

提升配电网光伏消纳能力和安全性的四象限储能规划方法

呼士召¹, 吉时好^{2,3}, 江健健¹, 董家读¹, 许亮¹, 王天霖¹, 陈深¹, 刘明波^{2,3}

(1. 广东电网有限责任公司, 广州 510180; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 3. 华南理工大学广东省绿色能源技术重点实验室, 广州 510640)

摘要: 随着高比例光伏广泛接入配电网节点电压和线路潮流越限问题日趋突出, 同时还有可能会产生“弃光”现象。为此建立了配电网储能配置两阶段分布鲁棒优化模型, 以提升配电网光伏消纳能力和安全性。该模型的第一阶段以最小化储能投资成本年值为目标确定储能的安装地点和容量。第二阶段模拟配电网全年典型日的最优运行, 其目标是配电网年运行费用最小, 其中采用基于2-范数距离的多个不确定集分别描述典型日光伏和负荷的不确定性, 而且考虑储能四象限运行特性。采用列与约束生成算法和max-min子问题分解算法求解该模型, 并在某实际10 kV配电网进行了仿真分析, 验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 配电网; 四象限储能; 光伏和负荷的不确定性; 最优配置; 分布鲁棒优化

Four-Quadrant Energy Storage Planning Method for Enhancing Photovoltaics Consumption Capacity and Safety of Distribution Networks

HU Shizhao¹, JI Shiyu^{2,3}, JIANG Jianjian¹, DONG Jiadu¹, XU Liang¹, WANG Tianlin¹, CHEN Shen¹, LIU Mingbo^{2,3}

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510180, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Green Energy Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With the widespread integration of high proportion photovoltaics into the distribution network, the problem of node voltage and line flow exceeding limits is becoming increasingly prominent. And there is a possibility of "PV curtailment" phenomenon. Therefore, a two-stage distributionally robust optimization model is established for energy storage configuration in the distribution networks to enhance the photovoltaic consumption capacity and safety of distribution networks. The first stage of the model determines the installation location and capacity of energy storage with the goal of minimizing the annual investment cost of energy storage. The second stage simulates the optimal operation of the distribution network on typical days throughout the year, with the goal of minimizing the annual operating cost of the distribution network. Multiple uncertainty sets based on norm-2 distance are used to describe the uncertainty of the output of PVs and loads in the typical days respectively, and the four-quadrant operating characteristics of energy storage are considered. The column and constraint generation algorithm and max-min sub-problem decomposition algorithm are used to solve the model. And simulation analysis is conducted on an actual 10 kV distribution network to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: distribution network; four-quadrant energy storage; photovoltaics and loads uncertainty; optimal configuration; distributionally robust optimization

0 引言

随着分布式光伏渗透率不断提高,其强不确定性对配电网的安全运行带来了挑战。目前分布式光伏的消纳情况受负荷影响较大,当光伏有效发电时间段内负载率较低,则消纳较少,须经配用变压器上送至10 kV线路,会造成潮流和电压越限等问题^[1]。如果消纳能力不足,还会造成弃光现象。而储能系统(energy storage system, ESS)具有有功和无功功率耦合四象限运行特性和快速连续灵活的调节能力,而且受地理资源等外部条件限制较小,合理调节配电网各节点的有功和无功功率注入,能有效提高新能源消纳能力,维持节点电压稳定,降低系统网损^[2-3]。

目前国内外对于配电网的光储协同优化展开了较为广泛的研究,针对电压越限问题,文献[4]以ESS调度成本、购售电成本以及网损成本之和最小为目标,提出了两阶段光储系统协同运行优化调度策略。由于电压控制过程中各节点的灵敏度不同,文献[5-6]通过对电气指标进行集群划分实现电压协同优化控制。文献[7]对多光储一体的配电网采用集中式滚动优化与分布式实时控制相结合的电压优化控制策略。为提高光伏消纳能力和利用率,文献[8]建立了以年综合成本和年总弃风量最小为目标的柔性互联和ESS协调规划的双层规划模型。文献[9]提出了一种变压器扩容与分布式ESS协调的容量配置方法,以降低投资成本、提高ESS配置方案的经济性。针对信息系统和物理系统分开进行规划的现状,文献[10]对含高比例光伏的低压配电网中ESS与通信网络提出了一种基于双层规划的协同规划方法,在提高控制性能的同时降低通信网络的复杂度。然而,上述文献集中于对确定性场景电压控制策略研究,没有考虑光伏和负荷功率的不确定性。

针对配电网中源荷的多重不确定性,两阶段鲁棒优化方法已经被广泛应用于配电网ESS最优配置问题中^[11-17]。文献[18]针对光伏和负荷功率的双重不确定性,提出了基于预测误差概率分布的不确定性场景生成方法。由于鲁棒优化方法获得的决策方案往往过于保守,而分布鲁棒优化方法既融入了随机优化方法中的概率统计特征,又借鉴了鲁棒优化方法的思想,在具备一定的抗风险能力的同时可提

高方案的经济性^[19-20]。针对主动配电网的电压调节问题,文献[21]提出了一种基于Wasserstein距离不确定集的混合ESS两阶段分布鲁棒优化策略,第一阶段确定分布式电池ESS的日前调度计划,第二阶段利用模型预测控制对日内充放电策略进行滚动优化。文献[22]依据弹性指标选择ESS的安装位置,建立了基于Kullback-Leibler散度距离不确定集的两阶段分布式鲁棒优化模型。然而,上述文献仅研究了ESS有功功率调节能力在配电网电压调节中的应用,不能有效发挥其有功和无功功率协同调节的潜力,降低了应用效率。随着ESS四象限运行特性越来越受到重视,文献[2]提出了一种考虑四象限ESS功率线性化建模的主动配电网有功-无功功率协调优化策略。文献[3]考虑负荷和光伏的不确定性和ESS的四象限运行特性,建立了分布式ESS最优配置和选址的多目标优化模型,并以功效系数法将多个目标优化问题转化为单目标优化问题。

综上,在配置ESS解决因光伏接入导致配电网支路潮流和电压越限问题的研究方面已取得部分研究成果,并已证明考虑不确定性的两阶段min-max-min模型对于ESS规划是一种有效的解决方案。但现有研究中大多采用电压灵敏度或网损灵敏度等指标来确定安装地点,同时兼顾ESS配置和选址优化的研究相对较少。此外,分布鲁棒优化方法相比鲁棒优化方法更具经济性,但目前在分布鲁棒优化建模中,基于距离不确定集构建的规划多为非凸模型,既增大了求解难度和求解时间,又降低了求解精度。而且,仅构造单一不确定集,对不确定性的刻画不够准确和全面,容易造成与实际场景相差较大的情况。

本文针对上述问题,考虑光伏和负荷功率的不确定性以及ESS四象限运行特性,建立一种基于2-范数距离多不确定集的ESS规划-运行两阶段分布鲁棒优化模型,第一阶段和第二阶段分别以最小化ESS投资和电网运行费用为目标,同时优化ESS在配电网中的安装地点和容量,采用列与约束生成(column and constraint generation, C&CG)算法和max-min子问题分解算法求解该模型。

