U_{j,t}^m - U_{\text{ref}})^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $N_{m_{ij},t}^{-1}$ 为有功-电压灵敏度矩阵中的元素; $w_{j,t}^m$ 为节点电压偏移系数; $U_{j,t}^m$ 为 t 时刻相应节点的电压; U_{ref} 为参考电压。结合式(7)的结论, 将无功耦合元素引入式(10)中, 有

$$\begin{cases} S_{i,t}^m = \sum_{j=1}^n (N_{m_{ij},t}^{-1} \cdot \frac{R_{ij}^m}{R_{ij}^m + X_{ij}^m} + L_{m_{ij},t}^{-1} \cdot \frac{X_{ij}^m}{R_{ij}^m + X_{ij}^m}) \times w_{j,t}^m \\ w_{j,t}^m = (U_{j,t}^m - U_{\text{ref}})^2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $S_{i,t}^m$ 为 t 时刻 i 节点 m 相的全维电压灵敏度; $L_{m_{ij},t}^{-1}$ 为无功-电压灵敏度矩阵 L^{-1} 中的元素; $R_{ij}^m + jX_{ij}^m$ 为线路阻抗。

式(11)计及了无功-电压耦合元素, 因此, 可以全面考量 DESS 的有功及无功功率输出对节点电压幅值的影响。而节点的全维电压灵敏度方差越大, 则表示该节点的全维电压灵敏度随着日内负荷的变化而波动的程度越大, 即负荷变化对该节点的电压水平影响更大。为了尽可能地提高 DESS 抬升系统电压水平的效果, 本文基于全维电压灵敏度方差确定 DESS 接入配电网的位置。网络中各节点的全维电压灵敏度方差为

$$\sigma_{i,m}^2 = D(S_{i,t}^m) \quad (12)$$

式中, $\sigma_{i,m}^2$ 为 i 节点 m 相的全维电压灵敏度方差 (full-dimensional voltage sensitivity variance, FVSV)。

在所有 DESS 待接入节点中, FVSV 越大的节点, 其全维电压灵敏度波动范围越大, 在该节点安装储能装置整体上越有利于抬升系统的电压水平。

2 计及电压偏差的 DESS 优化定容模型

目前电池储能设备的成本高昂, 为保证配置方案的合理性与可行性, 本文选取 DESS 投运成本及系统运行成本作为优化目标; 计及三相不平衡约束等运行约束建立 DESS 容量优化配置模型。同时考虑可再生能源发电的随机性与波动性对系统电压质量带来的影响, 将节点电压偏差引入目标函数中, 利用储能设备灵活的功率调节能力提升配电网电压质量。

2.1 目标函数

本文建立的 DESS 容量优化模型的目标函数为

单目标经济性函数, 即年均运营成本 C 可表示为

$$\min C = C_{\text{DESS}} + C_{\text{OPE}} \quad (13)$$

式中: C_{DESS} 为分布式储能年均投运成本; C_{OPE} 为配电网年均运行成本。

1) 分布式储能年均投运成本 C_{DESS}

$$C_{\text{DESS}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{om}} \quad (14)$$

$$C_{\text{inv}} = \frac{\tau(1+\tau)^y}{(1+\tau)^y - 1} \sum_{d=1}^q (c_e E_{\text{DESS},d} + c_s H_{\text{DESS},d}) \quad (15)$$

$$C_{\text{om}} = \sum_{d=1}^q c_{\text{om}} H_{\text{DESS},d} \quad (16)$$

式中: C_{inv} 和 C_{om} 分别为 DESS 的年均一次投资成本和年均运行成本; q 为储能接入数; τ 为年利率; y 为储能运行寿命; c_e 、 c_s 分别为 DESS 单位容量年均成本及 PCS 的单位功率年均成本; $E_{\text{DESS},d}$ 、 $H_{\text{DESS},d}$ 分别为第 d 个储能的额定容量和逆变器的额定视在功率; c_{om} 为储能 PCS 单位功率的年均维护费用。

2) 配电网年均运行成本 C_{OPE}

此处配电网年均运行成本包含 3 个部分: 配电网年购电成本 C_{buy} 、年均线路损耗成本 C_{loss} 和系统年均节点电压偏差量化成本 C_{dev} , 即

$$C_{\text{OPE}} = C_{\text{buy}} + C_{\text{loss}} + C_{\text{dev}} \quad (17)$$

其中购电成本为配电网从上级电网中购电的费用, 而电价与负荷水平有关, 通过分时电价则可以引导 DESS 运行: 负荷低谷时电价较低, 此时购电并储存起来, 当负荷处于峰值时电价上涨, 再释放储存的电能即可以实现储能套利与削峰填谷, 提高配电网运营商的经济效益。此外, 电力输送过程中产生的线路损耗也是影响系统运行经济性的重要指标之一。在系统参数一定的情况下, 线路上有功和无功功率的流动均会对网损产生影响。通过配置 DESS 并优化其与配电网的功率交互, 可在一定程度上降低线路上流动的有功/无功功率, 进而降低系统网损。

最后, 为减小可再生能源发电的波动性对系统电压水平的影响, 将节点电压偏差引入目标函数。为将电压偏差量化为价格量纲, 文献[28]提出将电压偏差转化为有功网损的方法, 即通过引入转换系数 λ , 结合购电电价则可将标幺化的电压偏差值转化为价格量纲。故有

$$C_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^{8760} c_{\text{epr},t} P_{0,t} \Delta t \quad (18)$$

$$C_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^{8760} \sum_{l=1}^L c_{\text{ep},t} P_{\text{loss},l,t} \Delta t \quad (19)$$

$$P_{\text{loss},l,t} = \text{Re} \left\{ \begin{bmatrix} I_{l,t}^{A*} \\ I_{l,t}^{B*} \\ I_{l,t}^{C*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_l^{AA} & Z_l^{AB} & Z_l^{AC} \\ Z_l^{BA} & Z_l^{BB} & Z_l^{BC} \\ Z_l^{CA} & Z_l^{CB} & Z_l^{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{l,t}^A \\ I_{l,t}^B \\ I_{l,t}^C \end{bmatrix} \right\} \quad (20)$$

$$C_{\text{dev}} = \sum_{t=1}^{8760} U_{\text{dev},t} \lambda \Delta t \cdot c_{\text{ep},t} \quad (21)$$

$$U_{\text{dev},t} = \sum_{i=1}^n \sum_{m \in \{A,B,C\}} \left| \frac{U_{i,t}^m - U_{\text{ref}}}{U_{\text{ref}}} \right| \quad (22)$$

