

面向配网规划的光储最优配比显式表征及量化分析方法

王旭晴¹, 龚向阳², 杨林泽³, 董博², 曾德龙¹, 王海玲², 汪洋³, 赖晓文³, 雷星雨³

(1. 宁波恒晨电力建设有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 国网浙江省电力有限公司宁波市奉化区供电公司, 浙江 宁波 315000; 3. 北京清能互联科技有限公司, 北京 100080)

摘要: 随着光伏大规模接入配电网, 为平抑光伏出力的波动性, 提高配网运行经济效益, 储能作为灵活、经济的可控资源, 成为配电网规划投资的重要选择。传统的配网规划光储最优配比以及经济效益分析方法通过对不同光伏容量下的规划问题进行求解, 以获得光储配比。此类方法需要求解大量规划问题, 计算效率低下, 且无法显式量化地分析储能容量对于整体经济效益的影响, 难以对系统规划起到指导作用。为此, 提出了一种面向配网规划的光储最优配比显式表征及量化分析方法。首先, 考虑接入配网的光伏出力以及储能物理运行特性约束, 构建了以配网光储规划总体经济效益最高为目标的配网光储规划模型, 并通过预求解的方法将模型进行凸转化。然后, 基于多参数规划方法, 以光伏容量为规划参数, 构建储能最优规划容量以及配网规划总体成本与配网接入光伏容量的解析表达式。最后, 基于解析表达式分析不同光伏容量下最优储能容量以及最优光储对比对配网规划整体经济效益的影响机理, 以辅助配网规划方案的制定。在PJM 5节点系统与IEEE 141节点系统的算例分析结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 光储联合系统; 配电网规划; 多参数规划; 光伏; 储能

Explicit Characterization and Quantitative Analysis Method for Optimal Allocation Ratio of Photovoltaic and Energy Storage for Distribution Network Planning

WANG Xuqing¹, GONG Xiangyang², YANG Linze³, DONG Bo², ZENG Delong¹, WANG Hailing²,
WANG Yang³, LAI Xiaowen³, LEI Xingyu³

(1. Hengchen Electric Power Construction Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315000, China; 2. Ningbo Fenghua District Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315000, China; 3. Beijing Tsintergy Technology Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: With the large-scale integration of photovoltaic (PV) into the distribution network, energy storage (ES), as a flexible and economically controllable resource, becomes an important choice of investment for distribution network planning to smooth out the fluctuation of PV generation and improve the economic efficiency of distribution network operation. The traditional methods identify the optimal allocation ratio of PV and ES in distribution network planning and analyze the economic benefits of distribution network planning by solving a large number of optimal distribution network planning problems. However, these methods are computationally inefficient and cannot explicitly quantify the impact of ES capacity on the overall economic efficiency, making it difficult to guide distribution network planning. Therefore, an explicit characterization and quantitative analysis method for the optimal allocation ratio of photovoltaic and energy storage for distribution network planning is proposed. First, a distribution network planning model is constructed, which contains constraints of PV generation and physical operating characteristics of ES integrated into the distribution network and aims at the highest overall economic efficiency of PV and ES planning in the distribution network; on the basis of this, the model is converted into convex by pre-solving method. Then, based on the multi-parameter planning method with PV capacity as the planning parameter, the analytical expressions between the optimal planning capacity of ES and the PV capacity of distribution network, the cost of distribution network planning and the PV capacity of distribution network, are constructed. Finally, based on the analytical expressions, the optimal ES capacity under different PV capacities and the mechanism of optimal allocation ratio of PV and

ES affecting the economic efficiency of distribution network planning are analyzed, which can assist the establishment of distribution network planning schemes. The results of the case study in PJM 5-bus system and IEEE 141-bus system verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: combined PV-ESS system; distribution network planning; multi-parameter programming; photovoltaic; energy storage

0 引言

国家主席习近平 2020 年 9 月 22 日在第 75 届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话, 承诺中国将在 2030 年前实现“碳达峰”、2060 年前实现“碳中和”。为实现“双碳”目标, 要求推进能源结构的清洁化和低碳化, 构建绿色环保的新型电力系统。光伏发电能有效节省化石燃料资源, 具有经济效益高、碳排放低等优点^[1], 使得光伏发电接入配电网成为新型电力系统建设的必然趋势。然而, 由于光伏发电具有很强的间歇性与波动性, 大规模光伏的接入将导致配电网存在安全风险和经济问题^[2-3], 配电网亟需灵活、经济的可控资源以平抑光伏随机波动带来的强不确定性。储能系统具有响应快速、能量供需管理灵活等特点, 在平抑功率波动^[4]、提高配电网运行经济效益方面上具有显著优势^[5-6]。随着储能技术的不断发展, 储能的运行与规划成本逐渐降低, 光伏与储能协调运行成为保证配电网运行经济性要求的重要手段, 受到国内外学者的广泛关注^[7-8]。

目前, 配电网储能容量规模小、位置分散。为充分发挥储能性能, 配合光伏电源协同运行, 需要在考虑光伏接入容量下对储能进行合理、经济的规划^[9]。在配电网规划期间, 储能设备容量的选择是至关重要的, 需要综合考虑储能设备响应特性、安装费用等多种因素, 并以提高系统运行整体经济效益为目的, 寻求最优容量配置方案^[10-11]。然而, 在光伏大规模接入的系统中, 储能设备容量与光伏机组容量不匹配会导致系统功率不平衡、线路堵塞等问题, 造成系统弃光限电现象^[12], 严重影响配网系统运行的经济性。配电网光伏和储能容量协同规划问题本质是求取给定配网拓扑结构下的光储最优配比。光储最优配比是指在不同的光伏容量下, 使得配电网总体规划效益最高且满足配电网运行约束的

最优储能规划容量与配电网接入光伏容量的比值。光储最优比对配电网的整体规划起到宏观指导作用, 辅助系统规划的总体经济效益分析。

针对光储最优配比以及经济效益分析, 国内外研究团队提出了许多方法, 包括直接模型分析、多阶段规划分析以及随机规划分析。直接模型分析^[13]是基于最优潮流模型对系统规划问题进行求解以获得最优规划决策与成本; 多阶段规划分析^[14]是利用多阶段规划模型, 基于全年的新能源与负荷数据来确定储能的最佳容量; 随机规划分析^[15-16]是利用随机规划算法, 基于可再生能源的发电统计特性或者发电分布特性进行规划分析以获得最优规划决策。然而, 上述方法通过大量的仿真计算比较各种决策下所计算出来的总体成本来定性分析规划决策的经济效益, 并进行数据上的比对, 造成计算负担。同时上述方法并没有显式量化地分析储能容量对于整体经济效益的影响, 难以对系统规划起到指导作用。

多参数规划在处理规划参数为变量的线性规划问题上优势显著。对于不同的规划参数, 多参数规划算法可分析线性规划问题中规划参数与决策变量以及规划问题目标值的关系, 得到关于规划参数的分段线性函数解集。将光伏容量视作规划参数, 则配电网光储最优规划问题便可转化为多参数规划问题。其难点在于: 多参数规划不能直接求解非线性问题, 若规划模型本质为非线性模型, 需要将模型转化为线性模型。由于储能规划模型中需要考虑储能运行的物理状态约束: 储能设备可以进行充电(消耗能量)或放电(产生能量), 但不能同时充电与放电^[17]。上述运行特性约束本质上是互补约束, 这使得该模型存在非线性约束。通过引入 0-1 变量来表示储能设备的充放电状态, 将规划模型从具有线性互补约束的线性模型转化为混合整数线性模型, 并运用多参数规划对其进行求解。然而, 使用多参

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177072); 宁波恒晨电力建设有限公司科技项目(KJXM2022036)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177072); the Science and Technology Project of Ningbo Hengchen Electric Power Construction Co., Ltd(KJXM2022036).

数规划求解混合整数线性模型将造成运算负担, 计算效率低下。

为解决以上问题, 本文提出了一种面向配网规划的光储最优配比显式表征及量化分析方法。首先构建以配网光储规划总体经济效益最高为目标、考虑接入配网的光伏出力以及储能物理运行特性约束的配网光储规划模型, 基于对模型的预求解获得在一定光伏容量内的储能最优运行状态。同时对配网光储规划模型进行凸转化, 通过对模型进行预求解并将储能运行状态进行固定, 从而将混合整数线性规划模型转化为线性规划模型。然后, 利用多参数规划算法求解转化后的线性模型, 获得储能最优规划容量以及配网规划总体成本与配网接入光伏容量的解析表达式。进一步, 通过解析表达式获得各种光伏容量下的最优储能容量以及最优光储配比对配网规划整体经济效益的影响机理, 以辅助配网规划方案的制定。最后, 通过在 PJM 5 节点系统与 IEEE 141 节点系统验证所提方法的有效性, 本文主要贡献以下几点。

1) 提出了一种配网光储规划模型的线性松弛方法。构建以配网光储规划总体经济效益最高为目标、考虑接入配网的光伏出力以及储能物理运行特性约束的配网光储规划模型。基于模型预求解与非线性降阶方法, 将模型中储能物理状态约束导致模型中存在整数变量固定, 将模型中的非线性约束转化为线性约束, 构建配网光储规划线性模型, 为后续分析系统光伏配比对配网系统规划经济效益提供模型基础。

2) 提出了一种面向配网光储规划的最优光储配比解析表征方法。基于多参数规划理论, 以光伏容量为规划参数分割配网光储规划线性模型可行域, 从而获取光伏容量与储能容量、规划成本的解析表达式。通过解析表达式分析各种光伏容量下最优储能容量以及最优光储配比对配网规划整体经济效益的影响机理, 以辅助配网规划方案的制定。

算例分析表明本文所提方法在典型场景选取合适或固定的整数变量符合规划长时间尺度调度规律时具有一定的有效性, 能够提供准确的光储最优配比解析表达式, 引导配电网整体规划的宏观决策制定, 并且避免求解大量混合整数线性规划问题所带来的计算负担, 满足计算高效性要求。本文所提方法的流程图如图 1 所示。