1 储能系统最优配置模型

针对配电网ESS规划问题,拟建立两阶段规划-运行min-max-min分布鲁棒优化模型,其框架如

图1所示。

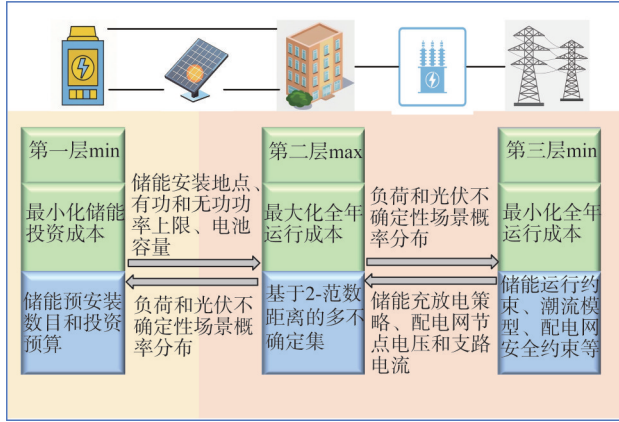


图1 ESS规划建模框

Fig. 1 Framework of modeling energy storage system planning

第一阶段以ESS投资费用年值最小为目标, 确定ESS安装地点、有功和无功功率上限及电池容量。第二阶段模拟配电网全年典型日的最优运行, 其目标是配电网年运行费用最小, 其中采用基于2-范数距离的多个不确定集分别描述典型日光伏和负荷的不确定性。由于光伏发电与季节天气有关, 因此采用基于2-范数距离的多不确定集分别描述不同典型日下场景概率分布, 以实现对实际场景准确而全面的刻画。

1.1 ESS功率四象限运行特性

ESS由电池和功率转换系统(power conversion system, PCS)组成, PCS为一个自换相的三相全桥逆变器, 通过控制器件开关是否导通对输出电压的大小和相位进行调节, 从而实现有功-无功功率四象限快速平滑调节^[2]。ESS功率四象限输出范围如图2所示。图中, $P_{ES,t}$ 为 t 时刻ESS的有功功率出力; $Q_{ES,t}$ 为 t 时刻ESS的无功功率出力; S_{ES} 为ESS的额定视在功率。

当PCS中的外环控制器检测到配电网需要有功

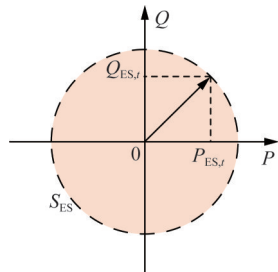


图2 ESS功率四象限输出范围

Fig. 2 Power four-quadrant output range of ESS

和无功功率时, 内环控制器控制ESS有功、无功功率出力大于0, 此时ESS向外放电, 提供无功功率, 对应ESS工作在功率圆第一象限; 当检测到配电网中的有功和无功功率富余时, 电网向ESS输送有功和无功功率, 电池处于充电状态, 电容从外界吸收无功功率, 对应ESS工作模式处于第三象限; 同理, ESS也可工作在二、四象限的功率圆内及圆上的其他状态, 根据实际需求灵活控制其充放电状态^[23-24]。

1.2 目标函数

第一阶段和第二阶段分别以ESS投资费用年值和配电网年运行费用最小为目标, 即:

$$\min \{C_{inv} + \max E(\min C_{op})\} \quad (1)$$

式中: C_{inv} 为ESS总投资成本年值; C_{op} 为配电网年运行费用; $E(\cdot)$ 为数学期望。

式(1)中ESS方案总投资成本年值包括ESS初始投资成本的年值和ESS年运维费用, 具体表示为:

$$C_{inv} = C_{ES, in} \frac{i_0}{1 - (1 + i_0)^{-T_{pro}}} + C_{ES, om} \quad (2)$$

式中: i_0 为基准贴现率; T_{pro} 为ESS运行年限; $C_{ES, om}$ 为ESS年运维费用; $C_{ES, in}$ 为ESS总投资成本, 具体表达式为:

$$C_{ES, in} = \sum_{i=1}^{N_i} \rho_i (\mu_{ES} E_{ES, i} + \mu_{SES} S_{ES, i}) \quad (3)$$

式中: N_i 为配电网节点数量; μ_{ES} 和 μ_{SES} 分别为单位容量成本和单位视在功率成本; $E_{ES, i}$ 和 $S_{ES, i}$ 分别为节点 i 安装ESS的容量和视在功率; ρ_i 为在节点 i 是否安装ESS的0-1整数变量, 如果其取值为1, 则表示在节点 i 安装ESS, 如果其取值为0, 则表示在节点 i 不安装ESS。

式(1)中配电网年运行费用包括配电网全年支路损耗费用 F_{loss} 、ESS年运行费用 F_{ES} 和弃光惩罚费用 F_{pv} , 具体表示为:

$$C_{op} = F_{loss} + F_{ES} + F_{pv} \quad (4)$$

配电网全年线路损耗费用 F_{loss} 可以表示为:

$$F_{loss} = M_d \sum_{m=1}^{N_m} w_m \sum_{s=1}^{N_i} p_s^m \sum_{t=1}^{N_i} \sum_{j \rightarrow i} \mu_{ij} r_{ij} L_{ij, t, s}^m \quad (5)$$

式中: M_d 为一年中的总天数(此处取365); N_m 和 w_m 分别为典型日 m 数量(此处将一年分为春夏秋冬四个季节, 每个季节再分为晴天和阴雨天, 共8个典

型日)和典型日 m 在一年中所占的比例; p_s^m 为第 m 个典型日的第 s 个场景发生的概率; N_s 为每个典型日的场景数量; N_t 为一天中所平均划分时段的数量(取 24); μ_g 为电能价格; r_{ij} 为支路 ij 的电阻; $L_{ij,t,s}^m$ 为在第 m 个典型日第 s 个场景下 t 时段支路 ij 的电流值的平方。

ESS 年运行费用 F_{ES} 包括 ESS 有功功率年运行费用 F_{PES} 和 ESS 无功功率年运行费用 F_{QES} , 具体表示为:

$$F_{ES} = F_{PES} + F_{QES} \quad (6)$$

$$F_{PES} = M_d \sum_{m=1}^{N_m} w_m \sum_{s=1}^{N_s} p_s^m \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} (\mu_{PES}^{\text{ch}} \rho_i P_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m} + \mu_{PES}^{\text{dis}} \rho_i P_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m}) \quad (7)$$

$$F_{QES} = M_d \sum_{m=1}^{N_m} w_m \sum_{s=1}^{N_s} p_s^m \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} (\mu_{QES}^{\text{ch}} \rho_i Q_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m} + \mu_{QES}^{\text{dis}} \rho_i Q_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m}) \quad (8)$$

式中, μ_{PES}^{ch} 和 μ_{PES}^{dis} 分别为 ESS 单位有功功率充放电价格; μ_{QES}^{ch} 和 μ_{QES}^{dis} 分别为 ESS 单位无功功率吸收和释放的价格; $P_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m}$ 和 $P_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m}$ 分别为在第 m 个典型日第 s 个场景下 t 时段节点 i 处 ESS 的充电和放电有功功率; $Q_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m}$ 和 $Q_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m}$ 分别为在第 m 个典型日第 s 个场景下 t 时段节点 i 处 ESS 吸收和释放的无功功率。