式中: $P_{0,t}$ 为 t 时刻从上级电网流入配电网根节点的有功功率; $c_{\text{ep},t}$ 为 t 时刻购电电价; Δt 为考察时段, 本文取 1 h; $P_{\text{loss},l,t}$ 为 t 时刻第 l 条支路的有功损耗; L 为系统总支路数; $I_{l,t}^A$ 为 t 时刻支路 l 的 A 相相电流; $I_{l,t}^{A*}$ 为 $I_{l,t}^A$ 的转置; Z_l^{AA} 和 Z_l^{AB} 分别为支路 l 的自阻抗与互阻抗; $U_{\text{dev},t}$ 为 t 时刻系统的总节点电压偏差; $U_{i,t}^m$ 为 t 时刻 i 节点 m 相的电压; λ 为有功网损与节点电压偏差转换系数, 取 500 kW/p.u.^[28]。

2.2 约束条件

1) 网络潮流平衡约束

$$P_{\text{DESS},i,t}^m - P_{\text{DG},i,t}^m + P_{\text{L},i,t}^m = U_{i,t}^m \sum_{j=1}^n \sum_{p \in \{A,B,C\}} U_{j,t}^p (G_{ij}^{mp} \cos \theta_{ij,t}^{mp} + B_{ij}^{mp} \sin \theta_{ij,t}^{mp}) \quad (23)$$

$$-Q_{\text{DESS},i,t}^m + Q_{\text{L},i,t}^m = U_{i,t}^m \sum_{j=1}^n \sum_{p \in \{A,B,C\}} U_{j,t}^p (G_{ij}^{mp} \sin \theta_{ij,t}^{mp} - B_{ij}^{mp} \cos \theta_{ij,t}^{mp}) \quad (24)$$

式中: $P_{\text{DESS},i,t}^m + jQ_{\text{DESS},i,t}^m$ 为 t 时刻 i 节点 m 相上 DESS 的运行功率; $P_{\text{L},i,t}^m + jQ_{\text{L},i,t}^m$ 为 t 时刻 i 节点 m 相的负荷; $P_{\text{DG},i,t}^m$ 为 t 时刻 i 节点上运行的分布式电源输出的有功功率。

2) 系统安全运行约束

在所有运行时间内, 系统各节点的电压偏差和三相不平衡度需小于规定的值, 即

$$\Delta U_{i,t}^m = |U_{i,t}^m - U_{\text{ref}}| \leq \Delta U_{\text{max}} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{i,t} = \frac{\|U_{i,t}^-\|_2}{\|U_{i,t}^+\|_2} \times 100\% \leq \varepsilon_{\text{max}} \quad (26)$$

式中: $\Delta U_{i,t}^m$ 为 t 时刻 i 节点 m 相的电压偏差; ΔU_{max} 为系统允许的节点电压偏差最大值, 本文取 0.05 p.u.; $\varepsilon_{i,t}$ 表示 t 时刻 i 节点的三相不平衡度; $U_{i,t}^-$ 和 $U_{i,t}^+$ 分

别为 t 时刻 i 节点电压的负序分量和正序分量; $\|\cdot\|_2$ 表示向量的二范数; ε_{max} 为配电网三相不平衡度允许的最大值。

3) DESS 选址定容约束

DESS 的配置数量过多会使成本过高, 且会对系统稳定运行产生负面影响^[29], 故需限制 DESS 的安装数量、额定功率及额定容量。

$$q \leq q_{\text{max}} \quad (27)$$

$$E_{\text{DESS},\text{min}} \leq E_{\text{DESS},d} \leq E_{\text{DESS},\text{max}}, \forall d \leq q \quad (28)$$

$$H_{\text{DESS},\text{min}} \leq H_{\text{DESS},d} \leq H_{\text{DESS},\text{max}}, \forall d \leq q \quad (29)$$

$$H_{\text{DESS},d} = \sqrt{P_{\text{DESS},d}^2 + Q_{\text{DESS},d}^2}, \forall d \leq q \quad (30)$$

式中: q_{max} 为储能配置数量的最大值; $H_{\text{DESS},\text{max}}$ 、 $H_{\text{DESS},\text{min}}$ 分别为单台储能额定视在功率的上、下限; $E_{\text{DESS},\text{max}}$ 、 $E_{\text{DESS},\text{min}}$ 分别为单台储能额定容量的上、下限; $P_{\text{DESS},d} + jQ_{\text{DESS},d}$ 为第 d 台 DESS 的额定功率。

4) DESS 并网运行约束

首先, DESS 的充电和放电两种运行状态不可能同时存在, 故引入 0-1 变量 $\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{dis}}$ 和 $\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{chg}}$ 表示储能的充放电状态, 其满足

$$\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{dis}} + \mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{chg}} \leq 1 \quad (31)$$

当 $\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{dis}}$ 为 1、 $\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{chg}}$ 为 0 时, 第 d 台 DESS 在 t 时刻工作在放电状态; 当 $\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{dis}}$ 为 0、 $\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{chg}}$ 为 1 时, 第 d 台 DESS 在 t 时刻工作在充电状态; 当 $\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{dis}}$ 和 $\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{chg}}$ 都为 0 时, 表明第 d 台 DESS 在 t 时刻既不充电也不放电。而 DESS 的有功和无功出力也需在逆变器额定视在功率圆范围内, 即

$$H_{\text{DESS},d}^2 \geq \left(\frac{\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{dis}} P_{\text{DESS},d,t}}{\eta} + \mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{chg}} P_{\text{DESS},d,t} \eta \right)^2 + Q_{\text{DESS},d,t}^2 \quad (32)$$