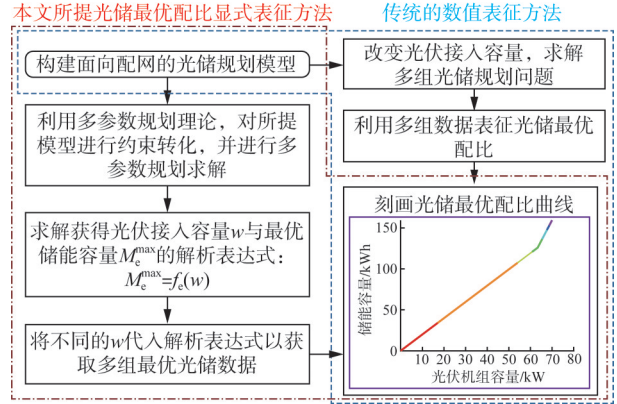


图 1 光储最优配比显式表征方法流程图

Fig. 1 Flow chart of explicit analysis method for optimal allocation ratio of photovoltaic and energy storage

1 面向配网的光储规划模型

本文聚焦于光伏与储能容量对于配网规划的经济效益的影响, 在考虑已接入配网系统的光伏容量的同时进行储能最优配置。对于面向配网的光储协同规划问题, 经济效益主要体现在光储协同规划的总规划成本, 总规划成本越小, 光储协同规划的经济效益越高。因此, 本文以总规划成本最小为目标, 根据典型日负荷曲线划分时段建立了如下面向配网的光储规划模型。

1.1 目标函数

$$\min C = \frac{r(1+r)^Y}{365[(1+r)^Y - 1]} \sum_{e \in \Omega_e} C_{\text{inv}} M_e^{\max} + \sum_{s \in \Omega_s} \frac{1}{|\Omega_s|} \sum_{t \in \Omega_t} \sum_{g \in \Omega_g} C_g P_{g,s,t} \Delta t + \sum_{s \in \Omega_s} \frac{1}{|\Omega_s|} \sum_{t \in \Omega_t} \sum_{e \in \Omega_e} C_e (P_{e,s,t}^{\text{ch}} + P_{e,s,t}^{\text{dis}}) \Delta t \quad (1)$$

式中: r 为贴现率, 在本文中取 5%; Y 为规划年数; C 为系统总规划成本; 第一项为储能设备建设投资成本, 以日均摊成本的形式体现^[18]; 第二项为分布式机组的运行成本; 第三项为储能机组的运行成本; 其中分布式机组的运行成本与储能机组的运行成本共同组成了配网系统在规划周期内的运营成本; C_{inv} 为储能单位容量的建设投资成本; C_g 为第 g 台分布式机组单位功率的运行成本; C_e 为第 e 台储能机组单位充放电量的维护成本; $M_e^{\max}$ 为第 e 台储能机组的规划容量; $P_{g,s,t}$ 为在第 s 个日负荷曲线场景的 t 时段下第 g 台分布式机组的功率; $P_{e,s,t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{e,s,t}^{\text{dis}}$

分别为在第 s 个典型日负荷场景的 t 时段下第 e 台储能机组的充放电功率; Ω_E 、 Ω_G 、 Ω_S 与 Ω_T 分别为储能机组、分布式机组、典型日负荷场景以及总时段集合; $|\Omega_S|$ 为集合 Ω_S 基数, 即典型日负荷场景数量; Δt 为时段间隔。

在本文中考虑的规划周期为 10 a, 即 $Y=10$, 且储能机组在第一年即规划投入使用。本文的规划模型计算的成本是一天的运行成本加上均摊到每一天的储能投资成本。值得说明的是, 本文聚焦于在配网系统给定光伏容量的情况下进行储能最优配置, 因此在设备投资成本中主要考虑储能投资成本而不考虑光伏机组投资成本; 同时本文并没有考虑通过弃光来消纳光伏出力, 而是通过储能来消纳, 因此在本文的总规划成本中并不存在弃光成本。对于分布式机组的运行成本, 分布式机组的运行成本实际上由很多部分组成: 机组出力成本(机组燃料费用)、运行维护费用、机组开机费用等^[19]。显然, 如果将所有的运行成本都考虑, 模型将更加精细与准确。然而, 机组出力成本是机组运营成本的主要组成部分, 因此不失合理性地, 部分关于系统调度的研究文献将分布式机组运营成本简化为机组出力成本。同时, 由于本文所聚集的问题是光储对比对配网系统规划的总体经济效益的影响, 为简化问题, 对于分布式机组的运营成本的考虑, 本文采用类似文献[20]的考虑方式, 即只考虑机组出力成本。

此外, 光伏机组的运行成本较低, 且本文只考虑已接入配网系统的光伏容量, 因此不考虑光伏机组的运行成本^[21]。

1.2 约束条件

本文考虑的约束有功率平衡约束、支路潮流约束、配电网中的分布机组相关约束、配电网中的储能组相关约束以及储能响应光伏不确定性约束。

1.2.1 功率平衡约束

$$\sum_{g \in \Omega_G} P_{g,s,t} + \sum_{p \in \Omega_{PV}} P_{p,s,t} + \sum_{e \in \Omega_E} (P_{e,s,t}^{\text{dis}} - P_{e,s,t}^{\text{ch}}) = \sum_{i \in \Omega_N} D_{i,s,t} \quad (2)$$

$$P_{p,s,t} = P_{p,s,t}^{\text{pre}} M_p^{\text{max}} \quad (3)$$

式中: $P_{p,s,t}$ 为在第 s 个日负荷曲线场景的 t 时段下第 p 台光伏机组的功率; $D_{i,s,t}$ 为在第 s 个日负荷曲线场景的 t 时段下第 i 个节点的负荷需求; $P_{p,s,t}^{\text{pre}}$ 为在第 s 个日负荷曲线场景的 t 时段下第 p 个光伏机组的功

率与容量的比值; M_p^{max} 为第 p 个光伏机组的容量; Ω_{PV} 、 Ω_N 分别为光伏机组以及系统节点集合。

1.2.2 支路潮流约束

$$\begin{aligned} -P_l^{\text{max}} &\leq P_{l,s,t} \leq P_l^{\text{max}} \quad (4) \\ P_{l,s,t} &= \sum_{g \in \Omega_G} A_{G,l,g} P_{g,s,t} + \sum_{p \in \Omega_{PV}} A_{PV,l,p} P_{p,s,t} + \\ &\quad \sum_{e \in \Omega_E} A_{E,l,e} (P_{e,s,t}^{\text{dis}} - P_{e,s,t}^{\text{ch}}) + \sum_{i \in \Omega_N} A_{N,l,i} D_{i,s,t} \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $P_{l,s,t}$ 为在第 s 个日负荷曲线场景的 t 时段下第 l 条支路所流过的功率; P_l^{max} 为第 l 条支路功率上限值; $A_{G,l,g}$ 、 $A_{PV,l,p}$ 、 $A_{E,l,e}$ 以及 $A_{N,l,i}$ 分别为第 g 台分布式机组、第 p 台光伏机组、第 e 台储能机组、以及第 i 个节点上的负荷对第 l 条支路的发电转移分布因子。约束式(4)–(5)为支路潮流上下限约束。

1.2.3 分布式机组约束

在本文中, 分布式机组所指的是安装在配网系统中的中小型燃煤发电机组, 它既可以独立于公共电网直接向用户提供电能, 也能并网向用户供电^[22]。分布式机组约束包括分布式机组出力约束以及分布式机组爬坡约束。分布式机组出力约束表示的是分布式机组出力不得大于其出力上限, 不得小于其出力下限; 分布式机组爬坡约束是一种动态约束, 它对一个单元在连续时间瞬间的发电量的急剧变化施加限制。当负荷变化时, 发电机组需要以一定的斜率从一个出力值变为另外一个出力值。由于分布式机组存在机械/热力方面的约束, 每单位时段的出力不能超过规定的最大变化率限值。

分布式机组的功率约束如式(6)所示。

$$P_g^{\text{min}} \leq P_{g,s,t} \leq P_g^{\text{max}} \quad (6)$$

式中 P_g^{max} 、 P_g^{min} 分别为第 g 台分布式机组出力的上下限值。

分布式机组的爬坡约束如式(7)所示。

$$r_{g,\text{down}} \leq P_{g,s,t} - P_{g,s,t-1} \leq r_{g,\text{up}} \quad (7)$$

式中 $r_{g,\text{up}}$ 、 $r_{g,\text{down}}$ 分别为第 g 台分布式机组爬坡的上下限值。

1.2.4 储能机组约束

式(8)–(10)为储能机组的存储能量约束^[16, 23–24], 式(8)表示储能机组可存储能量上下限约束, 式(9)表示 t 时段储能机组的存储容量由 $t-1$ 时段储能机组的存储容量以及 t 时段的充放电功率决定, 式(10)表示在一天最后时段储能机组的存储容量与储能机组的初始存储容量相同。储能机组的

存储能量约束如下所示。

$$M_e^{\min} \leq M_{e,s,t} \leq M_e^{\max} \quad (8)$$

$$M_{e,s,t} = M_{e,s,t-1} + \left(n_{\text{ch}} P_{e,s,t}^{\text{ch}} - \frac{P_{e,s,t}^{\text{dis}}}{n_{\text{dis}}} \right) \Delta t \quad (9)$$

$$M_{e,s,T} = M_{e,s,0} \quad (10)$$

式中： $M_{e,s,t}$ 、 $M_{e,s,0}$ 与 $M_{e,s,T}$ 分别为第 s 个典型日负荷场景的 t 时段下第 e 台储能机组的存储电量、初始时段下的容量以及最终时段下的容量； $M_e^{\min}$ 与 $M_e^{\max}$ 分别为储能存储电量的下限与上限，其中上限为储能规划容量，下限视具体调度要求而定； n_{ch} 为储能机组充电效率系数； n_{dis} 为储能机组放电效率系数。

值得说明的是，约束式(8)–(10)所描述的储能机组的存储能力约束模型与文献[15]中利用储能机组的荷电状态(state of charge, SOC)所描述的储能剩余电量约束模型是等价的。