弃光惩罚费用 F_{PV} 可以表示为:

$$F_{PV} = \lambda \sum_{m=1}^{N_m} w_m \sum_{s=1}^{N_s} p_s^m \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} |P_{PV,i,t,s}^m - \hat{P}_{PV,i,t,s}^m| \quad (9)$$

式中: λ 为弃光惩罚系数; $P_{PV,i,t,s}^m$ 和 $\hat{P}_{PV,i,t,s}^m$ 分别为在第 m 个典型日第 s 个场景下 t 时段节点 i 处光伏发电的自然出力 and 实际出力。

在 3 个目标函数项(如式(3)、(7)和(8)所示)中, 存在 0-1 整数变量与连续变量的乘积项, 可采用大 M 法对它们进行线性化。

式(3)可以等价表示为:

$$C_{ES,in} = \sum_{i=1}^{N_i} (\mu_{EES} E_{ES,i} + \mu_{SES} S_{ES,i}) \quad (10)$$

$$0 \leq E_{ES,i} \leq \rho_i M_1 \quad (11)$$

$$0 \leq S_{ES,i} \leq \rho_i M_2 \quad (12)$$

式中 M_1 和 M_2 分别为两个很大的正常数。

同理, 式(7)和(8)可以等价线性化。

1.3 第一阶段约束

ESS 的电池容量、有功和无功功率及安装数量

应受到相应的安装预算约束, 具体表示如下:

$$0 \leq P_{ES,i} \leq P_{ES,max} \quad (13)$$

$$0 \leq Q_{ES,i} \leq Q_{ES,max} \quad (14)$$

$$0 \leq S_{ES,i} \leq S_{ES,max} \quad (15)$$

$$0 \leq E_{ES,i} \leq E_{ES,max} \quad (16)$$

$$Q_{ES,i} \leq \sqrt{S_{ES,i}^2 - P_{ES,i}^2} \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \rho_i \leq N_{ESS} \quad (18)$$

式中: $P_{ES,i}$ 为节点 i 安装 ESS 充电/放电有功功率; $Q_{ES,i}$ 为节点 i 安装 ESS 吸收/释放无功功率; $P_{ES,max}$ 、 $Q_{ES,max}$ 、 $S_{ES,max}$ 和 $E_{ES,max}$ 分别为所能安装 ESS 的有功功率、无功功率、视在功率和电池容量的最大值; N_{ESS} 为拟安装 ESS 的数量。

1.4 第二阶段约束

1) 储能四象限运行约束

在 ESS 运行过程中, 其充电和放电有功功率、吸收和释放的无功功率应受到所安装功率的限制。其荷电状态约束, 即当前时段电池能量与前一时段电池电量和当前时段的充放电有功功率有关, 其电池能量不仅应满足电池荷电状态的上下限约束, 还应满足每个调度周期(此处为 1 d)内初始时段与最终时段电量相等。具体描述如下。

$$0 \leq P_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m} \leq P_{ES,i}, 0 \leq P_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m} \leq P_{ES,i} \quad (19)$$

$$0 \leq Q_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m} \leq Q_{ES,i}, 0 \leq Q_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m} \leq Q_{ES,i} \quad (20)$$

$$P_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m} \cdot P_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m} = 0 \quad (21)$$

$$Q_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m} \cdot Q_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m} = 0 \quad (22)$$

$$E_{ES,i,t,s}^m = E_{ES,i,t-1,s}^m + P_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m} \eta_{\text{ch}} \Delta T - P_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m} \Delta T / \eta_{\text{dis}} \quad (23)$$

$$E_{\text{SOC min}} \leq E_{ES,i,t,s}^m \leq E_{\text{SOC max}} \quad (24)$$

$$E_{ES,i,0,s}^m = E_{ES,i,24,s}^m \quad (25)$$

式中, $E_{ES,i,t,s}^m$ 为在第 m 个典型日第 s 个场景下 t 时段节点 i 处 ESS 的电量; η_{ch} 和 η_{dis} 分别为 ESS 的充放电效率; ΔT 为每个时间段的长度(此处为 1 h); $E_{\text{SOC min}}$ 和 $E_{\text{SOC max}}$ 分别为 ESS 电量的上下限; $E_{ES,i,0,s}^m$ 为在第 m 个典型日第 s 个场景下初始时段节点 i 处 ESS 的电量; $E_{ES,i,24,s}^m$ 为在第 m 个典型日第 s 个场景下结束时段节点 i 处 ESS 的电量。

因为目标函数式(7)是充放电有功功率 $P_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m}$ 和 $P_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m}$ 的增函数, 因此约束(21)自然满足^[25]。同理, 约束(22)也自然满足。

2) 配电网潮流方程及运行约束

配电网潮流方程采用 Distflow 模型描述, 即:

$$P_{j,t,s}^m = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t,s}^m - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij,t,s}^m - r_{ij} L_{ij,t,s}^m), \quad (26)$$

$$j = 2, 3, \dots, N_i$$

$$Q_{j,t,s}^m = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t,s}^m - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij,t,s}^m - x_{ij} L_{ij,t,s}^m), \quad (27)$$

$$j = 2, 3, \dots, N_i$$

$$P_{j,t,s}^m = \hat{P}_{PV,j,t,s}^m + \rho_j P_{ES,j,t,s}^{\text{dis},m} - \rho_j P_{ES,j,t,s}^{\text{ch},m} - P_{L,j,t,s}^m, \quad (28)$$

$$j = 2, 3, \dots, N_i$$

$$Q_{j,t,s}^m = \rho_j Q_{ES,j,t,s}^{\text{dis},m} - \rho_j Q_{ES,j,t,s}^{\text{ch},m} - Q_{L,j,t,s}^m, \quad (29)$$

$$j = 2, 3, \dots, N_i$$

$$V_{j,t,s}^m = V_{i,t,s}^m - 2(P_{ij,t,s}^m r_{ij} + Q_{ij,t,s}^m x_{ij}) + L_{ij,t,s}^m (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (30)$$

$$L_{ij,t,s}^m V_{i,t,s}^m = (P_{ij,t,s}^m)^2 + (Q_{ij,t,s}^m)^2 \quad (31)$$

$$(1 - \alpha) P_{PV,j,t,s}^m \leq \hat{P}_{PV,j,t,s}^m \leq P_{PV,j,t,s}^m \quad (32)$$

式中: $V_{j,t,s}^m$ 、 $P_{j,t,s}^m$ 和 $Q_{j,t,s}^m$ 分别为在第 m 个典型日第 s 个场景下 t 时段节点 j 处电压值的平方、注入的有功功率和无功功率; $L_{ij,t,s}^m$ 、 $P_{ij,t,s}^m$ 和 $Q_{ij,t,s}^m$ 分别为在第 m 个典型日第 s 个场景下 t 时段支路 ij 的电流的平方、有功功率和无功功率; $P_{jk,t,s}^m$ 和 $Q_{jk,t,s}^m$ 分别为在第 m 个典型日第 s 个场景下 t 时段支路 jk 的有功功率和无功功率; $P_{L,j,t,s}^m$ 和 $Q_{L,j,t,s}^m$ 分别为在第 m 个典型日第 s 个场景下 t 时段节点 j 处负荷消耗的有功功率和无功功率; x_{ij} 为支路 ij 的电抗; α 为允许最大弃光比例; ρ_j 为在节点 j 是否安装 ESS 的 0-1 整数变量。

