

考虑网络重构的多园区储能多目标优化配置

翁利国¹, 练德强¹, 张阳辉², 罗曼², 陈诗杰³, 黄媛³

(1. 国网浙江杭州市萧山区供电有限公司, 浙江 萧山 311201; 2. 浙江中新电力工程建设有限公司, 浙江 萧山 311201;
3. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610041)

摘要:合理的分布式储能配置在园区能源消纳过程中扮演着至关重要的角色。在进行储能电池配置时如何考虑多个园区之间的联络关系以及配置经济性和能源消纳效益之间的制约关系是一个难以解决的问题。此外,现代配电网多为闭环设计开环运行,多园区间的动态联络也是促进能源消纳的重要技术手段。因此,提出一种考虑网络重构的多园区储能的多目标优化配置模型及方法。首先,该模型将配置经济性和可再生能源消纳效益之间的制约关系进行了数学表征,考虑各种投资及运行约束,并引入虚拟功率表征各个园区之间的联络状态,通过网络的动态重构,从系统层面上提高能源消纳水平;其次基于二阶锥松弛及多面体线性化方法将原始难以直接求解的混合整数非线性非凸模型转化为混合整数线性规划模型;最后将所提算法应用于改进的 IEEE 33 节点系统中,构建多目标帕累托曲线。结果表明,多园区间的动态联络有助于提升彼此能源消纳水平,所提方法能够为工程实践提供多目标储能配置最优解。

关键词:储能配置;多园区联络;能源消纳;多目标优化

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.006 中图分类号: TM715 文章编号: 1673-9140(2023)03-0054-11

Multi-objective optimal configuration of multi-park energy storage considering network re-configuration

WENG Ligu¹, LIAN Deqiang¹, ZHANG Yanghui², LUO Man², CHEN Shijie³, HUANG Yuan³

(1.State Grid Zhejiang Hangzhou Xiaoshan District Power Supply Co., Ltd., Hangzhou 311201, China; 2.Zhejiang Zhongxin Power Engineering Construction Co., Ltd., Hangzhou 311201, China; 3.College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Reasonable distributed energy storage configuration plays a crucial role in the energy consumption process of the park. How to consider the connection between multiple parks and the constraints between economic costs and energy consumption benefits is a difficult problem to solve when configuring energy storage batteries. In addition, modern distribution networks are mostly closed-loop and open-loop operation, and the dynamic connection between multiple parks is also an important technical means to promote energy consumption. This paper proposes a multi-park energy storage multi-objective optimal configuration model considering network reconfiguration. First of all, the model mathematically represents the constraint relationship between configuration economy and energy consumption benefit, considers various investment and operation constraints, and introduces virtual power to represent the connection state between various parks; The model improves the energy consumption level from the system level through the dynamic reconstruction of the network. Secondly, based on the second-order cone relaxation and polyhedral linearization method, the original

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-07-06

基金项目: 四川省科技厅计划项目(2021YFSY0053)

通信作者: 翁利国(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事配网智能化研究; E-mail: 617071671@qq.com

mixed-integer nonlinear non-convex model, which is difficult to solve directly, is transformed into a mixed-integer linear programming model. Finally, the proposed method is applied to the improved IEEE 33 bus system to construct a multi-objective Pareto curve. The results show that the dynamic connection between multiple parks is helpful to improve each other's energy consumption level, and the proposed method can provide the optimal solution of multi-objective energy storage configuration for engineering practice.

Key words: energy storage configuration; multi-park liaison; energy consumption; multi-objective optimization.

随着“双碳”目标的提出以及社会环保意识的提高,未来电力系统中清洁能源发电占比势必会逐步上升^[1-2];另一方面,随着中国电力市场改革的推进^[3-4],传统的用电侧如负荷聚合商、大型工业负荷等将更加倾向于配置如分布式光伏、分布式风机等资源以最大限度提升自己在电力市场中交易的灵活性。

特别是对工业园区、商业园区以及居民园区等具有一定自治能力的区域来说,装配大量分布式发电资源是大势所趋。然而诸如光伏、风机等清洁能源发电机组,由于其发电量受天气影响较大,故而其发电量具有很强波动性以及不确定性。出于对电力系统安全性和电力市场稳定性的考虑,若没有其他手段的配合,清洁能源发电很难尽数上网,这将造成资源的浪费。储能装置能够耦合多个园区之间源荷时空差异性,平抑分布式清洁能源发电的波动性,提升其消纳水平,促进多园区之间的电能互补,实现负荷就地平衡,从而减小网络运行压力。

因此现阶段各个园区中通常会配置储能来提高清洁能源的消纳效益,目前学术界已经有大量针对园区储能配置的研究^[5-8],多以配置的经济性最高为目标^[5-6],考虑园区储能与清洁能源和园区负荷之间的时序联动^[7-8],以提升清洁能源的消纳水平。

目前的研究已经为园区储能配置提供了一定可行方案。然而随着配电网以及售电市场的发展,各个园区之间已经不再是各自独立运行的状态^[9-10],它们之间往往有联络线进行连接,相互之间能够进行电能的传输。

现有的园区储能规划方法并没有考虑到网络的连接转供关系,因此本文将网络重构引入储能配置模型之中,将其作为分布式资源消纳的网络解。在网络重建建模方面,文献[11]新增了2套变量表征辐射约束,文献[12]采用辅助潮流方法表征网络重构约束,然而以上方法均需要引入大量的辅助约

束,大大增加了模型规模。因此,本文利用虚拟功率法表征网络重构。

此外,随着“双碳”目标的提出,园区内可再生能源大规模地接入,其出力不确定性将造成弃电。因此,储能规划不再单纯考虑经济性,也需要重点考虑清洁能源的消纳效益。然而现有的储能配置方法多以储能配置的经济性为目标。本文提出一种考虑网络重构的园区储能多目标规划方法以解决上述2个问题。首先建立以经济性和能源消纳效益为目标的多园区储能规划模型,除了安全约束、潮流约束以及分布式光伏运行控制约束之外,引入储能约束表征分布式储能的模拟运行,引入虚拟功率^[13]表征多园区间联络线的开关状态。

所建立原始模型由于含有大量的如支路潮流的非线性约束,因此,整个多目标规划模型属于混合整数非线性规划模型(mixed integer nonlinear programming, MINLP),MINLP模型的求解通常采用智能算法^[14-17],如遗传算法^[14-15]和粒子群算法^[16-17]在模型求解时,将原始多目标优化模型松弛为单目标优化模型以便于直接求解;利用二阶锥松弛^[18-19]及多面体线性化^[20]的方法将原始混合整数非线性非凸模型转化为混合整数线性规划模型,使其可以直接被商业软件求解。最后,将所提方法应用于改进的IEEE 33节点系统上以验证其有效性。

