

DOI: 10.7667/PSPC180402

基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置与容量优化配置方法

杜鹏, 米增强, 贾雨龙, 林立乾

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北保定 071003)

摘要: 针对典型日负荷曲线, 提出基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置和容量优化配置方法。该方法考虑了分布式储能的充放电运行状态, 基于网损灵敏度方差确定配电网中各节点接入分布式储能的优先顺序。以配电网网损和节点电压波动为目标函数, 运用改进的粒子群算法对分布式储能的充放电功率进行优化, 并确定分布式储能的最优配置容量。仿真结果表明, 采用该方法确定分布式储能在配电网中的位置和容量可最大化实现功率就地平衡、降低配电网网损和降低配电网节点电压波动, 实现分布式储能在配电网中的优化配置。

关键词: 分布式储能; 配电网; 网损灵敏度方差; 改进粒子群算法; 有功网损

Optimal placement and capacity of distributed energy storage in distribution system based on the sensitivity variance of network loss

DU Peng, MI Zengqiang, JIA Yulong, LIN Liqian

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In view of typical daily load curve, a method of optimal placement and capacity of distributed energy storage in distribution system based on the sensitivity variance of network loss is proposed. In the method, the charging and discharging operation state of distributed energy storage are taken into account. The priority of all nodes in the distribution network to locate distributed energy storage based on the sensitivity variance of network loss is determined. Taking the distribution network loss and node voltage fluctuation as the objective function, the modified particle swarm algorithm is used to optimize the charging and discharging power of distributed energy storage. And the optimal capacity of distributed energy storage is determined. Finally, the simulation results show that the optimal method can effectively maximize the balance of power on the ground, optimize the network loss of the distribution network and lower the voltage fluctuation of the nodes, and achieve the optimal configuration of distributed energy storage in the distribution network.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. KJGW2018-014) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018QN075).

Key words: distributed energy storage; distribution network; sensitivity variance of network loss; modified particle swarm optimization algorithm; power loss

0 引言

储能技术是保障清洁能源大规模发展和电网经济运行的关键, 也是智能电网的重要组成部分^[1-2]。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(KJGW2018-014); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018QN075)

随着储能技术进步和成本降低以及需求侧的演化发展, 分布式储能在电力系统中的广泛应用是未来电网发展的必然趋势^[3]。国家发改委发布的《可再生能源发展“十三五”规划》将“推动储能技术示范应用配合国家能源战略行动计划, 推动储能技术在可再生能源领域的示范应用, 实现储能产业在市场规模、应用领域和核心技术等方面的突破”列为“十

三五”期间可再生能源发展的主要任务。当分布式储能接入配电网后,配电网潮流的方向和大小将发生改变,随之将对配电网的网损和电压产生影响。分布式储能接入位置和容量的不同对配电网的网损和电压有较大的影响,因此其接入位置和容量的确定是亟需解决的问题。

国内外学者从不同角度对分布式储能接入配电网的位置和容量优化配置方法进行了研究。文献[4]以储能安装成本、储能运行成本、切断可中断负荷的罚金及新电路的扩展成本的总和为目标函数,以配电网扩展规划为场景研究分布式储能的选点布局和容量配置。文献[5]提出了储能布局和尺寸的概念,证明了当发电成本曲线是凸的和递减的情况下,总是存在一个最优的容量分配方案,但没有给出放置分布式储能的可行方法。文献[6]提出了一种基于成本的方法来优化配电网中分布式储能的接入位置和容量,但不适用于大型系统。文献[7-8]研究了分布式储能和其他资源(如分布式电源和电容器)的规划问题,分布式储能被视为预留的调度资源。因此,分布式储能没有得到充分的利用。文献[9-10]考虑了分布式储能接入配电网的多目标优化问题,用智能优化算法对配电网中分布式储能的接入位置和容量进行优化,但对于大规模系统的运算时间较长。文献[11-13]对分布式电源和电动汽车充电桩的选址和定容进行了深入的讨论。文献[14-15]以电压灵敏度系数作为节点功率注入的函数来确定能够改善配电网电压水平的分布式储能接入位置,但没有对分布式储能接入配电网的容量进行优化。