储能机组充放电功率约束，如式(11)–(12)所示。

$$0 \leq P_{e,s,t}^{\text{ch}} \leq k M_e^{\max} \gamma_{e,s,t}^{\text{ch}} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{e,s,t}^{\text{dis}} \leq k M_e^{\max} \gamma_{e,s,t}^{\text{dis}} \quad (12)$$

式中： k 为储能机组的容量与储能机组的充放电功率上限的比例， k 保持在技术合理的范围； $\gamma_{e,s,t}^{\text{ch}}$ 、 $\gamma_{e,s,t}^{\text{dis}}$ 分别为第 s 个典型日负荷场景的 t 时段下第 e 台储能机组的充放电状态变量，当储能机组处于充电状态时， $\gamma_{e,s,t}^{\text{ch}} = 1$ ， $\gamma_{e,s,t}^{\text{dis}} = 0$ ；当储能机组处于放电状态时， $\gamma_{e,s,t}^{\text{ch}} = 0$ ， $\gamma_{e,s,t}^{\text{dis}} = 1$ ；当储能机组处于静置状态时， $\gamma_{e,s,t}^{\text{ch}} = 0$ ， $\gamma_{e,s,t}^{\text{dis}} = 0$ 。

式(13)为储能物理运行特性约束，表示储能同一时段只能处于充电、放电或静置状态之一，如下所示。

$$\gamma_{e,s,t}^{\text{ch}} + \gamma_{e,s,t}^{\text{dis}} \leq 1 \quad (13)$$

值得说明的是，对于更加精确的储能建模来说，确实应该考虑储能损失系数在储能本身的运行调度方面所带来的影响^[24]，然而本文主要关注的是光储对比对配网规划总规划成本的宏观影响，且配网中所配置的储能容量一般较小，因此在本文的储能建模中忽略了储能装置的损失系数对容量的影响。

1.2.5 储能备用约束

在本文所研究的模型中，假设光伏的不确定性通过储能来消纳。由于光伏发电具有不确定性，容易出现扰动导致功率不平衡，因此需要系统中需

要投入一定量的备用以实时消纳光伏出力扰动。本节根据光伏机组的容量大小以配置备用量^[25]，建立储能备用约束，如式(14)–(21)所示。其中，式(14)–(15)为光伏波动约束，如下所示。

$$\Delta P_{s,t}^{\text{up}} = \sum_{p \in \Omega_{\text{PV}}} \varepsilon_{p,s,t}^{\text{up}} P_{p,s,t} \quad (14)$$

$$\Delta P_{s,t}^{\text{down}} = \sum_{p \in \Omega_{\text{PV}}} \varepsilon_{p,s,t}^{\text{down}} P_{p,s,t} \quad (15)$$

式中： $\Delta P_{s,t}^{\text{up}}$ 、 $\Delta P_{s,t}^{\text{down}}$ 分别为第 s 个典型日负荷场景的 t 时段下系统接入光伏总向上和向下波动量； $\varepsilon_{p,s,t}^{\text{up}}$ 、 $\varepsilon_{p,s,t}^{\text{down}}$ 分别为在第 s 个日负荷曲线场景的 t 时段下第 p 台光伏机组的向上和向下功率波动系数。

式(16)–(17)为储能响应功率约束，表示储能机组在原计划调度基础上加上响应光伏不确定性的部分出力不能大于储能机组的最大额定功率，如下所示。

$$P_{e,s,t}^{\text{ch}} + P_{e,s,t}^{\text{dis}} + \alpha_{e,s,t} \Delta P_{s,t}^{\text{up}} \leq k M_e^{\max} \quad (16)$$

$$P_{e,s,t}^{\text{ch}} + P_{e,s,t}^{\text{dis}} + \beta_{e,s,t} \Delta P_{s,t}^{\text{down}} \leq k M_e^{\max} \quad (17)$$

式中 $\alpha_{e,s,t}$ 、 $\beta_{e,s,t}$ 分别为在第 s 个日负荷曲线场景的 t 时段下第 e 台储能机组的向上和向下储备系数。

式(18)–(19)为储能响应容量约束，表示储能机组实时容量加上因响应光伏不确定性而造成的容量变化量不能大于储能机组的最大容量，如下所示。

$$M_e^{\min} \leq M_{e,s,t} + n_{\text{ch}} \alpha_{e,s,t} \Delta P_{s,t}^{\text{up}} \leq M_e^{\max} \quad (18)$$

$$M_e^{\min} \leq M_{e,s,t} - \frac{\beta_{e,s,t} \Delta P_{s,t}^{\text{down}}}{n_{\text{dis}}} \leq M_e^{\max} \quad (19)$$

式(20)–(21)为储能响应参与约束，如下所示。

$$\sum_{e \in \Omega_E} \alpha_{e,s,t} = 1 \quad (20)$$

$$\sum_{e \in \Omega_E} \beta_{e,s,t} = 1 \quad (21)$$

式(20)–(21)表示所有储能提供的向上和向下储备量应等于光伏的向上和向下波动量，即满足式(22)–(23)。

$$\sum_{e \in \Omega_E} \alpha_{e,s,t} \Delta P_{s,t}^{\text{up}} = \Delta P_{s,t}^{\text{up}} \quad (22)$$

$$\sum_{e \in \Omega_E} \beta_{e,s,t} \Delta P_{s,t}^{\text{down}} = \Delta P_{s,t}^{\text{down}} \quad (23)$$

值得说明的是，约束式(22)–(23)在本文中的作用仅为对式(20)–(21)进行解释，实际建模中并没有直接考虑约束式(22)–(23)。

经整理，面向配网的光储规划模型如下所示。

$$\begin{cases} \text{目标函数: 式(1)} \\ \text{约束条件: 式(2)—(21)} \end{cases} \quad (24)$$

至此, 面向配网的光储规划模型构建完成, 该模型为第 2 节光储最优配比显式表征方法的基础。

2 光储最优配比显式表征方法

通过上述分析, 本文得到了面向配网的光储规划模型, 该模型的求解本质是求解一个非线性问题。通过改变接入系统的光伏容量并连续求解该模型即可获得各种光伏容量下的最优储能容量, 但求解多个非线性问题运算负担过大, 且根据结果难以揭示其中复杂的影响机理, 缺少明确的物理意义。多参数规划可以将光伏容量视作规划参数, 从而获得最优储能容量与光伏容量的分段线性函数关系^[26]。因此, 为分析光伏容量与储能容量的最优配比以及对电力系统规划带来的影响, 本节基于多参数规划理论, 基于上一节所构建的面向配网的光储规划模型, 提出求解模型以获得储能容量与配网接入光伏容量以及配网总规划成本与配网接入光伏容量的解析表达式。

同时, 本节的核心问题是光储最优配比的显式表征求解, 其本质为一个多参数混合整数规划问题, 该问题难以求解。为此, 本文提出了两阶段的求解方法: 1) 选取典型规划场景固定该问题中的整数变量; 2) 求解固定整数后的多参数规划问题。方法的准确性验证将在算例分析中展开探讨。

2.1 约束线性转化

由于多参数规划无法求解非线性模型^[24, 27], 因此需要先对上述模型进行线性转换。

由于式(11)—(12)存在二次项 $M_e^{\max} \gamma_{e,s,t}^{\text{ch}}$ 与 $M_e^{\max} \gamma_{e,s,t}^{\text{dis}}$, 使得模型存在非线性约束, 难以求解。因此对式(11)—(12)进行如下转换^[28]。

$$0 \leq P_{e,s,t}^{\text{ch}} \leq k M_e^{\max} \quad (25)$$

$$0 \leq P_{e,s,t}^{\text{ch}} \leq \delta \cdot \gamma_{e,s,t}^{\text{ch}} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{e,s,t}^{\text{dis}} \leq k M_e^{\max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{e,s,t}^{\text{dis}} \leq \delta \cdot \gamma_{e,s,t}^{\text{dis}} \quad (28)$$

式中 δ 为足够大的常数。经过转换, 式(25)—(28)与式(11)—(12)等价。转换后的面向配网的光储规划模型如下所示。

$$\begin{cases} \text{目标函数: 式(1)} \\ \text{约束条件: 式(2)—(10)、(13)—(21)、(25)—(28)} \end{cases} \quad (29)$$

转换后的规划模型求解问题本质为混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题的求解, 利用商用求解器 Gurobi 可以对其轻松求解。

2.2 模型预求解

由于多参数规划无法直接对非凸模型进行求解, 而在面向配网的光储协同规划模型中存在整数变量 $\gamma_{e,s,t}^{\text{ch}}$ 、 $\gamma_{e,s,t}^{\text{dis}}$, 使得模型非凸, 无法用多参数规划直接对其进行求解。因此需要先对面向配网的光储协同规划模型进行预求解以获得在一定范围的接入系统光伏容量下的最优储能运行状态。对面向配网的光储协同规划模型进行预求解相当于求解一个 MILP 问题, 正如 2.1 节所述, 利用商用求解器 Gurobi 可以对其轻松求解, 得到整数变量的最优解 $\{\gamma_{e,s,t}^{\text{ch}*}, \gamma_{e,s,t}^{\text{dis}*}\}$ 。随后将整数变量固定, 即 $\gamma_{e,s,t}^{\text{ch}} = \gamma_{e,s,t}^{\text{ch}*}$, $\gamma_{e,s,t}^{\text{dis}} = \gamma_{e,s,t}^{\text{dis}*}$, 使得模型从面向配网的光储协同规划模型转变成线性凸模型, 此时转换后的模型适用于多参数规划求解。

值得说明的是, 储能装置的充放电状态对系统总规划成本的影响主要体现在储能运行成本方面, 而关于储能充电状态对储能运行成本的影响, 文献[24]已证明: 考虑通常情况下储能在电价较高的负荷高峰时段放电, 在电价较低的负荷低谷时段充电, 储能充放电状态对储能运行成本的影响较小, 因此本文所提方法具有一定的有效性。后续本文在 3.1 部分对预求解的有效性进行验证。