此外, 还应满足节点电压和支路电流约束, 具体表示如下。

$$V_{\min} \leq V_{i,t,s}^m \leq V_{\max} \quad (33)$$

$$L_{ij,t,s}^m \leq L_{ij,\max} \quad (34)$$

式中, $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 分别为系统节点电压平方的上下限; $L_{ij,\max}$ 为支路允许流过的最大电流的平方。

式(31)含变量乘积表达式, 可进一步松弛得到二阶锥模型, 可以等效为如下表达式。

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t,s}^m \\ 2Q_{ij,t,s}^m \\ L_{ij,t,s}^m - V_{i,t,s}^m \end{matrix} \right\|_2 \leq L_{ij,t,s}^m + V_{i,t,s}^m \quad (35)$$

3) 典型日光伏和负荷功率的不确定集

在 ESS 运行过程中, 本文采用基于 2-范数距离的多个不确定性集描述光伏和负荷功率的不确定性场景概率。2-范数距离是一种直观的度量方式, 计算复杂度较低, 在处理低维数据或具有少量特征的数据时更加高效。因此, 为进一步提高其刻画的准确性和全面性, 根据实际情况, 将全年分为春夏秋

冬四季, 每个季节分为晴天和阴雨天, 共 8 个典型日, 即将描述光伏和负荷功率的不确定集划分为 8 个不确定集。在每个不确定集中, 分别采用 2-范数距离刻画该典型日下实际场景概率分布与经验场景概率分布之间的距离, 可以具体表示为:

$$P_s^m = \left\{ P_s^m \left| \sum_{s=1}^{N_s} P_s^m = 1, \sum_{s=1}^{N_s} (P_s^m - 1/N_s)^2 \leq r^2, P_s^m \geq 0, s \in S \right. \right\} \quad (36)$$

式中: P_s^m 为第 m 个典型日第 s 个场景发生的概率, 每个典型日所有场景发生的概率之和应等于 1; r 为控制每个典型日实际场景发生概率分布与其经验概率分布之间距离的参数; S 为所有场景的集合; P_s^m 第 m 个典型日第 s 个场景发生的概率的集合。

2 储能系统最优配置模型的求解

为讨论方便, 重写 ESS 最优配置模型为如下紧凑形式。

$$\min_x \left\{ c^T x + \sum_{m=1}^{N_m} \max_{p \in P_s^m} \min_{y \in \Omega(x)} \sum_{s=1}^{N_s} p_s^m d^T y^m(\xi_s) \right\} \quad (37)$$

$$\text{s.t. } Ax \leq b \leftarrow (11)-(16)、(18) \quad (38)$$

$$\|Bx\|_2 \leq h^T x \leftarrow (17) \quad (39)$$

$$\Omega(x) = \begin{cases} Dy^m(\xi_s) \leq f \leftarrow (24)、(32)、(33)、(34) \\ Fy^m(\xi_s) \leq Gx \leftarrow (19)-(20) \\ Ky^m(\xi_s) = e^m \leftarrow (23)、(25)、(26)-(30) \\ \|Qy^m(\xi_s)\|_2 \leq a^T y^m(\xi_s) \leftarrow (35) \end{cases} \quad (40)$$

式中: x 为第一阶段决策变量, 包括 $P_{ES,i}$ 、 $Q_{ES,i}$ 、 $S_{ES,i}$ 、 $E_{ES,i}$ 和 ρ_i ; p 为每个典型日待求的实际场景发生概率; y 为第二阶段决策变量, 包括 $P_{ij,t,s}^m$ 、 $Q_{ij,t,s}^m$ 、 $L_{ij,t,s}^m$ 、 $V_{i,t,s}^m$ 、 $P_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m}$ 、 $P_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m}$ 、 $Q_{ES,i,t,s}^{\text{ch},m}$ 、 $Q_{ES,i,t,s}^{\text{dis},m}$ 和 $E_{ES,i,t,s}^m$; $\xi_s (s = 1, 2, \dots, N_s)$ 为不确定变量, 包括光伏发电和负荷功率; A 、 B 、 D 、 F 、 G 、 K 、 Q 、 a 、 b 、 c 、 d 、 e^m 、 f 、 h 分别为相应的系数矩阵; $\Omega(x)$ 为相应的关于 x 的函数。

针对上述两阶段分布鲁棒优化模型, 本文采用 C&CG 算法进行求解。将原问题分解为主问题 (master problem, MP) 和子问题 (sub-problem, SP) 进行交替迭代求解, 在求解主问题的过程中不断引入与子问题有关的变量和约束, 可以获得更加紧缩的原目标函数值下界, 从而有效减少迭代次数得到原问题的最优解。

主问题可表示为:

$$(MP): \min_x \mathbf{c}^T \mathbf{x} + \eta \quad (41)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (42)$$

$$\|\mathbf{B}\mathbf{x}\|_2 \leq \mathbf{h}^T \mathbf{x} \quad (43)$$

$$\Omega(\mathbf{x}) = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{D}\mathbf{y}_l^m(\xi_s) \leq \mathbf{f} \\ \mathbf{F}\mathbf{y}_l^m(\xi_s) \leq \mathbf{G}\mathbf{x} \\ \mathbf{K}\mathbf{y}_l^m(\xi_s) = \mathbf{e}^m \\ \|\mathbf{Q}\mathbf{y}_l^m(\xi_s)\|_2 \leq \mathbf{a}^T \mathbf{y}_l^m(\xi_s) \end{array} \right\}, l = 1, 2, \dots, k \quad (44)$$

$$\eta \geq \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{s=1}^{N_s} p_s^{m,l^*} \mathbf{d}^T \mathbf{y}_l^m(\xi_s), l = 1, 2, \dots, k \quad (45)$$

式中: k 为当前迭代次数; l 为迭代次数的索引; η 为引入的中间变量; *表示由子问题求得的最优解。

第 m 个子问题可以表示为:

$$(SP^m): \Lambda(\mathbf{x}) = \max_{\mathbf{p} \in P_s^m} \min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x})} \sum_{s=1}^{N_s} p_s^m \mathbf{d}^T \mathbf{y}^m(\xi_s) \quad (46)$$

式中 $\Lambda(\mathbf{x})$ 为相应的关于 $\mathbf{x}$ 的函数。

在子问题(46)中, 外层 $\max$ 问题和内层 $\min$ 问题的可行域是相互独立的, 因此, 对于第 m 个子问题可以进一步分解为一个上层子问题(upper-level sub-problem, USP)和 s 个下层子问题(lower-level sub-problems, LSP_s), 即:

$$\text{USP}^m: \max_{\mathbf{p} \in P_s^m} \sum_{s=1}^{N_s} p_s^m \gamma_s^m = -\min_{\mathbf{p} \in P_s^m} \sum_{s=1}^{N_s} -p_s^m \gamma_s^m \quad (47)$$

$$\text{LSP}_s^m: \gamma_s^m = \left\{ \min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x})} \mathbf{d}^T \mathbf{y}^m(\xi_s): \Omega(\mathbf{x}_k) \right\} \quad (48)$$