本文运用网损灵敏度公式计算配电网各节点24 h的网损灵敏度,并根据各节点网损灵敏度方差确定配电网中各节点接入分布式储能的优先顺序。通过该方法得到分布式储能的最优接入位置,能确保分布式储能接入配电网后系统的网损最小。另外,本文以配电网网损和节点电压波动为目标函数,采用基于模拟退火的粒子群优化算法对选定节点分布式储能的充放电功率进行优化,并由此确定分布式储能的最优接入容量。本文提出的方法可为分布式储能在配电网中的优化配置提供参考。

1 分布式储能的优化布置

在配电网中, t 时刻的有功网损可以表示为^[16]

$$P_{\text{Loss},t} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\alpha_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j)] \quad (1)$$

式中: $\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j)$; $\beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j)$;

$V_i \angle \delta_i$ 为节点*i*在*t*时刻的电压; $V_j \angle \delta_j$ 为节点*j*在*t*时刻的电压; $r_{ij} + jx_{ij} = Z_{ij}$ 为节点阻抗矩阵的*i*行,*j*列元素; P_i, P_j 分别为节点*i, j*在*t*时刻注入的有功功率; Q_i, Q_j 分别为节点*i, j*在*t*时刻注入的无功功率。

在*T*时间段内的总网损为

$$E_{\text{Loss}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{Loss},t} \quad (2)$$

将式(1)分别对 P_i, Q_i 进行求导,可得

$$LSFP_i = \frac{\partial P_{\text{Loss},t}}{\partial P_i} = 2 \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} P_j - \beta_{ij} Q_j) \quad (3)$$

$$LSFQ_i = \frac{\partial P_{\text{Loss},t}}{\partial Q_i} = 2 \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} Q_j - \beta_{ij} P_j) \quad (4)$$

网损灵敏度反映出一定的系统运行方式下,节点*i*增加单位负荷功率引起的网损变化量。网损灵敏度越大,说明该节点对配电网网损的变化越敏感。在网损灵敏度较低时充电,可尽可能减小配电网网损的增加量,在网损灵敏度较高时进行放电可最大化降低配电网网损。在已有的研究中,仅根据负荷峰值情况下的网损灵敏度来确定分布式储能的优化布置^[11]。由于分布式储能充放电运行状态的变化和负荷曲线的波动,仅根据负荷峰值来对分布式储能进行优化布置是不精确的。

为了尽可能降低配电网网损,该文综合考虑了配电网各节点24 h的网损灵敏度变化,提出基于网损灵敏度方差确定配电网各节点接入分布式储能的优先顺序的方法。对于配电网中的每个节点,其网损灵敏度方差为

$$\delta_i = \frac{1}{24} \sum_{n=1}^{24} (LSFP_i - \frac{1}{24} \sum_{n=1}^{24} LSFP_i)^2 \quad (5)$$

式中, δ_i 为节点*i*在*t*时刻的网损灵敏度方差。 δ_i 综合考虑了分布式储能的充放电运行状态。对于配电网每个节点,网损灵敏度方差越大,网损灵敏度的波动范围越大,整体上越有利于配电网网损的降低。

在配电网中安装分布式储能时,可以通过各节点网损灵敏度方差的大小对配电网各节点进行排序,选择网损灵敏度方差较大的节点进行安装,使有功优化在计算时优先补偿降损效果最好的节点,缩小计算时间,提高模型的求解效率。

2 分布式储能的容量优化

2.1 分布式储能容量优化模型

在配电网中接入分布式储能时,需要考虑其充放电功率及容量大小^[17-18]。本文以配电网网损和各

节点电压波动的总和为目标函数, 对分布式储能的充放电功率进行优化。由于存在两个目标函数, 采用线性加权法进行处理, 将多目标优化问题转化为单目标优化问题^[19]。同时由于两个目标函数的量纲不同, 需要进行归一化处理, 如下所述。

$$\min f = \lambda_1 \frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{Loss},t}}{P_{\text{Loss}}} + \lambda_2 \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (V_{i,t} - V_{\text{ref}})^2}{V} \quad (6)$$

