

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180607

考虑时序特性的配电网风-光-储随机规划模型

石玉东¹, 刘晋源², 徐松², 蒋卓臻², 高红均², 刘俊勇², 吕林²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610064; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对分布式电源(Distributed Generation, DG)的不确定性和时序特性, 构建了考虑时序特性的配电网风-光-储随机规划模型。首先对风电和光伏的时序特性和不确定性概率分布进行详细建模, 并给出储能系统的充放电、容量限制约束模型。为充分融入随机规划, 采用 ARMA 模型对风-光的不确定性运行工况进行场景抽取, 并通过 Kantorovich 方法筛选获得 10 组典型场景。此外, 建立以投资成本和运行成本为综合优化目标, 二阶锥松弛支路潮流、储能、DG 运行相关约束、安全约束等为约束条件的风-光-储投资随机规划模型。最后, 通过修改的 IEEE33 节点系统进行算例分析, 验证了该模型的有效性。

关键词: 配电网; 随机规划; 分布式能源; 时序特性负荷

Integrated wind-photovoltaic-storage stochastic planning model considering time-varying characteristics in distribution network

SHI Yudong¹, LIU Jinyuan², XU Song², JIANG Zhuozhen², GAO Hongjun², LIU Junyong², LÜ Lin²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610064, China; 2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on the uncertainty and time-varying characteristics of Distributed Generation (DG), a wind-photovoltaic-storage stochastic planning model of distribution network is presented in this paper. Firstly, the time-varying and uncertainty probability distribution of Wind Turbine Generation (WTG) output and Photovoltaic Generation (PVG) output are modeled in detail. The charging and discharging constraint and capacity constraint model of Energy Storage System (ESS) is also given. In order to make the planning model fully integrated into the stochastic programming approach, the ARMA model is used to generate a large amount of uncertain operation conditions of the wind power and solar power. Then 10 typical scenarios are selected from above various conditions by the Kantorovich method. In addition, a wind-photovoltaic-storage investment stochastic planning model is presented, which regards investment cost and operation cost as a comprehensive optimization goal while satisfying second-order cone relaxation based branch power flow model, operation constraints related energy storage and DG, security constraints, etc. Finally, the validity of proposed model is verified by the modified IEEE 33-node system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51807125) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. YJ201750).

Key words: distribution network; stochastic programming; distributed generation (DG); time-varying characteristic

0 引言

伴随着经济的发展, 电力需求与日俱增, 为了应对环境与发展的问題, 分布式电源(Distributed Generation, DG)以其安全可靠、发电方式灵活、环

保清洁等优点被广大学者深入研究^[1-6]。而风力发电(Wind Turbine Generation, WTG)、光伏发电(Photovoltaic Generation, PVG)以及负荷需求存在一定的不确定性和时序特性, 因此对配电网的规划和研究, 考虑时序特性以及不确定性具有重要意义。

文献[7]建立了主动配电网规划-运行双层联合优化模型, 上层主要决策线路改造和新建、储能、

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51807125); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(YJ201750)

DG的选址定容，下层为典型日下DG和ESS的优化调度运行，以减少电网投资和运行费用。文献[8]的研究认为DG出力与负荷都随时间变化而变化，但在规划时却没有根据DG和负荷的时序特性开展工作，而是只考虑了某一个情景。由于考虑的场景单一，文献[7-8]的规划结果不具有代表性，与实际情况有所偏差。文献[9]的目标函数为配电网公司的年费用成本最小，考虑了风力发电和负荷全年的时序特性，采用了改进的遗传算法对建立的数学模型进行求解。文献[10]在考虑负荷与DG时序特性的同时，计及燃气轮机出力所产生的环境成本，建立以系统总的年费用最小为目标函数的DG规划模型，并采用遗传算法验证了模型的有效性。文献[11]根据历史统计资料提取了负荷和DG的时序场景及其权重，建立了考虑可靠性和电能损耗的多目标优化模型，最后采用遗传算法对模型进行求解。由于考虑了DG的时序特性，获得了更贴近实际的规划结果。

虽然文献[10-11]考虑了DG和负荷的时序性，但是由于没有考虑DG的出力不确定性，忽略了DG出力和负荷需求在同一季节不同日期的差异，以某个季节的单日数据值作为该季节的规划参数，导致结果存在较大误差。文献[12]首先考虑了风力发电、光伏发电等DG出力的随机性，然后考虑负荷需求的不确定性，最终建立了包含DG的配电网网架和主动管理模式的双层规划模型。文献[13]构建的DG多目标规划模型，考虑了DG和负荷的时序特性和不确定性，运用多目标复合微分进化算法进行求解。由此可见，同时考虑DG和负荷的时序特性与不确定性的随机规划可以获得更为准确的结果。储能系统(Electrical Storage System, ESS)存储电能的特性可以平抑清洁能源的不确定性和波动性^[14-15]；储能系统在负荷低谷时从电网吸收电能，在负荷高峰时向电网释放电能，一定规模的储能系统可以起到移峰填谷的作用^[16]。考虑储能和DG的协同规划^[17]，对清洁能源的进一步消纳具有较好的研究价值。

综上，本文以投资成本和运行成本最小为目标，提出一种考虑风、光时序特性及不确定性的风-光-储随机规划方法。首先，根据DG出力的时序特性与不确定性，对风机、光伏建立时序特性模型和不确定性模型。然后，通过ARMA模型生成大量风电、光伏的24个时段随机出力场景，并采用Kantorovich法场景削减抽取得到10组典型场景，使得削减后的场景概率分布最接近初始场景集。接着，为有效促进风光资源的消纳，在运行成本加入了弃风弃光惩罚，建立以投资成本和运行成本综合最小化为优化目标，二阶锥松弛支路潮流、安全约束等为约束条

件的风-光-储投资规划模型，同时用数学手段将模型线性化。最后，采用CPLEX算法优化包进行求解，通过修改的IEEE33节点系统进行算例分析，讨论了储能系统、时序性、随机方法和弃风弃光惩罚对规划的影响，验证模型的有效性。