1 考虑网络重构的多园区储能多目标优化配置模型

储能装置配置的目的是提升园区光伏的消纳水平,同时伴随着一定的配置成本,因此,本文考虑光伏消纳效益以及经济成本这2个目标,将储能装置的配置问题构建为基于最优潮流的多目标优化模型。此外,现代电力网络中各个园区之间通常具有一定的联络转供关系,因此,本文在建模时考虑

了多园区网络的重构。储能装置的配置需要模拟运行进行支撑,因此,本文将储能装置的配置模型与网络的模拟运行模型进行耦合建模,基本的潮流约束、安全约束、光伏和储能的运行控制约束以及网络重构约束均包含于模型之中。通过对该多目标优化模型的求解,可以得到不同经济成本下的储能装置最优配置方案。

1.1 目标函数

对储能的优化配置应考虑2个方面的因素:首先考虑储能配置对园区光伏消纳带来的效益;另一方面应该考虑储能配置的经济成本。显然,储能配置容量越高,对光伏的消纳效果越好,但所带来的经济成本也越高,如何平衡消纳效益和经济成本之间的关系是本文所探讨的主要问题之一。

1) 目标1:对园区光伏的消纳效益。

$$\max Z_1 = \sum_{g \in \Omega^G, t \in \Omega^T, \omega \in \Omega^S} \frac{P_{g,t,\omega}^{PV}}{P_g^{Cap} \beta_{t,\omega}} \quad (1)$$

式中, g, t, ω 分别为光伏设备、时段以及场景的索引; $\Omega^G, \Omega^T, \Omega^S$ 分别为所有光伏设备、所有时段以及所有场景的集合; P^{PV} 为光伏实际所发功率; P^{Cap} 为光伏最大可发功率; β 为光伏的功率输出系数,与日照强度有关。

2) 目标2:储能配置所带来的经济成本。

$$\min Z_2 = \sum_{i \in \Omega^{ESS}} x_i^{ESS} \left(E^{ESS} C^{E,ESS} + \bar{P}^{DC} C^{P,ESS} \right) \quad (2)$$

式中, x_i^{ESS} 为在*i*节点所配置的储能的数量; E^{ESS} 为单位储能的容量; $C^{E,ESS}$ 为储能的电池成本; \bar{P}^{DC} 为单位储能装置的最大放电功率; $C^{P,ESS}$ 为服务于储能放电的能量转换系统的成本; Ω^{ESS} 为所有备选配置储能的节点的集合。

1.2 约束条件

1) 网络潮流表征。

$$\sum_{k \in \Omega(i)} \left[P_{ki,t,\omega}^{line} - R_{ki} \left(I_{ki,t,\omega}^{line} \right)^2 \right] - \sum_{j \in \Omega(i)} P_{ij,t,\omega}^{line} + P_{i,t,\omega}^{PV} + \eta_{DC} P_{i,t,\omega}^{S,DC} - P_{i,t,\omega}^{S,C} = P_i^D, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^B \quad (3)$$

$$\sum_{k \in \Omega(i)} \left[Q_{ki,t,\omega}^{line} - X_{ki} \left(I_{ki,t,\omega}^{line} \right)^2 \right] - \sum_{j \in \Omega(i)} Q_{ij,t,\omega}^{line} + Q_{i,t,\omega}^{PV} = Q_i^D, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^B \quad (4)$$

$$\left(V_{i,t,\omega} \right)^2 - \left(V_{j,t,\omega} \right)^2 = 2 \left(R_{ij} P_{ij,t,\omega}^{line} + X_{ij} Q_{ij,t,\omega}^{line} \right) - \left(I_{ij,t,\omega}^{line} \right)^2 \left[\left(R_{ij} \right)^2 + \left(X_{ij} \right)^2 \right], \forall \omega, \forall t, \forall ij \in \Omega^{Line} \quad (5)$$

$$\left(S_{ij,t,\omega}^{line} \right)^2 = \left(P_{ij,t,\omega}^{line} \right)^2 + \left(Q_{ij,t,\omega}^{line} \right)^2, \forall \omega, \forall t, \forall ij \in \Omega^{Line} \quad (6)$$

$$\left(V_{i,t,\omega} \right)^2 \left(I_{ij,t,\omega}^{line} \right)^2 = \left(S_{ij,t,\omega}^{line} \right)^2, \forall \omega, \forall t, \forall ij \in \Omega^{Line} \quad (7)$$

式(3)~(7)中, Ω^B 为节点的集合; Ω^{Line} 为线路的集合; $\Omega(i)$ 为以节点*i*为末节点的线路其首端节点的集合; $\Omega_a(i)$ 为以节点*i*为首节点的线路其末端节点的集合。 $V_{i,t,\omega}, V_{j,t,\omega}$ 分别为节点*i, j*在时刻和 ω 场景下的电压; R_{ki}, R_{ij}, X_{ki} 以及 X_{ij} 分别为线路*ki, ij*的电阻和电抗; $I_{ki}^{line}, I_{ij}^{line}$ 分别为线路*ki*和*ij*上流过的电流; $P_{ij}^{line}, Q_{ij}^{line}$ 以及 S_{ij}^{line} 分别为线路*ij*上流过的有功功率、无功功率以及视在功率; $P_{ki}^{line}, Q_{ki}^{line}$ 分别为线路*ki*上的有功功率和无功功率; P_i^{PV}, Q_i^{PV} 分别为光伏在节点*i*上注入的有功功率和无功功率; η_{DC} 为储能系统的放电效率; $P^{S,DC}, P^{S,C}$ 分别为储能系统的放电功率和充电功率; P_i^D, Q_i^D 分别为节点*i*上的有功负荷和无功负荷。

式(3)、(4)分别表示节点有功和无功的平衡,式(5)表示了线路上的电压降落,式(6)、(7)为线路的功率约束。

2) 耦合节点功率约束。

本文储能规划的目的是使多个园区在能源方面能够充分自治,尽量做到自给自足,但在如连续日照不足等恶劣情况下,需要向上级网络购电以满足自身的负荷需求,上级电网所供电能的约束为

$$\underline{P}^{GSP} \leq P_{t,\omega}^{GSP} \leq \bar{P}^{GSP}, \forall t, \forall \omega \in \Omega^B \quad (8)$$

$$\underline{Q}^{GSP} \leq Q_{t,\omega}^{GSP} \leq \bar{Q}^{GSP}, \forall t, \forall \omega \in \Omega^B \quad (9)$$

式(8)~(9)中, P^{GSP}, Q^{GSP} 分别为耦合节点所输送的有功功率和无功功率; $\underline{P}^{GSP}, \bar{P}^{GSP}$ 分别为耦合节点所能输送的最小有功功率以及最大有功功率; $\underline{Q}^{GSP}, \bar{Q}^{GSP}$ 分别为耦合节点所能输送的最小无功功率以及最大无功功率。