2.3 模型多参数规划求解

针对预求解模型获得的最优储能运行状态, 将模型中的储能充放电状态固定后, 通过多参数规划的方法获得储能容量与配网规划总体成本以及储能容量与配网接入光伏容量的解析表达式。

为便于推导, 将固定储能充放电状态后的光储规划问题写为以下紧凑形式^[24, 27]。

目标函数:

$$\min C = \mathbf{H}^T \mathbf{x} \quad (30)$$

约束条件:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{B}\mathbf{w} + \mathbf{b}(\boldsymbol{\lambda}) \quad (31)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为式(1)中所涉及的优化变量的紧凑堆叠形

式, 即 $\mathbf{x} = [\{M_e^{\max}, P_{e,s,t}^{\text{ch}}, P_{e,s,t}^{\text{dis}}\}_{e \in \Omega_E}, \{P_{g,s,t}\}_{g \in \Omega_G}]^T$; w 为规划参数, 在本文模型中 $w = M_p^{\max}$; λ 为对偶乘子; $\mathbf{H}$ 为目标函数中与优化变量相关的系数矩阵; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 与 $\mathbf{b}$ 分别为约束中与优化变量相关的系数矩阵、与规划参数相关的系数矩阵以及常数矩阵。

在多参数规划中, 当 w 不同时, 有不同的起作用和不起作用的约束集合。假设规划问题有 Y 组不同的约束集合, 且 $w = w^*$, $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$ 。这里 w^* 是一个常数, $\mathbf{x}^*$ 为 $w = w^*$ 时优化问题(30)–(31)的最优解。此时约束集合为 $k_{w^*} \triangleq (\hat{J}_{w^*}, J_{w^*})$, 其中:

对于起作用的约束集合, 有:

$$\mathbf{A}_{j_{w^*}} \mathbf{x}^* = \mathbf{B}_{j_{w^*}} w^* + \mathbf{b}_{j_{w^*}}(\lambda_{j_{w^*}}) \quad (32)$$

对于不起作用的约束集合, 有:

$$\mathbf{A}_{J_{w^*}} \mathbf{x}^* < \mathbf{B}_{J_{w^*}} w^* + \mathbf{b}_{J_{w^*}}(\lambda_{J_{w^*}}) \quad (33)$$

式中: 当规划参数为 w^* 时, $\hat{J}_{w^*}$ 与 J_{w^*} 分别为约束(31)中起作用的约束集合以及不起作用的约束集合; $\mathbf{A}_{j_{w^*}}$ 、 $\mathbf{B}_{j_{w^*}}$ 、 $\mathbf{b}_{j_{w^*}}$ 与 $\lambda_{j_{w^*}}$ 分别为起作用约束的优化变量相关系数矩阵、规划参数相关系数矩阵、常数矩阵以及对偶乘子矩阵; $\mathbf{A}_{J_{w^*}}$ 、 $\mathbf{B}_{J_{w^*}}$ 、 $\mathbf{b}_{J_{w^*}}$ 与 $\lambda_{J_{w^*}}$ 分别为不起作用约束的优化变量相关系数矩阵、规划参数相关系数矩阵、常数矩阵以及对偶乘子矩阵。

根据 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件可以得到以下表达式^[29]。

$$\mathbf{M}_{j_{w^*}} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^* \\ \lambda_{j_{w^*}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{H}^T \\ \mathbf{B}_{j_{w^*}} w^* + \mathbf{b}_{j_{w^*}} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{M}_{j_{w^*}} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{A}_{j_{w^*}}^T \\ \mathbf{A}_{j_{w^*}}^T & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

式中 $\mathbf{M}_{j_{w^*}}$ 为一个中间变量矩阵。

当 $\mathbf{M}_{j_{w^*}}$ 为满秩矩阵时 $\mathbf{x}^*$ 和 $\lambda_{j_{w^*}}$ 可以表示为 w^* 的线性函数, 如式(36)所示。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^*(w^*) \\ \lambda_{j_{w^*}}(w^*) \end{bmatrix} &= \mathbf{M}_{j_{w^*}}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{H}^T \\ \mathbf{B}_{j_{w^*}} w^* + \mathbf{b}_{j_{w^*}} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_x(w^*) w^* + \mathbf{U}_x(w^*) \\ \mathbf{R}_\lambda(w^*) w^* + \mathbf{U}_\lambda(w^*) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (36)$$

式(36)中满足以下式子。

$$\mathbf{M}_{j_{w^*}}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{j_{w^*}, 11}^{-1} & \mathbf{M}_{j_{w^*}, 12}^{-1} \\ \mathbf{M}_{j_{w^*}, 21}^{-1} & \mathbf{M}_{j_{w^*}, 22}^{-1} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_x(w^*) \\ \mathbf{R}_\lambda(w^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{j_{w^*}, 12}^{-1} \mathbf{B}_{j_{w^*}} \\ \mathbf{M}_{j_{w^*}, 22}^{-1} \mathbf{B}_{j_{w^*}} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_x(w^*) \\ \mathbf{U}_\lambda(w^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}_{j_{w^*}, 11}^{-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{M}_{j_{w^*}, 12}^{-1} \mathbf{b}_{j_{w^*}} \\ -\mathbf{M}_{j_{w^*}, 21}^{-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{M}_{j_{w^*}, 22}^{-1} \mathbf{b}_{j_{w^*}} \end{bmatrix} \quad (39)$$

式中: $\mathbf{R}_x(w^*)$ 与 $\mathbf{R}_\lambda(w^*)$ 分别为 $w = w^*$ 时 $\mathbf{x}^*$ 与 $\lambda_{j_{w^*}}$ 的解析表达式中规划参数相关的系数矩阵; $\mathbf{U}_x(w^*)$ 与 $\mathbf{U}_\lambda(w^*)$ 分别为 $w = w^*$ 时 $\mathbf{x}^*$ 与 $\lambda_{j_{w^*}}$ 的解析表达式中的常数矩阵。值得说明的是, 由于在本文模型中, 规划参数 $w = M_p^{\max}$, 为一维变量, 因此 $\mathbf{R}_x(w^*)$ 、 $\mathbf{R}_\lambda(w^*)$ 、 $\mathbf{U}_x(w^*)$ 与 $\mathbf{U}_\lambda(w^*)$ 均为列数为 1 的列向量。另外, $\mathbf{M}_{j_{w^*}}$ 可能由于优化问题发生退化而非满秩矩阵^[29]。当其为非满秩矩阵时, 可采用一致性纽带断裂准则(consistent tie breaking rule), 确保计算结果的唯一性^[24]。

进一步地可以得到 C 与 w^* 的线性函数为:

$$\begin{aligned} C &= \mathbf{H}^T \mathbf{x}^*(w^*) \\ &= \mathbf{H}^T (\mathbf{R}_x(w^*) \cdot w^* + \mathbf{U}_x(w^*)) \\ &= R_C(w^*) \cdot w^* + U_C(w^*) \end{aligned} \quad (40)$$

式中 $R_C(w^*)$ 与 $U_C(w^*)$ 分别为 C 的解析表达式中规划参数相关系数与常数项, $R_C(w^*) = \mathbf{H}^T \mathbf{R}_x(w^*)$, $U_C(w^*) = \mathbf{H}^T \mathbf{U}_x(w^*)$ 。

为能够在规划问题表达式(30)–(31)中保持相同的起作用(不起作用)约束集合, w 应满足以下条件。

$$\mathbf{A}_{J_{w^*}} \mathbf{x}^*(w) < \mathbf{B}_{J_{w^*}} w + \mathbf{b}_{J_{w^*}} \quad (41)$$

将式(36)–(39)代入式(41), 并进行线性变换, 可得到只关于 w 的条件约束, 如下所示。

$$\mathbf{a}_{w^*} w < \mathbf{b}_{w^*} \quad (42)$$

$$\mathbf{a}_{w^*} = \mathbf{A}_{J_{w^*}} \mathbf{M}_{j_{w^*}, 12}^{-1} \mathbf{B}_{J_{w^*}} - \mathbf{B}_{J_{w^*}} \quad (43)$$

$$\mathbf{b}_{w^*} = \mathbf{b}_{J_{w^*}} + \mathbf{A}_{J_{w^*}} \mathbf{M}_{j_{w^*}, 11}^{-1} \mathbf{H}^T - \mathbf{A}_{J_{w^*}} \mathbf{M}_{j_{w^*}, 12}^{-1} \mathbf{b}_{j_{w^*}} \quad (44)$$

式中 $\mathbf{a}_{w^*}$ 与 $\mathbf{b}_{w^*}$ 分别为条件约束(41)中与规划参数相关的系数矩阵以及与规划参数无关的常数项矩阵, 表达式如式(43)–(44)所示。

根据式(42), 定义:

$$\Omega_{CR} = \{w | \mathbf{a}_{w^*} w < \mathbf{b}_{w^*}\} \quad (45)$$

式中: Ω_{CR} 为规划参数相关的临界域^[30], 其含义为当 $w \in \Omega_{CR}$ 时, $\mathbf{x}^*$ 与 $\lambda_{j_{w^*}}$ 均可以表示为如式(36)所示的线性解析函数。即便规划参数 w 有所变化, 只要在临界域 Ω_{CR} 内, $\mathbf{x}^*$ 与 $\lambda_{j_{w^*}}$ 便可直接通过式(36)

直接将规划参数代入即可求得, 无需重新求解优化问题(30)–(31)。由此, 通过多参数规划可以得到多组关于规划参数的临界域 Ω_{CR} , 且在不同的 Ω_{CR} 上优化变量 x 以及总规划成本 C 可表示为规划参数 w 的线性函数。

根据以上推导可以得知, 将配网接入光伏容量作为规划参数, 固定储能充放电状态的面向配网的光储规划模型便可用多参数规划算法求解。利用现成的多参数规划求解工具 MPT3, 可以轻松对模型进行多参数规划求解, 最终得到式(46)–(47)。

$$M_e^{\max} = \begin{cases} R_{e,1}w + U_{e,1}, w \in \Omega_{CR,1} \\ R_{e,2}w + U_{e,2}, w \in \Omega_{CR,2} \\ \vdots \\ R_{e,N}w + U_{e,N}, w \in \Omega_{CR,N} \end{cases} \quad (46)$$

$$C = \begin{cases} R_{C,1}w + U_{C,1}, w \in \Omega_{CR,1} \\ R_{C,2}w + U_{C,2}, w \in \Omega_{CR,2} \\ \vdots \\ R_{C,N}w + U_{C,N}, w \in \Omega_{CR,N} \end{cases} \quad (47)$$