1 风-光-储模型构建

风机、光伏和储能系统接入配电网的网架结构如图1所示。

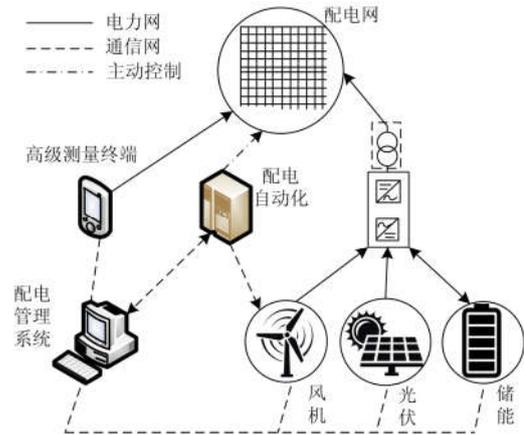


图1 风-光-储接入配电网结构示意图

Fig. 1 Structure of wind-photovoltaic-storage system connected to distribution network

1.1 风电模型

1.1.1 时序性模型

风力发电的功率主要取决于风机安装处的风速，风速由地理位置、气候、高度等因素决定。不同季节、不同时间段的风电功率曲线如图2所示^[18]。

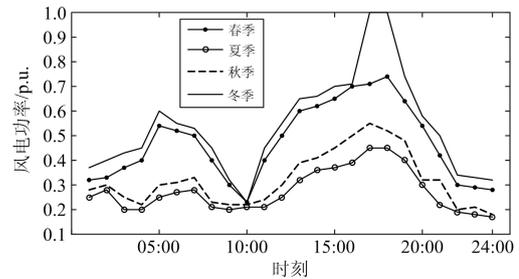


图2 风力发电的时序模型

Fig. 2 Time-varying model of wind power

由图2可知，冬、春、秋、夏四个季节的风电功率依次递减。四个季节在09:00左右风电功率最小、18:00左右风电功率达到最大。

1.1.2 不确定性模型

参考文献[19-20]中的风机模型，本文采用二参数 Weibull 分布表述风机的不确定性。风机额定功

率用 P^{rate} 表示, v^{in} 、 v^{out} 、 v^{rate} 分别为切入、切出和额定风速, 形状参数用 k 表示, 尺度参数用 c 表示, 风机的有功出力 P^{WTG} 在 $(-\infty, +\infty)$ 上的分布函数为

$$F(P^{\text{WTG}}) = \begin{cases} 0, & P^{\text{WTG}} < 0 \\ 1 - \exp\left\{-\left[\left(1 + \frac{v^{\text{rate}} - v^{\text{in}}}{v^{\text{in}} P^{\text{rate}}}\right) P^{\text{WTG}}\right]^k\right\}, & 0 \leq P^{\text{WTG}} < P^{\text{rate}} \\ \exp\left[-\left(\frac{v^{\text{out}}}{c}\right)^k\right], & 0 \leq P^{\text{WTG}} < P^{\text{rate}} \\ 1, & P^{\text{WTG}} \geq P^{\text{rate}} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 光伏模型

1.2.1 时序性模型

光伏发电受到天气、光照强度、温度等很多因素的影响, 其中光照强度对光伏发电输出功率的影响最大, 光照强度由季节和天气等因素决定。不同季节、不同时间段的光伏发电功率曲线如图 3 所示^[18]。

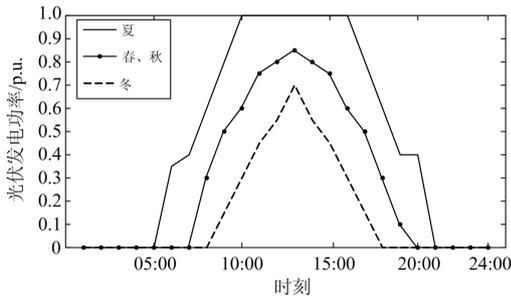


图 3 光伏发电的时序模型

Fig. 3 Time-varying model of photovoltaic power

由图 3 可知, 各季节一般在 12:00 左右发电功率可以达到峰值。

1.2.2 不确定性模型

光照强度根据地区环境和所处纬度不同而不同, 可以认为某地区光照强度这一变量是随机的, 它的数学期望值随时间变化而改变。通过大量的测量数据, 一天内的光照强度分布可以用 Beta 分布^[21]表示, 则光伏发电系统输出功率的概率密度函数为

$$f(P^{\text{PVG}}) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{P_m^{\text{PVG}} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left(\frac{P^{\text{PVG}}}{P_m^{\text{PVG}}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P^{\text{PVG}}}{P_m^{\text{PVG}}}\right)^{\beta-1} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Gamma(g) = \int_0^\infty x^{g-1} e^{-x} dx \\ P^{\text{PVG}} = S^{\text{PVG}} A^{\text{PVG}} \eta^{\text{PVG}} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\Gamma(g)$ 是 gamma 函数; 形状参数 α 和 β 均为正, 取值随地区不同而不同; P^{PVG} 、 P_m^{PVG} 为光伏阵列的输出功率和最大输出功率; S^{PVG} 为光伏阵列的光照强度; A^{PVG} 为光伏阵列的总面积; η^{PVG} 为光伏发电系统的总效率。

1.3 储能模型

储能主动配电网中与 WTG、PVG 一同规划, 可以减少弃风、弃光, 也具有削峰填谷的作用。定义 E_t^{ESS} 为 ESS 的当前状态(容量), ESS 的充放电状态^[22]如图 4 所示。

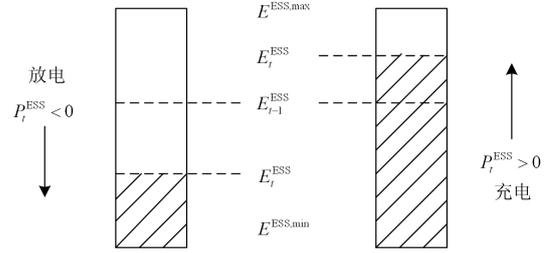


图 4 ESS 充放电示意图

Fig. 4 Charge and discharge of ESS

t 时刻储能的容量及其约束用式(4)、式(5)表示。

$$E_t^{\text{ESS}} = E_{t-1}^{\text{ESS}} + E_t^{\text{ESS}} \Delta t \quad (4)$$

$$\begin{cases} E^{\text{ESS},\min} \leq E_t^{\text{ESS}} \leq E^{\text{ESS},\max} \\ P^{\text{ESS},\min} \leq P_t^{\text{ESS}} \leq P^{\text{ESS},\max} \\ -\eta^{\text{dis}} (E_{t-1}^{\text{ESS}} - E^{\text{ESS},\min}) \leq P_t^{\text{ESS}} \Delta t \leq \eta^{\text{ch}} (E^{\text{ESS},\max} - E_{t-1}^{\text{ESS}}) \end{cases} \quad (5)$$