约束式(8)、(9)分别限制了电网耦合节点的有功功率和无功功率的传输,当节点*i*是电网耦合节点时,约束式(3)、(4)应该写作如下形式:

$$P_{t,\omega}^{GSP} - \sum_{j \in \Omega(i)} P_{ij,t,\omega}^{line} + P_{i,t,\omega}^{PV} = P_i^D, \forall t, \forall \omega \in \Omega^B \quad (10)$$

$$Q_{t,\omega}^{GSP} - \sum_{j \in \Omega(i)} Q_{ij,t,\omega}^{line} + Q_{i,t,\omega}^{PV} = Q_i^D, \forall t, \forall \omega \in \Omega^B \quad (11)$$

3) 安全约束。

为了各个园区及配电网的安全,各个节点电压应该保持在一定范围,安全约束如下:

$$\underline{V}_i \leq V_{i,t,\omega} \leq \overline{V}_i, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^B \quad (12)$$

式中, \underline{V}_i 、 \overline{V}_i 分别为 i 节点的最小和最大电压水平。

4) 光伏约束。

光伏所带逆变器能够实现对光伏所发功率的控制,并能够控制电压电流的相位差实现光伏功率因素控制,这使得光伏能够工作在超前或滞后的功率因素下,且能够对自身所发功率进行连续控制。

$$P_{g,t,\omega}^{PV} \cdot \tan(\cos^{-1}(PF_g^{\max})) \leq Q_{g,t,\omega}^{PV} \leq P_{g,t,\omega}^{PV} \cdot \tan(\cos^{-1}(PF_g^{\min})), \forall \omega, \forall t, \forall g \in \Omega^G \quad (13)$$

$$P_{g,t,\omega}^{PV} = P_g^{\text{Cap}} \beta_t - P_{g,t,\omega}^{\text{Curt}}, \forall \omega, \forall t, \forall g \in \Omega^G \quad (14)$$

$$0 \leq P_{g,t,\omega}^{\text{Curt}} \leq P_g^{\text{Cap}} \beta_t, \forall \omega, \forall t, \forall g \in \Omega^G \quad (15)$$

其中, PF_g^{\max} 、 PF_g^{\min} 分别为第 g 个光伏的最大和最小功率因素, P^{Curt} 为光伏的弃光功率; β 为光伏的功率输出系数。式(13)定义了光伏所工作的功率因素范围;式(14)定义了光伏实际所发功率;式(15)定义了光伏的弃光功率的范围。

5) 网络重构约束。

当主要送电线路中发生线路阻塞或安全越限的时候,合理的网络重构能够提高网络的安全水平以及光伏的消纳水平。对于一个可重构的网络来说,其网络状态必须满足以下3种情形中的2种。

C1:投入使用的线路比网络节点数少1。

$$\sum_{ij \in \Omega^{\text{line}}} a_{ij,t} = N_{\text{bus}} - 1, \forall t \in \Omega^T \quad (16)$$

式中, a_{ij} 是表征线路是否投入使用的0-1变量; N_{bus} 为网络节点总数。

C2:多园区网络中没有孤岛。

C3:多园区网络中没有环网。

C1可以通过式(17)表征,但C2和C3难以直接通过数学表达式进行表征。因此,一种辅助潮流法被用于表征C2。

假设网络中的每个节点上均有一个很小的虚拟有功负荷,在网络中随机选取一个节点作为虚拟耦合节点,则辅助潮流可以表征为

$$\sum_{k \in \Omega(i)} P_{ki,t}^{\text{im}} - \sum_{j \in \Omega(i)} P_{ij,t}^{\text{im}} = P_{i,t}^s, \forall t, \forall i \in \Omega^B \quad (17)$$

式中, P_{ki}^{im} 和 P_{ij}^{im} 分别表征线路 ki 和 ij 上流通的虚拟

功率; $P_{i,t}^s$ 为虚拟耦合节点 i 的功率。

利用大M法(big M method)表征模拟运行中线路的开断状态:

$$-M^{\text{im}} \cdot a_{ij,t} \leq P_{ij,t}^{\text{im}} \leq M^{\text{im}} \cdot a_{ij,t}, \forall t, \forall ij \in \Omega_{\text{Line}}^R \quad (18)$$

式中, M^{im} 为相比于 P^{im} 足够大的正数; Ω_{Line}^R 表征参与重构的线路的集合。式(18)表示,当线路投入运行时,线路上流通的功率不受限制,当线路没有投入运行时,线路功率为0。

对于可开断的线路,应引入以下辅助约束:

$$\begin{cases} (V_{i,t,\omega})^2 - (V_{j,t,\omega})^2 \leq M^V(1 - a_{ij,t}) + \\ 2(R_{ij}P_{ij,t,\omega}^{\text{line}} + X_{ij}Q_{ij,t,\omega}^{\text{line}}) - (I_{ij,t,\omega}^{\text{line}})^2 \left[(R_{ij})^2 + (X_{ij})^2 \right] \\ (V_{i,t,\omega})^2 - (V_{j,t,\omega})^2 \geq -M^V(1 - a_{ij,t}) + \\ 2(R_{ij}P_{ij,t,\omega}^{\text{line}} + X_{ij}Q_{ij,t,\omega}^{\text{line}}) - (I_{ij,t,\omega}^{\text{line}})^2 \left[(R_{ij})^2 + (X_{ij})^2 \right], \\ \forall \omega, \forall t, \forall ij \in \Omega_{\text{Line}}^R \end{cases} \quad (19)$$

$$-\overline{P}_{ij}^{\text{line}} a_{ij,t} \leq P_{ij,t,\omega}^{\text{line}} \leq \overline{P}_{ij}^{\text{line}} a_{ij,t}, \forall \omega, \forall t, \forall ij \in \Omega_{\text{Line}}^R \quad (20)$$

$$-\overline{Q}_{ij}^{\text{line}} a_{ij,t} \leq Q_{ij,t,\omega}^{\text{line}} \leq \overline{Q}_{ij}^{\text{line}} a_{ij,t}, \forall \omega, \forall t, \forall ij \in \Omega_{\text{Line}}^R \quad (21)$$

$$0 \leq (I_{ij,t,\omega}^{\text{line}})^2 \leq (\overline{I}_{ij}^{\text{line}})^2 a_{ij,t}, \forall \omega, \forall t, \forall ij \in \Omega_{\text{Line}}^R \quad (22)$$

式(19)~(22)中, M^V 为电压约束使用大M法引入的系数; $\pm \overline{P}_{ij}^{\text{line}}$ 、 $\pm \overline{Q}_{ij}^{\text{line}}$ 分别为线路 ij 上流通的有功、无功功率上下限约束; $\overline{I}_{ij}^{\text{line}}$ 分别为可开断电路上的实时电流及其上限。

式(19)表示了可开断线路两端的电压关系,当线路投入运行时,两端电压受该条线路的基本电路原理影响,反之该约束没有作用;式(20)、(21)表征了可开断线路上的功率关系;式(22)表征了可开断线路上的电流关系。