式中: P_{Loss} 为原始配电网 1 天中的网络损耗; V 为原始配电网 1 天中各节点电压波动的总和; N 为配电网的节点数; T 为 1 天中所划分的总时段数; $V_{i,t}, V_{\text{ref}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的电压幅值和基准电压值; λ_1 和 λ_2 为目标函数的权重系数, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

在对分布式储能的位置和容量进行优化配置时, 不仅需要考虑系统的运行约束, 同时也要考虑分布式储能的充放电功率约束。

1) 功率平衡约束

$$P_{G_{i,t}} + P_{\text{DSS}_{i,t}} - P_{L_{i,t}} = V_{i,t} \sum_{j=1}^N V_{j,t} (G_{i,j} \cos \delta_{ij,t} + B_{i,j} \sin \delta_{ij,t}) \quad (7)$$

$$Q_{G_{i,t}} + Q_{\text{DSS}_{i,t}} - Q_{L_{i,t}} = V_{i,t} \sum_{j=1}^N V_{j,t} (G_{i,j} \sin \delta_{ij,t} - B_{i,j} \cos \delta_{ij,t}) \quad (8)$$

式中: $P_{G_{i,t}}, Q_{G_{i,t}}$ 分别为 t 时刻配电网根节点处的有功功率和无功功率; $P_{\text{DSS}_{i,t}}, Q_{\text{DSS}_{i,t}}$ 分别为 t 时刻节点 i 上分布式储能发出或吸收的有功功率和无功功率; $P_{L_{i,t}}, Q_{L_{i,t}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的有功负荷和无功负荷; $V_{i,t}, V_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 和 j 的电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 为节点 i 和 j 之间互导纳的实部和虚部; $\delta_{ij,t}$ 为 t 时刻 i, j 两节点电压的相角差。

2) 分布式储能充放电功率约束

$$P_{\text{DSS}_{i,t} \min} \leq P_{\text{DSS}_{i,t}} \leq P_{\text{DSS}_{i,t} \max} \quad (9)$$

式中, $P_{\text{DSS}_{i,t} \max}, P_{\text{DSS}_{i,t} \min}$ 为分布式储能功率的上限和下限。

3) 分布式储能能量平衡约束

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{DSS}_{i,t}} \cdot \Delta t = 0 \quad (10)$$

2.2 分布式储能最优配置容量的确定

根据分布式储能的优化充放电功率和充放电时段来计算配电网中分布式储能的最优配置容量。在分布式储能的整个充放电时段, 计算每个时刻分布式储能的累积充电量或放电量, 并计算分布式储能每个连续充电或放电时间段的累积充电量或放电量, 取两者绝对值的最大值作为分布式储能的最优配置容量。具体计算过程如下所述。

$$\begin{cases} E_1 = \max(|P_{\text{DSS}_{i,t}} \Delta t \eta|, |P_{\text{DSS}_{i,t}} \Delta t \eta + P_{\text{DSS}_{i,t}} \Delta t \eta|, \dots, \\ |P_{\text{DSS}_{i,t}} \Delta t \eta + P_{\text{DSS}_{i,t}} \Delta t \eta + \dots + P_{\text{DSS}_{i,t}} \Delta t \eta|) \\ E_2 = \max(|\sum_{t=1}^{m_1} P_{\text{DSS}_{i,t}} \Delta t \eta|, |\sum_{t=m_2}^{m_3} P_{\text{DSS}_{i,t}} \Delta t \eta|, \dots, |\sum_{t=m_j}^{m_n} P_{\text{DSS}_{i,t}} \Delta t \eta|) \\ E = \max(E_1, E_2) \end{cases} \quad (11)$$

