

考虑主动管理与需求侧管理的主动配电网分布式光伏最大准入容量计算方法

蔡秀雯¹ 陈茂新¹ 陈钢¹ 方一晨² 张沈习² 程浩忠²

(1. 国网福建省电力有限公司泉州供电公司 福建省泉州市 362000;
2. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学电气工程系),上海市 200240)

摘要:为了在确保配电网安全、稳定运行的同时,促进配电网分布式光伏消纳,文章提出了一种主动配电网分布式光伏最大准入容量计算方法。以最大化分布式光伏准入容量为目标,计及系统潮流方程、节点电压、支路电流等多个电气约束,采用有载调压、无功补偿、储能充放电、网络重构、负荷削减等主动管理措施和需求侧管理措施,提升了“源荷”不确定性最不利条件下分布式光伏最大准入容量,建立了二阶段鲁棒优化模型。将原模型分解为主问题与子问题后,转化为混合整数二阶锥形式,使用列与约束生成算法求解。在改进的 IEEE 33 节点算例上对模型与算法的有效性进行检验,得到了主动配电网分布式光伏最大准入容量,并验证了主动管理与需求侧管理对其的提升作用。

关键词:主动管理;需求侧管理;分布式光伏;最大准入容量;鲁棒优化

Calculation Method for Maximum Allowable Access Capacity of Distributed PV in Active Distribution Network Considering Active Management and Demand-Side Management

CAI Xiuwen¹, CHEN Maoxin¹, CHEN Gang¹, FANG Yichen²,
ZHANG Shenxi², CHENG Haozhong²

(1. Quanzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Quanzhou 362000, Fujian Province, China;
2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: This paper proposes a method to calculate the maximum allowable access capacity of distributed photovoltaic (PV) generation in an active distribution network (ADN), in order to facilitate the usage of the distributed PV on the premise of system security and stability. The objective is to maximize the allowable access capacity of distributed PV. Several electrical constraints, including power flow equations, bus voltage limits, branch current limits, etc., are taken into account. Furthermore, active management (AM) and demand-side management (DSM) techniques including on-load voltage regulation, reactive power compensation, control of the battery energy storage system, network reconfiguration and load curtailment are applied to increase the access capacity under the worse uncertainty condition. A two-stage robust optimization model is established. The model can be decomposed into a master problem and a subproblem in the form of mixed integer second order cones, and solved by column-and-constraint generation algorithm. A case study is implemented on the modified IEEE 33-node system to verify the validation of the proposed model and algorithm. The maximum allowable access capacity of distributed PV can be obtained. The enhancement of the result is achieved through AM and DSM techniques.

This work is supported by Science and Technology Research Foundation of State Grid Fujian Electric Power CO., LTD. (No. 5213302000GD) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51907123).

KEYWORDS: active management; demand-side management; distributed photovoltaic generation; maximum allowable access capacity; robust optimization

中图分类号: TM 73 文献标志码: A 文章编号: 1000-7229(2021)05-0038-10
DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2021.05.005

基金项目:国网福建省电力有限公司科技项目“面向智慧城镇配电网的高比例分布式光伏消纳技术研究”(5213302000GD);国家自然科学基金青年基金(51907123)

0 引言

近年来,光伏发电技术在政策鼓励下高速发展,分布式光伏在配电网中渗透率不断提高。然而,分布式光伏出力可能引起配电网潮流变化,影响电能质量^[1]。因此,有必要考虑各电气指标约束,展开配电网分布式光伏最大准入容量的研究。

目前,国内外已有若干研究提出配电网分布式电源最大准入容量计算方法。文献[2]建立了以分布式电源并网容量最大为目标,考虑电压水平、旋转备用、线路功率、投资运行总费用等约束的分布式电源规划模型,采用随机权重粒子群算法进行求解;文献[3]计及电压偏差、电压波动、短路电流、继电保护约束,采用基于灵敏度的协调分段计算方法求解分布式电源最大并网容量;文献[4]建立了交直流混合配电网分布式电源最大准入容量计算模型,将其转化为混合整数二阶锥模型,直接调用求解器高效、准确求解,克服了启发式算法易陷入局部最优的缺陷。

实际上,分布式光伏功率与负荷功率具有不确定性,在分布式光伏最大准入容量计算中应予以考虑。文献[5]和[6]建立了基于机会约束的配电网分布式光伏最大准入容量计算模型;文献[7]采用蒙特卡洛抽样生成多场景,选取各场景下分布式光伏准入容量最小值作为最终结果;文献[8]使用盒式鲁棒区间表征“源荷”不确定性,使用鲁棒辅助变量替代不等式约束中的“源荷”功率变量,将模型转化为对偶形式后求解。

为应对大规模分布式光伏接入对配电网造成的不利影响,同时提升配电网对分布式光伏的消纳能力,传统配电网逐渐被主动配电网(active distribution network, ADN)替代。ADN可以对各种分布式资源进行综合控制^[9],电网侧应实现主动规划、管理、控制与服务,用户侧应积极参与需求侧响应,分布式电源侧应采用功率控制与调节技术,主动参与ADN的运行调度^[10]。文献[8]将有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)与静止无功补偿器(static var compensator, SVC)应用于ADN中,建立了分布式光伏最大准入容量计算模型;文献[11]在使用OLTC与SVC的基础上,考虑了网络重构、分布式光伏功率调节、投切电容器组进行无功补偿等主动管理(active management, AM)措施,提高分布式光伏最大准入容量;文献[12]使用储能与智能逆变器增大分布式光伏准入容量;文献[13]验证了智能软开关对潮流的改善作用,可促进配电网分布式光伏消纳。

现有研究存在以下不足:1)多数研究并未计及

“源荷”不确定性模型的鲁棒性有待提高;2)多从电网侧角度提升配电网分布式光伏最大准入容量,但并未考虑用户需求侧管理(demand side management, DSM)的作用。本文将在储能投资限制下,优化ADN中储能配置,并考虑分布式光伏出力与负荷功率的不确定性,应用有载调压、无功补偿、储能调节、网络重构与负荷削减等AM与DSM措施,建立“源荷”不确定性场景下ADN分布式光伏最大准入容量计算模型,通过凸松弛技术将其转化为混合整数二阶锥形式,并使用列与约束生成算法进行求解。

1 “源荷”典型时序场景构建

分布式光伏出力与负荷功率具有季节周期性与日周期性的特点。为计算ADN中分布式光伏最大准入容量,需要构建“源荷”典型时序场景集,确保容量不高于计算结果的分布式光伏接入在各场景下均不会导致ADN电气指标越限。

聚类算法在场景生成方面得到广泛应用^[14]。本文采用k-means聚类^[15]生成“源荷”典型时序场景。k-means算法聚类结果会在较大程度上受到聚类数的影响。为避免聚类结果陷入局部最优,同时确保生成的场景具有典型性,使用CH(+)指标评价不同聚类数下的k-means聚类结果,选取CH(+)指标值最高时的聚类数K作为最佳聚类数^[16]。

CH(+)指标计算公式为:

$$\text{CH}(+) = \frac{(R - K) T_K}{(K - 1) P_K} = \frac{(R - K) \sum_{i=1}^K R_i d(\bar{c}_i, \bar{c})}{(K - 1) \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^R d(x_j, c_i)} \quad (1)$$

式中:R为样本总数,K为聚类数,是位于区间 $[2, \sqrt{R}]$ 内的整数; R_i 为簇*i*中的样本数; $d(\cdot, \cdot)$ 表示欧氏距离; c_i 为簇*i*的质心; \bar{c} 为整个数据集的均值向量; x_j 为样本*j*的向量; T_K 和 P_K 分别用于表征类间分离度和类内紧凑度。