式中: η 为储能充放电效率; $P_{\text{DESS},d,t} + jQ_{\text{DESS},d,t}$ 为 t 时刻第 d 台 DESS 的运行功率。此外, 电池储能的充放电深度会影响其寿命, 为保证 DESS 的循环寿命, 需对其荷电状态(state of charge, SOC)进行约束。

$$\delta_{\text{SOC},d,t+1} = \mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{chg}} P_{\text{DESS},d,t} \eta - \frac{\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{dis}} P_{\text{DESS},d,t}}{\eta} \Delta t \quad (33)$$

$$\delta_{\text{SOC},\text{min}} \leq \delta_{\text{SOC},d,t} \leq \delta_{\text{SOC},\text{max}} \quad (34)$$

式中: $\delta_{\text{SOC},d,t}$ 为 t 时刻第 d 台 DESS 的荷电状态; $\delta_{\text{SOC},\text{min}}$ 、 $\delta_{\text{SOC},\text{max}}$ 分别为规定的 DESS 荷电状态的最小、最大值。为确保 DESS 可以长时间连续运行,

需规定其在一个典型的研究时段内(本文为一个典型日)充、放电量相等, 即

$$\sum_{t=1}^{24} P_{\text{DESS},d,t} (\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{chg}} \eta - \frac{\mu_{\text{DESS},d,t}^{\text{dis}}}{\eta}) \Delta t = 0 \quad (35)$$

3 求解算法及流程

式(13)—式(35)所示的DESS容量优化配置模型为典型的多约束非线性规划问题。考虑到灰狼优化算法在处理此类问题时具有良好的精度和收敛性^[30], 且通过改进可使其适用于大规模复杂优化问题的求解。本文借助改进粒子群-灰狼优化算法(particle swarm-grey wolf algorithm, PS-GWO)对该模型进行求解。

3.1 粒子群-灰狼优化算法

受到自然界狼群狩猎习惯的启发, 文献[31]提出了灰狼优化算法(grey wolf optimization, GWO), 其原理简单、寻优能力强。但传统 GWO 所具有的线性递减的收敛因子 a , 使其遇到复杂优化问题时表现乏力。文献[32]通过结合粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)和 GWO 的特点提出了 PS-GWO 算法, 有效提升了其面对大规模优化问题的求解能力, 具体改进如下。

1) 收敛因子的非线性递减策略

$$a = a_{\text{INIT}} - (a_{\text{INIT}} - a_{\text{FNL}}) \times \log \left(1 + \frac{(e-1)v}{v_{\text{max}}} \right) \quad (36)$$

式中: a_{INIT} 和 a_{FNL} 分别为 a 的初始值和最终值; v 为迭代次数; v_{max} 为最大迭代次数。

2) 改进个体位置更新策略

$$\mathbf{X}(v+1) = \omega(v) \cdot \frac{\mathbf{X}_1(v) + \mathbf{X}_2(v) + \mathbf{X}_3(v)}{3} + c_1 r_3 \cdot [\mathbf{X}_{\text{pb}} - \mathbf{X}(v)] + c_2 r_4 \cdot [\mathbf{X}_1(v) - \mathbf{X}(v)] \quad (37)$$

$$\omega(v) = \frac{v_{\text{max}} - v}{v_{\text{max}}} \cdot (\omega_{\text{INIT}} - \omega_{\text{FNL}}) + \omega_{\text{FNL}} \quad (38)$$

式中: $\omega(v)$ 为第 v 代的惯性权重; ω_{INIT} 和 ω_{FNL} 分别为 ω 的初始值和最终值; $\mathbf{X}(v)$ 为第 v 代个体位置向量; \mathbf{X}_{pb} 为个体的历史最优位置向量; $\mathbf{X}_1(v)$ 、 $\mathbf{X}_2(v)$ 和 $\mathbf{X}_3(v)$ 分别为第 v 代 α 狼、 β 狼和 γ 狼的位置向量; c_1 和 c_2 分别为个体学习因子和群体学习因子, 取 $[0,1]$ 的值; r_3 和 r_4 为 $[0,1]$ 的随机数。有关 PS-GWO 算法更多的细节见文献[32]。

3.2 两阶段 DESS 优化配置模型的求解流程

如本文第 1 节所述, 选址阶段基于 FVSV 以决策 DESS 并网位置的方法可以降低 DESS 优化配置

问题解空间的维度, 提升算法求解效率。考虑到传统方法多仅基于单次计算以决策多台储能的配置方案, 该策略可能导致局部配置过度、设备利用率低^[33]等问题。因此, 本文采用基于多次计算的序次配置策略, 每次计算仅配置一台 DESS, 以 1 h 为基本时间间隔将一个典型日划分为 24 个研究时段, 通过仿真确定 DESS 运行和配置方案; 之后对新网络重新进行潮流计算及电压灵敏度分析, 继而配置下一台 DESS。如此便避免了局部配置过度的问题, 同时又可以进一步降低解的维度。综上所述, 本文所提的两阶段 DESS 优化配置方法的求解流程图如图 2 所示。