式中: E 为节点 i 处分布式储能的最优配置容量; $1 \sim m_1, m_2 \sim m_3, m_j \sim m_n$ 为样本数据中需要连续充电或者连续放电的时段; Δt 为样本数据采样时间间隔; η 为分布式储能的充放电效率, 如式(12)所示。

$$\eta = \begin{cases} \eta_{\text{ch}} & \text{充电} \\ \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} & \text{放电} \end{cases} \quad (12)$$

2.3 优化模型的求解

在对配电网中分布式储能的位置和容量进行优化配置时, 需要对分布式储能的位置和功率进行编码, 编码形式为

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n, \dots, y_{j-n+i}, \dots, y_{T-n}] \quad (13)$$

式中: x_i 为第 i 个分布式储能的接入位置, 应对其取整; y_{j-n+i} 为 $(j+1)$ 时刻第 i 个分布式储能的充放电功率; n 为分布式储能的个数。

该文在粒子群优化算法中引入模拟退火的思想, 利用退火算法在一定概率控制下暂时接受一些劣质解的特性改进标准的粒子群优化算法。基于改进的粒子群算法求解分布式储能的位置和容量的优化方法流程如图 1 所示, 其基本步骤如下所述。

(1) 运用网损灵敏度式(3)计算配电网每个节点 1 天中的网损灵敏度, 并根据式(5)计算配电网每个节点的网损灵敏度方差, 进行排序, 选择待安装分布式储能的节点。

(2) 初始化。输入配电网原始数据, 在约束条件范围内随机产生粒子的位置和速度、粒子种群大小、最大迭代次数、模拟退火的温度等。

(3) 根据粒子初始负荷节点的注入功率值, 运用潮流计算程序进行配电网的潮流和网损计算, 并计算当前粒子的适应度值。

(4) 更新粒子的 p_{best} 和 g_{best} 值。

(5) 采用模拟退火算法对求出的 p_{best} 进行抽样, 产生新解并计算目标函数值, 采用 Metropolis 准则对最优解保留或者舍弃。

(6) 根据抽样的结果得到全局最优解 g_{best} , 并检查是否达到最大迭代次数, 若没有达到, 则转向(4), 否则转向(7)。

(7) 输出种群最优解。

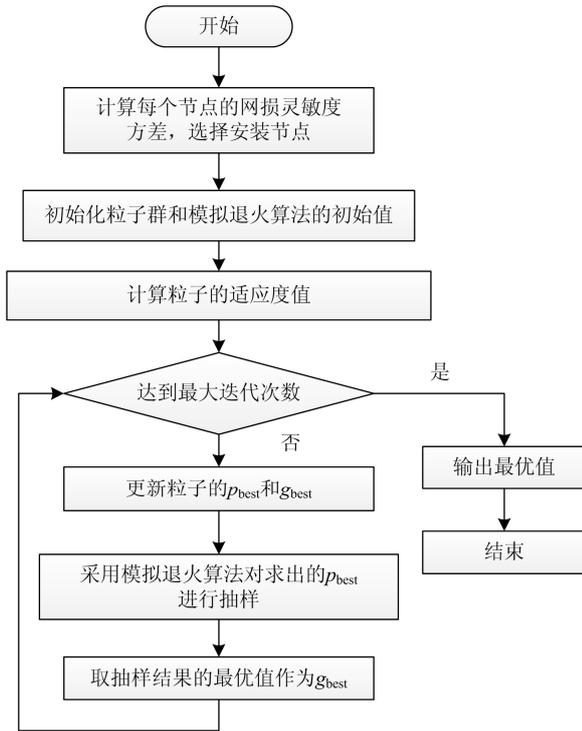


图 1 分布式储能的位置和容量优化方法求解流程
Fig. 1 Flowchart of optimal locating and sizing of distributed energy storage

