

考虑分布式电源的配电网无功调度和 储能优化方法

王秀茹¹, 刘刚¹, 黄华峰¹, 谢生军¹, 凌万水²

(1. 国网江苏省电力有限公司宿迁供电分公司, 江苏 宿迁 223800; 2. 上海金智晟东电力科技有限公司, 上海 200233)

摘要:在配电系统中使用诸如光伏、电池储能系统等分布式电源可实现灵活高效的无功补偿。为此,提出一种考虑分布式能源的配电网无功调度和储能优化的分析方法。该方法以运行成本为目标函数,结合前推回代算法和近似拟合法对分布式电源的无功调度和储能方法进行优化。最后,在 2 种配电系统中,采用实际太阳辐照数据和系统运行数据对该方法的有效性进行验证。结果表明,该方法可以消除对初始解和参数整定的依赖,求解速度比现有常用算法提高了 50 倍,可用于实时调度。

关键词:无功调度;储能优化;分布式电源

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.015 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2022)04-0134-09

Reactive power dispatching and energy storage optimization for distribution network with distributed power resources

WANG Xiuru¹, LIU Gang¹, HUANG Huafeng¹, XIE Shengjun¹, LING Wanshui²

(1. Suqian Power Supply Bureau, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suqian 223800, China;
2. Shanghai Jinzhi Shengdong Power Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: In distribution network, the application of distributed power resources such as photovoltaics and battery energy storage systems can achieve flexible and efficient reactive power compensation. Therefore, the reactive power dispatch and energy storage optimization considering distributed power sources is proposed. The operating cost is selected as the objective function, and the backward-forward sweep algorithm and approximate fitting method are combined to optimize the reactive power dispatch and energy storage method of distributed network. In the end, the actual solar radiation data and system operating data are employed to verify the effectiveness of the proposed method in two power distribution systems. It is shown that this method does not depend on the initial solution and parameter tuning. Its solution speed is 50 times faster than the existing common algorithms, and can be utilized for real-time scheduling.

Key words: reactive power dispatch; economic optimization; distributed energy resource

由于可减少对传统发电厂的依赖,可再生能源的发展在全球范围内都有了显著的增长^[1-2]。以光

伏(photovoltaic, PV)形式的太阳能发电技术成本迅速下降,正变得越来越受欢迎^[3-5]。而光伏系统的

输出受太阳辐照度的约束,电池储能系统(battery energy storage system, BESS)常被用于补偿光伏系统的输出^[6-8]。与此同时,随着充电技术的不断进步,电动汽车(electric vehicle, EV)的使用也变得更加普遍^[9-10]。光伏、电池储能系统和电动汽车都能为其周边提供电能,可将其归类为分布式电源^[11-12]。

分布式电源除了有功输送能力之外,已被证明可通过逆变器向电网提供无功功率^[13-14]。在电动汽车没有接入电源的情况下也可以用来提供无功功率,而且使用电动汽车进行无功补偿不会导致其电池性能下降^[14]。相比配电系统中传统功率因数校正装置,利用逆变器和分布式电源进行功率因数校正的响应时间更快,还可以更精确地调节电压^[15]。

一些学者采用元启发式算法来求解基于分布式电源的无功调度问题^[16-18],而这些算法需要很高的计算条件和较长的求解时间。文献[19]采用了数学规划方法,数学规划求解速度较快,但要获得最优解,则依赖于问题的凸优化,而且对代价函数有严格的约束。对于非线性问题,数学规划往往收敛到局部最优解,不能得到全局最优解^[20]。目前大多数学者虽然已经根据分布式电源的某些特性对其无功调度问题进行了优化,但没有考虑实际的无功成本和电池储能系统的储能成本^[21-23]。为了克服这些不足,本文结合系统电价、无功成本及线损,提出一种可将系统的运行成本降至最低的分布式电源无功调度方法和储能优化方法。

1 优化问题约束条件

优化问题的目标为最大限度的降低配电系统运行成本,由此建立目标函数:

$$O_{\text{obj}} = \sum_{t=1}^T \left[\underbrace{c_t^{\text{Pgrid}} P_t^{\text{grid}}}_{\text{电网有功成本}} + \underbrace{c_t^{\text{Qgrid}} Q_t^{\text{grid}}}_{\text{电网无功成本}} + \underbrace{c^{\text{PPV}} \sum_{x=1}^M P_{x,t}^{\text{PV}}}_{\text{PV有功成本}} + \underbrace{\sum_{x=1}^M c_{x,t}^{\text{QPv}} Q_{x,t}^{\text{PV}}}_{\text{PV无功成本}} + \underbrace{\sum_{x=1}^B c_{x,t}^{\text{QBESS}} Q_{x,t}^{\text{BESS}}}_{\text{BESS无功成本}} + \underbrace{\sum_{x=1}^B c_{x,t}^{\text{BESS,deg}}}_{\text{BESS退化成本}} - \underbrace{c_t^{\text{Pgrid}} \sum_{x=1}^E P_{x,t}^{\text{EV}}}_{\text{EV有功成本}} + \underbrace{\sum_{x=1}^E c_{x,t}^{\text{QEV}} Q_{x,t}^{\text{EV}}}_{\text{EV无功成本}} \right] H \quad (1)$$