式中: N 为多参数规划求解最终求得的临界域组数; $\Omega_{CR,1}$ 、 $\Omega_{CR,2}$ 、 $\dots$ 、 $\Omega_{CR,N}$ 分别为第 1, 2, $\dots$, N 组临界域; $R_{e,1}$ 、 $R_{e,2}$ 、 $\dots$ 、 $R_{e,N}$ 以及 $U_{e,1}$ 、 $U_{e,2}$ 、 $\dots$ 、 $U_{e,N}$ 分别为第 1, 2, $\dots$, N 组临界域上优化变量第 e 台储能的规划容量 $M_e^{\max}$ 的解析表达式中与规划参数相关的系数以及常数项; $R_{C,1}$ 、 $R_{C,2}$ 、 $\dots$ 、 $R_{C,N}$ 以及 $U_{C,1}$ 、 $U_{C,2}$ 、 $\dots$ 、 $U_{C,N}$ 分别为第 1, 2, $\dots$, N 组临界域上目标函数值的解析表达式中规划参数相关系数以及常数项。

通过储能容量与配网接入光伏容量的解析表达式可以进一步得到最优光储配比与配网接入光伏容量的解析表达式。

$$\Theta = \begin{cases} \frac{R_{\Theta,1}}{w} + U_{\Theta,1}, w \in \Omega_{CR,1} \\ \frac{R_{\Theta,2}}{w} + U_{\Theta,2}, w \in \Omega_{CR,2} \\ \vdots \\ \frac{R_{\Theta,N}}{w} + U_{\Theta,N}, w \in \Omega_{CR,N} \end{cases} \quad (48)$$

式中: Θ 为最优光储配比; $R_{\Theta,1}$ 、 $R_{\Theta,2}$ 、 $\dots$ 、 $R_{\Theta,N}$ 以及 $U_{\Theta,1}$ 、 $U_{\Theta,2}$ 、 $\dots$ 、 $U_{\Theta,N}$ 分别为第 1, 2, $\dots$, N 组临界域上最优光储配比的解析表达式中的与规划参数相关系数以及常数项。

综上所述, 通过以上过程可以得到储能容量与

配网接入光伏容量的解析表达式、配网系统总规划成本与配网接入光伏容量的解析表达式以及最优光储配比与配网接入光伏容量的解析表达式。值得说明的是, 本文的研究中只关注研究工业界较为关注光伏和储能的最优配置容量、光伏和最优总规划成本之间的非线性关系, 而其他方面的影响因素(如负荷、系统拓扑等)则作为边界条件提前确定, 求解它们的关联关系本质为一个多参数混合整数规划问题, 具有科学性, 这也是工业界较为关注的问题。

通过对解析表达式进行分析可以清晰地了解到各种光伏容量下的最优储能容量以及最优光储对比对配网规划整体经济效益的影响机理, 可见系统接入光伏容量与储能最优规划容量以及规划总成本并非简单的单一线性关系, 同时系统的光储配比又对规划结果有着直接影响, 因此准确刻画系统最优光储对比对配网规划的宏观调控有着重要作用。

3 算例分析

本文采用 PJM 5 节点系统与 IEEE 141 节点系统验证所提方法的有效性与实用性。对于 PJM 5 节点系统, 在系统中加入 1 个光伏电站和 1 个储能电站, 同时考虑 2 种典型日负荷曲线, 光伏容量的规划范围为 0~70 kW。对于 IEEE 141 节点系统, 在系统中加入 5 个光伏电站和 5 个储能电站, 同时考虑 2 种典型日负荷曲线, 光伏容量的规划范围为 200~700 kW。时间间隔 $\Delta t = 1$, 总时段数 $|\Omega_T| = 24$ 。

本文将用所提方法与传统抽样法对算例进行求解, 同时以传统抽样法求解结果与求解时间为基准, 与本文所提方法进行对比, 以验证本文所提方法的准确性与高效性。对比方法如下。

M0: 传统抽样法;

M1: 本文所提光储最优配比显式表征方法。

本文中所有算例均在 Intel(R) Core(TM) i7-9750 H CPU @2.60 GHz、32 GB RAM 硬件环境下测试。算例系统中储能单位容量的建设投资成本 C_{inv} 为 2 000 元/kWh^[31], 分布式机组单位功率的运行成本 C_g 为 1 元/kWh, 储能机组单位充放电量的维护成本 C_e 为 1 元/kWh^[32], 储能充放电效率均为 95%。

3.1 所提方法准确性验证

本小节在 PJM 5 节点系统与 IEEE 141 节点系统中验证光储最优配比显式表征的准确性。通过对第 2 节所提出的两阶段模型进行求解, 得到规划成本以及储能最优规划容量与光伏容量的解析表达式。

在 PJM 5 节点系统中, 本文所提方法共刻画出 9 个临界域, 每一种颜色代表一个临界域, 如图 2—3 所示。

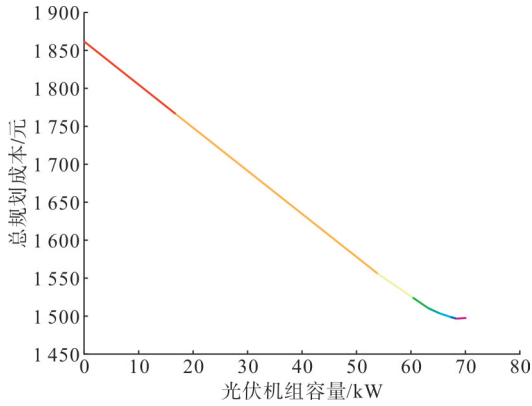


图2 PJM 5节点系统算例中使用本文所提方法所求的总规划成本与光伏容量的解析表达式的函数曲线图

Fig. 2 Function curve of the analytical expression between the planning costs and the PV capacities using the proposed method in the case of the PJM 5-bus system

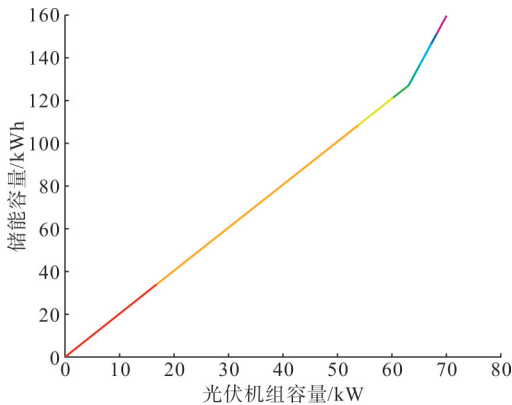


图3 PJM 5节点系统算例中使用本文所提方法所求的储能规划容量与光伏容量的解析表达式的函数曲线图

Fig. 3 Function curve of the analytical expression between the energy storage planning capacities and the PV capacities using the proposed method in the case of the PJM 5-bus system

在不同的临界域下, 存在不同的解析关系。如: 在临界域 $\Omega_{CR,4}$ 与 $\Omega_{CR,5}$ 中, 系统总运行成本 C 以及储能规划容量 $M_e^{\max}$ 与规划参数 $M_p^{\max}$ 的解析关系可以表示为:

$$M_e^{\max} = \begin{cases} 2.01M_p^{\max}, & M_p^{\max} \in \Omega_{CR,4} \\ 4.68M_p^{\max} - 168, & M_p^{\max} \in \Omega_{CR,5} \end{cases} \quad (49)$$

$$C = \begin{cases} -4.91M_p^{\max} + 1820.00, & M_p^{\max} \in \Omega_{CR,4} \\ -3.30M_p^{\max} + 1718.50, & M_p^{\max} \in \Omega_{CR,5} \end{cases} \quad (50)$$

同时, 在 PJM 5 节点系统中使用本文所提方法所求的储能设备建设投资成本与光伏容量的关联关系以及配网系统在规划周期内的运营成本与光伏容量的关联关系如图 4—5 所示。

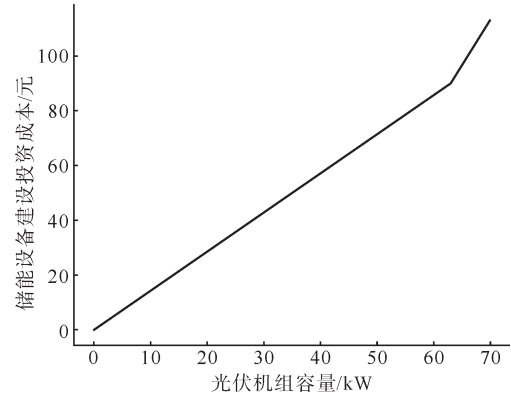


图4 PJM 5节点系统算例中使用本文所提方法所求的储能设备建设投资成本与光伏容量的关联关系

Fig. 4 Correlation between the investment costs of energy storage and PV capacities using the proposed method in the case of the PJM 5-bus system

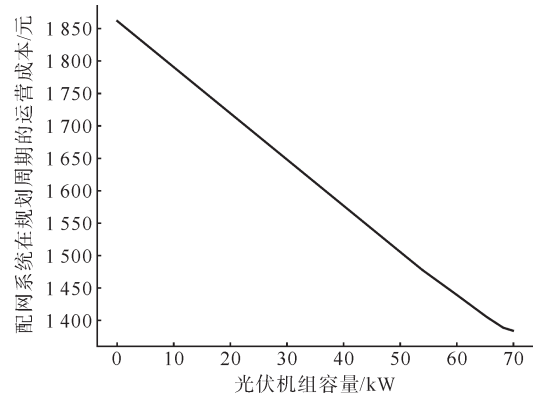


图5 PJM 5节点系统算例中使用本文所提方法所求的配网系统在规划周期内的运营成本与光伏容量的关联关系

Fig. 5 Correlation between the operating costs of the distribution system over the planning cycle and PV capacities using the proposed method in the case of the PJM 5-bus system