确定最佳聚类数K后,首先生成K个初始质心,将样本点划分到与质心距离最小的类中,形成K个簇,并计算、更新各个簇的质心,直至质心位置的变化量小于某一阈值,由此可构建“源荷”典型时序场景。考虑到“源荷”功率具有不确定性,以典型场景中各时刻“源荷”功率为基准,按一定偏移度设定区间,表征其功率可能的范围。

2 主动管理与需求侧管理建模

在ADN中拟采用AM与DSM措施,提升分布

式光伏最大准入容量。使用的 AM 措施包括有载调压、无功补偿、储能调节与网络重构,DSM 措施为负荷削减。本节对上述 AM 与 DSM 措施进行建模。

2.1 有载调压

OLTC 通常接在上级电网(节点 0)与配电网首节点(节点 1)之间,用于调控节点电压分布。支路 0-1 与 OLTC 的阻抗之和为 $r_{01} + jx_{01}$ 。在节点 0 和节点 1 之间设置虚拟节点 m,令支路 0-m 阻抗为 $r_{01} + jx_{01}$,支路 m-1 接有零阻抗 OLTC,则场景 s 时刻 t 下的 OLTC 数学模型如式(2)—(3)所示。

$$V_{1,s,t} = (1 + N_{s,t}^0 \Delta k^0) V_{m,s,t} \quad (2)$$

$$-\bar{N}^0 \leq N_{s,t}^0 \leq \bar{N}^0, \quad N_{s,t}^0 \in \mathbb{Z} \quad (3)$$

式中: $V_{1,s,t}$ 为节点 1 电压; $V_{m,s,t}$ 为虚拟节点 m 电压; 整数 $N_{s,t}^0$ 为 OLTC 分接头挡位位置; \bar{N}^0 为正、负向挡位调节上限; Δk^0 为 OLTC 分接头每调节一个挡位时变比的变化量。

2.2 无功补偿

投切电容器组可用于无功补偿,其数学模型为:

$$Q_{i,s,t}^{\text{CB}} = N_{i,s,t}^{\text{CB}} q_i^{\text{CB}} \quad (4)$$

$$0 \leq N_{i,s,t}^{\text{CB}} \leq \bar{N}_i^{\text{CB}}, \quad N_{i,s,t}^{\text{CB}} \in \mathbb{Z} \quad (5)$$

式中: $Q_{i,s,t}^{\text{CB}}$ 为场景 s 时刻 t 下接在节点 i 上的投切电容器组发出的无功功率; 整数 $N_{i,s,t}^{\text{CB}}$ 为投入的电容器个数,其上、下限分别为 \bar{N}_i^{CB} 和 0; q_i^{CB} 为单个电容器可补偿的无功功率。

2.3 储能配置与调节

在配电网中安装储能模块,通过对储能充放电状态与功率的调控,实现灵活性资源配置,增大 ADN 对分布式光伏的接纳能力。现考虑投资成本限制,对储能进行配置。储能投资约束为^[17]:

$$\sum_{i \in B} \left[\frac{d_i (1 + d_i)^{y_i^{\text{BES}}} - 1}{c_i^e n_i^{\text{BES}} E_i^{\text{BES}}} \right] \leq \bar{C}_{\text{inv}}^{\text{BES}} \quad (6)$$

式中: B 为安装储能的节点集合; 对于安装于节点 i 上的储能, d_i 为贴现率; y_i^{BES} 为经济使用年限; c_i^e 为单位容量造价; n_i^{BES} 为安装的储能模块数量; E_i^{BES} 为单个储能模块的额定容量; $\bar{C}_{\text{inv}}^{\text{BES}}$ 为折算到每年的储能投资上限。

场景 s 时刻 t 下节点 i 的储能数学模型为:

$$0 \leq P_{i,s,t}^{\text{dis}} \leq \gamma_{i,s,t} n_i^{\text{BES}} P_i^{\text{BES}} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{i,s,t}^{\text{ch}} \leq (1 - \gamma_{i,s,t}) n_i^{\text{BES}} P_i^{\text{BES}} \quad (8)$$

$$E_{i,s,t+\Delta t}^{\text{BES}} = E_{i,s,t}^{\text{BES}} + \left(\eta_i^{\text{ch}} P_{i,s,t}^{\text{ch}} - \frac{P_{i,s,t}^{\text{dis}}}{\eta_i^{\text{dis}}} \right) \Delta t \quad (9)$$

$$S_i n_i^{\text{BES}} E_i^{\text{BES}} \leq E_{i,s,t}^{\text{BES}} \leq \bar{S}_i n_i^{\text{BES}} E_i^{\text{BES}} \quad (10)$$

$$E_{i,s,0}^{\text{BES}} = E_{i,s,T}^{\text{BES}} \quad (11)$$

式中: $P_{i,s,t}^{\text{ch}}$ 和 $P_{i,s,t}^{\text{dis}}$ 分别为储能充放电功率; $\gamma_{i,s,t}$ 表征储能充放电状态,1 为放电,0 为充电; P_i^{BES} 为单个储能模块的额定功率; $E_{i,s,t}^{\text{BES}}$ 为储能电量; η_i^{ch} 和 η_i^{dis} 分别为储能充放电效率; Δt 为相邻调度时刻之间的时长; S_i 和 \bar{S}_i 分别为储能荷电状态上、下限; $E_{i,s,0}^{\text{BES}}$ 和 $E_{i,s,T}^{\text{BES}}$ 分别为调度初始时刻与末尾时刻的储能电量。

在储能配置与运行优化中,需要确定待选节点上安装的储能模块数量,使之满足投资约束;同时,需要优化各场景下调度周期内储能的模拟运行策略,通过储能调节最大化 ADN 中的分布式光伏准入容量。

2.4 网络重构

ADN 运行过程中,改变联络开关通断状态可调整网络拓扑。ADN 应始终满足辐射状拓扑约束,ADN 网络重构模型如下:

$$\begin{cases} \beta_{ij,s,t} \in \{0,1\}, & \forall i \in N, j \in N(i) \\ \sum_{j \in N(i)} \beta_{ij,s,t} = 1, & \forall i \in N \\ \beta_{lj,s,t} = 0, & \forall j \in N(l) \\ \alpha_{ij,s,t} = \beta_{ij,s,t} + \beta_{ji,s,t}, & \forall ij \in D \\ 0 \leq \alpha_{ij,s,t} \leq 1, & \forall ij \in D \end{cases} \quad (12)$$

式中: N 为 ADN 节点集合; $N(i)$ 为可能与节点 i 相连的节点集合; D 为 ADN 支路集合; 若节点 j 为 i 的父节点,则 $\beta_{ij,s,t}$ 为 1,否则 $\beta_{ij,s,t}$ 为 0; $\alpha_{ij,s,t}$ 用于表征支路 ij 通断状态,0 表示断开,1 表示连通。

2.5 负荷削减

本文考虑的 DSM 措施为负荷削减,负荷由基本负荷与可削减负荷构成^[18]。接于节点 i 的负荷于场景 s 时刻 t 下的模型为:

$$P_{i,s,t}^{\text{L}} = P_{i,s,t}^{\text{bl}} + (P_{i,s,t}^{\text{cl}} - \Delta P_{i,s,t}^{\text{cl}}) \quad (13)$$

$$Q_{i,s,t}^{\text{L}} = Q_{i,s,t}^{\text{bl}} + (Q_{i,s,t}^{\text{cl}} - \Delta Q_{i,s,t}^{\text{cl}}) \quad (14)$$

式中: $P_{i,s,t}^{\text{L}}$ 、 $P_{i,s,t}^{\text{bl}}$ 、 $P_{i,s,t}^{\text{cl}}$ 和 $\Delta P_{i,s,t}^{\text{cl}}$ 分别为总负荷、基本负荷、可削减负荷与已削减负荷的有功功率; $Q_{i,s,t}^{\text{L}}$ 、 $Q_{i,s,t}^{\text{bl}}$ 、 $Q_{i,s,t}^{\text{cl}}$ 和 $\Delta Q_{i,s,t}^{\text{cl}}$ 为相应无功功率。