式中 c_t^{Pgrid} 、 c^{PPV} 分别为电网、光伏 t 时的有功电

价; c^{Qgrid} 为电网无功电价; $c_{x,t}^{\text{QPv}}$ 、 $c_{x,t}^{\text{QBESS}}$ 分别为第 x 个光伏、电池储能 t 时的无功电价; $c_{x,t}^{\text{QEV}}$ 为第 x 个电动汽车 t 时的无功电价; P_t^{grid} 、 Q_t^{grid} 分别为 t 时从电网购买的有功、无功功率; $P_{x,t}^{\text{PV}}$ 、 $Q_{x,t}^{\text{PV}}$ 分别为第 x 个光伏 t 时的有功、无功功率; $P_{x,t}^{\text{EV}}$ 、 $Q_{x,t}^{\text{EV}}$ 分别为第 x 个电动汽车 t 时的有功、无功功率; $Q_{x,t}^{\text{BESS}}$ 为第 x 个电池储能 t 时的无功功率; t 为时间标检; $H = 30$ min 为调度子间隔; M 、 B 、 E 、 T 分别为系统中光伏、电池储能、电动汽车、调度子间隔数量。

来自电网的有功成本包括对电池储能系统和电动汽车充电的成本。电动汽车的充电费用由车主支付,所以在目标函数中减去该项。

1.1 电网约束

电网约束为

$$P_t^{\text{grid}} - \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{loss}} - \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{load}} + \sum_{x=1}^M P_{x,t}^{\text{PV}} - \sum_{x=1}^B P_{x,t}^{\text{BESS}} - \sum_{x=1}^E P_{x,t}^{\text{EV}} = 0 \quad (2)$$

$$Q_t^{\text{grid}} - \sum_{i=1}^N Q_{i,t}^{\text{loss}} - \sum_{i=1}^N Q_{i,t}^{\text{load}} + \sum_{x=1}^M Q_{x,t}^{\text{PV}} + \sum_{x=1}^B Q_{x,t}^{\text{BESS}} + \sum_{x=1}^E Q_{x,t}^{\text{EV}} = 0 \quad (3)$$

$$|I_{i,t}| \leq I_{\text{max}} \quad (4)$$

$$V_{\text{min}} \leq |V_{i,t}| \leq V_{\text{max}} \quad (5)$$

式(2)~(5)中 $P_{i,t}^{\text{loss}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{loss}}$ 分别为连接节点 i 线路上的有功、无功损耗; $P_{x,t}^{\text{BESS}}$ 为第 x 个电池储能 t 时的有功功率; $P_{i,t}^{\text{load}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{load}}$ 分别为节点 i 处的有功、无功负载; $I_{i,t}$ 为从节点 i 流出的电流; I_{max} 为电流的上限; V_{min} 、 V_{max} 分别为节点 i ($V_{i,t}$) 处的最小、最大电压。式(2)、(3)分别表示有功、无功平衡约束,式(4)、(5)分别表示电流、电压约束。

1.2 光伏系统约束

光伏系统的预计输出功率为

$$P_t^{\text{PV}} = G_t P_{\text{rated}}^{\text{PV}} \cdot \frac{1 - \eta_T (T_t^{\text{PV}} - 25)}{1000} - P_t^{\text{PV,invloss}} \quad (6)$$

$$T_t^{\text{PV}} = T_t^a + \frac{G_t}{800} (T_{\text{NOCT}} - 20) \quad (7)$$

式(6)、(7)中 G_t 为预测太阳辐照度; $P_{\text{rated}}^{\text{PV}}$ 为标准试验条件下光伏的额定功率; η_T 为功率温度系数; T_t^{PV} 为光伏温度; T_t^a 为环境温度; T_{NOCT} 为太阳能电池的额定工作温度; $P_t^{\text{PV,invloss}}$ 为光伏逆变器中的

有功功率损耗。

在任何时间点注入或吸收的无功功率须遵循约束：

$$|Q_{x,t}^{PV}| \leq \sqrt{(S_{\max}^{PV})^2 - (P_{x,t}^{PV70})^2} \quad (8)$$

式中 S_{\max}^{PV} 为光伏逆变器额定容量； $P_{x,t}^{PV70}$ 为 70% 置信水平下光伏系统预计输出功率的上限，将 G_t 改为 G_t^{70} (70% 置信水平下的预测太阳辐照度上限) 即可得到。

虽然逆变器的无功、有功输出可实现解耦，不受固定功率因数的限制，但大多数商业逆变器仍然将其无功输出限制在一定范围内。

1.3 电池储能系统和电动汽车约束

$P_{x,t}^{BESS}$ 受最大充电功率 P_{\max}^{BESS} 和最大放电功率 P_{\min}^{BESS} (为负值) 限制。电池储能系统的充电状态 $S_{SOC,x,t}$ 也必须在允许范围内。电池储能系统的约束条件为

$$P_{\min}^{BESS} \leq P_{x,t}^{BESS} \leq P_{\max}^{BESS} \quad (9)$$

$$S_{SOC,\min} \leq S_{SOC,x,t} \leq S_{SOC,\max} \quad (10)$$

$$S_{SOC,x,t+1} = S_{SOC,x,t} + [\delta_{x,t}^{CH} (\eta^{CH})^{-1} P_{x,t}^{BESS} + \delta_{x,t}^{DCH} (\eta^{DCH})^{-1} P_{x,t}^{BESS} - P_{x,t}^{BESS,invloss}] \frac{H}{E_x^{BESS}} \quad (11)$$

式中 $\delta_{x,t}^{CH}$ 、 $\delta_{x,t}^{DCH}$ 分别为充、放电变量，当 $P_{x,t}^{BESS} > 0$ 时， $\delta_{x,t}^{CH}$ 为 1，否则为 0； η^{CH} 、 η^{DCH} 分别为电池储能系统的充、放电效率； E_x^{BESS} 为第 x 个电池储能系统的容量。