式中: γ_s^m 为第 s 个下层子问题的求解结果; $\Omega(\mathbf{x}_k)$ 为相应的关于 $\mathbf{x}_k$ 的函数。

分解后的主问题是混合整数二阶锥规划问题, 上层子问题是二阶锥问题, 下层子问题是二阶锥问题, 可在 MATLAB R2021a 环境中调用 Gurobi 求解器进行求解, 求解流程如图 3 所示。

一种快速方法可以用来求解基于 2-范数距离不确定性集的 max-min 模型, 其中分解后的 $\max$ 问题可以进行快速求解, 不再需要使用商用求解器^[26]。根据这种快速求解方法第 m 个上层子问题的具体求解步骤如图 4 所示。其中, $\bar{\gamma}^m$ 是第 m 个不确定集对应的 s 个下层子问题计算结果的平均值; $D(\gamma^m)$ 是 s 个下层子问题计算结果的方差; $[\cdot]$ 表示取整数。可在 C&CG 算法中嵌套这个加速求解方法, 因此上层子问题不再采用商用求解

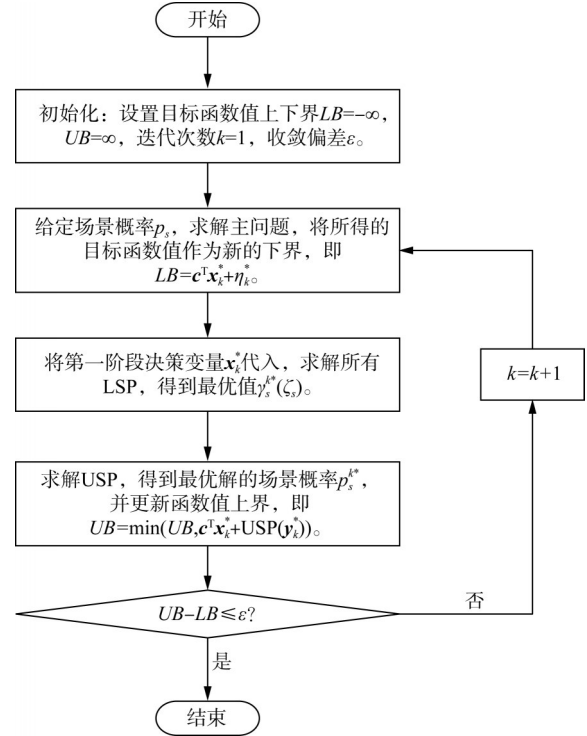


图 3 C&CG 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of C&CG algorithm

器进行耗时的优化过程, 而通过图 4 所示过程进行求解。

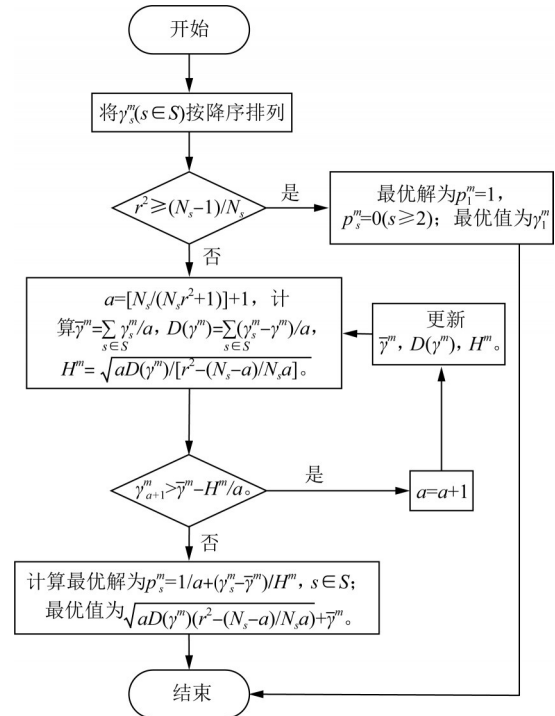


图 4 USP^m 加速方法求解流程图

Fig. 4 Flow chart of accelerated solution method for USP^m

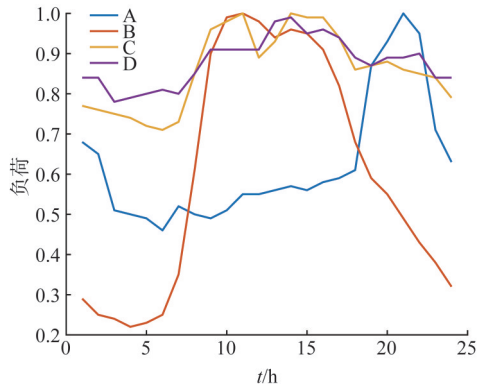


图6 4种典型的日负荷曲线类型

Fig. 6 Four types of typical daily load curves

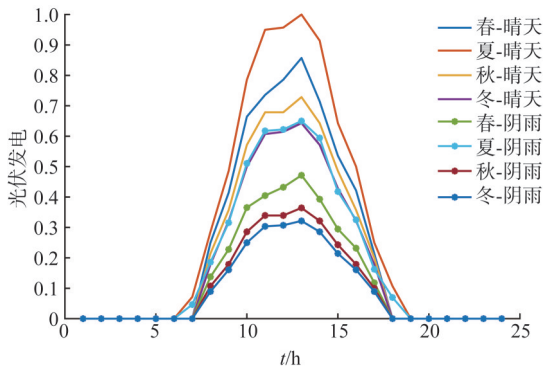


图7 8种典型的光伏发电日出力曲线

Fig. 7 Eight types of typical daily output curve of photovoltaics generations

表1 电能成本系数

Tab. 1 Electricity cost coefficient

参数	数值
基准贴现率 $i_0/\%$	4.5
储能容量成本/(万元·MW ⁻¹)	65
储能视在功率成本/(万元·MVA ⁻¹)	130
弃光惩罚系数 λ /(元·kWh ⁻¹)	0.61
网损电价 μ_g /(元·kWh ⁻¹)	0.6
有功功率充电费用 μ_{PES}^{ch} /(元·kWh ⁻¹)	0.05
有功功率放电费用 μ_{PES}^{dis} /(元·kWh ⁻¹)	0.05
无功功率吸收费用 μ_{QES}^{ch} /(元·kvarh ⁻¹)	0.01
无功功率释放费用 μ_{QES}^{dis} /(元·kvarh ⁻¹)	0.01

虑1-范数和 ∞ -范数置信约束更具稳定性,能够有效地衡量向量的整体大小,提高结果的合理性和准确性。

3.4 储能配置方案的有效性分析

设置允许最大弃光比例为20%得到的计算结果如表4所示。图8为求解得到的ESS的SOC情况,

表2 商用求解器和加速方法求解USP的结果对比

Tab. 2 Comparison of results between commercial solver and the accelerated method for solving USP