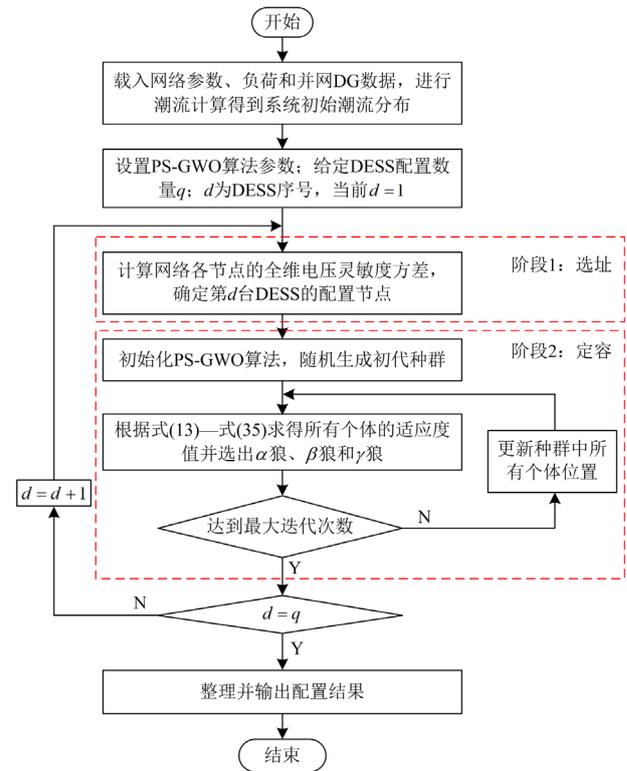


图 2 两阶段 DESS 优化配置流程图

Fig. 2 Flow chart of two-stage optimized configuration of DESS

4 算例分析

4.1 算例及参数设置

本文采用三相 IEEE33 节点配电网^[34]系统开展算例分析。系统额定电压为 12.66 kV, 电压允许范围为 0.95~1.05 p.u., 最大负荷为 $(3.715 + j2.3)$ MVA, 基准容量为 1 MVA, 各节点采用相同的典型日负荷变化曲线。在原算例的基础上分别于 11、21 和 28 节点各接入一台 600 kW 的三相光伏电源, 光伏渗透率达 48%。网络拓扑结构、日负荷及光伏出力曲线见文献[27]。

将上述模型代入 PS-GWO 算法调试后, 将种群数量设为 100, 最大迭代次数为 100; 收敛因子初始值 $a_{INIT} = 1$, 最终值 $a_{FNL} = 0$; 惯性权重初始值 $\omega_{INIT} = 0.9$, 最终值 $\omega_{FNL} = 0.1$, 学习因子 $c_1 = c_2 = 0.5$ [30]。模型相关代码在 Window10 64bit 环境下利用 Matlab 2018a 编写并求解, 所用便携式计算机 CPU 型号为 Intel(R) Core(TM) i7-8550U CPU @ 1.80 GHz, 运行内存为 8 GB。本文待配置的 DESS 类型为锂电池储能, 成本及相关约束信息参考文献 [35], 具体参数见表 1, 分时电价见表 2。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters settings

参数	取值	参数	取值
c_e /(美元/kWh)	600	$\delta_{SOC,max}/\%$	90
c_g /(美元/kWh)	1200	$\delta_{SOC,min}/\%$	10
c_{om} /(美元/kWh)	300	$\eta/\%$	75
$E_{DESS,max}$ /kWh	1500	$\varepsilon_{max}/\%$	3
$H_{DESS,max}$ /kVA	500	$\tau/\%$	19.4
q_{max} /台	4	$\gamma/\text{年}$	20

表 2 分时电价设置

Table 2 Time-varying price settings

时段	c_{ep} /(美元/kWh)
18:00—24:00	0.75
08:00—18:00	0.5
00:00—08:00	0.2

4.2 仿真结果分析

4.2.1 所提四象限 DESS 两阶段配置方法优势分析

为验证本文所提模型及序次求解方法的优越性, 本节将待配置 DESS 数量设为 2, 在其他参数均相同的情况下采用下述 4 种场景开展算例仿真与对比分析。

场景 1: 不配置 DESS;

场景 2: 采用单阶段优化配置方法, 即 DESS 的选址与定容均通过 PS-GWO 算法求解;

场景 3: 采用所提基于 FVSV 的两阶段优化配置方法, 通过单次计算的集中配置策略求解;

场景 4: 采用所提基于 FVSV 的两阶段优化配置方法, 通过多次计算的序次配置策略求解。

通过上述场景划分和使用本文所提的功率四象限 DESS 两阶段优化配置方法进行仿真后, 得到的结果如表 3 和图 3 所示。其中, 表 3 列出了各个场景下的四象限储能优化配置结果。通过对比可知, 在场景 2、3、4 中均选择了位于馈线末端的 18 节点作为 DESS 安装节点, 但场景 2 中仅通过 PS-GWO

确定 DESS 的选址和定容的单阶段配置方法选择了 33 节点接入第 2 台 DESS, 未识别出具有较大无功负荷的 30 节点。其在 DESS 投资花费较高的情况下系统运行成本仍相对较高。而场景 4 选择了 30 节点, 说明基于 FVSV 的选址策略可以准确识别出功率四象限 DESS 的最佳并网位置, 证明了所提选址方法的科学性。且因 PS-GWO 算法也需要对 DESS 位置信息进行编码, 算法解空间维度的增加也导致其具有最长的求解时间。其次, 场景 3 通过基于 FVSV 的选址-定容两阶段配置方法提升了求解效率, 但因其采用集中配置策略, 仅对系统进行了一次灵敏度计算, 导致选址过于集中, 设备利用率低。DESS 投资成本最高的情况下也具有最高的系统运行成本, 优化效果不理想。而场景 4 用最低的 DESS 投资成本取得了最低的系统运行成本和总成本, 说明采用多次计算的序次求解策略可以避免局部配置过度并提升设备利用率, 证明了序次求解策略的优越性。

表 3 不同场景下的优化结果

Table 3 Optimization results in different scenarios

	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
选址	—	18, 33	17, 18	18, 30
H_{DESS}/MVA	—	0.47, 0.45	0.48, 0.49	0.45, 0.41
E_{DESS}/MWh	—	1.49, 1.44	1.39, 1.47	1.34, 1.14
$C_{DESS}/\text{美元}$	0×10^6	0.85×10^6	0.87×10^6	0.76×10^6
$C_{OPE}/\text{美元}$	18.91×10^6	12.67×10^6	13.62×10^6	11.45×10^6
总成本/美元	18.91×10^6	13.52×10^6	14.49×10^6	12.21×10^6
求解时间/s	—	3711	1452	1347

