

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211382

面向主辅能量市场出清的输电网双层扩展规划

刘方¹, 苏韵掣¹, 苟竞¹, 李晨², 胥威汀¹, 刘友波³

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041; 2. 四川电力交易中心有限责任公司, 四川 成都 610041; 3. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 电力市场开放下源荷频繁互动给高比例可再生能源并网的电力系统规划带来一系列挑战。提出了一种面向电力主辅市场出清的价格驱动下的输电系统双层规划模型。上层模型主要考虑系统运营商的投资成本及系统运行效用成本。下层模型则为主辅电力市场出清模型, 在考虑系统运行宽裕度的前提下以边际节点电价与备用价格引导上层输电网扩展规划。通过将下层市场出清模型基于 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件作为约束代入上层优化模型, 构成混合整数非线性规划问题, 进一步用近似线性化以及互补松弛等方式将非线性优化问题线性化。最后, 以 Garver-6 节点系统及中国西南某 500 kV 输电网络为例进行验证。仿真结果表明所提输电网扩展规划方案有利于激励用户参与与新能源市场化消纳, 降低尖峰负荷场景下线路阻塞, 保障电力市场交易的公平性。

关键词: 输电网; 扩展规划; 电力市场; 边际节点电价

Bi-level model for transmission expansion planning in the energy and reserve market

LIU Fang¹, SU Yunche¹, GOU Jing¹, LI Chen², XU Weiting¹, LIU Youbo³

(1. Economic Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 2. Sichuan Electric Power Trading Center Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 3. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The reform of the electricity market in China has made market participants more active. This has posed a series of challenges for power system planning where there is a high penetration of renewable energy. This paper proposes a price-driven bi-level model for transmission expansion planning. At the upper level, the investment and operation cost of the transmission system is comprehensively considered. At the lower level, a market clearing model is established, i.e., the energy and reserve markets. Local marginal and reserve prices are obtained to guide the expansion planning of the upper level. By integrating the market clearing model of the lower level using the Karush-Kuhn-Tucker condition, a mixed-integer nonlinear programming problem with equilibrium constraints is formulated. This is linearized by linearization methods. In the case study, a modified Garver-6 bus system and 500 kV system of the South-west grid are adopted to test the proposed method. The simulation results show that the transmission expansion planning scheme is able to motivate users to consume more renewable energy to reduce line congestion under peak load scenarios and to ensure fairness in market trading.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSCJY00GHJ2100040).

Key words: transmission network; expansion plan; electricity market; local marginal price

0 引言

“碳中和、碳达峰”目标下, 风电、光伏等高比例可再生能源并网促使电力系统基本结构及运行特征发生根本变化, 电力系统的规划方法亦需随之

调整^[1-3]。一方面, 风电场、光伏电站、水电站等源侧机组出力的强不确定性使得电网调度运行模式日益复杂, 为保障可再生能源的高比例消纳, 如何在电力系统规划方案中平衡规划容量充裕度和输变电设施利用率成为电网规划的一个关键研究点^[4-5]; 另一方面, 电力市场改革开放背景下, 多元化市场主体积极参与、多级市场能源价格波动性频繁、源荷

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGSCJY00GHJ2100040)

端界限逐步模糊^[6-7],竞争性电力市场对电网传输通道将提出新的要求与标准,传统电力系统输电网的规划思路难以适应高比例可再生能源并网与竞争性电力市场环境下的运行新特征。

电力系统输电网扩展规划作为系统安全稳定运行的关键基础环节,旨在基于特定目标实现输电线路容量、类型、拓扑的优选^[8-10]。为辅助系统运营商制定合理的输电网规划方案,现阶段面向于输电网规划的研究工作及建模思路多聚焦于平衡投资规划经济性与运行安全可靠。传统规划思路下,系统运营商倾向于制定具有高冗余度的规划方案应对高占比可再生能源电网运行的典型场景^[11-12]或最劣场景^[13],即以较高的经济代价提升输电线路馈线容量以支撑极端场景下的新能源消纳需求及供电需求^[14-16]。然而,此类研究较少关注逐渐趋于成熟的电力市场机制对于电力系统规划的影响。