3 算例分析

3.1 算例系统

本文采用如图 2 所示的 IEEE33 节点系统来进行仿真分析。系统总的有功负荷为 3 715 kW, 无功负荷为 2 300 kvar, 基准电压为 12.66 kV, 节点电压允许范围为 0.95~1.05 p.u.。分布式储能允许接入节点为 2—33, 设定分布式储能为单位功率因数, 最大接入节点为 4 个, 最大接入功率为 200 kW。其中, $\eta_{ch} = 0.9$, $\eta_{dis} = 0.9$, $T=24$ 。

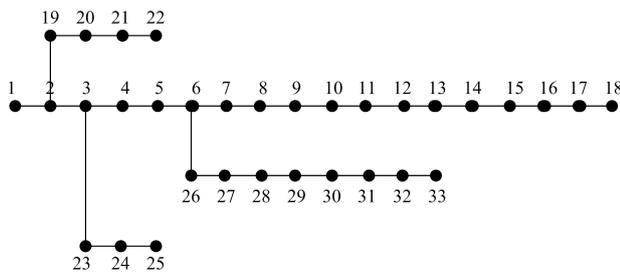


图 2 IEEE33 节点系统示意图
Fig. 2 System diagram of IEEE33

权重因子体现了各目标函数所占的比重, 其值对目标函数的优化效果产生影响。已有研究指出^[17],

通常情况下各目标取相同权重因子便可达到综合最优^[20], 故取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ 。

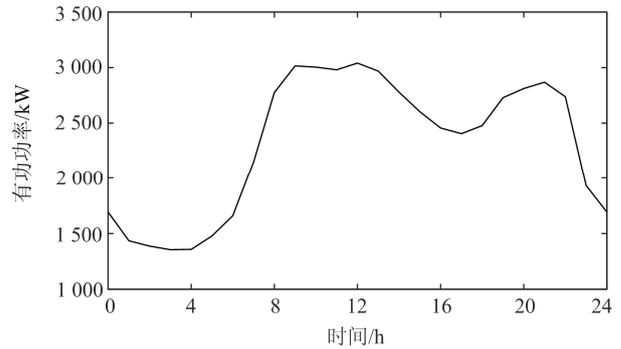


图 3 负荷典型日特性曲线
Fig. 3 Typical daily curve of load

3.2 分布式储能位置的优化

根据第 1 节的方法计算配电网各节点 24 h 的网损灵敏度, 并绘制各节点网损灵敏度曲线^[21-23], 如图 4 所示。

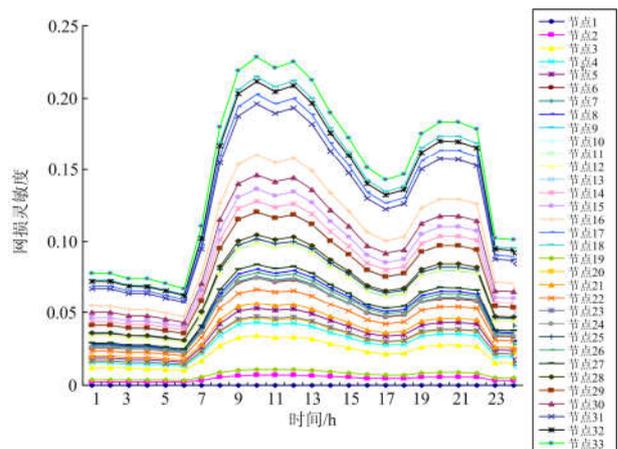


图 4 33 节点配电网的网损灵敏度
Fig. 4 LSF values for the 33-bus test system

由图 4 可知, 除了节点 1 外, 其他节点的网损灵敏度变化几乎是相同的。这是因为节点 1 是平衡节点, 没有功率注入。对其他节点, 网损灵敏度的值在负荷低谷期是比较小的, 在负荷高峰期比较大。因此, 对于同样的节点功率变化量, 负荷高峰期网损的变化量要多于负荷低谷期, 应尽量在负荷低谷期充电, 负荷高峰期放电, 以最大限度的降低配电网网损。此外可以发现, 在负荷低谷期, 节点 2 的网损灵敏度是最低的; 在负荷高峰期, 节点 33 的网损灵敏度是最高的。