在 IEEE 141 节点系统中, 本文所提方法共刻画出 13 个临界域, 系统总规划成本以及储能规划容量与规划参数的解析关系如图 6—7 所示。

同时, 在 IEEE 141 节点系统中使用本文所提方

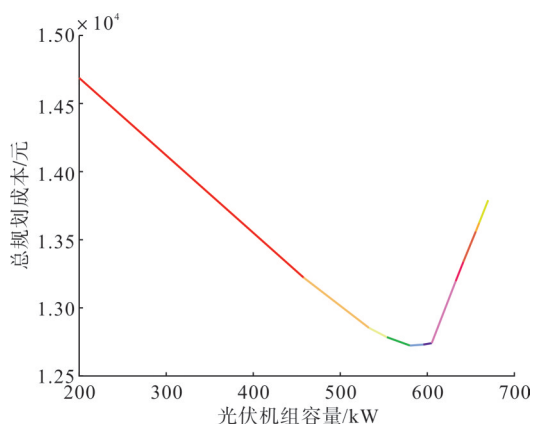


图6 IEEE 141 节点系统算例中使用本文所提方法所求的总规划成本与光伏容量的解析表达式的函数曲线图

Fig. 6 Function curve of the analytical expression between the planning costs and the PV capacities using the proposed method in the case of the IEEE 141-bus system

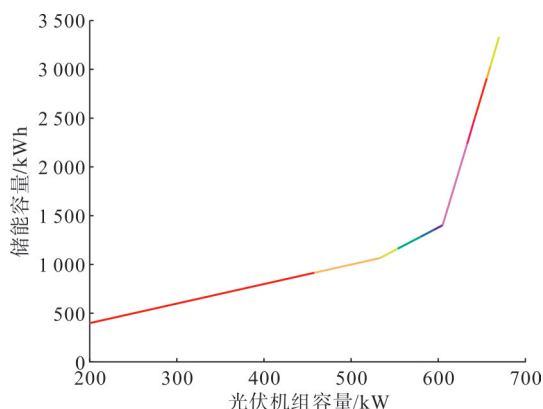


图7 IEEE 141 节点系统算例中使用本文所提方法所求的储能规划容量与光伏容量的解析表达式的函数曲线图

Fig. 7 Function curve of the analytical expression between the energy storage planning capacities and the PV capacities using the proposed method in the case of the IEEE 141-bus system

法所求的储能设备建设投资成本与光伏容量的关联关系以及配网系统在规划周期内的运营成本与光伏容量的关联关系如图8—9所示。

本文将从两方面来论证分析所提方法的准确性: 规划方法的有效性以及多参数规划求解的准确性。

3.1.1 规划方法有效性

在面向配网的光储协同规划问题中, 光伏发电存在不确定性, 需要配置一定容量的储能机组以消纳光伏发电。当光伏机组规划容量小于一定阈值时, 光伏机组规划容量越高, 系统总规划成本越小, 光储协同规划经济效益越高, 这是因为光伏机

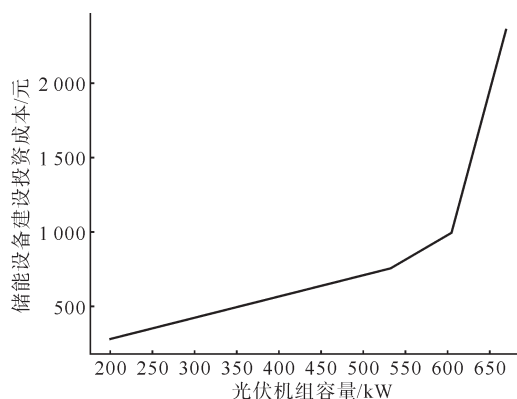


图8 IEEE 141 节点系统算例中使用本文所提方法所求的储能设备建设投资成本与光伏容量的关联关系

Fig. 8 Correlation between the investment costs of energy storage and PV capacities using the proposed method in the case of the IEEE 141-bus system

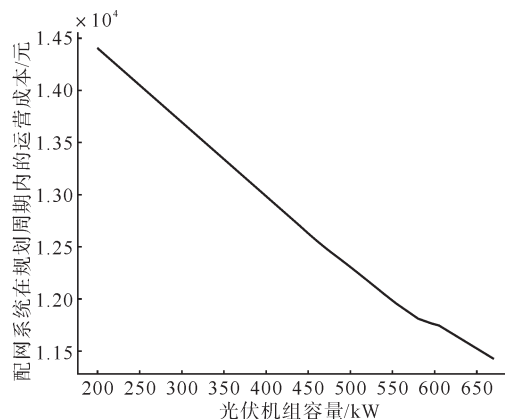


图9 IEEE 141 节点系统中使用本文所提方法所求的配网系统在规划周期内的运营成本与光伏容量的关联关系

Fig. 9 Correlation between the operating costs of the distribution system over the planning cycle and PV capacities using the proposed method in the case of the IEEE 141-bus system

组的发电成本较低, 投建光伏机组可以有效减少其他发电成本较为昂贵的机组出力, 由此降低规划周期内配网系统的运营成本以获取收益, 如图5和图9所示, 随着光伏容量的增长, 系统的运营成本呈现下降趋势。同时, 由于光伏机组容量较低, 光伏机组容量增加无需增设大量储能机组以消纳光伏发电的不确定性。因此, 随着光伏机组规划容量的增长, 虽然储能设备的投资成本也在增长, 但规划周期内配网系统的运营成本减少的更多。如图2和图6所示。当光伏容量低于62 kW和530 kW时, 随着光伏容量的增长, 总规划成本曲线呈现下降趋势。

储能设备的增设不仅会增加储能的投资成本,

在规划期间储能的运行同样产生运行成本。储能设备越多,运行成本越高,因此随着光伏机组规划容量的增加,储能的运行成本也在增加。因此当光伏机组规划容量大于一定阈值时,配网系统的运营成本减少的速率会减缓,总规划成本随光伏机组容量的增加而下降的趋势变缓。如图 2 和图 6 所示。当光伏容量高于 62 kW 低于 68 kW 和高于 530 kW 低于 610 kW,随着光伏容量的增长,总规划成本曲线的下降趋势变缓,逐步趋向于极值点。

当光伏机组规划容量大于一定阈值时,由于光伏机组规划容量较高,光伏机组容量增加需要配置大量储能机组以消纳光伏发电的不确定性,如图 3 和图 7 所示,当光伏容量高于 68 kW 和 610 kW 后,储能机组的规划容量骤增;同时储能设备投资成本也出现骤增,如图 4 和图 8 所示。此时光伏机组规划容量越高,规划周期内配网系统的运营成本的减少量低于储能机组的规划成本的增长量,因此光伏机组规划容量越高,系统总规划成本越大,光储协同规划经济效益越低,如图 2 和图 6 所示,当光伏容量高于 68 kW 和 610 kW 时,随着光伏容量的增长,总规划成本曲线呈现上升趋势。

同时,储能能够缓解网络阻塞^[33],通过“低充高放”的方式,降低高峰负荷时段通过特定输电线路的潮流,降低通过特定输电线路的潮流,避免网络过载,避免或延缓输电投资。同时,随着光伏接入配网的规模不断扩大,光伏功率波动也容易导致传输堵塞^[34]。因此配置适量的储能,能够缓解配网系统中光伏功率波动导致的线路潮流堵塞的情况,从而增加配网光伏的可接入容量。

以 PJM 5 节点系统线路 3 为例,本文对比了系统在接入 10 kW 光伏后规划储能机组前后的各时段潮流分布情况,如图 10 所示。在未规划储能机组时,线路 3 在 11、16、17、19、23 时段内接近满载,而在 18 与 20 时段内满载,线路阻塞。当规划了 40 kWh 储能,线路接近满载和已满载的情况得以缓解,此时系统可以配置更多的光伏而不会使得线路堵塞,由此验证了随着系统接入光伏机组增长,所需配置的储能机组也需要随着增加,如图 3 和图 7 所示。由此验证了本文规划方法的有效性。

3.1.2 多参数规划求解方法的准确性

在本节中将对比所提方法与传统抽样法这两种方法在刻画系统总成本以及储能规划容量与规划参

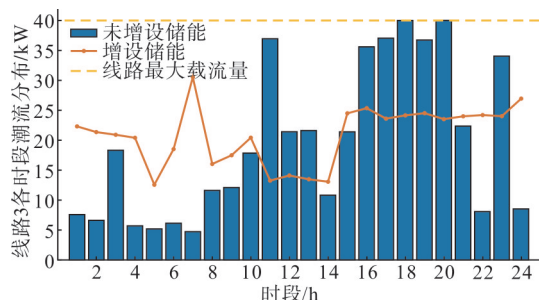


图 10 不同的储能机组投建情况下 PJM 5 节点系统中线路 3 在各时段下线路潮流对比

Fig. 10 Comparison of power flow of Branch 3 in different period in the case of the PJM 5-bus system under different conditions of energy storage construction

数的映射关系方面的求解结果,以验证多参数规划求解方法的准确性。传统抽样法通过等间抽样并求解,基于求解结果刻画待求量与规划参数的映射关系,算例设置如表 1 所示。

表 1 传统抽样法算例设置

Tab. 1 Case setting for conventional sampling method

算例	光伏容量范围/kW	样本数量
PJM 5 节点系统	0~70	700
IEEE 141 节点系统	200~700	1 000

PJM 5 节点系统算例的对比结果如图 11—12 所示。对比结果表明,与传统抽样法相比,本文所提方法能获得与之相似的结果。同时在对系统总成本与规划参数的关系刻画中,曲线最低点,即配网规划经济效益最大点,本文所提方法与传统抽样法相差无异。