其中: P_t^{ESS} 为各时段的充(放)电功率; $E^{\text{ESS},\max}$ 、 $E^{\text{ESS},\min}$ 为储能容量的上、下限; $P^{\text{ESS},\max}$ 、 $P^{\text{ESS},\min}$ 为单位时间储能充放电功率上、下限; η^{ch} 、 η^{dis} 为充、放电截止率。

ESS 通过在负荷高峰时向电网释放电能, 在负荷低谷时从电网吸收电能充电, 一定规模的 ESS 可以起到削峰填谷的作用^[23], 储能削峰填谷的示意图如图 5 所示。

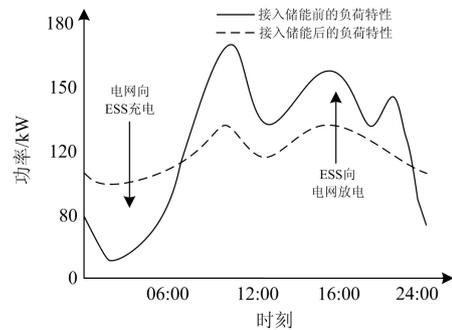


图 5 储能削峰填谷示意图

Fig. 5 Peak cutting of energy storage system

图 5 表明, 经过 ESS 的削峰填谷作用, 负荷曲线波动幅度明显减小, 可以有效减轻电网的调节压力。

2 风-光-储随机规划模型

2.1 场景的抽取(风光出力场景的确定)

根据需求,应用 ARMA 模型生成 10 000 组包含 24 个时段的场景集合^[24]。由于计算复杂度和计算量的限制,需要筛选出 10 组具有代表性的风光出力场景,应用 Kantorovich 距离法对已生成的场景集合进行削减与筛选。

1) 场景集的生成

假设同一个风场中风速的大小、方向相同,则可将该风场中所有的风机等效成一台风机。同理,假设同一个光场中光照的强度相同,则可将该光场中所有的光伏等效为一台光伏。再应用自回归模型法,根据各季节风机、光伏的历史出力数据建立模型,然后分时段对 ARMA 模型定阶,并确定模型的参数,最后使用过拟合方法检验该模型的适用性。

ARMA(n, m)的数学模型为

$$P_t = \sum_{i=1}^n \varphi_i P_{t-i} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^m \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (6)$$

其中: P_t 为序列 $\{P_t\}$ 在 t 时刻的元素; θ_j 、 φ_i 分别为滑动平均参数和自回归参数; 序列 $\{\varepsilon_t\}$ 为均值等于 0、方差等于 σ^2 的白噪声; 序列 $\{P_t\}$ 为等效风、光场的历史出力值。

场景数 $N_\Omega = 10\ 000$, 时间段数 $N_T = 24$, 场景标号用 s 表示。图 6 的流程图为 ARMA 模型生成场景的过程。

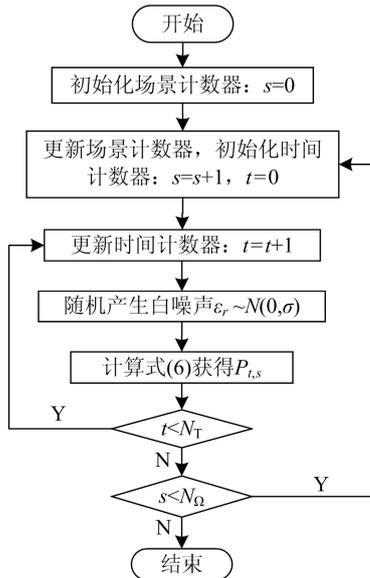


图 6 ARMA 模型生成场景的流程图

Fig. 6 Flow chart of scenario generation by ARMA model

2) 场景的削减

设包含 10 000 个场景元素的 Ω 为风光出力的原

始场景集, 确定一个包含 10 个元素的场景子集 S , 即 $N_S = 10$ 并且 $s \subset \Omega$ 。又设 s 和 s' 为原始场景集合 Ω 中的不同场景, $F(s)$ 为原始场景的概率分布, $F'(s)$ 为概率距离削减后子集 S 的概率分布。对所选场景指定一个新的概率, 使得 $F'(s)$ 最接近 $F(s)$ 。

成本函数 $v(s, s')$ 用场景 s 和 s' 的规范差表示为

$$v(s, s') = \|P_s - P_{s'}\| \quad (7)$$

其中: P_s 和 $P_{s'}$ 分别为场景 s 和 s' 中风、光场的有功出力, P_s 对应后文模型中风、光的出力预测值 $P_{j,s,t}^{\text{WTG,PRE}}$ 、 $P_{j,s,t}^{\text{PVG,PRE}}$ 。

Kantorovich 距离的表示为

$$d_s = \sum_{s' \in \Omega/S} \pi_{s'} \min_{s' \in \Omega} v(s, s') \quad (8)$$

其中, $\pi_{s'}$ 为集合 Ω 中场景 s' 对应于概率分布 $F(s)$ 的概率。

集合 S 中的元素为原始集和削减集之间 Kantorovich 距离最小的场景, 可以利用式(7)和式(8)选择。

削减场景的步骤具体如下。

步骤 1: 使用式(7)计算 Ω 中每对 s 和 s' 的成本函数 $v(s, s')$ 。

步骤 2: 概率距离的计算, 根据式(8)有 $d_s = \sum_{s'=1, s' \neq s}^S \pi_{s'} v(s, s')$, 取 $s_1 \in \arg \min_{s \in \Omega} d_s$ 有 $\Omega_j^{[1]} = \{1, \dots, S\} / s_1$ 。

步骤 3: 计算 $v^{[i]}(s, s') = \min\{v^{[i-1]}(s, s'), v^{[i-1]}(s, s_{i-1})\}$, $d_s^{[i]} = \sum_{s' \in \Omega_j^{[i-1]} \setminus \{s_i\}} \pi_{s'} v^{[i]}(s, s')$, $\forall s, s' \in \Omega_j^{[i-1]}$, 选择 $s_i \in \arg \min_{s \in \Omega_j^{[i-1]}} d_s^{[i]}$, 有 $\Omega_j^{[i]} = \Omega_j^{[i-1]} / s_i$ 。