以 33 节点配电网为例, 计算配电网各节点的网损灵敏度方差, 如图 5 所示。从图 5 可知, 网损灵敏度方差最大的节点是 33, 网损灵敏度方差最小

的节点是 1。此外, 节点 17、18、32 和 33 的网损灵敏度方差比其他节点的大。因此, 在这些节点上安装分布式储能有利于降低配电网网损。

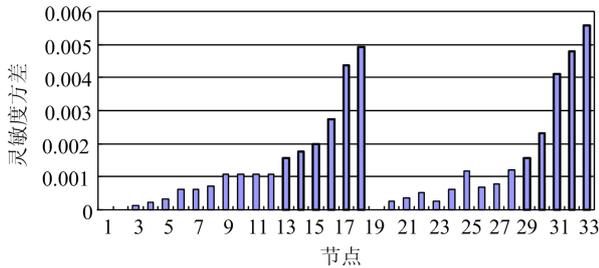


图 5 33 节点配电网各节点的网损灵敏度方差

Fig. 5 Loss sensitivity variance values for the 33-bus test system

3.3 分布式储能的容量优化

基于网损灵敏度方差分析的结果, 选取待安装节点的集合为 {17,18,32,33}。运用改进的粒子群优化算法进行分布式储能的容量优化配置, 结果如表 1 所示。

表 1 基于灵敏度方差的分布式储能位置和容量优化

Table 1 Results of optimal locating and sizing of distributed energy storage based on the loss sensitivity variance

分布式储能 安装情况	有功网 损/kW	节点电压 波动/kV	峰谷差/ kW	接入 位置	接入容量/ MW·h
未安装	1 992	190.255	1 682	—	—
安装	1910	176.281	931	17	0.944
				18	0.677
				32	1.024
				33	0.638

求解得出接入分布式储能的总容量为 3.283 MW·h。合理地对分布式储能的位置和容量进行优化, 不但能够降低配电网网损, 而且还可以降低配电网节点电压波动。接入分布式储能后, 配电网网损由 1 992 kW 降低到 1 910 kW, 节点电压波动由 190.255 kV 降低到 176.281 kV。此外, 分布式储能的接入有效抑制了配电网负荷峰谷差, 优化后降低幅度达到 44.6%。当不考虑安装分布式储能的网损灵敏度方差时, 将节点 2—33 作为待选安装节点, 运用改进的粒子群优化算法对分布式储能的位置和容量进行优化, 结果如表 2 所示。求解得出分布式储能的优化安装节点为 8、14、15、31, 接入总容量为 3.549 MW·h。

由表 2 可知, 当考虑所有可安装节点时, 配电网网损和负荷峰谷差均得到了一定程度的降低。配电网网损降低了 79 kW, 负荷峰谷差降低幅度为 38.1%。配电网的电压水平得到了提高, 节点电压波动由 190.255 kV 降低到 179.153 kV。

表 2 考虑所有可安装节点的分布式储能位置和容量优化
Table 2 Results of optimal locating and sizing of distributed energy storage considering all installable nodes

分布式储能 安装情况	有功网 损/kW	节点电压 波动/kV	峰谷差/ kW	接入 位置	接入容量/ MW·h
未安装	1 992	190.255	1 682	—	—
安装	1 913	179.153	1 041	8	0.768
				14	0.695
				15	1.022
				31	1.064

通过表 1 和表 2 的对比可发现, 在配电网降损和降低节点电压波动方面, 基于网损灵敏度方差的配置方案略优于搜索所有可安装节点的配置方案。但在降低配电网峰谷差方面, 基于网损灵敏度方差的配置方法明显优于搜索所有可安装节点的配置方法。与搜索所有可安装节点的配置方法相比, 采用基于网损灵敏度方差的配置方法进行分布式储能的位置和容量优化时, 分布式储能的配置容量减少 0.266 MW·h, 迭代 200 次, 耗时节省 1.03 min。基于网损灵敏度方差的方法确定了对配电网网损变化比较敏感的几个点, 精确找到了分布式储能的安装位置, 有利于分布式储能容量的优化, 且缩小了求解空间, 计算效率高。