使用商用求解器,在算例中设置的光伏容量范围内对式(2)—(10)、式(13)—(21)、式(25)—

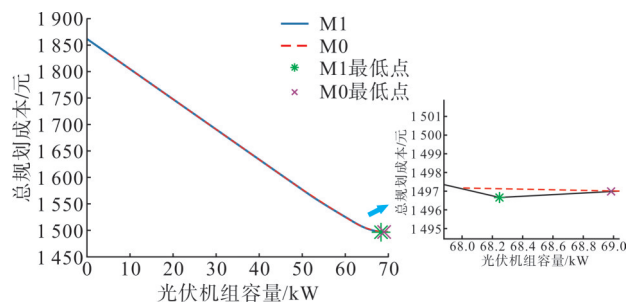


图 11 PJM 5 节点系统总规划成本与光伏容量的映射关系求解效果对比

Fig. 11 Comparison of solving effects of mapping relationship between planning costs and PV capacities in the case of the PJM 5-bus system

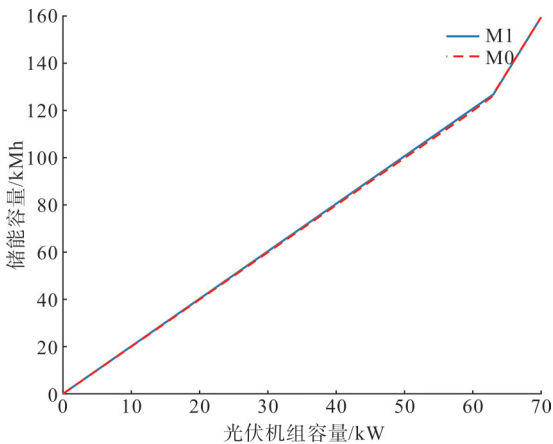


图 12 PJM 5 节点系统储能规划容量与光伏容量的映射关系求解效果对比

Fig. 12 Comparison of solving effects of mapping relationship between the energy storage planning capacity and PV capacity in the case of the PJM 5-bus system

(28)模型直接求解以获得配网规划的经济效益全局最优点, 并将 M0、M1 方法所求得的经济效益最大点与之进行比较, 结果如表 2 所示, 本文所提方法更加接近全局最优点。

表 2 经济效益全局最优点比较
Tab. 2 Comparison of global optimal point for economic benefits

算例	实际值/元	所用方法	计算值/元
PJM 5 节点算例	3 073. 89	M0	3 074. 22
		M1	3 073. 92
IEEE 141 节点算例	26 134. 49	M0	26 140. 49
		M1	26 134. 55

从算例分析结果也可看出本文所提方法尽管在预求解阶段会引入存在最优性条件变化引起求解结果不准的问题, 整数变量表征的储能运行状态会对其他机组的调度运行以及运行成本造成影响, 但在规划层面整数变量的变化模式对整体的运行成本较小, 并且当面向的规划场景与所选取典型场景较为接近时, 整数变量的固定对整体规划成本也较小。因此, 当典型场景选取合适或固定的整数变量符合规划长时间尺度调度规律时, 本文所提方法具有一定的有效性。

同时, 区别于 M0 仅通过抽样分析光储最优配比, 本文所提方法给出的配网规划光储最优配比的显式表达式可为电网规划人员提供更清晰的宏观指导, 具有一定应用价值。

3.2 所提方法高效性验证

在本节中通过对比本文所提方法与传统抽样法的求解时间来验证本文所提方法的高效性。同样地, 用传统抽样法求解刻画系统总成本以及储能规划容量与规划参数的关系, 等间抽样并求解, 算例设置同表 1, 同时对第 2 节所提出的两阶段模型进行求解, 建模及求解时间如表 3 所示。从表 3 可得, 所提方法的计算效率远高于传统抽样法。

表 3 求解时间比较
Tab. 3 Comparison of solving time

算例	所用方法	计算时间/s
PJM 5 节点算例	M0	1 933. 21
	M1	140. 63
IEEE 141 节点算例	M0	18 404. 35
	M1	160. 87

从表 3 可得, 本文所提方法仅需一次求解即可获取光储配比的解析表达式, 相较于传统方法每次求解配网光储规划问题均需重新建模求解, 因此大幅提高了配网光储最优配比分析的建模及求解效率。

4 结论

为了准确量化分析系统光伏配比对配网系统规划经济效益, 辅助配网规划决策制定, 本文提出了一种面向配网规划的光储最优配比显式表征及量化分析方法。该方法采用多参数规划获取配网规划最优光储配比的显式表达式, 并针对多参数规划方法难以应用于混合整数线性规划的难题提出了一种线性规划方法, 所提方法可适用于任意混合整数线性规划问题, 具有一定的可移植性。通过在 PJM 5 节点系统与 IEEE 141 节点系统验证所提方法的准确性与有效性。主要结论包括以下几点。

- 1)为分析系统光伏配比对配网系统规划经济效益提供模型基础, 提出了面向配网的光储规划模型; 为解决模型中储能物理状态约束导致模型中存在整数变量、模型存在非线性约束的问题, 提出了一种线性转化的方法, 通过对光储规划模型进行预求解, 得到储能最佳运行状态, 并将其固定, 将模型中的非线性约束转化为线性约束。
- 2)为获得储能容量与配网规划总体成本以及储能容量与配网接入光伏容量的解析表达式, 基于多参数规划理论, 在固定储能运行状态变量下对光储

规划模型进行多参数求解。通过解析表达式获得各种光伏容量下的最优储能容量以及最优光储配比对配网规划整体经济效益的影响机理,以辅助配网规划方案的制定。

本文所研究对象为包含储能与光伏机组的配电网规划问题,具有一定的现实意义。此外,随着新能源在配电网中的渗透率不断增加以及储能技术的不断发展,光伏与储能的协同运作在电力系统中的作用与意义日趋增大;同时,储能能够缓解网络阻塞,通过“低充高放”的方式,降低高峰负荷时段通过特定输电线路的潮流,降低通过特定输电线路的潮流,避免网络过载,避免或延缓输电投资。同时,随着光伏接入配网的规模不断扩大,光伏功率波动也容易导致传输堵塞。因此配置适量的储能,能够缓解配网系统中光伏功率波动导致的线路潮流堵塞的情况,从而增加配网光伏的可接入容量。如何通过光储协同规划以优化配网系统潮流分布,以满足高比例新能源接入的情况下缓解线路堵塞、提高配网运行的经济性与可靠性将是后续研究的重点。在后续研究中也针对第一阶段储能装置固定对求解结果影响的问题,进一步探索所提方法的适用性;并且将考虑配网精细化建模,如将向主网购电、弃光行为考虑到模型中去。

参考文献

- [1] 高庆忠,赵琰,穆昱壮,等.高渗透率可再生能源集成电力系统灵活性优化调度[J].电网技术,2020,44(10):3761-3768.
GAO Qingzhong, ZHAO Yan, MU Yuzhuang, et al. Flexibility optimal dispatch of high-penetration renewable energy integrated power systems [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3761-3768.
- [2] 胡丹尔,彭勇刚,韦巍,等.多时间尺度的配电网深度强化学习无功优化策略[J].中国电机工程学报,2022,42(14):5034-5045.
HU Daner, PENG Yonggang, WEI Wei, et al. Multi-timescale deep reinforcement learning for reactive power optimization of distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5034-5045.
- [3] 李浩,曹华珍,吴亚雄,等.含光伏低压配电网末端功率-电压控制方法[J].南方电网技术,2022,16(11):139-148.
LI Hao, CAO Huazhen, WU Yaxiong, et al. Edge-side power-voltage control method of low voltage distribution network with PV systems [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(11): 139-148.
- [4] 苏海峰,胡梦锦,梁志瑞.基于时序特性含储能装置的分布式电源规划[J].电力自动化设备,2016,36(6):56-63.
SU Haifeng, HU Mengjin, LIANG Zhirui. Distributed generation & energy storage planning based on timing characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 56-63.
- [5] 何耿生,陈晖,张世旭,等.储能提升高比例新能源基地低碳-经济-可靠性能的效益分析[J].南方电网技术,2024,18(4):120-129.
HE Gengsheng, CHEN Hui, ZHANG Shixu, et al. Benefit analysis of energy storage to improve low carbon, economy and reliability performance of high proportion renewable energy bases [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 120-129.
- [6] 叶琳浩,申展,许峰,等.考虑光伏不确定性和时序相关性的分布鲁棒光储协同优化配置方法[J].南方电网技术,2023,17(4):132-143.
YE Linhao, SHEN Zhan, XU Feng, et al. Distributionally robust collaborative optimal allocation method of photovoltaic and energy storage considering photovoltaic uncertainty and temporal correlation [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 132-143.
- [7] 吴涵,孙力文,项晟,等.计及可再生能源与负荷高维时序相关性的主动配电网扩展规划[J].电力系统自动化,2022,46(16):40-51.
WU Han, SUN Liwen, XIANG Sheng, et al. Expansion planning of active distribution network considering high-dimensional temporal correlation between renewable energy and load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 40-51.
- [8] 王阳,刘希喆.光储充电站经济调度规划与容量配置分析[J].南方电网技术,2022,16(11):1-8.
WANG Yang, LIU Xizhe. Economic dispatching planning and capacity allocation analysis of photovoltaic-storage charging station [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(11): 1-8.
- [9] 丁明,方慧,毕锐,等.基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J].中国电机工程学报,2019,39(8):2187-2201.
DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187-2201.
- [10] 金楚,周博,艾小猛,等.考虑光储联合系统参与频率响应的储能容量优化配置方法[J].全球能源互联网,2018,1(3):361-368.
JIN Chu, ZHOU Bo, AI Xiaomeng, et al. Optimal configuration of energy storage capacity with PV-storage system participating in frequency regulation service [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 361-368.
- [11] 茆美琴,刘云晖,张榴晨,等.含高渗透率可再生能源的配电网广义储能优化配置[J].电力系统自动化,2019,43(8):77-85.
MAO Meiqin, LIU Yunhui, ZHANG Liuchen, et al. Optimal configuration of generalized energy storage in distribution network with high-penetration renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 77-85.
- [12] 赵波,包侃侃,徐志成,等.考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J].中国电机工程学报,2015,35(21):5465-5474.
ZHAO Bo, BAO Kankan, XU Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5465-5474.