6) 储能约束。

$$0 \leq P_{i,t,\omega}^{\text{S,DC}} \leq x_i^{\text{ESS}} \overline{P}^{\text{DC}}, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^{\text{ESS}} \quad (23)$$

$$0 \leq \eta_C P_{i,t,\omega}^{\text{S,C}} \leq x_i^{\text{ESS}} \overline{P}^{\text{C}}, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^{\text{ESS}} \quad (24)$$

$$\mu_{i,t,\omega}^{\text{DC}} + \mu_{i,t,\omega}^{\text{C}} \leq 1, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^{\text{ESS}} \quad (25)$$

$$P_{i,t,\omega}^{\text{S,DC}} \leq M^{\text{DC}} \cdot \mu_{i,t,\omega}^{\text{DC}}, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^{\text{ESS}} \quad (26)$$

$$P_{i,t,\omega}^{\text{S,C}} \leq M^{\text{C}} \cdot \mu_{i,t,\omega}^{\text{C}}, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^{\text{ESS}} \quad (27)$$

$$x_i^{\text{ESS}} \underline{S}^{\text{ESS}} \leq S_{i,t,\omega}^{\text{ESS}} \leq x_i^{\text{ESS}} \overline{S}^{\text{ESS}}, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^{\text{ESS}} \quad (28)$$

$$S_{i,0,\omega}^{\text{ESS}} = S_{i,N_T,\omega}^{\text{ESS}}, \forall \omega \in \Omega^S \quad (29)$$

$$S_{i,t,\omega}^{\text{ESS}} = S_{i,t-1,\omega}^{\text{ESS}} + \eta_C P_{i,t,\omega}^{\text{S,C}} - P_{i,t,\omega}^{\text{S,DC}}, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^{\text{ESS}} \quad (30)$$

式(23)~(30)中, η_c 为储能系统的充电效率; \bar{P}^C 为储能系统的最大充电功率; $\mu_{i,t,\omega}^{DC}$ 为表征储能系统是否在放电状态的0-1变量; $\mu_{i,t,\omega}^C$ 为表征储能系统是否在充电状态的0-1变量; $S_{i,t,\omega}^{ESS}$ 为储能装置的荷电状态表征其所存储的能量; \bar{S}^{ESS} 、 \underline{S}^{ESS} 分别为储能装置的最大和最小荷电状态, M^{DC} 、 M^C 分别为相比于 $P_{i,t,\omega}^{S,DC}$ 和 $P_{i,t,\omega}^{S,C}$ 足够大的数; N_T 为运行时段的末时刻。

式(23)、(24)表示任一时间段的储能的充放电功率均不应超过其功率限制; 式(25)~(27)表示储能装置不能同时工作在充电状态和放电状态; 式(28)~(29)为储能装置荷电状态的约束; 式(30)为储能装置功率平衡约束。

2 模型求解

所建立的多园区储能配置模型为非线性、非凸的多目标优化模型, 传统的求解算法多为粒子群算法、遗传算法等智能优化算法, 但这些方法需要大量的迭代从而找到最优解, 求解效率低下。因此, 本文从2个方面入手将模型转化为混合整数线性规划模型: 首先, 针对多目标对其进行松弛, 将模型转化为包含目标约束的单目标优化模型; 此外, 利用二阶锥松弛和多面体线性化将非凸非线性优化模型转化为线性规划模型。经转化后的模型能够直接被如CPLEX的线性规划求解器直接求解。

2.1 多目标优化模型的目标松弛处理

对式(1)、(2)所示的2个优化目标进行松弛处理, 使其转化为单目标优化能够被求解器直接求解。

1) 各时段弃光率。

考虑将目标 Z_1 松弛为一个约束条件嵌入模型中, 将 Z_2 作为优化目标, 对清洁能源的消纳需求通常以浪费率为表征, 本文以弃光率表征, 引入以下约束:

$$\lambda = \frac{\sum_{g \in \Omega^c, t \in \Omega^T, \omega \in \Omega^s} P_{g,t,\omega}^{Curt}}{\sum_{g \in \Omega^c, t \in \Omega^T, \omega \in \Omega^s} P_g^{Cap} \beta_{t,\omega}} \quad (31)$$

$$\lambda \leq \bar{\lambda} \quad (32)$$

式中, λ 为平均弃光率; P^{Curt} 为光伏的弃光功率; $\bar{\lambda}$ 为所允许的最大弃光率。

式(31)定义了弃光率, 式(32)约束了弃光率的范围。经松弛后的模型以式(2)为目标函数, 并包含式(3)~(32)为模型约束条件。

2) 一定的投资费用要求下以消纳为目标。

当以光伏消纳作为目标, 多园区储能投资总额则作为约束条件, 考虑如何在投资限额内将光伏消纳提升到最优, 目标函数式(2)可被转化为

$$Z_2 \leq C_{\max} \quad (33)$$

式中, C_{\max} 表示储能系统的最大投资成本。经松弛后的模型以式(1)为目标函数, 并包含式(3)~(30)、(33)为模型约束条件。

2.2 线性化处理

式(3)~(7)所示的潮流约束具有很强的非凸非线性, 这使得模型难以被直接求解, 因此有必要将其转化为线性约束。

引入辅助变量: $(I_{ki,t,\omega}^{line})^2 = \hat{I}_{ki,t,\omega}^{line}$ 、 $(I_{ij,t,\omega}^{line})^2 = \hat{I}_{ij,t,\omega}^{line}$ 、 $(V_{i,t,\omega})^2 = \hat{V}_{i,t,\omega}$ 及 $(V_{j,t,\omega})^2 = \hat{V}_{j,t,\omega}$, 约束式(2)~(5)、(7)、(12)能够被转化为如下约束:

$$\sum_{k \in \Omega(i)} [P_{ki,t,\omega}^{line} - R_{ki} \hat{I}_{ki,t,\omega}^{line}] - \sum_{j \in \Omega(i)} P_{ij,t,\omega}^{line} + P_{i,t,\omega}^{PV} + \eta_{DC} P_{i,t,\omega}^{S,DC} - P_{i,t,\omega}^{S,C} = P_{i,t,\omega}^D, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^B \quad (34)$$

$$\sum_{k \in \Omega(i)} [Q_{ki,t,\omega}^{line} - X_{ki} \hat{I}_{ki,t,\omega}^{line}] - \sum_{j \in \Omega(i)} Q_{ij,t,\omega}^{line} + Q_{i,t,\omega}^{WP} = Q_{i,t,\omega}^D, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^B \quad (35)$$

$$\hat{V}_{i,t,\omega} - \hat{V}_{j,t,\omega} = 2(R_{ij} P_{ij,t,\omega}^{line} + X_{ij} Q_{ij,t,\omega}^{line}) - \hat{I}_{ij,t,\omega}^{line} [(R_{ij})^2 + (X_{ij})^2], \forall \omega, \forall t, \forall ij \in \Omega^{Line} \quad (36)$$

$$\hat{V}_{i,t,\omega} \hat{I}_{ij,t,\omega}^{line} = (S_{ij,t,\omega}^{line})^2, \forall \omega, \forall t, \forall ij \in \Omega^{Line} \quad (37)$$

$$(\underline{V}_i)^2 \leq \hat{V}_{i,t,\omega} \leq (\bar{V}_i)^2, \forall \omega, \forall t, \forall i \in \Omega^B \quad (38)$$