电动汽车充、放电约束如文献[23]所述。将式(8)上标 PV 分别改为 BESS 和 EV 即是电池储能系统和电动汽车提供的无功功率约束条件。

2 优化方法

2.1 无功调度优化

1) 无功成本计算。

假设将光伏、电池储能系统和电动汽车连接到系统的逆变器为具有无功容量的三相逆变器。不需要额外的投资来进行分布式能源的无功管理。逆变器中的功率损耗可以近似为

$$P^{invloss} = c^{\text{self}} + c^V S + c^R S^2 \quad (12)$$

式中 c^{self} 、 c^V 、 c^R 为通过实验确定的符合逆变器效率曲线的常数； S 为流经逆变器的视在功率。

无功注入造成的额外损耗为

$$\Delta P_{x,t}^{X,invloss} = \begin{cases} c^{X,V} (S_{x,t}^X - P_{x,t}^X) + c^{X,R} \cdot \\ \{ ((S_{x,t}^X)^2 - (P_{x,t}^X)^2), & P_{x,t}^X \neq 0 \\ [c^{X,\text{self}} + c^{X,V} Q_{x,t}^X + c^{X,R} (Q_{x,t}^X)^2], & P_{x,t}^X = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中 上标 $X \in \{EV, PV, BESS\}$ 分别表示电动汽车、光伏、电池储能。虽然附加功率损耗取决于逆变器参数，但无功成本的计算也受补偿附加损耗的电源影响。

光伏的无功成本为

$$c_{x,t}^{QPv} Q_{x,t}^{PV} = c_t^{Pgrid} \cdot \Delta P_{x,t}^{PV,invloss} \quad (14)$$

对于光伏系统，当 $P^{PV} \neq 0$ 时， $\Delta P_{x,t}^{X,invloss}$ 由 P^{PV} 补偿；当 $P^{PV} = 0$ 时， $\Delta P_{x,t}^{X,invloss}$ 由 P^{grid} 补偿。

电池储能系统的无功成本为

$$c_{x,t}^{QBESS} Q_{x,t}^{BESS} = \begin{cases} c_t^{Pgrid} \cdot \Delta P_{x,t}^{BESS,invloss}, & P^{BESS} \neq 0 \\ \frac{\sum_{t'=1}^t \delta_{x,t'}^{CH} P_{x,t'}^{BESS} c_{t'}^{Pgrid}}{\sum_{t'=1}^t \delta_{x,t'}^{CH} P_{x,t'}^{BESS}} \cdot \Delta P_{x,t}^{BESS,invloss}, & P^{BESS} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

对于电池储能系统，当 $P^{BESS} \neq 0$ 时，额外的功率损耗会减少从电网购买的电能或减少可以出售给电网的电能；当 $P^{BESS} = 0$ 时， $\Delta P_{x,t}^{BESS,invloss}$ 降低了电池储能系统的充电效率。

电动汽车的无功成本为

$$c_{x,t}^{QEV} \cdot Q_{x,t}^{EV} = c_t^{Pgrid} \cdot \Delta P_{x,t}^{EV,invloss} \quad (16)$$

电动汽车充电器只有在电动汽车不充电或放电时才允许产生或吸收无功功率，其充电器的功率损耗由电网补偿。

2) 线损估计。

为了计算分布式电源对电网注入功率后对线损的影响，首先，使用近似逼近方法求解线路损耗；然后，使用线损近似结果推导出无功调度的解析解。

线路上的功率流截面如图 1 所示，节点 i 的近似有功和无功损耗为

$$\begin{cases} \tilde{P}_i^{\text{loss}} = r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \\ \tilde{Q}_i^{\text{loss}} = x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \end{cases} \quad (17)$$

其中, r_i 、 x_i 分别为连接节点 i 线路的电阻、电抗。

系统中总的有功和无功损耗为

$$\begin{cases} \tilde{P}^{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N-1} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \\ \tilde{Q}^{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N-1} x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \end{cases} \quad (18)$$

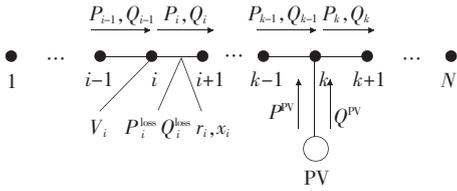


图 1 线路功率流截面

Figure 1 The power flow in the across section of lines

因 P_i 、 Q_i 忽略了二阶项,故式(17)、(18)为近似式。如图 2 所示,系统中令节点电压 V_i 保持初始值不变, \tilde{P}^{loss} 、 \tilde{Q}^{loss} 与使用前推回代算法所得结果呈线性关系,近似功率损耗为

$$\tilde{P}^{\text{loss}} \approx \sum_{i=1}^{N-1} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|\bar{V}_i|^2} \quad (19)$$

其中, $|\bar{V}_i|$ 为未添加光伏时系统中节点 i 的电压,可用 $|\bar{V}_i|$ 代替 $|V_i|$,说明即使没有更新节点电压数据,也可以准确估计损耗。

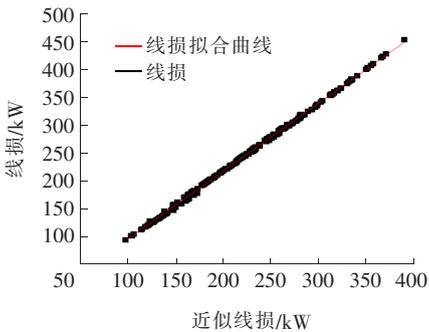


图 2 69 节点系统中前推回代算法所得线损与近似线损关系

Figure 2 The line loss obtained by the BFS and the approximate line loss in the 69-bus system

线路损耗为

$$\begin{cases} P^{\text{loss}} = \eta^{P,0} + \eta^{P,1} \tilde{P}^{\text{loss}}, \\ Q^{\text{loss}} = \eta^{Q,0} + \eta^{Q,1} \tilde{Q}^{\text{loss}} \end{cases} \quad (20)$$