参数	商用求解器		加速方法	
不确定度	$r=0.05$	$r=0.1$	$r=0.05$	$r=0.1$
所有USP计算时间/s	9.773 511	13.829 33	0.022 499	0.029 628
场景1概率	0.110 628	0.121 274	0.110 633	0.121 267
场景2概率	0.080 256	0.060 490	0.080 251	0.060 503
场景3概率	0.111 726	0.123 467	0.111 730	0.123 460
场景4概率	0.114 069	0.128 143	0.114 069	0.123 460
场景5概率	0.128 078	0.156 097	0.128 053	0.156 107
场景6概率	0.094 711	0.089 445	0.094 723	0.089 447
场景7概率	0.072 516	0.089 445	0.072 491	0.089 447
场景8概率	0.097 276	0.094 510	0.097 288	0.094 576
场景9概率	0.099 824	0.099 676	0.099 836	0.099 673
场景10概率	0.090 910	0.081 833	0.090 920	0.081 840

表3 求解结果对比

Tab. 3 Comparison of solution results

对比参数	本文提出方法	鲁棒优化方法	1-范数和 ∞ -范数分布鲁棒方法
不确定度设置	$r=0.05$	$\Gamma=1$	$\alpha_1=0.5, \alpha_x=0.5$
计算时间/s	539.93	2 540.35	593.41
迭代次数	2	2	2
收敛误差	$<10^{-5}$	$<10^{-3}$	$<10^{-4}$
ESS安装地点	节点4	节点4	节点4
ESS电量容量/MWh	2.398 2	3.745 7	2.395 0
ESS额定视在功率/MVA	1.199 1	1.872 8	1.197 5
投资费用年值/万元	40.959 2	63.973 4	40.904 3
运行费用年值/万元	18.106 9	18.655 6	18.258 7

图9—10分别为ESS的无功功率吸收和释放策略,图11—12分别为节点3—4的弃光情况。将得到的

表4 允许最大弃光比例为20%时的求解结果

Tab. 4 Results obtained under maximum allowable PV curtailment ratio of 20 %

对比参数	允许最大20%弃光
不确定度设置	$r=0.05$
计算时间/s	734.41
迭代次数	2
收敛误差	$<10^{-3}$
ESS安装地点	节点4
ESS电量容量/MWh	0.401 7
ESS额定视在功率/MVA	0.200 8
投资费用年值/万元	6.860 4
运行费用年值/万元	30.107 7

配置结果和运行策略应用前后配电网的电压变化情况如图13—14所示。

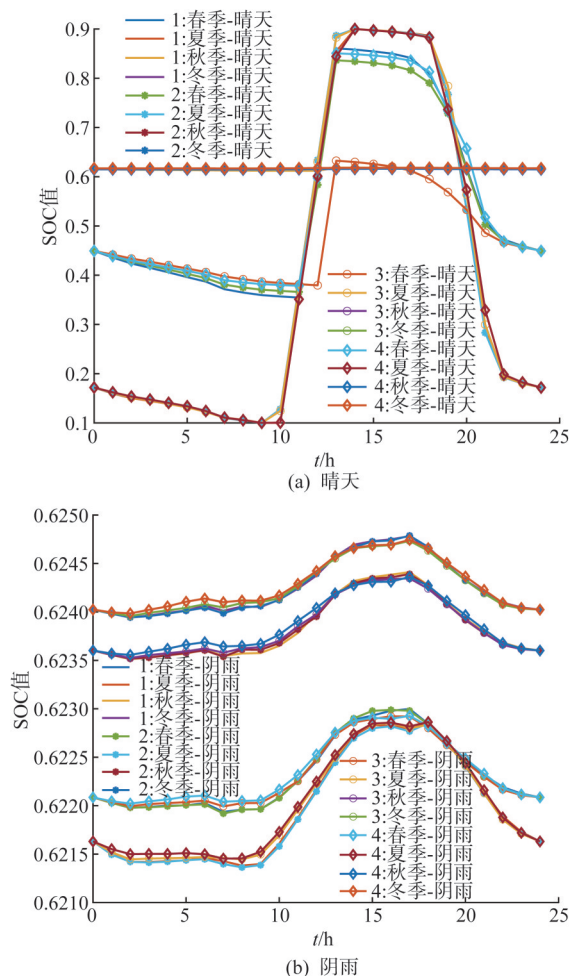


图8 节点4安装ESS的SOC变化

Fig. 8 SOC variation of energy storage system installed at bus 4

算法求解得到的ESS安装地点为节点4,在春季和夏季晴天的中午10—14时充电,晚上18—21时放电,而在其他典型日变化很小。ESS在夏季晴天午间电压较高的时段吸收无功功率辅助电压调节,如图9所示。由于系统中不存在低电压情况,因此ESS无功功率释放量很小,可以忽略不计,如图10所示。在实际中ESS往往安装在电压问题最严重的地方,在午间光伏发电出力大容易产生电压越限的时段ESS充电,在晚上负荷重的时段ESS放电,解决电压越限和光伏发电就地消纳的问题,求解结果与实际情况相符。如图11—12所示,弃光集中于光伏发电出力最大的时刻,如夏季晴天的午间和春季晴天正午时刻,对比表3和表4可以看出,

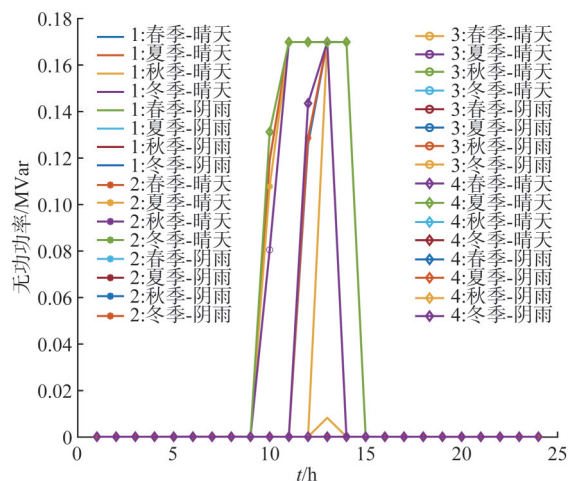


图9 节点4安装ESS的无功功率吸收情况

Fig. 9 Reactive power absorption of energy storage system installed at bus 4

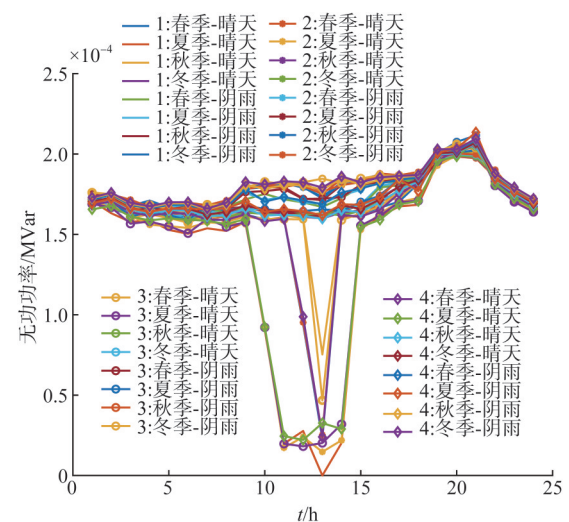


图10 节点4安装ESS的无功功率释放情况

Fig. 10 Reactive power release of energy storage system installed at bus 4

由于弃光成本相较于ESS设备成本低,优化结果更倾向于弃光,导致投资费用相较于不弃光降低,但运行费用会增加。

安装ESS前,节点2、3和4在春、夏季晴天的午间存在电压越限的情况,如图13所示。安装ESS后,所有典型日都没有电压越限情况,配电网可以维持安全运行,春季-晴天和夏季-晴天的节点2、3和4电压情况分别如图14所示。