⋮

步骤 $N_{\Omega^*} + 1$: 舍去的场景集为 $\Omega_j^* = \Omega_j^{[N_{\Omega^*}]}$, 最后选择的场景为 $\Omega_s^* = \Omega / \Omega_j^*$ 。

最终, 计算选择场景的概率。

$$\pi_s^* = \pi_s + \sum_{s' \in J(s)} \pi_{s'}, \forall s \in \Omega_s^* \quad (9)$$

获得的场景 Ω_s^* 即为筛选得到的 S , 各筛选后的场景 s 对应概率为 π_s 。

2.2 目标函数

考虑不确定性运行场景的规划模型可表示为式(10)的形式。总体来说, 规划模型可分为投资和运行两个层次进行优化。投资层面包括投资成本 C^{INV} 和投资约束, 运行层面包括运行成本 C^{OPE} 和稳态运行约束。

$$\begin{cases} \min_{x^{\text{inv}}} F(x^{\text{inv}}, x_s^{\text{ope}}) = C^{\text{INV}} + C^{\text{OPE}} \\ \text{s.t. } G(x^{\text{inv}}) \leq 0 \\ H(x^{\text{inv}}) = 0 \\ \min_{x_s^{\text{ope}}} f(x^{\text{inv}}, x_s^{\text{ope}}) = C^{\text{OPE}} \\ \text{s.t. } g(x^{\text{inv}}, x_s^{\text{ope}}) \leq 0 \\ h(x^{\text{inv}}, x_s^{\text{ope}}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中: x^{inv} 、 x_s^{ope} 分别为设备投资决策变量和运行变量; $F(\cdot)$ 、 $G(\cdot)$ 和 $H(\cdot)$ 分别为投资层的目标函数、不等式约束和等式约束; $f(\cdot)$ 、 $g(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$ 分别为模拟运行层的目标函数、不等式约束和等式约束。

2.2.1 投资成本

投资成本包括风机、光伏、储能系统的投资成本, 可表示为

$$C^{\text{INV}} = \sum_{j \in \Omega^{\text{WTG}}} c^{\text{WTG}} x_j^{\text{WTG}} + \sum_{j \in \Omega^{\text{PVG}}} c^{\text{PVG}} x_j^{\text{PVG}} + \sum_{j \in \Omega^{\text{ESS}}} \sum_{l \in K^{\text{ESS}}} c_l^{\text{ESS}} x_{j,l}^{\text{ESS}} \quad (11)$$

其中: j 为设备投资节点; Ω^{WTG} 、 Ω^{PVG} 、 Ω^{ESS} 为投资设备候选节点集合; c^{WTG} 、 c^{PVG} 、 c_l^{ESS} 为单位投资成本系数; x_j^{WTG} 、 x_j^{PVG} 、 $x_{j,l}^{\text{ESS}}$ 为安装对应型号设备的数量; l 为设备类型标识; K^{ESS} 为投资设备候选类型集合。

2.2.2 运行成本

本文模型为了促进清洁能源消纳和限制风机、光伏的过度投资, 在运行成本中增加了弃风、弃光惩罚函数, 此外运行成本还包括网损成本、主网购电成本。

$$C^{\text{OPE}} = \omega \sum_{s \in S} \pi_s \sum_{t \in T} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{ij \in E} c^{\text{Loss}} I_{ij,s,t}^2 r_{ij} + \sum_{j \in B^{\text{TR}}} c^{\text{TR}} P_{j,s,t}^{\text{TR}} + \\ & \sum_{j \in B^{\text{WTG}}} c^{\text{WTG}} (P_{j,s,t}^{\text{WTG,PRE}} - P_{j,s,t}^{\text{WTG}}) + \\ & \sum_{j \in B^{\text{PVG}}} c^{\text{PVG}} (P_{j,s,t}^{\text{PVG,PRE}} - P_{j,s,t}^{\text{PVG}}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中: ω 为投资成本与运行成本之间的转换因子, 与投资年限、投资成本细化程度、运行成本覆盖广度有关; π_s 为场景 s 的概率; $I_{ij,s,t}^2 r_{ij}$ 为支路 ij 消耗的有功功率; $P_{j,s,t}^{\text{WTG,PRE}}$ 、 $P_{j,s,t}^{\text{PVG,PRE}}$ 为 s 场景下风机和光伏发出的有功功率; c^{Loss} 为网损电价; c^{TR} 为主网购电电价; c^{WTG} 为弃风惩罚价格; c^{PVG} 为弃光惩罚价格; $P_{j,s,t}^{\text{TR}}$ 、 $P_{j,s,t}^{\text{WTG}}$ 、 $P_{j,s,t}^{\text{PVG}}$ 分别为主网购电量、风电出力、光伏发电出力; E 为支路集合; B^{TR} 为变压器节点集合; B^{WTG} 为风机节点集合; B^{PVG} 为光伏节点集合。

2.3 约束条件

2.3.1 投资约束

由于投资资金、场地大小等因素的限制, 对风机、光伏和储能的数量限制和选型约束如式(13)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq x_j^{\text{WTG}} \leq N_j^{\text{WTG}}, \quad \forall j \in \Omega^{\text{WTG}} \\ 0 \leq x_j^{\text{PVG}} \leq N_j^{\text{PVG}}, \quad \forall j \in \Omega^{\text{PVG}} \\ 0 \leq \sum_{l \in K^{\text{ESS}}} x_{j,l}^{\text{ESS}} \leq 1, \quad \forall j \in \Omega^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (13)$$