约束式(6)、(37)仍然为非凸约束, 式(37)的等式左侧能够转化为

$$\hat{V}_{i,t,\omega} \hat{I}_{ij,t,\omega}^{line} = \left[\left(\hat{V}_{i,t,\omega} + \hat{I}_{ij,t,\omega}^{line} \right) / 2 \right]^2 - \left[\left(\hat{V}_{i,t,\omega} - \hat{I}_{ij,t,\omega}^{line} \right) / 2 \right]^2 \quad (39)$$

基于二阶锥松弛,式(6)、(39)能够转化为凸约束:

$$S_{ij,t,\omega}^{\text{line}} \geq \sqrt{(P_{ij,t,\omega}^{\text{line}})^2 + (Q_{ij,t,\omega}^{\text{line}})^2} \quad (40)$$

$$\left[\left(\hat{V}_{i,t,\omega} + \hat{I}_{ij,t,\omega}^{\text{line}} \right) / 2 \right]^2 \geq \sqrt{(S_{ij,t,\omega}^{\text{line}})^2 + \left[\left(\hat{V}_{i,t,\omega} - \hat{I}_{ij,t,\omega}^{\text{line}} \right) / 2 \right]^2} \quad (41)$$

式(40)、(41)有如下形式:

$$d_3 = \sqrt{(d_1)^2 + (d_2)^2} \quad (42)$$

式中, d_1 、 d_2 、 d_3 均为一般性变量。

式(40)、(41)可以通过一种高精度的多面体线性化方法进行转化^[20]:

$$\tau_l \geq |d_1|, \alpha_l \geq |d_2|, l=0 \quad (43)$$

$$\begin{cases} \tau_l = \tau_{l-1} \cos\left(\frac{\pi}{2^{l+1}}\right) + \alpha_{l-1} \sin\left(\frac{\pi}{2^{l+1}}\right) \\ \alpha_l \geq \left| \alpha_{l-1} \cos\left(\frac{\pi}{2^{l+1}}\right) - \tau_{l-1} \sin\left(\frac{\pi}{2^{l+1}}\right) \right| \end{cases} \quad (44)$$

$$\forall l = 1, 2, \dots, L$$

$$\tau_l \leq z_3, \alpha_l \leq \zeta_l \tan\left(\frac{\pi}{2^{l+1}}\right), l=L \quad (45)$$

式(43)~(45)中, τ_l 、 α_l 为辅助变量; L 为常数。

线性约束式(43)~(45)等价于:

$$d_3 \cos(\pi/2^{L+1}) \geq \sqrt{(d_1)^2 + (d_2)^2} \quad (46)$$

3 算例验证

3.1 算例描述

本文基于改进的 IEEE 33 节点系统进行仿真验证,如图 1 所示,各园区内部均含有光伏及负荷,园区与园区之间、园区与主干线之间通过 9 条可开断的线路连接,将其用字母(A~I)编号。典型日照曲线及典型负荷曲线如图 2 所示^[19],图 2 中光照强度为光伏实际出力与光伏安装容量的比值,负荷曲线为实际负荷与最大负荷的比值,光伏出力典型场景曲线如图 3 所示。储能数据如表 1 所示^[21]。设置线路最大开断次数为 4。假设各光伏节点均安装 1.5 MW 的光伏,以投资经济性为优化目标,并设置最大弃光率为 10%,对其进行仿真验证。

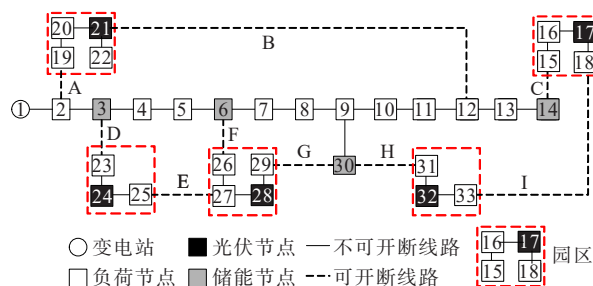


图 1 IEEE 33 节点算例系统

Figure 1 IEEE 33-bus study system

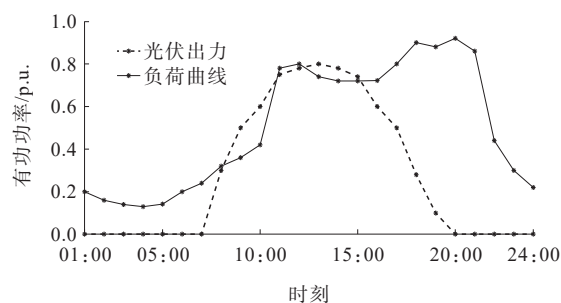


图 2 负荷及参考光伏出力曲线

Figure 2 Load and reference PV output curve

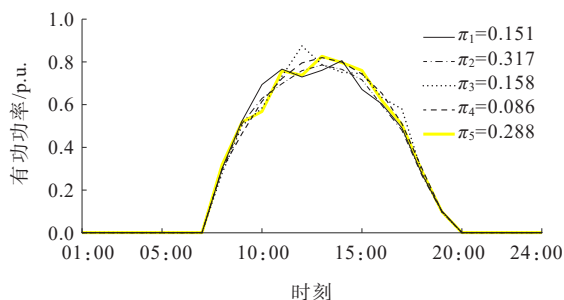


图 3 光伏出力典型场景

Figure 3 Typical scenarios of PV output

表 1 储能装置参数

Table 1 Energy storage device parameters

参数	单位	数值
储能电池成本	元/(kW·h)	1 600
储能充放电系统成本	元/kW	500
单位储能容量	(kW·h)/个	100
单位储能最大充电功率	kW	30
单位储能最大放电功率	kW	30

3.2 容量配置结果

在该算例系统中,为了满足弃光率不高于 10% 这一目标,最小储能投资成本为 $2.425 5 \times 10^7$ 元,各节点储能配置结果如表 2 所示。

表2 储能配置结果

Table 2 Energy storage configuration results

节点	储能装置数量	储能容量/(MW·h)	最大充放电功率/MW
3	24	2.4	0.72
6	25	2.5	0.75
14	54	5.4	1.62
30	44	4.4	1.32