负荷削减数学模型如式(15)—(16)所示:

$$\Delta P_{i,t}^{\text{cl}} \leq \Delta P_{i,s,t}^{\text{cl}} \leq \bar{\Delta} P_{i,t}^{\text{cl}} \quad (15)$$

$$\Delta Q_{i,t}^{\text{cl}} \leq \Delta Q_{i,s,t}^{\text{cl}} \leq \bar{\Delta} Q_{i,t}^{\text{cl}} \quad (16)$$

式中: $\Delta P_{i,t}^{\text{cl}}$ 和 $\Delta P_{i,s,t}^{\text{cl}}$ 、 $\Delta Q_{i,t}^{\text{cl}}$ 和 $\Delta Q_{i,s,t}^{\text{cl}}$ 分别为可被削减负荷的有功与无功功率上、下限。

3 分布式光伏准入容量优化模型

3.1 目标函数

在最大化 ADN 分布式光伏准入容量时,应考虑

“源荷”不确定性的影响,确保在不确定性最不利条件下ADN仍能安全、稳定运行。各典型场景中,“源荷”不确定性可用式(17)—(18)所示的鲁棒区间表示:

$$P_{i,s,t}^{\text{PV}} = (\underline{\eta}_{i,s,t}^{\text{PV}} + a_{i,s,t}^{\text{PV}} \Delta \eta_{i,s,t}^{\text{PV}}) P_i^{\text{PV}} \quad (17)$$

$$P_{i,s,t}^{\text{bl}} = (\underline{\eta}_{i,s,t}^{\text{bl}} + a_{i,s,t}^{\text{bl}} \Delta \eta_{i,s,t}^{\text{bl}}) P_i^{\text{bl}} \quad (18)$$

式中: $P_{i,s,t}^{\text{PV}}$ 、 $\underline{\eta}_{i,s,t}^{\text{PV}}$ 和 $\Delta \eta_{i,s,t}^{\text{PV}}$ 分别为接在节点 i 上的分布式光伏在场景 s 时刻 t 下的实际有功功率、出力系数下限和出力系数上下限之差; P_i^{PV} 为节点 i 上接入的分布式光伏容量; $P_{i,s,t}^{\text{bl}}$ 、 $\underline{\eta}_{i,s,t}^{\text{bl}}$ 和 $\Delta \eta_{i,s,t}^{\text{bl}}$ 分别为场景 s 时刻 t 下的基本负荷实际有功功率、负荷系数下限和负荷系数上下限之差; P_i^{bl} 为节点 i 上的基荷需求基准值; $a_{i,s,t}^{\text{PV}}, a_{i,s,t}^{\text{bl}} \in [0, 1]$, 为“源荷”不确定性辅助变量。

分别使用 y 和 n 表示待选节点接入的分布式光伏容量和储能模块数,分别使用 $z_{s,t}$ 、 $x_{s,t}$ 和 $a_{s,t}$ 表示场景 s 时刻 t 下的配电网潮流变量、AM 和 DSM 变量向量、“源荷”不确定性辅助变量向量。以最大化分布式光伏准入容量之和为目标,同时考虑“源荷”不确定性最不利条件对其抑制作用与 AM、DSM 技术对其提升作用,优化模型目标函数如式(19)所示:

$$\max_{(n, x_{s,t}) \in F} \left\{ \min_{a_{s,t} \in U} \max_{(y, z_{s,t}) \in \Psi} f^T y \right\} \quad (19)$$

式中: F 为“源荷”场景给定时 n 和 $x_{s,t}$ 的可行域; U 为 $a_{s,t}$ 的可行域; Ψ 为 n 、 $x_{s,t}$ 和 $a_{s,t}$ 给定时 y 和 $z_{s,t}$ 的可行域; f 为元素为 1 的列向量。

3.2 约束条件

除 AM、DSM 约束外,ADN 分布式光伏最大准入容量计算模型还应考虑系统运行与安全约束。本节将对其进行建模。

3.2.1 DistFlow 方程约束

ADN 潮流应满足 DistFlow 方程约束。场景 s 时刻 t 下外界注入节点 i 的有功功率 $P_{i,s,t}^{\text{inj}}$ 与无功功率 $Q_{i,s,t}^{\text{inj}}$ 分别如式(20)和式(21)所示。

$$P_{i,s,t}^{\text{inj}} = P_{i,s,t}^{\text{PV}} + P_{i,s,t}^{\text{dis}} - P_{i,s,t}^{\text{ch}} - P_{i,s,t}^{\text{L}} \quad (20)$$

$$Q_{i,s,t}^{\text{inj}} = Q_{i,s,t}^{\text{CB}} - Q_{i,s,t}^{\text{L}} \quad (21)$$

考虑网络重构后,潮流方程约束为:

$$\sum_{ki \in D} (P_{ki,s,t} - r_{ki} I_{ki,s,t}^2) + P_{i,s,t}^{\text{inj}} = \sum_{ij \in D} P_{ij,s,t} \quad (24)$$

$$\sum_{ki \in D} (Q_{ki,s,t} - x_{ki} I_{ki,s,t}^2) + Q_{i,s,t}^{\text{inj}} = \sum_{ij \in D} Q_{ij,s,t} \quad (25)$$

$$\alpha_{ij,s,t} (V_{i,s,t}^2 - V_{j,s,t}^2) = 2(r_{ij} P_{ij,s,t} + x_{ij} Q_{ij,s,t}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,s,t}^2 \quad (26)$$

$$I_{ij,s,t}^2 V_{i,s,t}^2 = P_{ij,s,t}^2 + Q_{ij,s,t}^2 \quad (27)$$

式中: $P_{ki,s,t}$ 、 $Q_{ki,s,t}$ 分别为从节点 k 流向 i 的有功与无

功功率; r_{ki} 和 x_{ki} 分别为支路 ki 的电阻与电抗; $I_{ki,s,t}$ 为流经支路 ki 的电流; $V_{i,s,t}$ 为节点 i 电压。

3.2.2 支路电流约束

当支路 ij 联络开关断开时,电流为 0,否则,支路电流应小于上限值。约束为:

$$|I_{ij,s,t}| \leq \alpha_{ij,s,t} \bar{I}_{ij} \quad (28)$$

式中: \bar{I}_{ij} 为流经支路 ij 的电流上限。

3.2.3 节点电压约束

ADN 节点电压约束为:

$$\underline{V}_i \leq V_{i,s,t} \leq \bar{V}_i \quad (29)$$

式中: \bar{V}_i 和 \underline{V}_i 分别为节点 i 电压上、下限,由文献[19]规定。

3.2.4 电压波动约束

分布式光伏出力波动会引起 ADN 节点电压波动,对电能质量造成不利影响。电压波动及其约束为^[20]:

$$d_i = \frac{\lambda^{\text{PV}}}{V_N^2} \sum_{k=0}^i [r_{k(k+1)} P_k^{\text{PV}}] \leq \bar{d}_i \quad (30)$$

式中: d_i 为分布式光伏出力波动引起的节点 i 处电压波动大小,其上限为 \bar{d}_i ,由文献[21]规定; λ^{PV} 为分布式光伏出力瞬时变化幅度与额定功率之比; V_N 为节点电压额定值。