其中, N_j^{WTG} 、 N_j^{PVG} 分别为候选节点风机和光伏的投资数量限制。

2.3.2 运行约束

1) 潮流约束

$$\begin{aligned} \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk,s,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij,s,t} - I_{ij,s,t}^2 r_{ij}) &= \sum_{j \in B^{\text{TR}}} P_{j,s,t}^{\text{TR}} + \sum_{j \in B^{\text{WTG}}} P_{j,s,t}^{\text{WTG}} + \\ & \sum_{j \in B^{\text{PVG}}} P_{j,s,t}^{\text{PVG}} + \sum_{j \in B^{\text{ESS}}} P_{j,s,t}^{\text{discharge}} - \sum_{j \in B^{\text{ESS}}} P_{j,s,t}^{\text{charge}} - \sum_{j \in B^{\text{Load}}} P_{j,s,t}^{\text{Load}} \\ \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk,s,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij,s,t} - I_{ij,s,t}^2 x_{ij}) &= \sum_{j \in B^{\text{TR}}} Q_{j,s,t}^{\text{TR}} + \\ & \sum_{j \in B^{\text{WTG}}} Q_{j,s,t}^{\text{WTG}} - \sum_{j \in B^{\text{Load}}} Q_{j,s,t}^{\text{Load}}, \quad \forall t, \forall s, \forall j \end{aligned} \quad (14)$$

$$U_{j,s,t}^2 = U_{i,s,t}^2 - 2(P_{ij,s,t} r_{ij} + Q_{ij,s,t} x_{ij}) + I_{ij,s,t}^2 (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (15)$$

$$\forall t, \forall s, \forall ij \in E, \forall i \in B$$

$$I_{ij,s,t}^2 U_{i,s,t}^2 = P_{ij,s,t}^2 + Q_{ij,s,t}^2, \quad \forall t, \forall s, \forall ij \in E \quad (16)$$

其中: $\delta(j)$ 为终点集合, 即某支路以 j 为起点, $\delta(j)$ 为其终点集合; $\pi(j)$ 为起点集合, 即某支路以 j 为终点, $\pi(j)$ 为其起点集合; $P_{ij,s,t}$ 、 $Q_{ij,s,t}$ 、 r_{ij} 、 x_{ij} 、 I_{ij} 分别为 ij 支路在 t 时段 s 场景下的有功功率、无功功率、阻抗、电抗、电流; $Q_{j,s,t}^{\text{TR}}$ 、 $Q_{j,s,t}^{\text{WTG}}$ 分别为 t 时段 s 场景下 j 节点所连接的变压器、风电无功功率; $P_{j,s,t}^{\text{charge}}$ 、 $P_{j,s,t}^{\text{discharge}}$ 分别为 t 时段 s 场景下 j 节点所连接的储能充、放电功率; $P_{j,s,t}^{\text{Load}}$ 、 $Q_{j,s,t}^{\text{Load}}$ 分别为 t 时段 s 场景下 j 节点所连接的负荷有功、无功功率; $U_{j,s,t}$ 为 t 时段 s 场景下 j 节点电压; B 为系统所有节点集合。

2) 安全约束

$$\begin{cases} U_j^{\text{min}} \leq U_{j,s,t} \leq U_j^{\text{max}}, \quad \forall t, \forall s, \forall j \in B \\ I_{ij,s,t} \leq I_{ij}^{\text{max}}, \quad \forall t, \forall s, \forall ij \in E \end{cases} \quad (17)$$

其中: I_{ij}^{max} 为支路 ij 电流幅值上限; U_j^{min} 为 j 节点电压幅值下限; U_j^{max} 为 j 节点电压幅值上限。

3) 变压器节点功率约束

$$\begin{cases} P_j^{\text{TR},\min} \leq P_{j,s,t}^{\text{TR}} \leq P_j^{\text{TR},\max} \\ Q_j^{\text{TR},\min} \leq Q_{j,s,t}^{\text{TR}} \leq Q_j^{\text{TR},\max} \end{cases}, \forall s, \forall t, \forall j \in B^{\text{TR}} \quad (18)$$

其中: $P_j^{\text{TR},\max}$ 、 $P_j^{\text{TR},\min}$ 分别为变压器有功功率上、下限; $Q_j^{\text{TR},\max}$ 、 $Q_j^{\text{TR},\min}$ 分别为变压器无功功率上、下限。

4) DG 相关约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,s,t}^{\text{PVG}} \leq P_{j,s,t}^{\text{PVG,PRE}}, & \forall s, \forall t, \forall j \in B^{\text{PVG}} \\ 0 \leq P_{j,s,t}^{\text{WTG}} \leq P_{j,s,t}^{\text{WTG,PRE}}, & \forall s, \forall t, \forall j \in B^{\text{WTG}} \\ Q_{j,s,t}^{\text{WTG},\min} \leq Q_{j,s,t}^{\text{WTG}} \leq Q_{j,s,t}^{\text{WTG},\max}, & \forall s, \forall t, \forall j \in B^{\text{WTG}} \end{cases} \quad (19)$$

风电机组具有一定的无功调节能力(光伏机组没有), DG 的无功输出较为复杂, 本文近似简化处理无功约束限值 $Q_{j,s,t}^{\text{WTG},\min}$ 、 $Q_{j,s,t}^{\text{WTG},\max}$ 为定常数。

2.4 模型的线性化处理

由于运行成本式(12)、潮流约束式(14)一式(16)具有非线性项, 对目标函数的求解具有较大的难度, 因此需要将其线性化, 令

$$\begin{cases} \tilde{I}_{ij,s,t} = I_{ij,s,t}^2 \\ \tilde{U}_{j,s,t} = U_{j,s,t}^2 \\ \tilde{U}_{i,s,t} = U_{i,s,t}^2 \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)代入式(12)和式(14)一式(16)中, 有

$$C^{\text{OPE}} = \omega \sum_{s \in S} \pi_s \sum_{t \in T} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{ij \in E} c^{\text{Loss}} \tilde{I}_{ij,s,t} r_{ij} + \sum_{j \in B^{\text{TR}}} c^{\text{TR}} P_{j,s,t}^{\text{TR}} + \\ & \sum_{j \in B^{\text{WTG}}} c^{\text{WTG}} (P_{j,s,t}^{\text{WTG,PRE}} - P_{j,s,t}^{\text{WTG}}) + \\ & \sum_{j \in B^{\text{PVG}}} c^{\text{PVG}} (P_{j,s,t}^{\text{PVG,PRE}} - P_{j,s,t}^{\text{PVG}}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk,s,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij,s,t} - \tilde{I}_{ij,s,t} r_{ij}) &= \sum_{j \in B^{\text{TR}}} P_{j,s,t}^{\text{TR}} + \sum_{j \in B^{\text{WTG}}} P_{j,s,t}^{\text{WTG}} + \\ \sum_{j \in B^{\text{PVG}}} P_{j,s,t}^{\text{PVG}} + \sum_{j \in B^{\text{ESS}}} P_{j,s,t}^{\text{discharge}} - \sum_{j \in B^{\text{ESS}}} P_{j,s,t}^{\text{charge}} - \sum_{j \in B^{\text{Load}}} P_{j,s,t}^{\text{Load}} \\ \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk,s,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij,s,t} - \tilde{I}_{ij,s,t} x_{ij}) &= \sum_{j \in B^{\text{TR}}} Q_{j,s,t}^{\text{TR}} + \\ \sum_{j \in B^{\text{WTG}}} Q_{j,s,t}^{\text{WTG}} - \sum_{j \in B^{\text{Load}}} Q_{j,s,t}^{\text{Load}}, & \forall t, \forall s, \forall j \end{aligned} \quad (22)$$