4 结论

本文提出了一种基于2-范数距离多不确定集的

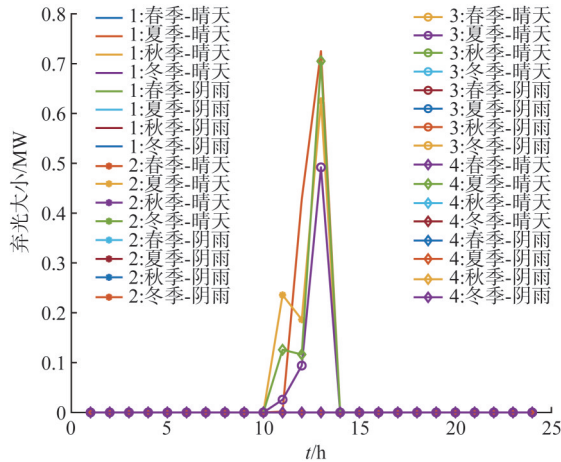


图 11 节点 3 弃光情况

Fig. 11 PV curtailment at bus 3

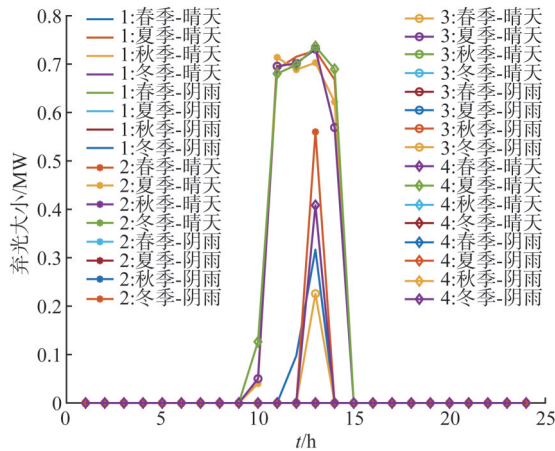


图 12 节点 4 弃光情况

Fig. 12 PV curtailment at bus 4

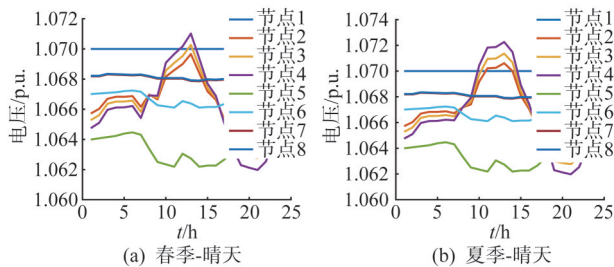


图 13 安装ESS前系统节点电压变化情况

Fig. 13 Changes of bus voltages before installing energy storage systems

配电网四象限 ESS 配置的两阶段分布鲁棒优化方法, 其优势表现在以下几个方面。

1) 根据光伏发电的实际出力特性将全年划分为八个典型日, 在每个典型日同时考虑光伏发电和负荷功率的不确定性, 构造了 8 个基于 2-范数距离的不确定集, 可以更充分描述光伏发电不确定性。

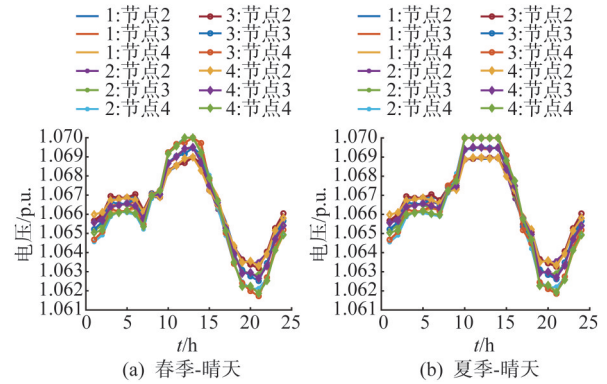


图 14 安装ESS后系统节点电压变化情况

Fig. 14 Changes of bus voltages after installing energy storage systems

2) 采用 2-范数距离构建的不确定集的分布鲁棒方法在兼顾鲁棒性和经济性的同时避免了两阶段模型的非凸问题, 提高了求解速度。

3) 采用 C&CG 算法和 max-min 子问题分解算法确定 ESS 安装地点、电池容量和额定视在功率, 在兼顾 ESS 选址与定位的同时降低求解时间。在某实际 10 kV 配电网的仿真计算验证了本文所提方法的可行性和有效性, 在避免频繁充放电的同时可以有效解决光伏接入导致的电压越限问题, 并提高光伏消纳能力。

参考文献

- [1] 赵鹏程. 含分布式光伏配电网的分层分级控制策略研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [2] 梅笑妍, 陶苏朦, 张瀛文, 等. 基于四象限储能功率线性化模型的配电网协同优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(6): 112 - 120.
MEI Xiaoyan, TAO Sumeng, ZHANG Yingwen, et al. Coordinated optimization of distribution network based on linear model of four-quadrant energy storage power [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 112 - 120.
- [3] 张伟骏, 李智诚, 陈大玮, 等. 配网侧分布式储能系统的随机优化配置和选址方法[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 125 - 135.
ZHANG Weijun, LI Zhicheng, CHEN Dawei, et al. Stochastic optimal configuration and site selection method of grid-side distributed energy storage system [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 125 - 135.
- [4] 顾怡, 邢洁, 马洪艳, 等. 计及配网电压越限的光储协同优化运行策略[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 893 - 902.
GU Yi, XING Jie, MA Hongyan, et al. Optimal operation strategy of distributed photovoltaic and energy storage systems by considering voltage violations in the distribution network [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(3): 893 - 902.
- [5] 葛津铭, 刘英儒, 庞丹, 等. 含高渗透率光伏配电网的集群划分电压控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 74 - 82.