3.2.5 谐波电流约束

分布式光伏注入并网点的谐波电流不应超出文献[22]规定的限值,其表达式与约束为:

$$k_h \frac{P_{i,s,t}^{\text{PV}}}{V_N} \leq \bar{I}_h^{\text{PV}} \quad (31)$$

式中: k_h 为 h 次谐波电流与基波电流之比,可通过查询分布式光伏谐波电流频谱得到; \bar{I}_h^{PV} 为 h 次分布式光伏谐波电流上限。

3.2.6 主变压器传输功率约束

场景 s 时刻 t 下由上级电网经主变压器流入 ADN 首节点的有功功率 $P_{0m,s,t}$ 与无功功率 $Q_{0m,s,t}$ 应分别满足约束(32)和(33):

$$\underline{P}_G \leq P_{0m,s,t} \leq \bar{P}_G \quad (32)$$

$$\underline{Q}_G \leq Q_{0m,s,t} \leq \bar{Q}_G \quad (33)$$

式中: \bar{P}_G 和 \underline{P}_G 分别为 $P_{0m,s,t}$ 的上、下限; \bar{Q}_G 和 \underline{Q}_G 分别为 $Q_{0m,s,t}$ 的上、下限。

4 原模型转化与求解

前文得到的优化模型含非线性项与绝对值项,难以直接求解。本节将原问题拆分为主问题与子问题,

转化为混合整数二阶锥形式后, 使用列与约束生成算法求解。

4.1 模型转化

引入变量 $l_{ij,s,t} = I_{ij,s,t}^2$ 和 $v_{i,s,t} = V_{i,s,t}^2$, 可消除电流与电压二次方项。结合 big-M 法^[23] 和凸松弛技术, 约束(24) — (27) 可转化为以下二阶锥形式:

$$\sum_{ki \in D} (P_{ki,s,t} - r_{ki} l_{ki,s,t}) + P_{i,s,t}^{\text{inj}} = \sum_{ij \in D} P_{ij,s,t} \quad (34)$$

$$\sum_{ki \in D} (Q_{ki,s,t} - x_{ki} l_{ki,s,t}) + Q_{i,s,t}^{\text{inj}} = \sum_{ij \in D} Q_{ij,s,t} \quad (35)$$

$$v_{i,s,t} - v_{j,s,t} - 2(r_{ij} P_{ij,s,t} + x_{ij} Q_{ij,s,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij,s,t} + M(1 - \alpha_{ij,s,t}) \geq 0 \quad (36)$$

$$v_{i,s,t} - v_{j,s,t} - 2(r_{ij} P_{ij,s,t} + x_{ij} Q_{ij,s,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij,s,t} - M(1 - \alpha_{ij,s,t}) \leq 0 \quad (37)$$

$$\| [2P_{ij,s,t} \quad 2Q_{ij,s,t} \quad l_{ij,s,t} - v_{i,s,t}]^T \|_2 \leq l_{ij,s,t} + v_{i,s,t} \quad (38)$$

式中: $\| \cdot \|_2$ 为欧几里得 2-范数; M 为极大的数。

约束(28) 和(29) 分别转化为:

$$0 \leq l_{ij,s,t} \leq \alpha_{ij,s,t} \bar{l}_{ij} \quad (39)$$

$$\underline{V}_i^2 \leq v_{i,s,t} \leq \bar{V}_i^2 \quad (40)$$

OLTC 约束(2) 可转化为以下形式^[24]:

$$v_{1,s,t} = \sum_{n=0}^{2\bar{N}^0} \{ [1 + (n - \bar{N}^0) \Delta k^0]^2 v_{m,n,s,t} \} \quad (41)$$

$$\sum_{n=0}^{2\bar{N}^0} \beta_{n,s,t}^0 = 1, \beta_{n,s,t}^0 \in \{0, 1\} \quad (42)$$

$$\underline{V}_m^2 \beta_{n,s,t}^0 \leq v_{m,n,s,t} \leq \bar{V}_m^2 \beta_{n,s,t}^0 \quad (43)$$

$$\underline{V}_m^2 (1 - \beta_{n,s,t}^0) \leq v_{m,s,t} - v_{m,n,s,t} \leq \bar{V}_m^2 (1 - \beta_{n,s,t}^0) \quad (44)$$

储能运行约束中, 使用整型变量 $\omega_{i,s,t}^{\text{BES}}$ 代替式(7) 与式(8) 中的双线性项 $\gamma_{i,s,t} n_i^{\text{BES}}$, 则 $\omega_{i,s,t}^{\text{BES}}$ 应满足:

$$0 \leq \omega_{i,s,t}^{\text{BES}} \leq M \gamma_{i,s,t} \quad (45)$$

$$n_i^{\text{BES}} - M(1 - \gamma_{i,s,t}) \leq \omega_{i,s,t}^{\text{BES}} \leq n_i^{\text{BES}} \quad (46)$$

为便于展现后续模型求解过程, 将该二阶段鲁棒优化模型写成一般化形式 GP, 如附录 A 式(A1) 所示。GP 中的变量符号与具体变量的对应关系如附录 A 式(A2) 所示。

4.2 模型求解

上文得到的优化问题目标函数包含两阶段。第 1 阶段对应外层 max 问题, 即通过优化 AM 和 DSM 变量, 最大化分布式光伏准入容量; 第 2 阶段对应内层 min-max 问题, 即考虑“源荷”不确定性对结果的抑制作用, 通过最优化潮流确定最不利条件下分布式光伏最大准入容量。

包含两阶段的原问题可使用列与约束生成

(column-and-constraint generation, C&CG) 算法^[25] 求解。原问题被分解为主问题(master problem, MP) 和子问题(sub-problem, SP), 分别如附录 A 式(A3) 和(A4) 所示。MP、SP 目标函数值分别为解的上界(upper bound, UB) 与下界(lower bound, LB)。主、子问题交替迭代求解, 直至 UB 与 LB 之差低于设定阈值。

根据强对偶理论, 将双层优化模型 SP 进行对偶变换, 则内层最大化问题转化为最小化问题, 与外层合并为单层最小化问题。文献[26]证明, 对偶问题最优解位于鲁棒区间边界, 即 $(a_{i,s,t}^{\text{PV}}, a_{i,s,t}^{\text{BL}}) \in \{0, 1\}$ 。SP 含二阶锥约束, 根据文献[25]使用的二阶锥模型对偶变换方法, 引入对偶变量后, SP 的对偶形式(dual problem, DP) 如附录 A 式(A5) 所示。DP 中含有双线性项, 可用 big-M 法进行消除, 最终获得混合整数二阶锥规划模型 DP'。

使用 C&CG 算法求解模型的步骤如下:

1) 初始化: 迭代次数 $w = 0$; 设置在“源荷”不确定性最不利条件下的不确定性辅助变量值为 $a_{w,s,t}^{\text{BL}*} = 0, a_{w,s,t}^{\text{PV}*} = 0$; 设置分布式光伏最大准入容量上界为 $U_B = +\infty$, 下界为 $L_B = -\infty$; 设置 C&CG 算法收敛阈值 ε 。

2) 求解 MP, 得到 AM 和 DSM 变量最优值 $x_{s,t}^*$, 更新 U_B 为 MP 目标函数最优值。

3) 令 $w = w + 1$, 将 $x_{s,t}^*$ 代入 DP', 求解 DP', 得到“源荷”不确定性最不利条件下 $a_{w,s,t}^{\text{BL}*}$ 和 $a_{w,s,t}^{\text{PV}*}$, 求得 DP' 目标函数 f_w^{sub} , 更新下界为 L_B 为 $\max\{L_B, f_w^{\text{sub}}\}$ 。

4) 生成新变量 y_w 和 $z_{w,s,t}$, 在 MP 中增加第 w 组约束, 将 $a_{w,s,t}^{\text{BL}*}$ 和 $a_{w,s,t}^{\text{PV}*}$ 代入 MP, 求解 MP, 得到 $x_{s,t}^*$ 和 MP 目标函数 f_w^{master} , 更新上界为 $U_B = \min\{U_B, f_w^{\text{master}}\}$ 。