$$\tilde{U}_{j,s,t} = \tilde{U}_{i,s,t} - 2(P_{ij,s,t} r_{ij} + Q_{ij,s,t} x_{ij}) + \tilde{I}_{ij,s,t} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2), \quad (23)$$

$$\forall t, \forall s, \forall ij \in E, \forall i \in B$$

$$\tilde{I}_{ij,s,t} \tilde{U}_{i,s,t} = P_{ij,s,t}^2 + Q_{ij,s,t}^2, \quad \forall t, \forall s, \forall ij \in E \quad (24)$$

此时式(24)仍具有非线性项, 对其松弛变形, 转化为式(25)所示的二阶锥形式。

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,s,t} \\ 2Q_{ij,s,t} \\ \tilde{I}_{ij,s,t} - \tilde{U}_{j,s,t} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij,s,t} + \tilde{U}_{j,s,t} \quad (25)$$

综上, 通过对模型的非线性部分等价处理, 使问题转化为混合整数二阶锥规划, 可以通过 CPLEX 算法优化包进行求解。

3 算例分析

3.1 算例介绍

为了验证本文所建模型的有效性, 将 IEEE33 节点算例中负荷的基值均提高到 1.5 倍进行验证分析, 系统容量为 8 MW, 本算例无需规划变电站, 其他网络参数参见文献[25], DG 的安装成本见表 1—表 3, WTG 单位安装容量为 0.1 MW; PVG 单位安装容量为 0.2 MW, DG 安装的候选位置见表 4, 投资成本与运行成本之间的转化因子 ω 取值 5 000, 弃风、弃光的惩罚成本均为 300 \$/MWh, 网损价格为 80 \$/MWh, 电价曲线如图 7 所示。

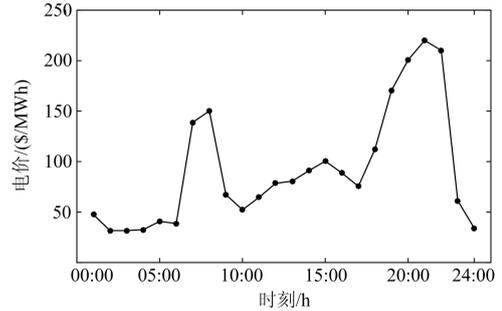


图 7 电价曲线图

Fig. 7 Electricity price curve

表 1 ESS 参数

Table 1 Parameters of ESS

型号	功率极限/ kW	容量极限/ kWh	单位成本/ ($\times 10^4$ \$)	充电 效率	放电 效率
[1]	100	500	20	0.9	1.11
[2]	300	1 500	60	0.9	1.11
[3]	500	2 500	100	0.9	1.11

表 2 WTG 参数

Table 2 Parameters of WTG

切入风速/ (m/s)	切出风速/ (m/s)	额定风速/ (m/s)	功率极限/ MW	单位成本/ ($\times 10^6$ \$)
3	20	12	0.1	0.077

表 3 PVG 参数

Table 3 Parameters of PVG

功率极限/MW	单位成本/($\times 10^6$ \$)
0.2	0.189

表 4 候选位置

Table 4 Candidate locations

类别	候选节点
ESS	16, 33
WTG	3, 17, 21
PVG	16, 19, 30, 31

3.2 算例结果分析

结合 DG 参数、负荷数据以及算例参数可得考虑风-光-储时序特性的规划结果, 如表 5 第 I 组所示。由于光伏只有白天出力, 与负荷的需求特性相

匹配, 因此光伏机组的总装机容量多于风电机组。对比第 II 组不考虑 DG 的规划可知: 考虑风-光-储时序特性的规划使得主网购电成本、网损成本下降约一半; 由于风机夜间仍然有出力而此时负荷需求的电量不高, 存在弃风的现象; 考虑到电网安全、ESS 充放电的上限等因素, 白天也存在一定的弃光。总的来看, 考虑 DG 的规划使得区域配电网运行成本下降, 其投资成本也会在 4 年之内收回, 本文应用的模型具有一定的经济价值。

表 5 规划结果对比

Table 5 Comparison of planning results

组别	I. 考虑风-光-储 时序特性	II. 不考虑 DG	III. 不考虑 ESS	IV. 不考虑 DG 时序 特性	V. 只考虑 单场景
风电机组/数量	3(2)、17(2)、21(1)	0	3(2)	3(3)、17(1)、21(2)	3(1)
光伏机组/数量	16(2)、30(1)	0	16(2)、19(1)	30(1)	16(1)、30(1)、31(1)
储能/数量	16(1[3])	0	0	16(1[3])	33(1[3])
主网购电成本/($\times 10^4$ \$-d)	0.422 6	0.767 0	0.578 5	0.584 9	0.526 0
单位弃风惩罚/($\times 10^4$ \$-d)	0.026 3	0	0.028 7	0.026 6	0.028 0
单位弃光惩罚/($\times 10^4$ \$-d)	0.029 2	0	0.030 0	0.029 4	0.032 2
网损成本/($\times 10^4$ \$-d)	0.014 8	0.026 0	0.018 3	0.021 5	0.019 1
总运行成本/($\times 10^4$ \$-d)	0.656 5	0.793 0	0.744 2	0.795 4	0.672 7
新增投资成本/($\times 10^4$ \$)	195.20	0	72.10	165.1	164.40