图 3 为不同场景下系统日网损、电压越限情况等运行指标的对比。

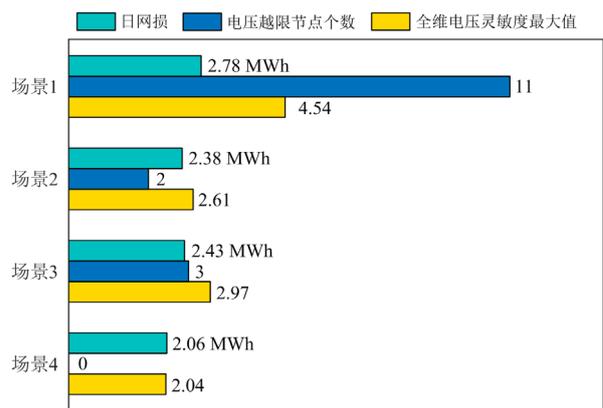


图 3 不同场景下网络的运行表现

Fig. 3 Operation performance in different scenarios

由图 3 可知, 场景 4 中配置 DESS 后系统未出现电压越限情况, 但在场景 2 和场景 3 中均有节点发生电压越限。对系统网损和全维电压灵敏度的优

化效果来说, 场景 4 也为最优, 同样可以证明本文所提基于 FVSV 的四象限 DESS 选址-定容两阶段序次优化配置方法的科学性与优越性。

4.2.2 DESS 最优配置结果及配电网运行状态分析

为得出最佳的 DESS 配置方案, 本节在其他仿真条件均相同的情况下, 通过设置不同的 DESS 接入数量进行对比实验, 仿真结果如表 4 和图 4 所示。从表 4 的优化配置结果可以看出, 分别在 18 节点和 30 节点各接入 1 台 DESS 时最低年均成本为 12 213 806.02 美元, 其接入额定容量分别为 1.34 MWh 和 1.14 MWh, 额定视在功率分别为 0.45 MVA 和 0.41 MVA。年均成本相较于配置前降低了 6 690 935.86 美元, 优化效果为 35.39%。从选址的角度分析, 18 节点位于网络的辐射末端, 电压质量较差, 故每一种配置了 DESS 的方案中均首先选择了 18 节点作为储能接入点; 而 30 节点则距离光伏接入点 28 节点较近且具有较大的无功负荷, 在该处配置 DESS 便于调节由于光伏出力变化引起的电压波动, 也便于就地进行无功补偿。因此, 在 18 与 30 节点配置 DESS 的方案可以最大化利用储能设备性能, 故具有最低的年均成本, 验证了基于 FVSV 的选址策略的科学性及有效性。从定容的角度分析, 由于 18 节点处的 DESS 需要更大的容量及功率以应对更严重的电压偏移问题, 故各方案中该处 DESS 的额定容量及视在功率均为最大; 而 30 节点因其靠近光伏电源而无需较大的容量, 但该处具有大量无功负荷, 故其额定视在功率也相对较大。

表 4 不同 DESS 配置数量下的优化结果

方案	配置数量	选址	$E_{\text{DESS}}/$ MWh	$H_{\text{DESS}}/$ MVA	$C/$ 美元
方案一	0	—	—	—	18.91×10^6
方案二	1	18	1.48	0.47	16.12×10^6
方案三	2	18	1.34	0.45	12.21×10^6
		30	1.14	0.41	
方案四	3	18	1.07	0.44	12.23×10^6
		25	0.59	0.24	
		18	1.05	0.45	
方案五	4	30	0.78	0.35	12.92×10^6
		25	0.55	0.22	
		8	0.51	0.20	

图 4 列出了不同 DESS 配置方案下目标函数中各类成本的分布情况。由图 4 可知, DESS 主要通过优化的充放电运行状态实现套利和电压调节以

降低 C_{buy} 与 C_{dev} , 进而降低系统整体运行成本; DESS 实现套利的过程如图 5 所示。此外, 接入 3 台和接入 4 台两个 DESS 配置方案的 C_{loss} 和 C_{dev} 相对于接入两台 DESS 的方案均有所上升, 说明储能配置过多也会对系统网损及电压水平产生负面影响。最后, 方案三花费 761 496.53 美元的年均储能投运成本, 使配电网年均运行成本降低了 7 452 431.86 美元, 性价比达到 978.66%, 验证了本文所提两阶段 DESS 优化配置方法的有效性。下面针对方案三进行分析。