式中 $\eta^{P,0}$ 和 $\eta^{P,1}$ 、 $\eta^{Q,0}$ 和 $\eta^{Q,1}$ 为图 2 中对 \tilde{P}^{loss} 和 P^{loss} 、 \tilde{Q}^{loss} 和 Q^{loss} 拟合所获得的常数。

图 2 中横轴近似线损根据式(19)所得,纵轴线

损为前推回代算法所得。节点系统中前推回代算法所得线损与近似线损误差如图 3 所示,对损耗拟合的最大误差小于 5%。

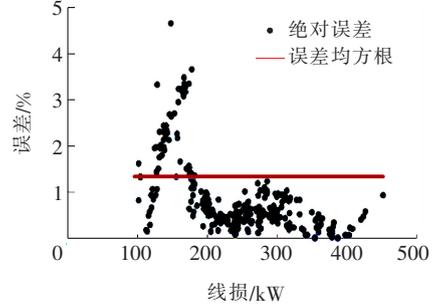


图 3 69 节点系统中前推回代算法所得线损与近似线损误差

Figure 3 The error between the line loss obtained by the BFS and the approximate line loss in the 69-bus system

3) 目标函数的显式表达。

优化问题中考虑的决策变量是 $Q_{x,t}^{\text{PV}}$ 、 $P_{x,t}^{\text{BESS}}$ 、 $Q_{x,t}^{\text{BESS}}$ 和 $Q_{x,t}^{\text{EV}}$ 。假设光伏系统总是运行在最大功率点,并产生最大 $P_{x,t}^{\text{PV}}$ 。 $P_{x,t}^{\text{EV}}$ 遵循文献[23]所述的充电策略,将总充电和电池退化成本降至最低。在图 1 系统中,只有节点 k 处具有一个光伏 PV,由式(1)可得该系统目标函数为

$$O_{\text{Obj}} = \sum_{t=1}^T [c_t^{\text{Pgrid}} P_t^{\text{grid}} + c_t^{\text{Qgrid}} Q_t^{\text{grid}} + c_t^{\text{PPV}} P_t^{\text{PV}} + c_t^{\text{QPV}} Q_t^{\text{PV}}] H$$

利用式(20)展开式(2)、(3),可得:

$$\begin{cases} P^{\text{grid}} = \sum_{i=1}^N P_i^{\text{load}} - P^{\text{PV}} + \eta^{P,0} + \eta^{P,1} \tilde{P}^{\text{loss}} \\ Q^{\text{grid}} = \sum_{i=1}^N Q_i^{\text{load}} - Q^{\text{PV}} + \eta^{Q,0} + \eta^{Q,1} \tilde{Q}^{\text{loss}} \end{cases}$$

\tilde{P}^{loss} 包含来自光伏的电能注入,即

$$\tilde{P}^{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{k-1} r_i \frac{(P'_i - P^{\text{PV}})^2 + (Q'_i - Q^{\text{PV}})^2}{|\bar{V}_i|^2} + \sum_{i=k}^{N-1} r_i \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{|\bar{V}_i|^2}$$

其中, P'_i 、 Q'_i 是节点 k 处添加 PV 之前节点 i 的原始有功、无功。通过平方项展开可得:

$$\tilde{P}^{\text{loss}} = \tilde{P}^{\text{loss}_{\text{initial}}} + \sum_{i=1}^{k-1} r_i \frac{(P^{\text{PV}})^2 - 2P'_i P^{\text{PV}} + (Q^{\text{PV}})^2 - 2Q'_i Q^{\text{PV}}}{|\bar{V}_i|^2}$$

其中,常量 $\tilde{P}_{\text{initial}}^{\text{loss}}$ 为添加分布式电源之前的有功损耗。

同理可对 \tilde{Q}^{loss} 进行扩展。因此,目标函数可以用 Q^{PV} 显式表达并对 Q^{PV} 求微分,当 $\frac{\partial O_{\text{Obj}}}{\partial Q^{\text{PV}}} = 0$ 时,可以得到使系统运行成本最小的 Q^{PV} 。

当 $P^{\text{PV}} = 0$ 时,可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial O_{\text{Obj}}}{\partial Q^{\text{PV}}} &= A_k Q^{\text{PV}} - B_k + C_k Q^{\text{PV}} - D_k + \\ &E + F Q^{\text{PV}} - \frac{c^{\text{Qgrid}}}{2} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$\begin{aligned} A_k &= \sum_{i=1}^{k-1} \frac{r_i}{|\bar{V}_i|^2} c^{\text{Pgrid}} \eta^{P,1}, B_k = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{r_i Q'_i}{|\bar{V}_i|^2} c^{\text{Pgrid}} \eta^{P,1} \\ C_k &= \sum_{i=1}^{k-1} \frac{x_i}{|\bar{V}_i|^2} c^{\text{Qgrid}} \eta^{Q,1}, D_k = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{x_i Q'_i}{|\bar{V}_i|^2} c^{\text{Qgrid}} \eta^{P,1} \\ E &= \frac{c^{\text{Pgrid}} c^{\text{PV,V}}}{2}, F = c^{\text{Pgrid}} c^{\text{PV,R}} \end{aligned}$$

A_k 、 B_k 、 C_k 、 D_k 取决于分布式电源在系统中的位置,不取决于其类型, E 、 F 取决于逆变器特性。因此, Q^{PV} 的最优值为

$$Q^{\text{PV}} = \frac{B_k + D_k - E + \frac{c^{\text{Qgrid}}}{2}}{A_k + C_k + F} \quad (22)$$