电网公司既是电力系统运营者,又是输电资产所有者,集电力市场出清、系统平衡调度和对输电设备及线路投资、运营、维护等多重职能^[17-18]。在电力市场背景下,系统输电网络结构限制及容量限制易导致节点电价偏离边际成本,致使用户电能成本增加,发电商的市场力增大、市场效率降低^[19]。市场主体对电力市场公平效率的诉求日趋增长,如何准确评估未来竞争性多层级电力市场带来的多重价格波动,实现市场公平公正及效用优化是电网规划中亟待解决的重要问题。部分学者针对面向电力市场环境下的输电网扩展规划模型展开研究,文献[20]通过整合确定性规划约束和概率性规划参数,提出了电力主能量市场约束下的输电网规划模型;文献[21-22]结合市场主体竞标博弈行为,提出了一种考虑电力交易信号的输电系统双层优化配置模型;文献[23]进一步提出了面向主能量市场交易出清的系统运营商与发电机组的双层博弈模型,通过上下层参数传递及交互迭代实现系统规划方案优选;文献[24]采用蒙特卡洛方法模拟负荷变化及电能交易价格波动序列,并对应制定扩展规划方案。文献[25]分析了电力市场的市场力对电网规划方案的影响,指出市场主体市场力的滥用会导致电价的上升以及社会福利的损失。文献[26]通过预测规划年中机组的报价策略和负荷增长水平,建立考虑电力市场环境下的多场景电网扩展规划模型;文献[27]进一步通过预测市场下的区域电力市场出清价格,基于确定性/概率性的规划准则建立电网规划模型。然而,以上研究多以发电机组与电网公司在市场环境下的竞争博弈环节为着眼点,鲜少考虑:1)输电线路阻塞传导下的节点电价生成机制;2)节点电价

与备用价格对规划结果的具体影响;3)市场公平效率及主体效用。在实际规划环节,系统运营商在规划时需统筹考虑多级市场的价格影响,如电力主能量市场、辅助服务市场等多级耦合市场,确定经济可靠的投资方案以在提升可再生能源消纳水平、满足市场交易需求等多目标间谋求平衡。

电力系统长周期的规划决策以为短周期全网安全稳定运行提供通道裕度为目标,规划形成的目标网架将改变输电网络的运行安全域,从而影响实时交易出清结果及实时调度方案的制定,规划—市场—运行在长短时间尺度上相互耦合影响。本文提出了一种主辅能量市场出清价格驱动下的输电系统双层扩展规划模型,上层模型主要考虑系统运营商的投资成本及系统运行效用成本,下层模型为主辅电力市场出清模型,以边际节点电价(Locational Marginal Prices, LMP)与备用价格引导上层输电网扩展规划。通过将下层市场出清模型基于 KKT 条件作为约束代入上层优化模型,构成表示为混合整数非线性规划形式(Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP)的含均衡约束的数学规划问题(Mathematical Programming with Equilibrium Constraints, MPEC),进一步用近似线性化以及互补松弛等方式将双层 MILNLP 问题转化为一定精度下的 MILP 问题进行求解。最后以改进的 Garver-6 节点系统及西南 500 kV 输电网为算例对本文方法进行了验证。本文以节点电价及其不平衡度来刻画网络的阻塞程度及市场公平度,以线路投资成本及系统运营成本刻画系统经济性,以可再生能源弃电量刻画系统新能源并网态势,实现了兼顾公平性、效用度、经济性的多目标输电网扩展规划。