- GE Jinming, LIU Yingru, PANG Dan, et al. Cluster division voltage control strategy of photovoltaic distribution network with high permeability [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 74–82.
- [6] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 配电网分布式储能集群调控策略[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.
- [7] 韩璟琳, 胡平, 侯若松, 等. 计及多光储一体机的配电网电压优化控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 69–77, 152.
- HAN Jinglin, HU Ping, HOU Ruosong, et al. Voltage optimal control strategy for distribution networks with multiple integrated photovoltaic and energy storage machines [J]. Electric Power, 2024, 57(6): 69–77, 152.
- [8] LI J, ZHANG L, ZHANG B, et al. Coordinated planning for flexible interconnection and energy storage system in low-voltage distribution networks to improve the accommodation capacity of photovoltaic [J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(6): 700–713.
- [9] LI C, ZHANG H, ZHOU H, et al. Double-layer optimized configuration of distributed energy storage and transformer capacity in distribution network [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023(147): 108834.
- [10] 张博, 唐巍, 蔡永翔, 等. 面向高比例户用光伏消纳的储能系统与通信网络协同规划[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3161–3169.
- ZHANG Bo, TANG Wei, CAI Yongxiang, et al. Collaborative configuration of energy storage systems and communication networks for accommodation of high-penetration residential PVs [J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3161–3169.
- [11] 于丹文, 杨明, 翟鹤峰, 等. 鲁棒优化在电力系统调度决策中的应用研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 134–143, 148.
- YU Danwen, YANG Ming, ZHAI Hefeng, et al. An overview of robust optimization used for power system dispatch and decision-making [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 134–143, 148.
- [12] ZHAO B, REN J, CHEN J, et al. Tri-level robust planning-operation co-optimization of distributed energy storage in distribution networks with high PV penetration [J]. Apply Energy, 2020(279): 115768.
- [13] 任郡枝. 光伏配电网中储能系统规划方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [14] 王梦宇. 整县光伏短期功率预测与储能配置研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [15] BOROUMANDFAR G, KHAJEHZADEH A, ESLAMI M, et al. Information gap decision theory with risk aversion strategy for robust planning of hybrid photovoltaic/wind/battery storage system in distribution networks considering uncertainty [J]. Energy, 2023, 278(A): 127778.
- [16] 都骋. 含储能的分布式电源优化配置与调度研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [17] 刘志伟, 马悦, 沙志成, 等. 考虑新能源多重相关性的柔性配电网分布鲁棒优化策略[J]. 中国电力, 2024, 57(12): 97–108.
- LIU Zhiwei, MA Yue, SHA Zhicheng, et al. Distributionally robust operation for flexible distribution networks considering multi-correlation of renewable power generation [J]. Electric Power, 2024, 57(12): 97–108.
- [18] 马丽, 李伟, 裴玮, 等. 含高比例光伏配电网中计及需求侧响应的混合储能配置优化[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1416–1425.
- MA Li, LI Wei, PEI Wei, et al. Hybrid energy storage configuration optimization in distribution network with high-proportion PV considering demand response [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1416–1425.
- [19] 贺帅佳, 阮贺彬, 高红均, 等. 分布鲁棒优化方法在电力系统理论分析与应用综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 179–191.
- HE Shuaijia, RUAN Hebin, GAO Hongjun, et al. Overview on theory analysis and application of distributionally robust optimization method in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 179–191.
- [20] RAYATI M, BOZORG M, CHERKAoui R, et al. Distributionally robust chance constrained optimization for providing flexibility in an active distribution network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2920–2934.
- [21] ZHAO W, CAO Z, WAN C, et al. Two-stage distributionally robust voltage regulation of active distribution network with hybrid energy storage [C]//2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS), December 04–06, 2020, Jinan, China. New York: IEEE, 2020: 71–76.
- [22] CAO K, LIU Y, WANG C. A Distributionally robust optimal allocation method of energy storage for resilience enhancement of distribution network [C]//2023 IEEE International Conference on Energy Technologies for Future Grids (ETFG), December 03–06, 2023, Wollongong, Australia. New York: IEEE, 2023: 1–6.
- [23] 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.
- [24] 王育飞, 陈强, 郑云平, 等. 基于动态无功电压灵敏度的有源配电网移动式储能优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 29–35, 59.
- WANG Yufei, CHEN Qiang, ZHENG Yunping, et al. Optimal scheduling of mobile energy storage in active distribution network based on dynamic reactive power and voltage sensitivity [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 29–35, 59.
- [25] 戴月. 多独立主体参与的主动配电网分散式最优潮流方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [26] ZHANG X, DING T, QU M. An Algorithmic approach for inner max-min model under norm-2 type uncertainty set in data-driven distributionally robust optimization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1755–1758.
- [27] LIU M, CANIZARES C A, HUANG W. Reactive power and voltage control in distribution systems with limited switching operations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 889–899.
- [28] 刘澧庆. 微电网频率/电压控制及储能优化配置研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [29] 孙旭, 邱晓燕, 张志荣, 等. 基于数据驱动的交流配电网分

- 布鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4768 – 4778.
- SUN Xu, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, et al. Distributed robust optimal dispatching of AC/DC distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4768 – 4778.
- [30] 秦龙庆, 郑景文, 廖小兵, 等. 基于概率场景驱动的柔性配电网分布式无功优化[J]. 高电压技术, 2025, 51(1): 200 – 209.
- QIN Longqing, ZHENG Jingwen, LIAO Xiaobing, et al. Distributed reactive power optimization of flexible distribution network based on probability scenario-driven[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 200 – 209.
- [31] 翟苏巍, 李银银, 杜凡, 等. 考虑海量分布式能源接入的配电网分布式无功控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(8): 138 – 144.
- ZHAI Suwei, LI Yinyin, DU Fan, et al. Distributed reactive power control strategy of distribution network considering massive distributed energy access[J]. Electric Power, 2024, 57(8): 138 – 144.
- [32] 张静忠, 蒙飞, 孙阳, 等. 考虑有功不确定性的配电网新能源无功优化控制[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 51 – 59.
- ZHANG Jingzhong, MENG Fei, SUN Yang, et al. Reactive power optimization control for renewable energy in distribution networks considering active power uncertainties [J]. Electric Power, 2024, 57(3): 51 – 59.

收稿日期: 2024-06-13; 网络首发日期: 2024-10-26

作者简介:

呼时召(1984), 男, 工程师, 硕士, 从事广东电网调度运行工作;

吉时好(2001), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统调度与控制, jishiyu16@163.com;

江健健(1976), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为新能源及储能规划。

(上接第 114 页 Continued from Page 114)

- SU Zhipeng, WANG Li, LIANG Xinyi, et al. Optimal dispatch of virtual power plant considering stepped carbon trading and comprehensive demand response [J]. Electric Power, 2023, 56(12): 174 – 182.
- [30] 李东东, 王啸林, 沈运帷, 等. 考虑多重不确定性的含需求响应及电碳交易的虚拟电厂优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 210 – 217, 251.
- LI Dongdong, WANG Xiaolin, SHEN Yunwei, et al. Optimal scheduling strategy of virtual power plant with demand response and electricity-carbon trading considering multiple uncertainties [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 210 – 217, 251.
- [31] 李明冰, 李强, 管西洋, 等. 市场环境下考虑多元用户侧资源协同的虚拟电厂低碳优化调度[J]. 中国电力, 2025, 58(2): 66 – 76.
- LI Mingbing, LI Qiang, GUAN Xiyang, et al. Market oriented low-carbon optimal scheduling of virtual power plants considering multiple user-side resources coordination [J]. Electric Power, 2025, 58(2): 66 – 76.
- [32] 蹇林旋. 倾听电动汽车背后的民众心声[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

收稿日期: 2024-05-11; 网络首发日期: 2025-03-23

作者简介:

陈文颖(1980), 女, 副教授, 博士, 研究方向为网络控制系统、优化理论与最优控制, 51651854@ncepu.edu.cn;

郑修诺(2000), 女, 硕士, 研究方向为综合能源系统优化调度、电动汽车与电网互动, 969742392@qq.com;

王咏梅(1979), 女, 通信作者, 工程师, 硕士, 研究方向为嵌入式控制与自动控制实践, zxn18250936938@163.com。