当 $P^{\text{PV}} \neq 0$ 时,令 $\frac{\partial O_{\text{Obj}}}{\partial Q^{\text{PV}}} = 0$,可得:

$$Q^{\text{PV}} \left(A_k + C_k + F + \frac{E}{\sqrt{(P^{\text{PV}})^2 + (Q^{\text{PV}})^2}} \right) = B_k + D_k + \frac{c^{\text{Qgrid}}}{2} \quad (23)$$

因此,可以使用式(22)、(23)得到节点 k 处的 PV 在每个时间段的最优无功调度。

当系统中存在多个分布式电源时,求解最优无功调度所需步骤:① 确定系统的常数 $\eta^{P,0}$ 、 $\eta^{P,1}$ 、 $\eta^{Q,0}$ 、 $\eta^{Q,1}$;② 确定每个分布式能源的 A_k 、 B_k 、 C_k 、 D_k 、 E 、 F ;先将其他决策变量视为常量,再计算每台分布式电源的最优无功出力 Q^X ;③ 将所有分布式能源的最优无功功率合并到总的无功功率 Q_i 中,并更新每个分布式能源的常数 B_k 、 D_k ;④ 开始后续迭代计算 Q^X ,直到收敛。

2.2 储能优化

储能优化的目标是在价格最低时从电网购买电

能,在价格最高时出售电能来获取最大利润。要确定储能优化对于特定的电价是否可行,必须满足以下条件:

$$\begin{aligned} c^{\text{Pgrid}} \eta^B P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}} &> c^{\text{Pgrid}} P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}} + c^{\text{Pgrid}} \Delta P^{\text{loss}}_{\text{nadir}} + \\ &c^{\text{Pgrid}} \Delta P^{\text{loss}}_{\text{peak}} + c^{\text{Qgrid}} (\Delta Q^{\text{loss}}_{\text{nadir}} + \Delta Q^{\text{loss}}_{\text{peak}}) \end{aligned} \quad (24)$$

式中 $\eta^B = \eta^{\text{CH}} \eta^{\text{DCH}}$ 为电池储能系统的效率; $\Delta P^{\text{loss}}_{\text{nadir}}$ 、 $\Delta P^{\text{loss}}_{\text{peak}}$ 分别为价格最低点充电、价格最高点放电造成的有功损耗; $\Delta Q^{\text{loss}}_{\text{nadir}}$ 、 $\Delta Q^{\text{loss}}_{\text{peak}}$ 为相应的无功损耗。

在不使用电池储能系统的情况下,不等式(24)的左项表示价格峰值时从电网中获取电能 $P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}}$ 所必须的成本,右边4项之和表示以价格最低点向电池储能系统充电后价格峰值时输送电能的成本。假设电池储能系统位于节点 k ,基于式(20)可得:

$$\begin{cases} \Delta P^{\text{loss}}_{\text{nadir}} = \alpha_k (P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}})^2 + 2\beta_k P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}} \\ \Delta P^{\text{loss}}_{\text{peak}} = \alpha_k (\eta^B P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}})^2 - 2\gamma_k \eta^B P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}} \\ \Delta Q^{\text{loss}}_{\text{nadir}} = \epsilon_k (P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}})^2 + 2\zeta_k P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}} \\ \Delta Q^{\text{loss}}_{\text{peak}} = \epsilon_k (\eta^B P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}})^2 - 2\lambda_k \eta^B P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}} \end{cases} \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \sum_{i=1}^{k-1} \frac{r_i}{|\bar{V}_i|^2} \eta^{P,1}, \beta_k = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{r_i P_{i,\text{nadir}}}{|\bar{V}_i|^2} \eta^{P,1} \\ \gamma_k &= \sum_{i=1}^{k-1} \frac{r_i P_{i,\text{peak}}}{|\bar{V}_i|^2} \eta^{P,1}, \epsilon_k = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{x_i}{|\bar{V}_i|^2} \eta^{Q,1} \\ \zeta_k &= \sum_{i=1}^{k-1} \frac{x_i P_{i,\text{nadir}}}{|\bar{V}_i|^2} \eta^{Q,1}, \lambda_k = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{x_i P_{i,\text{peak}}}{|\bar{V}_i|^2} \eta^{Q,1} \end{aligned}$$

将不等式(24)的左项减右边各项,得到储能优化的收入 R_{ev} ,取 $\frac{\partial R_{\text{ev}}}{\partial P^{\text{BESS}}} = 0$,可得收入最高情况下的电能:

$$\begin{aligned} P^{\text{BESS}}_{\text{nadir}} &= \\ &\frac{c^{\text{Pgrid}} \eta^B (1 + 2\gamma_k) - c^{\text{Pgrid}} (1 + 2\beta_k) +}{2\alpha_k (c^{\text{Pgrid}}_{\text{nadir}} + (\eta^B)^2 c^{\text{Pgrid}}_{\text{peak}}) +} \rightarrow \\ &\leftarrow \frac{2c^{\text{Qgrid}} (\lambda_k \eta^B - \zeta_k)}{2\epsilon_k c^{\text{Qgrid}} (1 + (\eta^B)^2)} \end{aligned} \quad (26)$$

2.3 电压电流约束处理

无功调度、储能优化过程未考虑式(5)、(6)中的电流和电压约束。节点电压、电流分别近似为

$$V_{i+1,t}^2 = V_{i,t}^2 - 2(r_i P_{i,t} + x_i Q_{i,t}) \quad (27)$$

$$|I_{i,t}| = \frac{|S_{i,t}|}{|V_{i,t}|} \quad (28)$$

对于每个周期,在确定分布式电源的无功输出后,根据式(27)、(28)计算电压和电流值。为系统中的每个节点和线路创建分布式电源优先级列表,距离节点和线路最近的分布式电源为最高优先级。当约束式(4)、(5)被违反时,按照文献[23]的方法调整分布式电源的输出,直到满足所有约束。