5) 若上下界之差为 $U_B - L_B \leq \varepsilon$, 停止迭代, 输出结果; 否则, 返回步骤 3)。

5 算例分析

5.1 算例设置

为验证前文所提模型与求解方法的有效性, 本节将在改进的 IEEE 33 节点配电网系统上进行算例分析。基于 MATLAB 2016a 程序开发与仿真平台, 采用 YALMIP 工具箱调用 Gurobi 9.0.0 商业求解器对模型进行求解。硬件配置为 i5-10500 CPU、3.10 GHz 处理器、16 GB 内存。算例配电网如图 1 所示, 线路阻抗与负荷参数详见文献[27], 各节点负荷功率因数恒定。节点 3、7、10、14、27 上负荷的可削减部分占比为 30%, 可全部或部分切除。

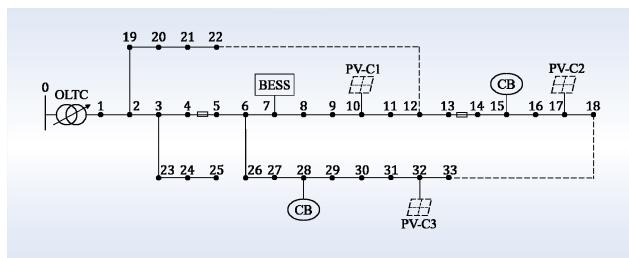


图1 改进的 IEEE 33 节点配电网

Fig. 1 The modified IEEE 33-node distribution network

分布式光伏待选接入点为节点 10、17 和 32, 分布式光伏谐波电流频谱详见文献[28], 无功功率忽略不计^[20]; OLTC 正、负向各有 4 个挡位, 调节范围在 0.95~1.05 pu 之间; 投切电容器组接在节点 15 与 28 上, 最大可投切 5 个电容器, 单个电容器可补偿 30 kW 无功功率; 拟于节点 7 处规划储能装置, 单个储能模块额定功率为 250 kW, 额定容量为 1 000 kWh, 充、放电效率为 85%, 经济使用年限为 20 年, 贴现率为 8%, 单位容量造价为 1 530 元/(kW·h), 建设投资成本上限为 54.4 万元, 荷电状态上、下限分别为 80% 和 20%, 调度周期始末时刻荷电状态为 50%; 支路 12~22 和 18~33 装有常开联络开关, 支路 4~5 和 13~14 装有分段开关。

对全年分布式光伏出力与负荷功率进行 k-means 聚类, CH(+) 指标在聚类数为 3 时取值最大。聚类数为 3 时, 以分布式光伏装机容量与负荷功率历史最大值为基准值, “源荷”典型时序场景如图 2 所示。

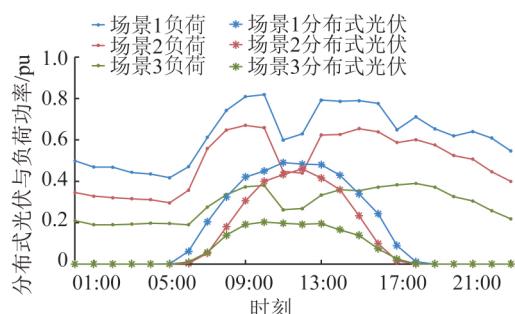


图2 “源荷”典型时序场景

Fig. 2 Typical timing scenarios of distributed PV and load power

分别使用 $\Delta\eta_{i,s,t}^{\text{bl}}$ 和 $\Delta\eta_{i,s,t}^{\text{PV}}$ 表示接在节点 i 上的分布式光伏功率系数与基本负荷功率系数在场景 s 时刻 t 下的鲁棒区间宽度, 则基本负荷功率系数 $\eta_{i,s,t}^{\text{bl}}$ 与分布式光伏功率系数 $\eta_{i,s,t}^{\text{PV}}$ 可以分别表示为:

$$\eta_{i,s,t}^{\text{bl}} = \underline{\eta}_{i,s,t}^{\text{bl}} + \Delta\eta_{i,s,t}^{\text{bl}}/2 \quad (47)$$

$$\eta_{i,s,t}^{\text{PV}} = \underline{\eta}_{i,s,t}^{\text{PV}} + \Delta\eta_{i,s,t}^{\text{PV}}/2 \quad (48)$$

5.2 “源荷”不确定性对结果影响分析

改变 $\Delta\eta_{i,s,t}^{\text{PV}}$ 和 $\Delta\eta_{i,s,t}^{\text{bl}}$ 的取值, 可调节“源荷”不确

定性鲁棒区间宽度。在不同鲁棒区间宽度下, 分布式光伏最大准入容量计算结果如表 1 所示。

表 1 不同鲁棒区间宽度下分布式光伏最大准入容量计算结果
Table 1 Results of the maximum access capacity of distributed PV under different robust interval widths

$(\Delta\eta_{i,s,t}^{\text{PV}}, \Delta\eta_{i,s,t}^{\text{bl}})$	待选节点分布式光伏准入容量			总和 MW
	节点 10	节点 17	节点 32	
(0,0)	1.281 2	1.320 9	5.139 3	7.741 4
(0.10,0.05)	0.962 8	1.294 3	4.481 0	6.738 1
(0.15,0.10)	2.671 2	0.957 6	2.970 1	6.598 9
(0.20,0.15)	1.116 7	0.752 5	4.527 3	6.396 5

由表 1 可知, 当 $(\Delta\eta_{i,s,t}^{\text{PV}}, \Delta\eta_{i,s,t}^{\text{bl}}) = (0,0)$, 即不考虑不确定因素时, 准入的分布式光伏容量之和最大。随着表征源荷不确定性的鲁棒区间宽度增大, 即鲁棒优化趋于保守, 不确定性最恶劣条件下分布式光伏最大准入容量呈现减小的趋势。

5.3 主动管理与需求侧管理优化结果

以场景 1 下 $(\Delta\eta_{i,s,t}^{\text{PV}}, \Delta\eta_{i,s,t}^{\text{bl}}) = (0.15, 0.10)$ 为例, 对 AM 措施与 DSM 措施结果进行分析。考虑投资限制, 在节点 7 上配置 3 个储能模块, 则储能安装容量为 3 000 kWh, 最大充放电功率为 750 kW。为最大化“源荷”不确定性最不利条件下 ADN 分布式光伏准入容量, OLTC 分接头在 01:00—06:00、08:00—15:00 位于 -4 挡, 18:00 位于 3 挡, 21:00 位于 2 挡, 其余时刻位于 4 挡。接在节点 15 上的投切电容器组在 16:00 投入的电容器个数为 0, 其余时刻为 5; 接在节点 28 上的投切电容器组在 07:00 投入的电容器个数为 0, 其余时刻为 5。4 条线路通断情况如图 3 所示, ADN 拓扑始终满足辐射状约束。调度周期内储能的充电功率与荷电状态如图 4 所示, 其中充电功率为负表示储能处于放电状态。由图 4 可知, 在分布式光伏出力较大的 07:00—15:00, 储能持续充电, 储存 ADN 难以消纳的分布式光伏输出电量; 在 00:00—06:00 和 16:00—00:00 期间, 分布式光伏出力较小或无出力, 储能释放日间积聚的电量, 为负荷供电, 起到灵活调控资源的作用。

5.4 对比分析

为验证 AM 与 DSM 对 ADN 分布式光伏最大准入容量的提升作用, 计算采用不同 AM 和 DSM 情况下的结果, 如表 2 所示。由表 2 可知, 场景 1 与场景 4、5、2 相比, 分布式光伏最大准入容量分别提升了 29.54%、13.60% 和 1.93%, 则对于该算例配电网, 储能调节对分布式光伏最大准入容量提升作用最大, 网络重构和有载调压次之; 无功补偿和负荷削减对分布式光伏最大准入容量的提升效果较弱。