注: 规划结果中, “()”外为安装节点, “()”内为安装数量, “[]”内为所选型号。

3.3 对比分析

3.3.1 考虑 ESS 与否分析

为了考察 ESS 的接入对系统的影响, 在原规划中去除 ESS, 其他条件均不变, 规划结果如表 5 第 III 组所示。与第 I 组对比分析可知, ESS 的接入减少了弃风弃光量, 并且使系统的风机和光伏装机容量提高。考虑风-光-储规划中 ESS 的充放电功率如图 8 所示。

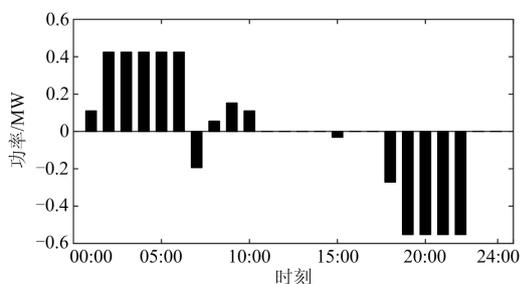


图 8 ESS 的充放电功率

Fig. 8 Charge and discharge power of ESS

结合规划中风机、光伏的装机容量和 ESS 的充放电状态可知: 1) 夜间光伏不出力且负荷电量需求

较少, 而风机仍有出力, ESS 逐步充电至饱和状态, 消纳了部分风机的出力; 2) 傍晚光伏出力减小而负荷需求仍然较高, ESS 逐步放电至区域配电网, 减少了从主网的购电量; 3) 系统中接入 ESS, 一定程度上降低了主网购电和网损成本, 提高了风机的装机容量, 起到了消纳 DG 出力的作用。

3.3.2 时序性分析

不考虑时序特性, 用传统的场景集方法模拟风机、光伏出力和负荷特性重新进行规划, 结果如表 5 第 IV 组。为了更直观地比较分析其差异, 将第 I、IV 组规划结果转化为年成本, 并用柱状图表示如图 9。对比分析可知: 1) 两组规划的弃风、弃光惩罚成本总体相差较小, 这是由于规划针对弃风、弃光设置了较大的惩罚值, 使得风光利用达到最大化; 2) 考虑时序的规划, 主网购电成本与网损成本明显减少, 因为不同类型的负荷具有不同的需求特性, 考虑时序特性使得这一差别凸显出来; 3) 考虑时序特性的规划中, 尽管光伏的投资成本较高, 但因其出力与负荷相匹配, 因此接入比例较高, 而不考虑时序特性的规划中, 风机的接入容量则高于光伏。

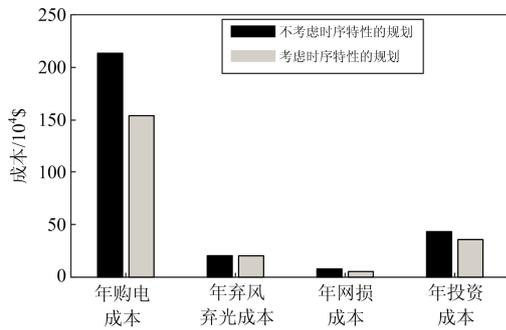


图9 第 I、IV 组年成本对比

Fig. 9 Annual cost comparison of Group I and IV

3.3.3 随机方法与确定性方法对比分析

在主动配电网的规划中，不同场景的 DG 出力大小不同，负荷的需求也不同。为了比较多场景随机规划与单场景确定性规划的差异，在规划单场景风光光伏出力和负荷需求时，均采用多场景数据的平均值。规划结果如表 5 第 V 组所示，与第 I 组对比分析可知，1) 由于多场景中风机、光伏出力和负荷需求存在波动和不确定性，采用多场景的随机规划能更真实地反映实际情况，而单场景规划则失真于实际情况。因此，多场景规划的主网购电、网损、弃风弃光均小于单场景规划。2) 单场景规划中的光伏装机容量远远高于风机，更好地说明了光伏与负荷的匹配度高。

为了比较随机规划与确定性规划，利用表 5 第 I、V 组确定的规划结果，在 ARMA 模型确定的 10 000 个场景下模拟运行，分别计算其模拟运行成本，所得模拟结果的均值和最大值如表 6 所示。

表 6 随机规划与确定性规划运行成本对比

Table 6 Comparison of operating costs between stochastic programming and deterministic planning

类别	随机规划/($\times 10^4$ \$)		确定性规划/($\times 10^4$ \$)	
	均值	最大值	均值	最大值
主网购电成本	0.426 9	0.454 9	0.524 8	0.604 9
单位弃风惩罚	0.026 2	0.030 7	0.028 3	0.032 2
单位弃光惩罚	0.029 6	0.034 3	0.032 5	0.035 7
网损成本	0.014 9	0.016 1	0.019 5	0.021 8
总运行成本	0.661 6	0.727 4	0.670 1	0.766 0

从表 6 对比可知，通过相同场景的模拟运行，随机规划的平均运行成本和最大运行成本均低于确定性规划，由于考虑了风光运行的不确定性，随机规划能有效提升规划方案的经济性。

3.3.4 弃风、弃光惩罚分析

规划的目标函数中包含了弃风、弃光惩罚函数以限制风机、光伏的过度投资，同时可以促进清洁

能源的消纳。将表 5 的 I、III、IV、V 组弃风、弃光惩罚以及风电、光伏的装机容量用图 10 表示。

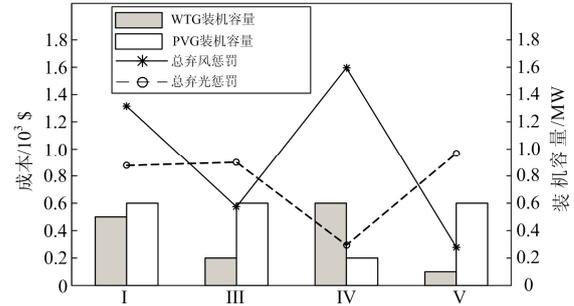


图 10 弃风、弃光惩罚与风机、光伏装机容量

Fig. 10 Cost of wind-light abandoning and the capacity of WTG and PVG

显然，风机和光伏的装机容量越大其弃风弃光惩罚越高。对比表 5 的单位弃风弃光惩罚可知：考虑风-光-储时序特性的规划弃风弃光惩罚最低，风电、光电的消纳率最高；不考虑 ESS 规划的弃风弃光惩罚最高，可见规划时考虑 ESS 可以促进风电、光电的消纳；规划时考虑风光的时序性以及多场景方法，可以获得更加合理的规划结果。