1 模型思路

本文采用集中式的现货市场及辅助服务市场交易出清及安全校核的模式。其中,供需双方基于自身供需态势通过电力库申报交易量,系统运行机构根据发、用双方的报量进行全电量集中统一出清并发布系统节点电价、制定调度计划、确定机组组合。其中,常规机组以节点价格实现电能交易,以备用市场出清价格为系统提供备用容量。

该种电力市场交易模式下的高占比可再生能源输电网扩展规划可呈现为一个双层优化问题。其中,上层是电网作为系统规划者的决策函数,其规划目标是通过合理的扩展及新建输电线路,使得系统内多级市场参与者的总福利最大化、系统运行费用最小化。下层为主辅能量市场出清问题,系统运营商基于市场供需状态,确定典型运营日的现货市场节点边际价格及备用市场上、下备用价格,并实现机组优化调度。

上层规划模型实现输电网扩展规划, 下层市场出清模型指导运行调度, 上下层耦合模型集规划、市场、运行为一体, 具体如图 1 所示。

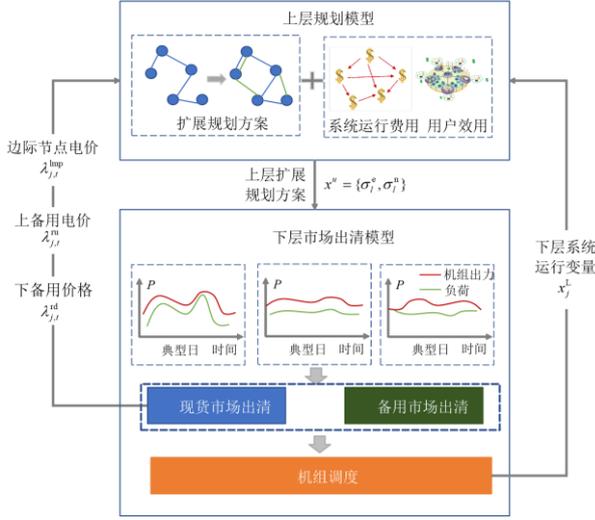


图 1 计及市场出清的输电网双层规划模型

Fig. 1 Transmission expansion planning framework integrated with market clearing results

2 模型构建

2.1 上层电网规划模型

系统运营商统筹考虑规划周期内电力主能量市场及备用市场出清结果及社会效用, 集中式地进行输电线路扩展规划方案, 即确定规划年限内输电系统新建或扩展线路的位置及容量。本文通过刻画等值年内多典型日最高负荷及发电运行方式, 实现考虑恶劣场景下的输电网的扩展规划, 其目标函数可表示为

$$\min_{x^u} C^S(x^u) := C^E(x^u) + 365 \sum_{j \in J} w_j (C_j^P(x^u, x_j^l) + C_j^U(x_j^l)) \quad (1)$$

式中: $C_j^P(\cdot)$, $C_j^U(\cdot)$, $C^E(\cdot)$ 分别为典型日 j 系统运行成本函数、社会效用成本函数及系统投资成本函数; x^u 为上层输电线路规划决策变量; x_j^l 为下层典型日 j 市场出清下的机组调度决策; J 为规划周期典型日集合; w_j 为典型日权重, $\sum_{j \in J} w_j = 1$ 。

采用等年值法计算系统运营商的投资成本 $C^E(\cdot)$, 可表述为

$$C^E(x^u) = \frac{r(1+r)^{M_n}}{(1+r)^T - 1} \left(\sum_{l \in L^c} \rho_l^c \sigma_l^c K_l^c + \sum_{l \in L^n} \rho_l^n \sigma_l^n K_l^n \right) \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in L^c} \rho_l^c \sigma_l^c K_l^c + \sum_{l \in L^n} \rho_l^n \sigma_l^n K_l^n \leq I^{\max} \quad (3)$$