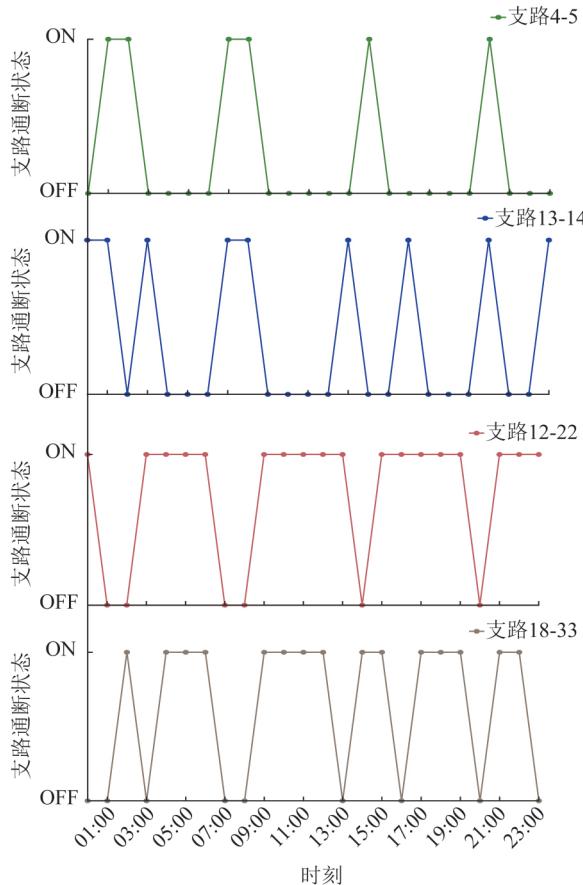


图3 支路通断状态

Fig. 3 On-off states of branches

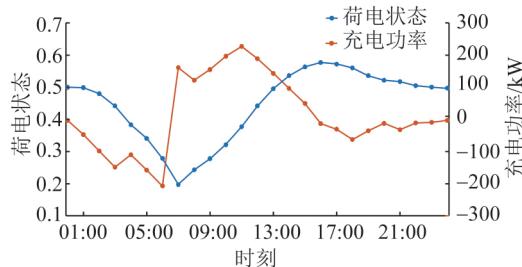


图4 储能荷电状态与充电功率

Fig. 4 State of charge and charging power of the battery

节点3、7、10、14和27上的负荷含可削减部分，负荷削减情况如图5所示。

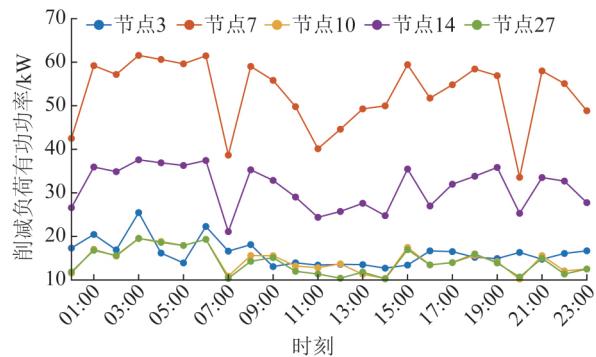


图5 负荷削减曲线

Fig. 5 Load curtailment curves

表2 不同AM和DSM组合下分布式光伏最大准入容量

Table 2 Maximum access capacity of distributed PV under different AM-DSM combinations

MW

场景	有载调压	无功补偿	储能调节	网络重构	负荷削减	待选节点分布式光伏准入容量			总和
						节点10	节点17	节点32	
1	√	√	√	√	√	2.6712	0.9576	2.9701	6.5989
2	✗	√	√	√	√	5.3935	0.2384	0.8422	6.4741
3	√	✗	√	√	√	0.9629	1.6958	3.8930	6.5517
4	√	√	✗	√	√	1.5033	0.5804	3.0141	5.0978
5	√	√	√	✗	√	2.6409	0	3.1681	5.8090
6	√	√	√	√	✗	0.5506	1.1954	4.8498	6.5958

6 结论

本文提出了考虑“源荷”不确定性、主动管理与需求侧管理的主动配电网分布式光伏最大准入容量计算模型，转化为具有混合整数二阶锥形式的主问题与子问题后，使用列与约束生成算法求解。算例分析表明，“源荷”不确定性可能对分布式光伏最大准入容量产生抑制作用，且抑制程度与鲁棒优化保守程度成正相关；主动管理与需求侧管理对分布式光伏最大准入容量具有提升作用，可有效促进分布式光伏消纳。在后续研究中，更多主动管理、需求侧管理措施

与配电网的耦合机理仍待进一步深入探讨。

7 参考文献

- [1] 孙玲玲,赵美超,王宁,等. 基于电压偏差机会约束的分布式光伏发电准入容量研究[J]. 电工技术学报,2018,33(7):1560-1569.
SUN Lingling, ZHAO Meichao, WANG Ning, et al. Research of permitted capacity of distributed photovoltaic generation based on voltage deviation chance constrained [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1560-1569.
- [2] 阎鼎,包海龙,程浩忠,等. 配电网中分布式电源最大准入容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(10):16-20.

- YAN Ding , BAO Hailong , CHENG Haozhong , et al. Optimal allocation of maximum distributed generation capacity in distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA , 2015 , 27 (10) : 16-20.
- [3] 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 Zhudong , 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.
- [4] 黄河,高松,韩俊,等. 交直流混合配电网分布式电源最大准入容量[J]. 电力建设,2019,40(10): 75-83.
- HUANG He , GAO Song , HAN Jun , et al. Maximum capacity of grid-connected distributed generation in AC/DC hybrid distribution network [J]. Electric Power Construction , 2019 , 40(10) : 75-83.
- [5] TORQUATO R , SALLAS D , ORIENTE PEREIRA C , et al. A comprehensive assessment of PV hosting capacity on low-voltage distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery , 2018 , 33(2) : 1002-1012.
- [6] DUBEY A , SANTOSO S. On estimation and sensitivity analysis of distribution circuit's photovoltaic hosting capacity [J]. IEEE Transactions on Power Systems , 2017 , 32(4) : 2779-2789.
- [7] DING F , MATHER B. On distributed PV hosting capacity estimation , sensitivity study , and improvement [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2017 , 8(3) : 1010-1020.
- [8] WANG S X , CHEN S J , GE L J , et al. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2016 , 7(3) : 1111-1123.
- [9] D'ADAMO C , JUPE S , ABBEY C. Global survey on planning and operation of active distribution networks – Update of CIGRE C6.11 working group activities [C]//CIRED 2009 – 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – Part 1 , Prague: IET , 2009: 1-4.
- [10] 刘广一,张凯,舒彬. 主动配电网的6个主动与技术实现[J]. 电力建设,2015,36(1): 33-37.
- LIU Guangyi , ZHANG Kai , SHU Bin. Six actives and key technologies of active distribution network [J]. Electric Power Construction , 2015 , 36(1) : 33-37.
- [11] CHEN X , WU W C , ZHANG B M. Robust capacity assessment of distributed generation in unbalanced distribution networks incorporating ANM techniques [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2018 , 9(2) : 651-663.
- [12] SOUSA J F B , BORGES C L T , MITRA J. PV hosting capacity of LV distribution networks using smart inverters and storage systems: A practical margin [J]. IET Renewable Power Generation , 2020 , 14(8) : 1332-1339.
- [13] 梁海深,李盛伟,白临泉,等. 基于SNOP的柔性配电网中分布式电源最大准入容量计算[J]. 电力建设,2018,39(8): 69-76.
- LIANG Haishen , LI Shengwei , BAI Linquan , et al. Allowable DG penetration capacity calculation of SNOP-based flexible distribution network [J]. Electric Power Construction , 2018 , 39(8) : 69-76.
- [14] 赵金利,陈昊,宋关羽,等. 考虑可靠性收益的配电网智能软开关规划方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(10): 22-31.
- ZHAO Jinli , CHEN Hao , SONG Guanyu , et al. Planning method of soft open point in distribution network considering reliability benefits [J]. Automation of Electric Power Systems , 2020 , 44 (10) : 22-31.
- [15] LI R , WANG W , XIA M C. Cooperative planning of active distribution system with renewable energy sources and energy storage systems [J]. IEEE Access , 2018 , 6: 5916-5926.
- [16] 丁明,解蛟龙,刘新宇,等. 面向风电接纳能力评价的风资源/负荷典型场景集生成方法与应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(15): 4064-4072.
- DING Ming , XIE Jiaolong , LIU Xinyu , et al. The generation method and application of wind resources/load typical scenario set for evaluation of wind power grid integration [J]. Proceedings of the CSEE , 2016 , 36(15) : 4064-4072.
- [17] ZHANG Y X , REN S Y , DONG Z Y , et al. Optimal placement of battery energy storage in distribution networks considering conservation voltage reduction and stochastic load composition [J]. IET Generation , Transmission & Distribution , 2017 , 11 (15) : 3862-3870.
- [18] 孙川,汪隆君,许海林. 用户互动负荷模型及其微电网日前经济调度的应用[J]. 电网技术,2016,40(7): 2009-2016.
- SUN Chuan , WANG Longjun , XU Haolin. An interaction load model and its application in microgrid day-ahead economic scheduling [J]. Power System Technology , 2016 , 40 (7) : 2009-2016.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电能质量 供电电压偏差: GB/T 12325—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社 2008.
- [20] 刘健,黄炜. 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下的可接入容量分析[J]. 电网技术,2015,39(2): 299-306.
- LIU Jian , HUANG Wei. Analysis on grid-connectible capacity of distributed PV generation in case of PV generation distribution close to load distribution [J]. Power System Technology , 2015 , 39(2) : 299-306.
- [21] 国家标准化管理委员会. 电能质量 电压波动和闪变: GB/T 12326—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社 2008.
- [22] 国家技术监督局. 电能质量 公用电网谐波: GB/T 14549—1993 [S]. 北京: 中国标准出版社,1993.
- [23] 刘一欣,郭力,王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(14): 4013-4022 4307.
- LIU Yixin , GUO Li , WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization [J]. Proceedings of the CSEE , 2018 , 38(14) : 4013-4022 4307.
- [24] LI P , JI H R , WANG C S , et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2017 , 8(4) : 1430-1442.