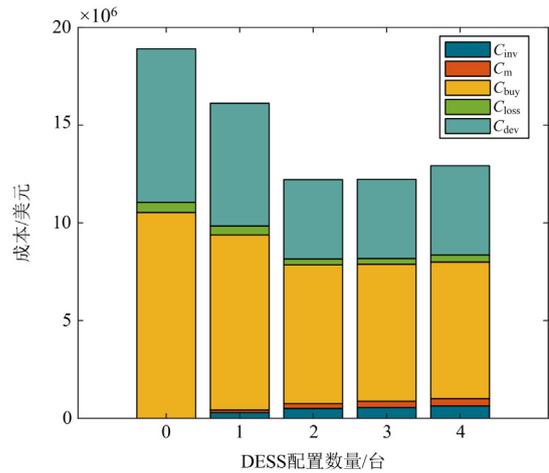


图 4 不同 DESS 配置数量下的成本分布

Fig. 4 Cost distribution under different numbers of DESS

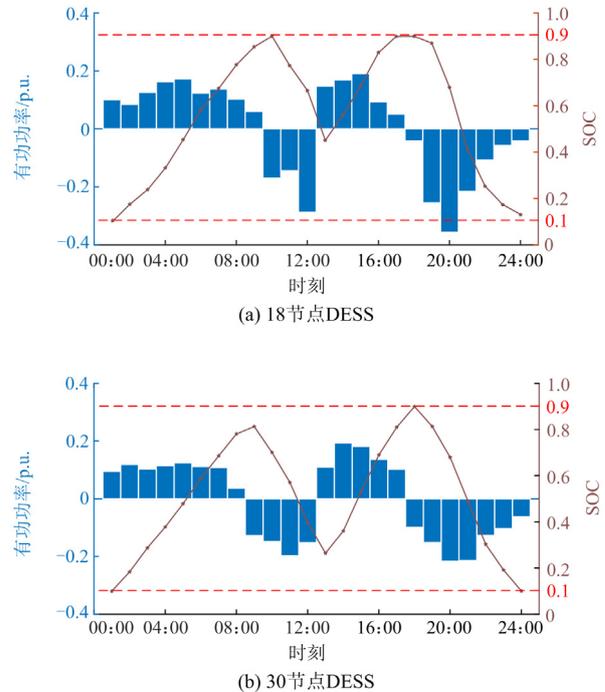


图 5 典型日内两台 DESS 运行情况

Fig. 5 Operation state of two DESSs in a typical day

图 5 为方案三中两台 DESS 的有功运行情况及 SOC 曲线, 可以看出两台储能能在 00:00—08:00 低负荷时段内都进行充电, 因此时购电电价最低, 在此时段内进行充电储存电能具有最好的经济性; 10:00—13:00 达到日负荷的一个小高峰, 此时两台 DESS 均放电以防止系统节点电压跌落。而 30 节点较 18 节点更接近负荷中心, 故该处的 DESS 会放电更早以应对负荷上升; 随后 13:00—17:00 系统负荷有所下降, 光伏出力达最大值, 两台 DESS 随即充电以吸收过多的有功, 防止节点电压异常升高; 18:00—23:00 系统负荷达到当日最高水平, 光伏出力逐渐下降至 0, 此时两台 DESS 均全力放电以维持系统电压处于合理的范围内。此外, 18 节点的 DESS 最大输出功率更大, 因其需要更大的功率以维持节点电压水平。最后, 两台 DESS 的 SOC 轨迹在正常范围之内。

储能输出的视在功率及无功功率的优化结果分别如图 6、图 7 所示。由图可知, 两台 DESS 的视在功率在 00:00—08:00 的低负荷时期运行点相对较低; 在 12:00 前后及 19:00—24:00 的荷峰时段, 两台 DESS 的视在功率输出均运行在各自 PCS 的极限功率上。从图 7 中可以看出, 功率四象限 DESS 可以通过向系统供给无功功率而减少根节点的无功注入, 进而降低系统的有功损耗。

DESS 配置前后网络各项运行指标如表 5 所示。尽管在 00:00—08:00 的低负荷时期由于储能充电导致网损从 770.03 kWh 升至 793.62 kWh, 但日内总网损仍由 2775.92 kWh 降至 2058.82 kWh, 降损效果达到 25.83%。在电压水平方面, 得益于储能的无功支撑, 在低负荷时期使得 DESS 的充电行为也

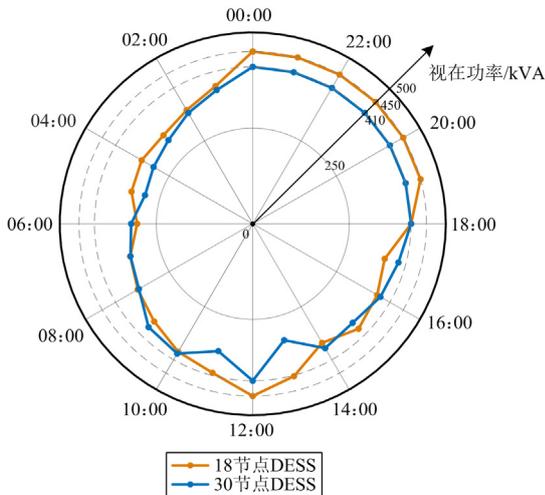


图 6 典型日内两台 DESS 视在功率运行轨迹

Fig. 6 Apparent power track of two DESSs in a typical day

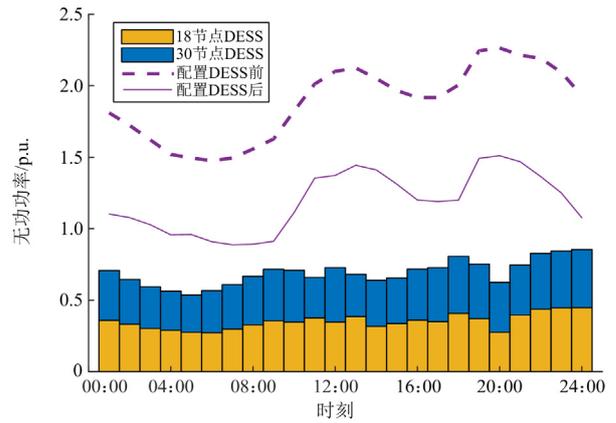


图 7 DESS 无功出力及系统根节点注入无功功率

Fig. 7 Reactive power of DESSs output and root bus injection

表 5 DESS 配置前后系统各项运行指标

Table 5 Operating indicators of the system before and after DESSs configuration

时段		网损/ kWh	平均电压偏 移/(p.u.·h ⁻¹)	最大三相不 平衡度/%
00:00—08:00	配置前	770.03	3.52	2.45
	配置后	793.62	2.17	2.34
08:00—18:00	配置前	938.18	3.15	2.67
	配置后	629.15	1.99	2.62
18:00—24:00	配置前	1067.71	4.81	2.79
	配置后	636.05	2.20	2.68
总计	配置前	2775.92	3.69	2.79
	配置后	2058.82	2.10	2.68