从表2可以看出,各个储能备选节点均安装了储能装置,最少为3节点安装了24个储能装置,最多为14节点安装了54个储能装置。可见各个位置上的最优储能配置情况存在较大差异,这种现象可以由网络结构进行解释,结合网络结构图可以看出,3节点离变电站最近,而14节点离变电站最远。由于3节点附近的负荷节点和光伏节点离变电站的电气距离比较近,当系统中电能不足时,可以直接从变电站输送电能,满足系统的电能需求;另一方面,由于14节点附近的负荷节点和光伏节点离变电站的电气距离比较远,当系统中电能不足时,若从变电站传输大量电能,可能会导致电压越限,不满足安全要求。因此,距离变电站电气距离越远,所需储能容量越大,以实现电能就地平衡,减少系统运行压力。

3.3 网络重构结果

针对9条可重构线路,将其编号为A~I,其重构结果如表3所示。

表3 网络重构结果

Table 3 Network reconstruction results

时段	投入运行线路	时段	投入运行线路
01:00—02:00	B、C、D、G、H	18:00—19:00	B、D、E、H、I
03:00—05:00	B、C、E、G、H	20:00—21:00	A、C、D、E、H
06:00—07:00	B、C、D、G、H	22:00—24:00	B、C、D、G、H
08:00—17:00	B、C、D、F、H		

从表3中可以看出,在08:00之前以及17:00以后,网络拓扑变化较为频繁,而在08:00—17:00这10h的时间内拓扑结构相对比较固定。结合图2可以看出,从08:00开始,光伏出力逐渐增加,到中午13:00的时候达到顶峰,晚上20:00之后,光伏出力降为0;负荷在11:00—21:00处于比较高峰的状态。

值得一提的是,图2中的日照曲线和负荷曲线为与最大值的比值,而非实际值。在17:00,光伏的最大可发功率和系统负荷分别为3.75 MW和2.10 MW,光伏发电量大于负荷量,在18:00,光伏的最大可发功率和系统负荷分别为2.10 MW和3.34 MW,光伏发电量小于负荷量。由此可见,拓扑变化依托于系统中各节点的充放电状态。

另一方面,从表3中可以看出线路B和线路C在大部分时段投入运行,因此,14节点上的储能装置与17节点和21节点上的光伏装置在大部分时段联系最紧密;同理30节点上的储能装置与28节点和32节点上的光伏装置联系较紧密;3节点上的储能装置与24节点上的光伏装置联系较紧密;6节点上的储能装置与28节点上的光伏装置联系较紧密。可见,相比于节点3和节点6,节点14和节点30的储能服务于较多的园区,因此表3中所示的储能配置结果中,14节点和30节点的储能安装量显著高于3节点和6节点。该现象也证明了本文所提储能配置模型的有效性。

3.4 多时段模拟运行

为了分析各个园区光伏的时序控制状态,在参考光伏曲线下求解多时段模拟运行模型。

图4展示了各个园区光伏在24个时段上的弃光率,可以看出各个节点光伏在08:00—16:00均存在不同程度的弃光,特别是在09:00弃光率达到最大。虽然日照强度在13:00达到最大,但是13:00也是处于负荷的高峰时段,显然弃光率不仅与光伏装置的最大可发电量有关,还与系统负荷量有关,而在09:00光照强度已经比较高,而系统负荷量还处于增长阶段,因此在09:00弃光率达到最大。

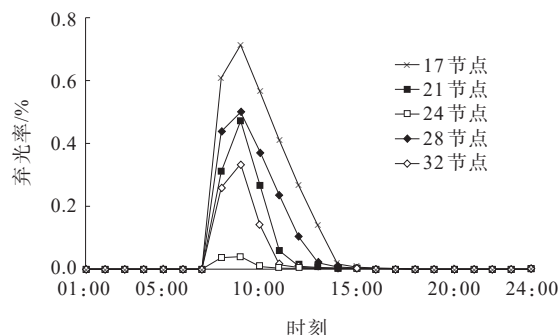


图4 各时段各光伏弃光率

Figure 4 The abandon rate of each PV in each period

另一方面,从图4中可以看出17节点光伏的弃光率整体最高,其次是28节点、21节点和32节点,24节点的弃光率最低,为了便于解释这种现象,图5展示了24个时段各园区的负荷量。对比图4和图5可以发现,负荷量越高的园区,其自身光伏的弃光率越低,特别是24节点所在的园区,其整体负荷水平显著高于其他园区,从图4中也可以看出,24节点的光伏几乎没有弃光。这说明具有较大负荷量的园区在光照较强的时段能够较好地消纳本地光伏发电,而负荷量较小的园区由于网络安全约束,在光照较强的时段不得不进行大量弃光。这种现象进一步验证了本文所提方法的有效性。

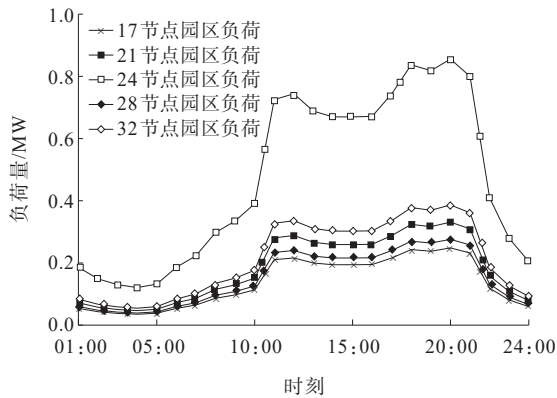


图5 各时段各园区负荷量

Figure 5 The load of each park in each period

3.5 有无储能装置对比

为了验证储能装置在光伏消纳方面的作用,以不接入储能的情况进行对比实验,实验基于参考光伏出力曲线进行。图6展示了不接入储能的情况下各光伏装置在24个时段的弃光率。相较于图4所示加装储能情况下所得的模拟运行结果,不加装储能的情况下,整体弃光率将会非常大,特别是在08:00—18:00这个时段,光照强度比较大,而系统的负荷量无法将光伏发电全消纳,导致了大量的弃光。而在18:00之后,负荷量依然比较大,但是日照强度出现了显著下降,此时光伏发电量能够被全消纳,系统中电能不足还需从变电站进行传输。结合图1来看,当加装储能装置后,在日照强度较高的

08:00—18:00阶段,储能装置均在充电,而在18:00之后日照强度出现显著下降时,储能装置开始大量放电,以满足系统负荷需求。由此可见在日照强度较高的系统中,储能的接入能够在日照强度高的阶段存储电能,在日照强度低的阶段释电能,从而促进光伏的消纳。

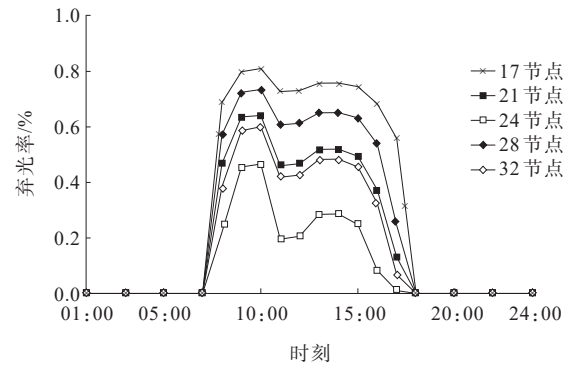


图6 各时段弃光率(无储能)