- [25] DING T , LI C , YANG Y H , et al. A two-stage robust optimization for centralized-optimal dispatch of photovoltaic inverters in active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2017 , 8(2) : 744-754.
- [26] BERTSIMAS D , LITVINOV E , SUN X A , et al. Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems , 2013 , 28(1) : 52-63.
- [27] BARAN M E , WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery , 1989 , 4(2) : 1401-1407.
- [28] SAKAR S , BALCI M E , ALEEM S H E A , et al. Hosting capacity assessment and improvement for photovoltaic-based distributed generation in distorted distribution networks [C]//2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Florence , Italy: IEEE , 2016: 1-6.

收稿日期: 2020-10-20

作者简介:

蔡秀雯(1983),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为新能源消纳配电网规划;

陈茂新(1971),男,学士,高级工程师,主要研究方向为新能源电力系统配电网规划;

陈钢(1983),男,学士,高级工程师,主要研究方向为配电网规划;

方一晨(1995),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划;

张沈习(1988),男,副研究员,硕士生导师,通信作者,主要研究方向为新能源电力系统、综合能源系统;

程浩忠(1962),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统规划、电压稳定、综合能源系统。

(编辑 刘文莹)

附录 A

优化模型一般化形式为:

$$\begin{aligned} & \max_{(\mathbf{n}, \mathbf{x}_{s,t}) \in F} \left\{ \min_{\mathbf{a}_{s,t} \in U} \max_{(\mathbf{y}, \mathbf{z}_{s,t}) \in \Psi} \mathbf{f}^T \mathbf{y} \right. \\ & \quad \left. \mathbf{H}_{1,s,t} \mathbf{y} + \mathbf{H}_{2,s,t} \mathbf{z}_{s,t} + \mathbf{H}_{3,s,t} \mathbf{a}_{s,t}^{\text{bl}} + \mathbf{H}_{4,s,t} \mathbf{x}_{s,t} + \right. \\ & \quad \left. \mathbf{H}_{5,s,t} \mathbf{a}_{s,t}^{\text{PV}} \otimes \mathbf{y} = \mathbf{h}_{s,t} \right. \\ & \quad \left. \sum_{t=0}^{T-1} \mathbf{H}_{6,s,t} \mathbf{x}_{s,t} = 0 \right. \\ & \quad \left. \mathbf{G}_1 \mathbf{y} \leq \mathbf{g}_1 \right. \\ \text{s. t. } & \left. \mathbf{G}_2 \mathbf{n} \leq \mathbf{g}_2 \right. \\ & \quad \left. \mathbf{G}_{3,s,t} \mathbf{y} + \mathbf{G}_{4,s,t} \mathbf{n} + \mathbf{G}_{5,s,t} \mathbf{z}_{s,t} + \mathbf{G}_{6,s,t} \mathbf{x}_{s,t} + \right. \\ & \quad \left. \mathbf{G}_{7,s,t} \mathbf{a}_{s,t}^{\text{PV}} \otimes \mathbf{y} \leq \mathbf{g}_{3,s,t} \right. \\ & \quad \left. \sum_{t=0}^{T-1} \mathbf{G}_{8,s,t} \mathbf{x}_{s,t} \leq \mathbf{g}_{4,s,t} \right. \\ & \quad \left. \| \mathbf{A}_i \mathbf{z}_{s,t} \|_2 \leq \mathbf{c}_i^T \mathbf{z}_{s,t}, i \in \{1, \dots, L\} \right. \end{aligned} \quad (\text{A1})$$

式中: 第 1 个约束为场景 s 时刻 t 下的等式约束; 第 2 个约束为场景 s 下全调度周期约束, 表示储能在调度周期始、末时刻电量相等, 即在全调度周期内的充、放电量相抵; 第 3、4 个约束是与时间无关的不等式约束; 第 5 个约束为场景 s 时刻 t 下的不等式约束; 第 6 个约束表示储能在每个时刻的电量不超出限值; 第 7 个约束为二阶锥约束, 对应式(38), 其中 L 为支路总数; $\mathbf{H}_{1,s,t}$ — $\mathbf{H}_{6,s,t}$ 、 \mathbf{G}_1 、 \mathbf{G}_2 、 $\mathbf{G}_{3,s,t}$ — $\mathbf{G}_{8,s,t}$ 和 \mathbf{A}_i 为系数矩阵; $\mathbf{h}_{s,t}$ 、 \mathbf{g}_1 、 \mathbf{g}_2 、 $\mathbf{g}_{3,s,t}$ 、 $\mathbf{g}_{4,s,t}$ 和 \mathbf{c}_i 为常数列向量; \otimes 表示 2 个维数相同的矩阵对应位置元素分别相乘得到新矩阵的运算。

式(A1)中符号的对应关系如式(A2)所示:

$$\begin{aligned} & \mathbf{y} \rightarrow \{P_i^{\text{PV}}\} \\ & \mathbf{n} \rightarrow \{n_i^{\text{BES}}\} \\ & \mathbf{z}_{s,t} \rightarrow \{l_{ij,s,t}, p_{i,s,t}, P_{ij,s,t}, Q_{ij,s,t}\} \\ & \mathbf{x}_{s,t} \rightarrow \{\beta_{n,s,t}^0, p_{m,n,s,t}, P_{i,s,t}^{\text{dis}}, P_{i,s,t}^{\text{ch}}, \eta_{i,s,t}, \omega_{i,s,t}^{\text{BES}}, \\ & \quad \beta_{ij,s,t}, \alpha_{ij,s,t}, \Delta P_{i,s,t}^{\text{el}}, \Delta Q_{i,s,t}^{\text{el}}\} \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