为了实现运行成本最小化目标,基于各项约束,建立优化方法,如图 4 所示。

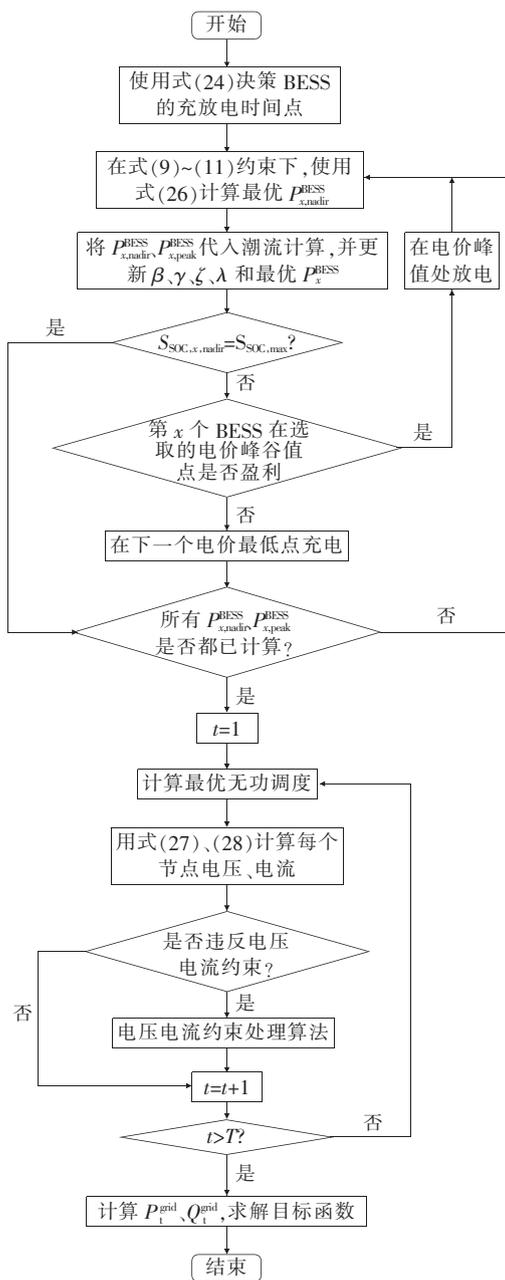


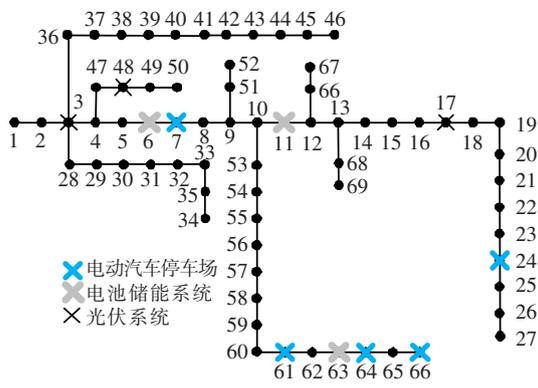
图 4 所提出方法流程

Figure 4 Flow chart of the proposed method

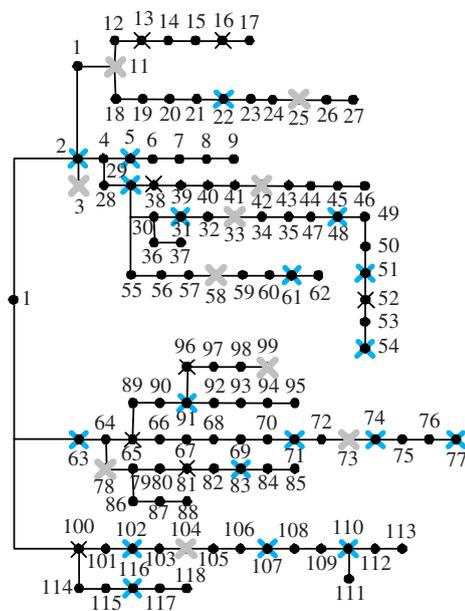
3 算例分析

3.1 算例参数

采用 69、119 节点配电系统验证本文所提方法,如图 5 所示,69、119 节点系统中每个光伏系统的 P_{rated}^{PV} 分别为 300、500 kWp;系统中的电池都是容量为 500 kW·h 的锂离子电池;假设每个电动汽车充电器的额定值为 4 kW·A。69 节点系统中的节点 3、17、48 分别有 44、100、25 辆电动汽车;119 节点系统中的节点 6、13、38、52、61、65、81、96、100 分别有 150、50、100、35、75、80、40、20、90 辆电动汽车。第 1 辆车早上 6 点到达,最后 1 辆车晚上 8 点出发。 V_{min} 、 V_{max} 分别为 0.9、1.05 p.u., I_{max} 为 1 p.u.。



(a) 69 节点系统



(b) 119 节点系统

图 5 具有分布式电源的 69、119 节点系统

Figure 5 69-bus and 119-bus system with distributed power resources

为了综合评估所提方法的性能,在系统中同时使用内点法(interior point methods, IPM)、遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)进行优化问题求解(图5),并与本文所提方法进行对比。IPM采用文献[24]中数据结构和KKT条件;GA采用120个染色体;PSO采用120个粒子,均迭代60次。所有算法都在MATLAB R2019a上实现,采用Intel Core i7-6500U CPU@2.50 GHz, RAM为16 GB。