4 结论

本文在规划阶段引入 DG 时序特性和不确定性，应用 ARMA 模型和 Kantorovich 方法生成并削减得到 10 组具有代表性的典型场景，对该场景进行随机规划，通过算例仿真得出以下结论。

1) 在配电网规划中，考虑 DG 模型的时序性，由于光伏出力与负荷需求相匹配，光伏的装机容量高于风机。

2) 由于光伏出力与负荷需求相匹配，对 ESS 的依赖性不高，而 ESS 可在凌晨低负荷时段吸收多余的风电，使得 ESS 的接入能有效提高配电网风机的投资。

3) 多场景的随机规划综合考虑了风光运行不确定性，能有效提升规划方案的经济性，同时也使得规划结果更为合理。

参考文献

[1] 栗然, 马慧卓, 祝晋尧, 等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 6-13. LI Ran, MA Huizhuo, ZHU Jinyao, et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 6-13.

[2] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 26(16): 1-7.

- ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 1-7.
- [3] MORADI M H, ABEDINI M. A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems[J]. Electrical Power and Energy systems, 2010, 34(1): 66-74.
- [4] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
- ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [5] 李军, 颜辉, 张仰飞, 等. 配电网和微网中分布式电源选址定容方法对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 147-154.
- LI Jun, YAN Hui, ZHANG Yangfei, et al. Comparison of locating and sizing methods of DGs between in micro-grids and in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 147-154.
- [6] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 基于改进小生境粒子群算法的主动配电网优化重构[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 32(3): 135-140.
- ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Optimal reconfiguration of the active distribution network based on improved niche multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 32(3): 135-140.
- [7] 沈欣炜, 朱守真, 郑竞宏, 等. 考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1913-1920.
- SHEN Xinwei, ZHU Shouzhen, ZHENG Jinghong, et al. Active distribution network planning-operation cooptimization considering the coordination of ESS and DG[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1913-1920.
- [8] HAESSEN E, ESPINOZA M. Optimal placement and sizing of distributed generator using fuzzy goal programming with genetic algorithm[J]. IEEE European Transaction on Electrical Power, 2008, 18(3): 217-230.
- [9] 初壮, 乔福泉. 考虑风电与负荷时序性的分布式电源选址定容[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(10): 87-90.
- CHU Zhuang, QIAO Fuquan. Locating and sizing of distributed wind generation considering wind generation and the timing characteristics of load[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2017, 29(10): 87-90.
- [10] 徐迅, 陈楷, 龙禹, 等. 考虑环境成本和时序特性的微网多类型分布式电源选址定容规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 914-921.
- XU Xun, CHEN Kai, LONG Yu, et al. F Optimal site selection and capacity determination of multi-types of distributed generation in microgrid considering environment cost and timing characteristics[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 914-921.
- [11] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58-63.
- LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58-63.
- [12] 方陈, 张翔, 程浩忠, 等. 主动管理模式下含分布式发电的配电网网架规划[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 823-829.
- FANG Chen, ZHANG Xiang, CHENG Haozhong, et al. Framework planning of distribution network containing distributed generation considering active management[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 823-829.
- [13] 彭春华, 于蓉, 孙惠娟. 基于 K-均值聚类多场景时序特性分析的分布式电源多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 58-65.
- PENG Chunhua, YU Rong, SUN Huijuan. Multi-objective DG planning based on K-means clustering and multi-scenario timing characteristics analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 58-65.
- [14] 娄素华, 吴耀武, 崔艳昭, 等. 电池储能平抑短期风电功率波动运行策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 17-22.
- LOU Suhua, WU Yaowu, CUI Yanzhao, et al. Operation strategy of battery energy storage system for smoothing short-term wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 17-22.
- [15] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 考虑实际运行的配电网电池储能系统的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 88-94.
- LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Study on optimal allocation of battery energy storage in distribution network considering the actual operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 88-94.
- [16] 鲍冠南, 陆超, 袁志昌, 等. 基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 11-16.
- BAO Guannan, LU Chao, YUAN Zhichang, et al. Load

- shift real-time optimization strategy of battery energy storage system based on dynamic programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 11-16.
- [17] GAO Y, XUE F, YANG W, et al. Optimal operation modes of photovoltaic-battery energy storage system based power plants considering typical scenarios[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 397-406. DOI: 10.1186/s41601-017-0066-9.
- [18] 高红均, 刘俊勇. 考虑不同类型 DG 和负荷建模的主动配电网协同规划[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4911-4922.
GAO Hongjun, LIU Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4911-4922.
- [19] 刘思夷, 赵波, 汪湘晋, 等. 基于 Benders 分解的独立型微电网鲁棒优化容量配置模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 119-126.
LIU Siyi, ZHAO Bo, WANG Xiangjin, et al. Capacity configuration model for robust optimization of stand-alone microgrid based on benders decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 119-126.
- [20] 邱威, 张建华, 刘念. 含大型风电场的环境经济调度模型与解法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 8-16.
QIU Wei, ZHANG Jianhua, LIU Nian. Model and solution for environmental/economic dispatch considering large-scale wind power penetration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 8-16.
- [21] 王愿. PV-PHEVs 混合供电系统的随机优化及模糊控制研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- [22] XIANG Y, LIU J, LIU Y, et al. Robust energy management of microgrid with uncertain renewable generation and load[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1034-1043.
- [23] 曾博, 刘念, 张玉莹, 等. 促进间歇性分布式电源高效利用的主动配电网双层场景规划方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 155-163, 171.
ZENG Bo, LIU Nian, ZHANG Yuying, et al. Bi-level scenario programming of active distribution network for promoting intermittent distributed generation utilization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 155-163, 171.
- [24] 张放, 刘继春, 高红均, 等. 基于风电不确定性的电力系统备用容量获取[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 14-19.
ZHANG Fang, LIU Jichun, GAO Hongjun, et al. Reserve capacity model based on the uncertainty of wind power in the power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 14-19.
- [25] ZENG B, ZHANG J, YANG X, et al. Integrated planning for transition to low-carbon distribution system with renewable energy generation and demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1153-1165.

收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-11-01

作者简介:

石玉东(1966—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与规划;

刘晋源(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划;

徐松(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划。Email: 1473413606@qq.com

(编辑 许威)