并未对电压水平造成影响, 甚至有所提升, 平均节点电压偏移量由 3.52 p.u.·h⁻¹ 降至 2.17 p.u.·h⁻¹; 其次, 系统在 18:00—24:00 的荷峰时期平均节点电压偏移量由配置前的 4.81 p.u.·h⁻¹ 减少至 2.10 p.u.·h⁻¹, 优化效果最佳, 达到 56.34%。日内系统的平均节点电压偏移量也由原来的 3.69 p.u.·h⁻¹ 降低至 2.10 p.u.·h⁻¹。最后, 系统三相不平衡度均在允许范围内, 符合要求。

FVSV 代表了节点全维电压灵敏度的波动程度, 而全维电压灵敏度则代表该节点电压幅值受功率变化的影响程度。因此节点 FVSV 在一定程度上反映了该节点的电压水平。为了从另一角度论证功率四象限 DESS 对系统电压水平的提升效果, 图 8 绘制了储能配置前后节点 FVSV 的分布情况。由图 8 可知, 未配置 DESS 时系统 FVSV 的最大值 1.0826 出现在 18 节点的 B 相, 说明该处电压不稳定。在 18 和 30 节点分别配置一台 DESS 后, 18 节点 B 相的 FVSV 降至 0.1529, 降幅达到 85.88%。从图 9 中 18 节点的时序电压分布也可以看出, 未配置 DESS 时该节点电压越限严重, 仅在 14:00—16:00

光伏出力最大时节点电压满足约束; 接入 DESS 后 18 节点的电压回升至正常水平, 未出现电压越限现象, 优化效果理想, 验证了本文所提方法的有效性。

综上所述, 考虑储能 PCS 的功率四象限运行策略可以在规划阶段有效深掘 DESS 在多方面的潜力, 兼顾提升系统经济性的同时更高效地发挥了储能的实用性能。

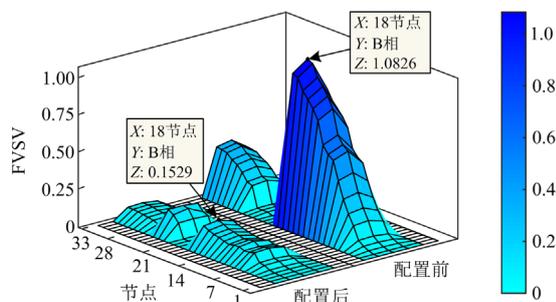


图 8 各节点全维电压灵敏度方差分布

Fig. 8 FVSV distribution of each bus

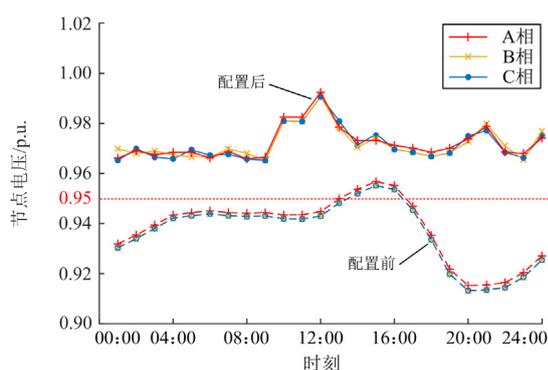


图 9 DESS 配置前后的 18 节点电压水平

Fig. 9 The 18-bus voltage profile before and after DESSs configuration

5 结论

本文基于储能 PCS 的功率四象限运行策略, 提出了面向不平衡配电网的 DESS 两阶段优化配置方法。通过改进 IEEE33 节点三相配电网进行算例仿真分析, 得出结论如下:

1) 储能的接入不但可以通过分时电价机制实现套利收益, 还可以通过降损、调压等手段降低系统运行成本。在 18 和 30 节点各配置一台储能后, 系统的总运行成本降低约 35%。

2) 考虑无功-电压耦合的电压灵敏度分析方法可以通过计算节点的 FVSV 以确定功率四象限 DESS 的最佳接入位置, 为相关储能选址研究提供了参考。

3) 功率四象限运行的 DESS 可通过协同有功功

率和无功功率的灵活输出实现高效的电压调节, 使不平衡配电网各节点电压均在规定的范围内。同时可以降低网络的有功损耗, 降损率达 25%。

考虑到目前电动汽车的市场体量快速上涨, 如何分析大量电动汽车接入对 DESS 规划方案的影响还需进一步研究。

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(7): 1893-1904, 2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [2] 石立国, 李延真, 关雪琳, 等. 电动汽车充电桩与分布式电源多阶段协同规划方法[J]. 供用电, 2022, 39(5): 33-40, 53.
SHI Liguang, LI Yanzhen, GUAN Xuelin, et al. Combined multi-stage planning method of EV charging piles and distributed generations[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 33-40, 53.
- [3] 赵龙, 杨波, 崔灿, 等. 基于多种群牵引差分进化算法的含分布式电源配电网规划[J]. 供用电, 2022, 39(5): 61-69.
ZHAO Long, YANG Bo, CUI Can, et al. Distribution network planning with distributed generation based on multi group traction differential evolution algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 61-69.
- [4] YU P, WAN C, SONG Y, et al. Distributed control of multi-energy storage systems for voltage regulation in distribution networks: a back-and-forth communication framework[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 12(3): 1964-1977.
- [5] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [6] 李征, 王文宾, 韩胜峰, 等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 32-41.
LI Zheng, WANG Wenbin, HAN Shengfeng, et al. Voltage adaptability of distributed photovoltaic access to a distribution network considering reactive power support[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 32-41.