主问题表达式如式(A3)所示:

$$\begin{aligned} & \max_{(\mathbf{n}, \mathbf{x}_{s,t}, \mathbf{y}_w)} \zeta \\ & \zeta \leq \mathbf{f}^T \mathbf{y}_w \\ & \mathbf{H}_{1,s,t} \mathbf{y}_w + \mathbf{H}_{2,s,t} \mathbf{z}_{w,s,t} + \mathbf{H}_{3,s,t} \mathbf{a}_{w,s,t}^{\text{bl}*} + \mathbf{H}_{4,s,t} \mathbf{x}_{s,t} + \\ & \quad \mathbf{H}_{5,s,t} \mathbf{a}_{w,s,t}^{\text{PV}*} \otimes \mathbf{y}_w = \mathbf{h}_{s,t} \\ & \sum_{t=0}^{T-1} \mathbf{H}_{6,s,t} \mathbf{x}_{s,t} = 0 \\ & \mathbf{G}_1 \mathbf{y}_w \leq \mathbf{g}_1 \\ \text{s. t. } & \mathbf{G}_2 \mathbf{n} \leq \mathbf{g}_2 \\ & \mathbf{G}_{3,s,t} \mathbf{y}_w + \mathbf{G}_{4,s,t} \mathbf{n} + \mathbf{G}_{5,s,t} \mathbf{z}_{w,s,t} + \mathbf{G}_{6,s,t} \mathbf{x}_{s,t} + \\ & \quad \mathbf{G}_{7,s,t} \mathbf{a}_{w,s,t}^{\text{PV}*} \otimes \mathbf{y}_w \leq \mathbf{g}_{3,s,t} \\ & \sum_{t=0}^{T-1} \mathbf{G}_{8,s,t} \mathbf{x}_{s,t} \leq \mathbf{g}_{4,s,t} \\ & \| \mathbf{A}_i \mathbf{z}_{w,s,t} \|_2 \leq \mathbf{c}_i^T \mathbf{z}_{w,s,t}, i \in \{1, \dots, L\}, \\ & \forall w \in \{1, \dots, W\} \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

式中: W 为 C&CG 算法当前迭代次数; \mathbf{y}_w 和 $\mathbf{z}_{w,s,t}$ 为

C&CG 算法第 w 次迭代时生成的变量; $\mathbf{a}_{w,s,t}^{\text{bl}*}$ 和 $\mathbf{a}_{w,s,t}^{\text{PV}*}$ 为 C&CG 算法第 w 次迭代时子问题返回至主问题的“源荷”不确定性辅助变量最优值, 在 MP 中为常数。

子问题表达式如式(A4) 所示:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{a}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\mu}} \max_{\mathbf{y} \in U(\mathbf{y}, \mathbf{z}_s)} \mathbf{f}^T \mathbf{y} \\ \text{s. t. } & \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{H}_{1,s,t} \mathbf{y} + \mathbf{H}_{2,s,t} \mathbf{z}_{s,t} + \mathbf{H}_{5,s,t} \mathbf{a}_{s,t}^{\text{PV}} \otimes \mathbf{y} = \\ \quad \mathbf{h}_{s,t} - \mathbf{H}_{3,s,t} \mathbf{a}_{s,t}^{\text{bl}} - \mathbf{H}_{4,s,t} \mathbf{x}_{s,t}^* \\ \mathbf{G}_{1,t} \mathbf{y} \leq \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{G}_{3,s,t} \mathbf{y} + \mathbf{G}_{5,s,t} \mathbf{z}_{s,t} + \mathbf{G}_{7,s,t} \mathbf{a}_{s,t}^{\text{PV}} \otimes \mathbf{y} \leq \\ \quad \mathbf{g}_{3,s,t} - \mathbf{G}_{4,s,t} \mathbf{n}^* - \mathbf{G}_{6,s,t} \mathbf{x}_{s,t}^* \\ \| \mathbf{A}_i \mathbf{z}_{s,t} \|_2 \leq \mathbf{c}_i^T \mathbf{z}_{s,t}, i \in \{1, \dots, L\} \end{array} \right. \quad (A4) \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{x}_{s,t}^*$ 和 \mathbf{n}^* 为求解 MP 得到的 $\mathbf{x}_{s,t}$ 和 \mathbf{n} 最优解, 在 SP 中为常数。

对于 SP 中的 4 类约束, 分别引入对偶变量 $\boldsymbol{\lambda}_{1,s,t}, \boldsymbol{\lambda}_2, \boldsymbol{\lambda}_{3,s,t}$ 和 $(\boldsymbol{\sigma}_{i,s,t}, \boldsymbol{\mu}_{i,s,t})$, 可得 SP 的 DP, 如式(A5) 所示:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{a}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\mu}} [\boldsymbol{\lambda}_2^T \mathbf{g}_1 + \sum_{t \in \Omega} \sum_{s \in \Lambda} (\boldsymbol{\lambda}_{1,s,t}^T \mathbf{h}_{s,t} - \boldsymbol{\lambda}_{1,s,t}^T \\ & \quad \mathbf{H}_{2,s,t} \mathbf{a}_{s,t}^{\text{bl}} - \boldsymbol{\lambda}_{1,s,t}^T \mathbf{H}_{4,s,t} \mathbf{x}_{s,t}^* + \\ & \quad \boldsymbol{\lambda}_{3,s,t}^T \mathbf{g}_{3,s,t} - \boldsymbol{\lambda}_{3,s,t}^T \mathbf{G}_{4,s,t} \mathbf{n}^* - \boldsymbol{\lambda}_{3,s,t}^T \mathbf{G}_{6,s,t} \mathbf{x}_{s,t}^*)] \\ & \text{s. t. } \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{G}_1^T \boldsymbol{\lambda}_2 + \sum_{t \in \Omega} \sum_{s \in \Lambda} (\mathbf{H}_{1,s,t}^T \boldsymbol{\lambda}_{1,s,t} + \mathbf{H}_{5,s,t}^T \boldsymbol{\lambda}_{1,s,t} \otimes \\ \quad \mathbf{a}_{s,t}^{\text{PV}} + \mathbf{G}_{3,s,t}^T \boldsymbol{\lambda}_{3,s,t} + \mathbf{G}_{7,s,t}^T \boldsymbol{\lambda}_{3,s,t} \otimes \mathbf{a}_{s,t}^{\text{PV}}) \geq \mathbf{f} \\ \mathbf{H}_{2,s,t}^T \boldsymbol{\lambda}_{1,s,t} + \mathbf{G}_{5,s,t}^T \boldsymbol{\lambda}_{3,s,t} + \sum_{i=1}^L (\mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\sigma}_{i,s,t} + \mathbf{c}_i \boldsymbol{\mu}_{i,s,t}) = 0 \\ \| \boldsymbol{\sigma}_{i,s,t} \|_2 \leq \boldsymbol{\mu}_{i,s,t}, i \in \{1, \dots, L\} \\ \mathbf{a}_{s,t}^{\text{PV}}, \mathbf{a}_{s,t}^{\text{bl}} \in \{0, 1\}, \boldsymbol{\lambda}_2, \boldsymbol{\lambda}_{3,s,t}, \boldsymbol{\mu}_{i,s,t} \geq 0 \end{array} \right. \quad (A5) \end{aligned}$$

式中: Ω 为调度时刻集合; Λ 为典型场景集合。