Figure 6 Abandon rate of PV in each period (without energy storage)

3.6 帕累托前沿

利用帕累托前沿对仿真结果进行分析,可筛选得到综合性能较好的优化方案^[21-22]。所提的多目标储能配置模型的帕累托前沿如图7所示。从图像形状来看,帕累托曲线整体呈现一条直线的状态,曲线斜率几乎保持不变。这种现象可以由以下理论进行说明:储能装置对光伏消纳的影响主要反映于两方面,一方面是储能装置的容量,另一方面为储能装置的充放电功率,而从前文的分析可知,对于本文所用的算例系统,储能装置的容量是影响光伏消纳的最主要因素,即使是在投资额为 2.4255×10^7 元的情况下,模拟运行时各储能装置依然达到了最大荷电状态。可以推断出,将储能投入系统中使用时,新增的储能装置容量即为所能减少的光伏弃光功率,因此弃光率和投资额呈线性相关的关系。此外,从图7中可以看出,帕累托曲线并非一条完全光滑的曲线,这是由储能装置的位置所决定的,从前文的分析可知,各个节点的储能装置所辐射的范围并不一样,因此当不同节点新增储能时对整个系统光伏消纳所带来的收益并不一样。

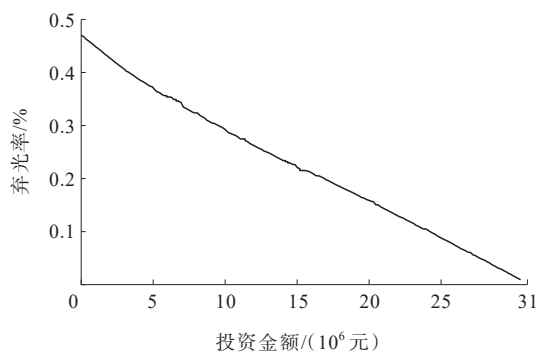


图7 帕累托前沿

Figure 7 The Pareto Frontier

3.7 参数分析

储能装置的单位存储容量以及其单位最大充放电功率是影响其配置结果的重要参数,对其进行参数分析,其结果如图8、9所示。

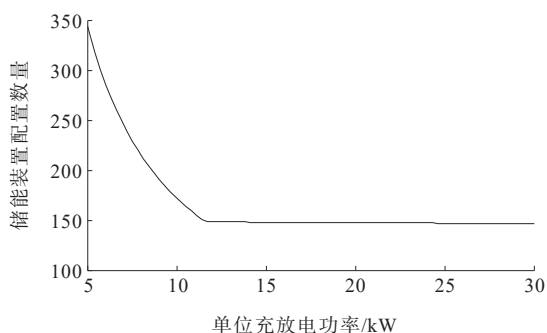


图8 单位充放电功率对储能配置结果的影响

Figure 8 Influence of unit charge and discharge power on energy storage configuration results

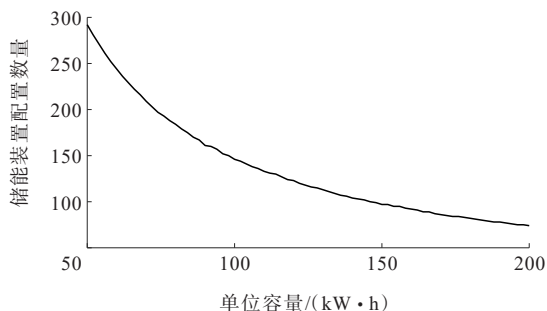


图9 单位容量对储能配置结果的影响

Figure 9 Influence of unit capacity on energy storage configuration results

从图8中可以看出,当储能装置的最大充放电功率低于11.7 kW时,所需储能装置数量随着最大充放电功率的增加逐渐减小,而且曲线的斜率也呈现逐渐减小的趋势;而当储能装置的最大充放电功

率高于11.7 kW时,储能装置数量并不随最大充放电功率变化而变化。以上现象表明,当充放电功率较低时,提升储能装置的充放电功率所带来的边际收益较高,而随着充放电功率提升,其边际收益逐渐下降,直到达到某一阈值后,提升充放电功率的边际效益将为零。

从图9可以看出,对储能装置容量进行参数分析所得的曲线变化趋势与图8相似,即随着储能装置容量的提升,所带来的边际收益逐渐下降。

在实际的工程应用中,针对储能装置最大充放电功率以及容量的参数分析可以为储能装置的选型提供一定的辅助支撑。

3.8 算法精度分析

本文通过二阶锥松弛以及多面体线性化方法,将原始混合整数非凸非线性优化模型转化为混合整数线性规划模型,转化后的模型存在一定松弛误差,为了验证松弛的精确性,定义松弛误差如下:

$$\delta_{ij,t} = \hat{I}_{ij,t}^{\text{line}} \hat{V}_{i,t} - (P_{ij,t}^{\text{line}2} + Q_{ij,t}^{\text{line}2}) \quad (47)$$

所有时段关键线路松弛误差的散点图如图10所示,可以看出各条线路的松弛误差均保持在 10^{-4} 以内,表明松弛过后的最优潮流模型是精准的, 10^{-5} 数量级的误差对于规划配置是完全可接受的。

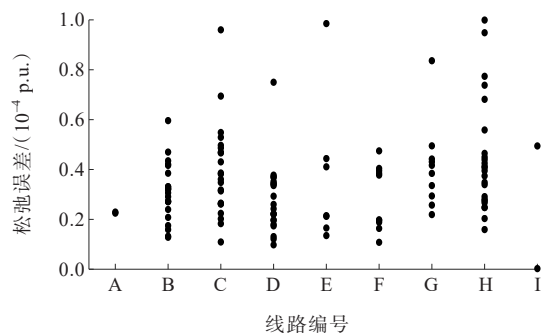


图10 关键线路松弛精度

Figure 10 Critical line relaxation accuracy

4 结语

为了解决园区能源消纳问题和提高系统经济性,提出一种考虑网络重构的园区储能多目标优化

配置方法。首先,基于二阶锥潮流建立通用于网络动态重构的潮流模型,此外考虑到能源消纳效益与投资成本之间的相互制约关系,提出以经济性和能源消纳为目标的多目标优化模型。其次,通过二阶锥和多面体线性化将原始模型转化为可直接求解的线性规划模型,通过对优化目标的松弛,将模型转化为单目标优化模型。最后,将所提方法应用在IEEE 33节点算例系统上。结果表明:

1)考虑网络重构时,网络的拓扑变化能够有效反应系统中的电量状态,根据实时负荷量和光伏发电量来改变网络拓扑能够有效提升光伏的消纳水平;