$c_i^{P_{grid}}$ 取自海南三亚2015年平均每小时批发电价, $c_i^{Q_{grid}}$ 为10 kV用户供电的单位无功成本^[25]。采用文献[26]中的预测方法,基于式(6)得到 G_i, G_i^{70} 。采用2015年1月1日至2019年6月25日的太阳辐照度和环境温度数据作为训练数据,以生成2019年6月26日的太阳辐照度预测值,如图6所示。

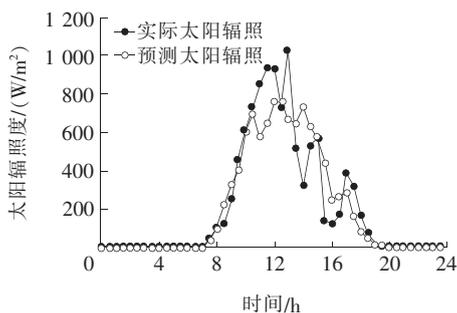


图6 预测和实际太阳辐照度

Figure 6 Forecast and actual solar irradiance

3.2 性能评估

1) 算法对比。

4种算法在求解时间、运行成本、线路损耗三方面的性能对比如表1所示,在69、119节点系统中,相比其他3种算法,本文所提方法均具有最好的性能;与其他算法相比,119节点系统中所提方法通过分布式电源无功调度和储能优化所降低的成本分别为24%、19%、25%;所提方法的求解速度比其他算法提高了50倍。

在4种算法中,PSO在69节点系统上的性能优于遗传算法,但在119节点系统上的性能较差;GA所需的求解时间大约是PSO的2倍。增加种群规模和迭代次数可使PSO、GA能够获得更好的解,但使用测试中的种群和迭代次数所需的求解时间已经无法用于实时调度。使用PSO、GA求解问

题时大部分时间用在针对每个粒子或染色体的迭代上,但本文所提方法只需执行一次迭代。因此,在面对更大的系统和更多的变量时,所提方法在降低成本和求解速度方面的优势将进一步扩大。

表1 不同方法结果对比

Table 1 Comparison of results of different methods

节点系统	算法	求解时间/s	运行成本/元	线损/%
69	本文方法	138	58 390	2.95
	GA	10 579	58 425	2.98
	PSO	5 445	58 415	2.96
	IPM	194	59 005	3.37
119	本文方法	286	348 825	3.41
	GA	28 626	350 430	3.67
	PSO	14 780	350 785	3.78
	IPM	2 240	350 865	3.59

IPM虽然比PSO、GA求解速度快,但仍慢于所提方法。IPM生成雅可比、海森矩阵所需的时间实际上比求解优化问题所需的时间要长,而且处理雅可比、海森矩阵所需内存资源较大。与其他方法相比,由于得到的是局部最优解而非全局最优,故IPM在成本降低方面的表现较差。

因此,与其他3种算法相比,本文所提方法具有优势:求解速度快50倍以上,可扩展到具有更多变量的大系统,并且适用于实时控制;消除对初始解和参数的依赖;可表现变量之间的显式关系,通过式(22)~(26)可分析参数之间的相互影响。

2) 功率输出。

所提方法下对69节点系统的有功和无功输出如图7所示,可知储能优化增加了系统的负载峰值,同时拉低了负载最低值。在分布式电源密度较高的区域,储能优化可能会给电网调整发电量带来影响。

所提方法下69节点系统在一天中运行成本数据如图8所示,可知与电网无功补偿相比,使用分布式电源产生无功具有较低的成本。即使在分布式电源密度较低的情况下,系统中的大部分无功需求也可以就地满足,降低了线路损耗。具有多种分布式电源的组合对系统是有益的,因为当其中一些分布式电源由于其有功功率的使用而不能输出无功功率时,另一些分布式电源能够补充这一部分需求。

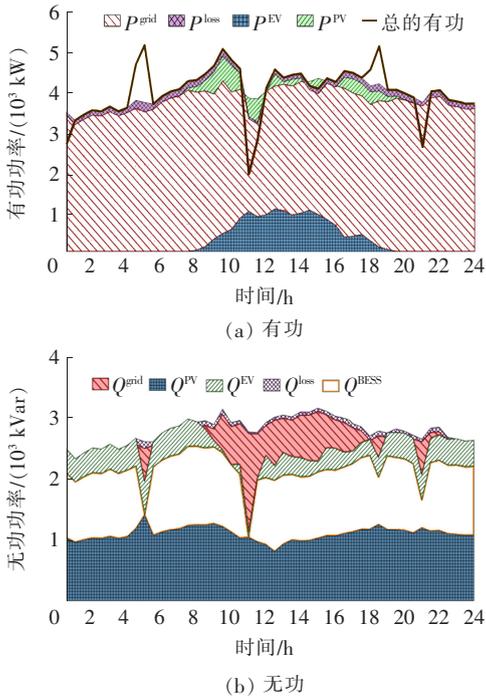


图 7 有功和无功功率数据

Figure 7 Active and reactive power data

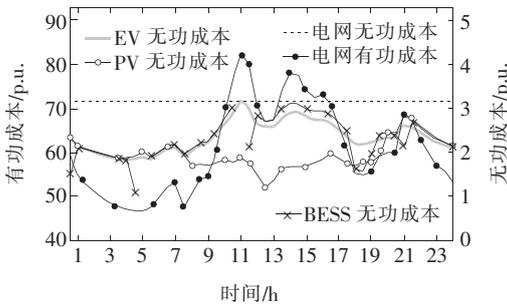


图 8 有功和无功成本

Figure 8 The cost of active and reactive power

4 结语

本文以运行成本为优化问题目标函数,结合前推回代算法和近似拟合法提出了一种分布式电源的无功调度和储能优化方法。用实际太阳辐照和系统运行数据在 69、119 节点配电系统上对该方法的有效性进行了验证。与现有算法相比,该方法能够有效地应用在多变量复杂系统,求解出近似最优解的速度提高了 50 倍。因此,该方法既适用于大型系统的日前电力调度,也适用于实时电力调度。同样的分析方法也适用于不同参数、不同成本函数的一般电力调度。

参考文献:

[1] 徐立新,沈志钧,刘明波,等. 考虑配电网安全校核的分布式能源聚合商参与市场竞标的双层混合整数优化模型[J]. 电网技术,2021,45(11):4395-4406.
 XU Lixin, SHEN Zhijun, LIU Mingbo, et al. Bi-level mixed integer optimization model for distributed energy aggregator participation in electricity market bidding considering security verification of distribution system [J]. Power System Technology, 2021, 45 (11): 4395-4406.