$$\sigma_l^c + \sigma_l^n \leq 1 \quad \forall l \in L^o \quad (4)$$

式中: $x^u = \{\sigma_l^c, \sigma_l^n\}$, σ_l^c, σ_l^n 为系统运营商面向新建线路及扩展线路的 0-1 决策变量; K_l^c, K_l^n 为新建线路及扩展线路的容量; L^c, L^n, L^o 为新投资线路候选集合、扩展线路候选集合、规划前已有线路集合, 且 $L^n \in L^o$; ρ_l^c, ρ_l^n 为新建线路/扩展线路的单位投资费用; I^{\max} 为最大投资金额; r 为规划方案的贴现率; M_n 为投资规划年限。式(3)保证了输电网扩展规划方案满足初始预算要求; 式(4)避免了新建线路及扩展线路的重复投资规划。

社会效用成本函数 $C_j^U(\cdot)$ 为机组与用户的社会成本效用之和, 可表述为

$$C_j^U(x_j^l) = \left(\begin{aligned} & - \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} (\lambda_{j,t,g}^{\text{mp}} p_{j,t,g}^g + \lambda_{j,t,g}^{\text{ru}} r_{j,t,g}^{\text{ru}} + \lambda_{j,t,g}^{\text{rd}} r_{j,t,g}^{\text{rd}}) + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \left(-\alpha_m D_{j,t,m}^d + \frac{1}{2} \beta_m D_{j,t,m}^d{}^2 \right) \end{aligned} \right) \quad (5)$$

式中: 前一项为机组参与主辅能量市场收益, 后一项为用户的用能效用函数; $p_{j,t,g}^g$ 为机组出力; $r_{j,t,g}^{\text{ru}}, r_{j,t,g}^{\text{rd}}$ 为机组 $g \in G$ 提供的上备用与下备用; $D_{j,t,m}^d$ 为用户 $m \in M$ 负荷率; α_m, β_m 为该用户的效用系数; $\lambda_{j,t,g}^{\text{mp}}$ 为主能量市场的边际节点电价; $\lambda_{j,t,g}^{\text{ru}}, \lambda_{j,t,g}^{\text{rd}}$ 分别为辅助备用市场的上备用及下备用价格。

2.2 下层主辅能量市场出清模型

下层主辅能量市场出清模型旨在满足系统安全运行约束的前提下使得每个典型日 j 的系统运行成本 C_j^P 最小。通过建立基于 DC-OPF 的直流潮流模型, 计及系统功率平衡约束、发电机出力约束、负荷容量约束和线路输送容量约束等物理约束, 安全校核后由统一出清确定系统节点交易价格, 对于任意时刻 t :

$$\min_{x_j^l} C_j^P(x_j^l) := \sum_{t \in T} \left(\begin{aligned} & \sum_{d \in D} c_{j,t}^d p_{j,t,d}^d + \sum_{g \in G} c_{j,t}^g p_{j,t,g}^g + \\ & \sum_{g \in G} c_{j,t}^{\text{ru}} r_{j,t,g}^{\text{ru}} + \sum_{g \in G} c_{j,t}^{\text{rd}} r_{j,t,g}^{\text{rd}} \end{aligned} \right) \quad (6)$$

式中: $x_j^l = \{D_{j,t,m}^d, p_{j,t,d}^d, p_{j,t,g}^g, r_{j,t,g}^{\text{ru}}, r_{j,t,g}^{\text{rd}}, f_{j,t,l}, \theta_{j,t,b}\}$ 为下层决策变量, $D_{j,t,m}^d, p_{j,t,d}^d, p_{j,t,g}^g, r_{j,t,g}^{\text{ru}}, r_{j,t,g}^{\text{rd}}$ 分别为系统负荷率、可再生能源弃电量、常规机组出力、常规机组提供的上备用容量、常规机组提供的下备用容量; $c_{j,t}^d, c_{j,t}^g, c_{j,t}^{\text{ru}}, c_{j,t}^{\text{rd}}$ 分别为可再生能源弃电、常规机组出力、常规机组提供的上备/下备用容量的单位成本; D, G 分别为可再生能源节点集合与常规机组节点集合; T 为一日 24 h 时刻点集合。下层模型的