图 6 对不同安装方法下的节点电压进行了对比。选取配电网末端, 最有可能发生电压越限的节点 18 为研究对象。从图 6 可知, 分布式储能接入配电网, 可有效降低配电网节点电压波动, 改善节点电压水平。此外, 分布式储能充电将导致配电网电压的降低, 而分布式储能放电将提高配电网电压。

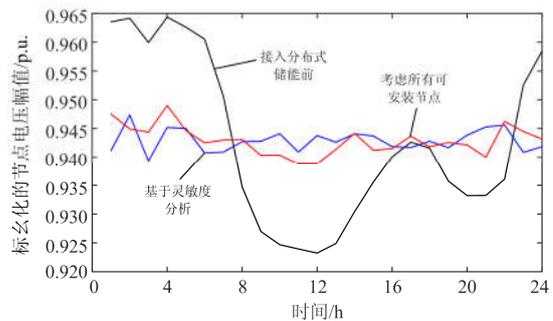


图 6 不同安装方法下节点 18 的电压对比

Fig. 6 Voltage curves of node 18 in different installation methods

采用基于网损灵敏度方差与考虑所有可安装节点的分布式储能的位置和容量优化后的负荷曲线如图 7 所示。由图 7 可知, 分布式储能的安装可平抑配电网负荷波动, 且采用基于网损灵敏度方差的配

置方法优化后的负荷曲线更加平滑。

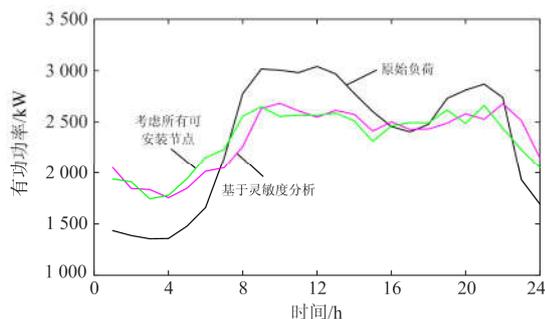


图 7 不同安装方法下的负荷曲线

Fig. 7 Load curves in different installation methods

4 结论

含分布式储能接入的主动配电网是未来电网发展的主要趋势, 如何安全、可靠地接入分布式储能是所面临的一大挑战。针对这一问题, 该文提出了基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置和容量优化配置方法, 得出以下主要结论:

(1) 考虑分布式储能的充放电运行状态, 基于网损灵敏度方差的配置方法可确定配电网各节点接入分布式储能的优先顺序。

(3) 考虑分布式储能的能量平衡、充放电功率等约束条件, 运用改进的粒子群算法对分布式储能的充放电功率进行优化, 并确定分布式储能的最优配置容量。

(3) 与考虑所有可安装节点的分布式储能的位置和容量优化配置方法相比, 基于网损灵敏度方差的优化配置方法更有利于降低配电网网损、降低配电网节点电压波动和降低负荷峰谷差。