2)规划模型能够提供一条帕累托曲线,在实际的工程应用中可根据实际的资金情况、能源消纳需求等方面的因素,根据帕累托曲线进行储能规划。

参考文献:

- [1] 阮前途,陈赞,潘智俊.新型电力系统对实现沿海城市双碳目标贡献的探讨[J].电力系统自动化,2022,46(14):11-18.
RUAN Qiantu, CHEN Yun, PAN Zhijun. Discussion on contributions of novel power system to achieving carbon emission peak and carbon neutrality of coastal city[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 11-18.
- [2] 黄鸣宇,张庆平,张沈习,等.高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):116-123.
HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 116-123.
- [3] 边晓燕,张璐瑶,周波等.基于知识图谱的国内外电力市场研究综述[J].电工技术学报,2022,37(11):2777-2788.
BIAN Xiaoyan, ZHANG Luyao, ZHOU Bo, et al. Review on domestic and international electricity market research based on knowledge graph[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2777-2788.
- [4] 甘子莘,荆朝霞,谢文锦,等.适应中国电力市场改革现状的输电权分配机制[J].中国电力,2021,54(6):54-61.
GAN Zishen, JING Zhaoxia, XIE Wenjin, et al. Financial transmission right mechanism and its application in China electricity market[J]. Electric Power, 2021, 54(6): 54-61.
- [5] 潘华,高旭,姚正,等.计及储能效益的综合能源系统利益分配机制研究[J].智慧电力,2022,50(5):25-32.
PAN Hua, GAO Xu, YAO Zheng, et al. Benefit allocation of integrated energy system considering energy storage benefit[J]. Smart Power, 2022, 50(5): 25-32.
- [6] 张冲,荣娜.基于改进粒子群算法的新能源侧储能容量配置[J].电网与清洁能源,2022,38(10):98-105.
ZHANG Chong, RONG Na. Energy storage capacity allocation of renewable energy side based on improved particle swarm optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 98-105.
- [7] 薛贵挺,单博雅,王侗,等.考虑光伏不确定性的工业园区光-储鲁棒优化配置[J].系统仿真学报,2022,34(11):2396-2405.
XUE Guiting, SHAN Boya, WANG Ti, et al. Robust optimal configuration of PV-energy storage in industrial parks considering the uncertainty of photovoltaics[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(11): 2396-2405.
- [8] 刘道兵,袁野,李世春,等.利用氢储能在含可再生能源系统容量配置综述[J].电测与仪表,2022,59(12):1-13.
LIU Daobing, YUAN Ye, LI Shichun, et al. A review of capacity allocation of renewable energy system using hydrogen storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 1-13.
- [9] 李鹏,陈博,王子轩,等.计及网络安全约束和多能协同交互的多园区综合能源系统分散协调调度[J].电力自动化设备,2020,40(12):15-25.
LI Peng, CHEN Bo, WANG Zixuan, et al. Decentralized coordinated dispatch of multi-community integrated energy system considering network security constraints and multi-energy collaborative interaction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 15-25.
- [10] 张亮,李章溢,裴玮,等.基于综合需求响应的工业园区联络线功率控制[J].电力工程技术,2021,40(3):106-113.
ZHANG Liang, LI Zhangyi, PEI Wei, et al. Tie-line power control method for an industrial park based on integrated demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 106-113.
- [11] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming

- [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.
- [12] 李洪美,崔翰韬,万秋兰.考虑电动汽车充电策略的配网重构二阶锥规划模型[J].中国电机工程学报,2015,35(18):4674-4681.
LI Hongmei, CUI Hantao, WAN Qiulan. Distribution network reconfiguration based on second-order conic programming considering EV charging strategy[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(18):4674-4681.
- [13] 朱俊澎,顾伟,张韩旦,等.考虑网络动态重构的分布式电源选址定容优化方法[J].电力系统自动化,2018,42(5):111-119.
ZHU Junpeng, GU Wei, ZHANG Handan, et al. Optimal siting and sizing of distributed generators considering dynamic network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(5):111-119.
- [14] 房宇娇,李树静,李宏仲,等.考虑广义储能的配电网双层规划研究[J].可再生能源,2020,38(11):1541-1550.
FANG Yujiao, LI Shujing, LI Hongzhong, et al. Research on Bi-level planning of distribution network considering generalized energy storage[J]. Renewable Energy Resources,2020,38(11):1541-1550.
- [15] 尚敬福,马克睿,花志浩,等.计及碳排放的综合能源系统优化调度及仿真实现[J].供用电,2021,38(11):77-84.
SHANG Jingfu, MA Kerui, HUA Zhihao, et al. Optimal scheduling and simulation of integrated energy system considering carbon emission[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(11): 77-84.
- [16] 陈刚,黄杨,丁理杰,等.考虑高压配电网转供能力的储能电站双层规划模型[J].电力建设,2021,42(1):85-95.
CHEN Gang, HUANG Yang, DING Lijie, et al. Bi-level programming model of energy storage power station considering transfer capability of high voltage distribution network[J]. Electric Power Construction,2021,42(1):85-95.
- [17] 蒙璟,李训聿,丁霞燕.基于改进自适应权重多目标粒子群算法的分布式电源优化配置[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):55-60+106.
MENG Jing, LI Xunyu, DING Xiayan. Optimal allocation of distributed generation based on improved adaptive weight multi-objective particle swarm optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 55-60+106.
- [18] 郭清元,吴杰康,莫超,等.基于混合整数二阶锥规划的新能源配电网电压无功协同优化模型[J].中国电机工程学报,2018,38(5):1385-1396.
GUO Qingyuan, WU Jiekang, MO Chao, et al. A model for multi-objective coordination optimization of voltage and reactive power in distribution networks based on mixed integer second-order cone programming[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(5):1385-1396.
- [19] 贺帅佳,高红均,刘俊勇,等.计及需求响应柔性调节的分布鲁棒DG优化配置[J].中国电机工程学报,2019,39(8):2253-2264.
HE Shuaijia, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. Distributionally robust optimal DG allocation model considering flexible adjustment of demand response[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(8):2253-2264.
- [20] ZARE A, CHUNG C Y, ZHAN J P, et al. A distributionally robust chance-constrained MILP model for multistage distribution system planning with uncertain renewables and loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5):5248-5262.
- [21] 陈聪,沈欣炜,夏天,等.计及焓效率的综合能源系统多目标优化调度方法[J].电力系统自动化,2019,43(12):60-67+121.
CHEN Cong, SHEN Xinwei, XIA Tian, et al. Multi-objective optimal dispatch method for integrated energy system considering exergy efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(12):60-67+121.
- [22] 吕思,卫志农,马骏超,等.基于多目标优化的电力-交通系统协同运行分析[J].电力系统自动化,2022,46(12):98-106.
LÜ Si, WEI Zhinong, MA Junchao, et al. Analysis on coordinated power-transportation system operation based on multi-objective optimization[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(12):98-106.