- [13] OH H. Optimal planning to include storage devices in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1118 – 1128.
- [14] PANDZIC H, WANG Y, QIU T, et al. Near optimal method for siting and sizing of distributed storage in a transmission network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2288 – 2300.
- [15] LIU Y, DU W, XIAO L, et al. A method for sizing energy storage system to increase wind penetration as limited by grid frequency deviations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(1): 729 – 737.
- [16] BAYRAM I, ABDALLAH M, TAJER A, et al. A stochastic sizing approach for sharing-based energy storage applications [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3): 1075 – 1084.
- [17] NAZIR N, ALMASSALKHI M. Guaranteeing a physically realizable battery dispatch without charge-discharge complementarity constraints [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 2473 – 2476.
- [18] 刘飞,熊晓琪,查鹏程,等. 直流配电网网架结构与分布式光伏多目标协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3754 – 3764.
LIU Fei, XIONG Xiaoqi, ZHA Pengcheng, et al. Multi-objective collaborative optimization for dc distribution network configuration and distributed photovoltaic [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3754 – 3764.
- [19] 张峰,杨志鹏,张利,等. 计及多类型需求响应的孤岛型微能源网经济运行[J]. 电网技术, 2022, 44(2): 547 – 555.
ZHANG Feng, YANG Zhipeng, ZHANG Li, et al. Optimal operation of islanded micro energy grid with multi-type demand responses [J]. Power System Technology, 2022, 44(2): 547 – 555.
- [20] 彭春华,姜治,孙惠娟,等. 路—电耦合配电网调度与充电策略协同鲁棒优化[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2762 – 2773.
PENG Chunhua, JIANG Zhi, SUN Huijuan, et al. Coordinated robust optimization of distribution network scheduling and charging strategy with traffic-grid coupling [J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2762 – 2773.
- [21] 黄弦超,封钰,丁肇豪,等. 多微网多时间尺度交易机制设计和交易策略优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 77 – 88.
HUANG Xianchao, FENG Yu, DING Zhaohao, et al. Design of multi-time scale trading mechanism and trading strategy optimization for multiple microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 77 – 88.
- [22] 张津琛,王旭,蒋传文,等. 计及交通流量不确定性的多网耦合综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3081 – 3093.
ZHANG Jinhui, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Optimal scheduling method of multi-network regional integrated energy system based on traffic flow uncertainty [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3081 – 3093.
- [23] 王荔妍,陈启鑫,何冠楠,等. 考虑电池储能寿命模型的发电计划优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 93 – 100.
WANG Liyan, CHEN Qixin, HE Guannan, et al. Generation planning optimization considering battery energy storage life model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 93 – 100.
- [24] 李中浩,余娟,杨知方,等. 精准计及大规模储能电池寿命的电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(19): 7371 – 7383.
- LI Z, YU J, YANG Z, et al. Economic dispatch of power system accurately considering the life of large-scale energy storage battery [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(19): 7371 – 7383.
- [25] QIU T, XU B, WANG Y, et al. Stochastic multistage coplaning of transmission expansion and energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(1): 643 – 651.
- [26] THOMAS G, JOZEF N. Multiparametric linear programming [J]. Management Science, 1972, 18(7): 406 – 422.
- [27] LIN W, YANG Z, YU J, et al. Determination of transfer capacity region of tie lines in electricity markets: theory and analysis [J]. Applied Energy, 2019, 23(9): 1141 – 1458.
- [28] ZENG B, DONG H, XU F, et al. Bilevel programming approach for optimal planning design of EV charging station [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2314 – 2323.
- [29] LIN W, YANG Z, YU J, et al. Tie-line power transmission region in a hybrid grid: fast characterization and expansion strategy [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2222 – 2231.
- [30] PISTIKOPOULOS E, GEORGIADIS M, DUA V. Multi-parametric programming: theory, algorithms, and applications [M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2007.
- [31] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组,王松岑,来小康,等. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3 – 8, 30.
Consulting Group of State Grid Corporation of China to Prospects of New Technologies in Power Systems, WANG S, LAI X, et al. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3 – 8, 30.
- [32] 王斯好. 面向调频市场机制的虚拟发电厂组建于竞价策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [33] 汤明润,李若阳,刘慕然,等. 电力系统稳态下可再生能源大规模接入量预测[J/OL]. 中国电力, 1 – 8 [2024 – 07 – 03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20240702.1148.004.html>.
TANG Mingrun, LI Ruoyang, LIU Muran, et al. Prediction of large-scale renewable energy access under steady state of electric power system [J/OL]. Electric Power: 1 – 8 [2024 – 07 – 03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20240702.1148.004.html>.
- [34] 葛磊蛟,杜天硕,孙冰. 分布式光伏功率数据的IMOWOA和LightGBM混合虚拟采集方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 1035 – 1047.
GE Leijiao, DU Tianshuo, SUN Bing. Hybrid virtual collection method of IMOWOA and LightGBM for distributed PV power data [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1035 – 1047.

收稿日期: 2023-07-14;网络首发日期:2024-05-22

作者简介:

王旭晴(1981), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为电力运行规划与优化, 476403190@qq.com;

裴向阳(1980), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力运行规划与优化, 40825451@qq.com;

杨林泽(2001), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力运行规划与优化, linzer_yang@163.com。

征 稿 启 事

《南方电网技术》是由中国南方电网公司主管、南方电网科学研究院有限责任公司主办的电力技术类科技期刊,向国内外公开发行人。刊登电力系统的科研、规划、设计、工程、生产运行、设备和系统维护等方面的成果、经验和动态,尤其是科研创新方面的论文。设有特约专稿、高压直流输电、高电压与绝缘、系统分析与运行、控制与保护、调度与通信、输变电技术、电力技术经济、智能电网、分布式电源与微电网、低碳电力等栏目。热烈欢迎国内外的电力研究人员、工程技术人员、大专院校师生踊跃投稿。

1 文稿要求

1) 文稿应未在其他刊物上发表过,译文稿件须附上原作者的书面许可证明。内容要有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说理严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。

2) 学术论文请按 GB 7713—1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过 9 000 字(包括图表所占篇幅)为宜。同时请写明如下 a、b、c、d、e 五项:

a) 作者署名(不宜超过 7 位)、作者单位、地址、电话、email 信箱和邮政编码;

b) 论文题目和作者单位英译文,作者姓名的汉语拼音;

c) 作者的简历,包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称、学位、当前从事的研究或工作等项;

d) 350 字左右的中文摘要,3~8 个关键词,以及摘要和关键词相应的英文文本。摘要采用第三人称写法,内容包括论文的目的、方法、结果和结论;

e) 若为国家基金资助项目或部、省级重大科研攻关项目,需提供项目名称及编号。

2 书写格式

1) 要求文稿正文字号为 5 号,汉字字体为宋体,英数字体为 Times New Roman,希腊字体为 Symbol。文稿须采用可编辑的电子文档形式。

2) 计量单位采用国家法定计量单位和符号,不能用“大气压”、“kgf/cm²”、“卡”、“ppm”等已废除的计量单位。

3) 文中和公式中容易混淆的字符请注明文种(希文、英文、罗马字等)、大小写、上下标及上下标字母含义,表示矢量及矩阵的字符用黑斜体表示或特别注明。

4) 文稿标题中不宜用缩略词(化学符号和公知公用者除外);摘要和正文中的缩略词在第一次出现时必须写出全称,后加括号附缩略词。

3 表格、插图及参考文献

1) 表格尽量采用“三线表”。表格的上方写表序和表名。表名应有自明性且中文、英文表名并列。表注放在表底,缩入 1 个汉字以“注:”起头排版。

2) 插图的下放应有图序和图名。图名应有自明性且中英文图名并列。工程图、电气图和函数图采用 AutoCAD、

Adobe Illustrator 或 Corel DRAW 软件绘制,工程图和电气图要符合国家标准规定,函数图要标明曲线序号及其注释,坐标轴上要有标值、标目,注明物理量和单位;数码照片图具备 200 万总像素以上。

3) 图片和表格中的文字、变量、单位和数字要齐全、清晰。

4) 参考文献应选用公开发表的资料,按引用的先后次序列表于文后,以[1]、[2]…标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《信息与文献 参考文献著录规则,GB/T 7714—2015》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范,CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。中文参考文献后要并列其英文译文(如示例[6]所示)。

文献类型及其标识为:普通图书[M];会议论文[C];报纸文章[N];期刊文章[J];学位论文[D];报告[R];标准[S];专利[P];汇编[G];档案[B];古籍[O];参考工具[K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z]。网上期刊[J/OL];网上电子公告[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

4 投稿

1) 请登录《南方电网技术》编辑部网站 <https://nfdwjs.csg.cn>,选择“作者登录”,登录或注册登录后选择投稿并按提示操作,登录方面出现问题请致电 020-36625646 咨询。

2) 投稿时务必附上联系电话(手机为佳)。

3) 编辑部不保证留存稿件,请作者自留底稿。稿件评审进程和结论可在《南方电网技术》编辑部网站上即时查询。作者也可致电 020-36625642、36625643 或发送电子邮件到 nfdwjs@csg.cn 向编辑部了解审稿情况。

4) 文章一经发表,编辑部便取得作者的自动授权,可将文章收录入本刊网站,及与本刊有合作关系的数据库。

参考文献著录格式示例:

- [1] 刘国钧,陈绍业,王凤翥. 图书馆目录[M]. 北京:高等教育出版社,1957:15-18.
- [2] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集. 西安:西安电子科技大学出版社,1996:468-471.
- [3] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的 LBB 分析[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,1997.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则:GB/T 7714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 邓一刚. 全智能节电器:200610171314.3[P]. 2006-12-13.
- [6] 陈祥. 无线技术在现代电网管理中的应用与展望[J]. 南方电网技术,2009,3(6):85-89.
CHEN Xiang. Development of wireless technology in modern power grid management and its perspective [J]. Southern Power System Technology, 2009,3(6):85-89.
- [7] 王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[EB/OL]. (1998-08-16) [1998-10-04]. <http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>.

《南方电网技术》编辑部