[2] 代贤忠,王旭斌,安麒,等. 基于物联网分散决策的分布式能源交易运行模式与方法[J]. 可再生能源,2021,39(8):1130-1136.
 DAI Xianzhong, WANG Xubin, AN Qi, et al. Scheme and method for distributed energy resource trading considering internet of things-based decentralized decision-making[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(8): 1130-1136.

[3] 刘飞,熊晓琪,查鹏程,等. 直流配电网网架结构与分布式光伏多目标协同优化[J]. 中国电机工程学报,2020,40(12):3754-3765.
 LIU Fei, XIONG Xiaqi, ZHA Pengcheng, et al. Multi-objective collaborative optimization for DC distribution network configuration and distributed photovoltaic [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3754-3765.

[4] 张永新,李飞,张榴晨,等. 基于线路阻抗聚类的分布式光伏电站等效建模[J]. 太阳能学报,2022,43(5):312-318.
 ZHANG Yongxin, LI Fei, ZHANG Liuchen, et al. Equivalent modeling of distributed photovoltaic power stations based on line impedance clustering [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 312-318.

[5] 张剑云,李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(11):3498-3507.
 ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3507.

[6] 张勤进,胡王宝,刘彦呈,等. 一种直流微电网多光伏变换器新型功率分配策略[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(9):101-112.
 ZHANG Qinjin, HU Wangbao, LIU Yancheng, et al. A novel power sharing strategy for multi photovoltaic con-

- verters in a DC microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(9):101-112.
- [7] 杨子龙, 宋振浩, 潘静, 等. 分布式光伏/储能系统多运行模式协调控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(8):2213-2220.
YANG Zilong, SONG Zhenhao, PAN Jing, et al. Multi-mode coordinated control strategy of distributed PV and energy storage system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(8):2213-2220.
- [8] 林少伯, 韩民晓, 赵国鹏, 等. 基于随机预测误差的分布式光伏配网储能系统容量配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(4):25-33.
LIN Shaobo, HAN Minxiao, ZHAO Guopeng, et al. Capacity allocation of energy storage in distributed photovoltaic power system based on stochastic prediction error[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(4):25-33.
- [9] 张琦, 杨健维, 向悦萍, 等. 计及气象因素的区域电动汽车充电负荷建模方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(6):14-22.
ZHANG Qi, YANG Jianwei, XIANG Yueping, et al. Regional electric vehicle charging load modeling method considering meteorological factors[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6):14-22.
- [10] 程瑜, 黄森, 刘瑞丰. 面向配电网设备利用率提升的分布式储能优化配置[J]. *智慧电力*, 2021, 49(8):8-14.
CHENG Yu, HUANG Sen, LIU Ruifeng. Optimal configuration of distributed energy storage for improving equipment utilization in distribution network[J]. *Smart Power*, 2021, 49(8):8-14.
- [11] 李恒杰, 夏强强, 史一炜, 等. 考虑目标充电站选择冲突的电动汽车充电引导策略[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(5):68-74.
LI Hengjie, XIA Qiangqiang, SHI Yiwei, et al. Electric vehicle charging guidance strategy considering selection conflict of target charging stations[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(5):68-74.
- [12] 谭笑, 王主丁, 李强, 等. 计及多约束的多分布式电源接入配电网最大承载力分段算法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(4):72-80.
TAN Xiao, WANG Zhuding, LI Qiang, et al. Segmentation algorithm for maximum hosting capacity of distributed generator accessing to distribution network considering multiple constraints[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(4):72-80.
- [13] 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.
- [14] 侯祖锋, 陈建钿, 丘冠新, 等. 考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(6):158-164.
HOU Zufeng, CHEN Jiandian, QIU Guanxin, et al. Two-level dynamic reactive power scheduling strategy in a distribution network considering reactive power regulation of distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6):158-164.
- [15] WANDHARE R G, AGARWAL V. Reactive power capacity enhancement of a PV-grid system to increase PV penetration level in smart grid scenario[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(4):1845-1854.
- [16] 安娟, 黄存强, 杨曦, 等. 考虑分布式电源运行特性的青海配电网储能规划研究[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(8):98-102.
AN Juan, HUANG Cunqiang, YANG Xi, et al. Research on energy storage planning of Qinghai distribution network considering distributed power supply operating characteristics[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(8):98-102.
- [17] CHEN S H, HU W H, CHEN Z. Comprehensive cost minimization in distribution networks using segmented-time feeder reconfiguration and reactive power control of distributed generators[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2):983-993.
- [18] MOHSENI-BONAB S M, RABIEE A. Optimal reactive power dispatch: a review, and a new stochastic voltage stability constrained multi-objective model at the presence of uncertain wind power generation[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2017, 11(4):815-829.
- [19] ROBBINS B A, DOMÍNGUEZ-GARCÍA D. Optimal reactive power dispatch for voltage regulation in unbalanced distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(4):2903-2913.