- [7] 李军徽, 侯涛, 严干贵, 等. 计及调频成本和荷电状态恢复的多储能系统调频功率双层优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8020-8033.
LI Junhui, HOU Tao, YAN Gangui, et al. Two-layer optimization of frequency modulation power in multi-battery energy storage system considering frequency modulation cost and recovery of state of charge[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8020-8033.
- [8] 孙伟卿, 罗静, 张婕. 高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 9-18.
SUN Weiqing, LUO Jing, ZHANG Jie. Energy storage capacity allocation and influence factor analysis of a power system with a high proportion of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 9-18.
- [9] 王仁顺, 赵宇, 马福元, 等. 受端电网高比例可再生能源消纳的运行瓶颈分析与储能需求评估[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3777-3787.
WANG Renshun, ZHAO Yu, MA Fuyuan, et al. Operational bottleneck analysis and energy storage demand evaluation for high proportion of renewable energy consumption in receiving-end grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3777-3787.
- [10] 李建林, 袁晓冬, 郁正纲, 等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 15-24.
LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15-24.
- [11] FU X, WU X, ZHANG C, et al. Planning of distributed renewable energy systems under uncertainty based on statistical machine learning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 619-645.
- [12] 闫群民, 董新洲, 穆佳豪, 等. 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 11-19.
YAN Qunmin, DONG Xinzhou, MU Jiahao, et al. Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 11-19.
- [13] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 配电网分布式储能集群调压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 133-141.
LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Control strategy of voltage regulation for distributed energy storage cluster in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 133-141.
- [14] SUN X, QIU J, YI Y, et al. Cost-effective coordinated voltage control in active distribution networks with photovoltaics and mobile energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 13(1): 501-513.
- [15] GUO Z, WEI W, CHEN L, et al. Operation of distribution network considering compressed air energy storage unit and its reactive power support capability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2954-2965.
- [16] KHASANOV M, KAMEL S, RAHMANN C, et al. Optimal distributed generation and battery energy storage units integration in distribution systems considering power generation uncertainty[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(24): 3400-3422.
- [17] 黄志强, 陈业伟, 毛志鹏, 等. 柔性多状态开关与分布式储能系统联合接入规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 29-37.
HUANG Zhiqiang, CHEN Yewei, MAO Zhipeng, et al. Joint access planning of soft open point and distributed energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 29-37.
- [18] ZHANG Z, DOU C, YUE D, et al. Event-triggered hybrid voltage regulation with required BESS sizing in high-PV-penetration networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2614-2626.
- [19] SAINI P, GIDWANI L. An environmental based techno-economic assessment for battery energy storage system allocation in distribution system using new node voltage deviation sensitivity approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 128(3).
- [20] ZHENG Y, SONG Y, HUANG A, et al. Hierarchical optimal allocation of battery energy storage systems for multiple services in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 11(3): 1911-1921.
- [21] MUQBEL A, AL-AWAMI A T, Parvania M. Optimal planning of distributed battery energy storage systems in unbalanced distribution networks[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 16(1): 1194-1205.
- [22] WANG H, YAN Z, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal energy storage allocation for mitigating the unbalance in active distribution network via uncertainty quantification[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 12(1): 303-313.
- [23] 王永杰, 吴文传, 张伯明, 等. 有功无功协调的主动配电网鲁棒电压控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 29-34.
WANG Yongjie, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al.

- Active and reactive power coordinated robust optimization for active distribution networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(9): 29-34.
- [24] 吴科成, 高志华, 刘瑞宽, 等. 考虑分布式储能功率四象限输出的主动配电网鲁棒优化调度模型[J]. *南方电网技术*, 2021, 15(11): 75-84.
- WU Kecheng, GAO Zhihua, LIU Ruikuan, et al. Robust optimal scheduling model of active distribution network considering four-quadrant output of distributed energy storage power[J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(11): 75-84.
- [25] XIAO X, LI Z, WANG Y, et al. Optimal power quality compensation of energy storage system in distribution networks based on unified multi-phase OPF model[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(3): 1873-1887.
- [26] 贾兆昊, 张峰, 丁磊. 考虑功率四象限输出的配电网储能优化配置策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 105-113.
- JIA Zhaohao, ZHANG Feng, DING Lei. Optimal allocation strategy of energy storage in distribution network considering power four-quadrant output[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 105-113.
- [27] LI Y, CAI H. Improving voltage profile of unbalanced Low-Voltage distribution networks via optimal placement and operation of distributed energy storage systems[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2022, 16(13): 2748-2761.
- [28] ZULPO R S, LEBORGNE R C, BRETAS A S. Optimal siting and sizing of distributed generation through power losses and voltage deviation[C] // *IEEE 16th International Conference on harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, May 25-28, 2014, Bucharest, Romania: 871-875.
- [29] 李振坤, 陈思宇, 符杨, 等. 基于时序电压灵敏度的有源配电网储能优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(16): 4630-4640.
- LI Zhenkun, CHEN Siyu, FU Yang, et al. Optimal allocation of ess in distribution network containing dg base on timing-voltage-sensitivity analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(16): 4630-4640.
- [30] ALIRAHMI S M, MOUSAVI S F, AHMADI P, et al. Soft computing analysis of a compressed air energy storage and SOFC system via different artificial neural network architecture and tri-objective grey wolf optimization[J]. *Energy*, 2021, 236.
- [31] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69(3): 46-61.
- [32] LONG W, JIAO J, LIANG X, et al. Inspired grey wolf optimizer for solving large-scale function optimization problems[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 60: 112-126.
- [33] SU X, ZHANG Z, LIU Y, et al. Sequential and comprehensive BESSs placement in unbalanced active distribution networks considering the impacts of BESS dual attributes on sensitivity[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(4): 3453-3464.
- [34] 车仁飞, 李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(1): 75-80.
- CHE Renfei, LI Renjun. A new three-phase power flow method for weakly meshed distribution systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(1): 75-80.
- [35] ZHAO H, WU Q, HU S, et al. Review of energy storage system for wind power integration support[J]. *Applied Energy*, 2015, 137: 545-553.

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2023-02-22

作者简介:

李英量(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定控制、配电网规划;
E-mail: yingliang.li@hotmail.com

蔡鹤鸣(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式储能与主动配电网运行优化。E-mail: brokencai1082@gmail.com

(编辑 许威)