参考文献

- [1] 王承民, 孙伟卿, 衣涛, 等. 智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 33-41.
WANG Chengmin, SUN Weiqing, YI Tao, et al. Review on energy storage application planning and benefit evaluation methods in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 33-41.
- [2] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10.
LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10.
- [3] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关
- 键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.
- LI Jianlin, MA Huimeng, YUAN Xiaodong, et al. Overview on key applied Technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [4] MACRAE C, OZLEN M, ERNST A, et al. Locating and sizing energy storage systems for distribution feeder expansion planning[C] // TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, November 1-4, 2015, Macao, China: 1-6.
- [5] THRAMPOULIDIS C, BOSE S, HASSIBI B. Optimal placement of distributed energy storage in power networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(2): 416-429.
- [6] CARPINELLI G, CELLI G, MOCCI S, et al. Optimal integration of distributed energy storage devices in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 985-995.
- [7] HUNG D Q, MITHULANANTHAN N. Community energy storage and capacitor allocation in distribution systems[C] // Power Engineering Conference, September 25-28, 2011, Brisbane, QLD, Australia: 1-6.
- [8] HUNG D Q, MITHULANANTHAN N. Multiple distributed generator placement in primary distribution networks for loss reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(4): 1700-1708.
- [9] NICK M, HOHMANN M, CHERKAOUI R, et al. Optimal location and sizing of distributed storage systems in active distribution networks[C] // 2013 IEEE Grenoble Conference, June 16-20, 2013, Grenoble, France: 1-6.
- [10] 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.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405-3411.
- [11] 李军, 颜辉, 张仰飞, 等. 配电网和微网中分布式电源选址定容方法对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 147-154.
LI Jun, YAN Hui, ZHANG Yanghui, et al. Comparison of locating and sizing methods of DGs between in micro-grids and in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 147-154.
- [12] 段庆, 孙云莲, 张笑迪, 等. 电动汽车充电桩选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 88-93.

- DUAN Qing, SUN Yulian, ZHANG Xiaodi, et al. Location and capacity planning of electric vehicles charging piles[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 88-93.
- [13] 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.
- CHU Zhuang, LI Zhao, BAI Wangwang. Optimal siting and sizing of distributed generations considering uncertainties and environmental factors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 34-41.
- [14] NICK M, HOHMANN M, CHERKAoui R, et al. On the optimal placement of distributed storage systems for voltage control in active distribution networks[C] // IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, IEEE, 2012: 1-6.
- [15] CHRISTAKOU K, LEBouDEC J Y, PAOLONE M, et al. Efficient computation of sensitivity coefficients of node voltages and line currents in unbalanced radial electrical distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 741-750.
- [16] KOTHARI D P, DHILLON J S. Power system optimization[M]. New Delhi: Prentice-Hall, India, 2006.
- [17] 颜宁, 厉伟, 邢作霞, 等. 复合储能在主动配电网中的容量配置[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 180-186.
- YAN Ning, LI Wei, XING Zuoxia, et al. Capacity allocation method in active distribution network based on hybrid energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 180-186.
- [18] 李建林, 郭斌琪, 牛萌, 等. 风光储系统储能容量优化配置策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1189-1196.
- LI Jianlin, GUO Binqi, NIU Meng, et al. Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1189-1196.
- [19] 曾德良, 简一帆. 火电厂负荷分配的多目标优化算法[J]. 热力发电, 2017, 46(5): 98-104.
- ZENG Deliang, JIAN Yifan. Multi-objective optimization algorithm for load distribution in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(5): 98-104.
- [20] DAWES R M, CORRIGAN B. Linear models in decision making[J]. Psychological Bulletin, 1974, 81(2): 95.
- [21] SARDI J, MITHULANANTHAN N, HUNG D Q. A loss sensitivity factor method for locating ES in a distribution system with PV units[C] // 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), November 15-18, 2015, Brisbane, QLD, Australia: 1-5.
- [22] 宋柄兵, 顾洁. 考虑电网输电能力改善的超导储能装置优化选址定容[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(11): 92-98.
- SONG Bingbing, GU Jie. Optimal locating and sizing of superconducting magnetic energy storage device for transfer capability improvement of power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2017, 29(11): 92-98.
- [23] LI W, Lu C, PAN X, et al. Optimal placement and capacity allocation of distributed energy storage devices in distribution networks[C] // 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), August 20-23, 2017, Xi'an, China: 1403-1407.

收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-06-05

作者简介:

杜鹏(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为分布式储能, 主动配电网; E-mail: 2676518169@qq.com

米增强(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统与智能电网, 机械弹性储能技术;

贾雨龙(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式储能, 主动配电网, 柔性负荷建模。

(编辑 姜新丽)