具体约束如下:

1) 机组约束

$$p_{j,t,g}^g + r_{j,t,g}^{ru} \leq G_g^{\max} \quad : (m_{j,t,g}^{G^+}) \quad (7)$$

$$r_{j,t,g}^{rd} - p_{j,t,g}^g \leq -G_g^{\min} \quad : (m_{j,t,g}^{G^-}) \quad (8)$$

$$r_{j,t,g}^{ru} \leq R_g^{RU} \quad : (m_{j,t,g}^{RU}) \quad (9)$$

$$r_{j,t,g}^{rd} \leq R_g^{RD} \quad : (m_{j,t,g}^{RD}) \quad (10)$$

$$p_{j,t,g}^g \geq 0, r_{j,t,g}^{ru} \geq 0, r_{j,t,g}^{rd} \geq 0 \quad : (m_{j,t,g}^g, m_{j,t,g}^{ru}, m_{j,t,g}^{rd}) \quad (11)$$

式中: G_g^{\max}, G_g^{\min} 为该常规机组 $g \in G$ 的最大/最小出力; R_g^{RU}, R_g^{RD} 为该机组的最大上/下备用容量。式(7)和式(8)约束了常规机组在参与主能量市场时的最大/最小出力; 式(9)和式(10)约束了该机组在参与备用市场时提供的最大上/下备用容量。

2) 可再生能源弃电及负荷约束

$$0 \leq p_{j,t,d}^d \leq G_{j,t,d}^{re} \quad : (m_{j,t,d}^d) \quad (12)$$

$$D_{j,t,b}^0 \leq D_{j,t,b}^d \leq D_{j,t,b}^{\max} \quad : (m_{j,t,b}^{DD}, m_{j,t,b}^{DU}) \quad (13)$$

式中: $G_{j,t,d}^{re}$ 为可再生能源机组 $d \in D$ 在典型日 j 时刻 t 下的最大出力; $D_{j,t,b}^0, D_{j,t,b}^{\max}$ 为节点 $b \in B$ 上的基础负荷率与最大负荷率。

3) 系统约束

在该典型日 j 对于任意时刻 t , 系统运行应满足以下约束。

(1) 节点平衡约束

$$G_{j,t,b}^{re} - p_{j,t,b}^d + p_{j,t,b}^g - \sum_{l|b \in o(l)} f_{j,t,l} + \sum_{l|b \in r(l)} f_{j,t,l} = D_{j,t,b}^d \quad : (\lambda_{j,t}^1) \forall b \in B \quad (14)$$

式中: $f_{j,t,l}$ 为输电线路 $l \in L$ 上的线路潮流, L 为上层规划决策下系统所有线路的集合, $L = L^e \cup L^l \cup L^o$; $b \in o(l)$ 为节点 b 送端线路集合; $b \in r(l)$ 为节点 b 受端线路集合; B 为节点集合。

(2) 备用约束

$$\sum_{g \in G} r_{j,t,g}^{ru} \geq \phi^G \sum_{b \in B} G_{j,t,b}^{re} + \phi^D \sum_{b \in B} D_{j,t,b}^d \quad : (\lambda_{j,t}^{ru}) \quad (15)$$

$$\sum_{g \in G} r_{j,t,g}^{rd} \geq \phi^G \sum_{b \in B} G_{j,t,b}^{re} + \phi^D \sum_{b \in B} D_{j,t,b}^d \quad : (\lambda_{j,t}^{rd}) \quad (16)$$

式(15)和式(16)保障了输电系统内所有常规机组提供的上/下备用容量裕度可满足考虑可再生能源出力及负荷需求波动性的备用需求, ϕ^G, ϕ^D 为可再生能源、负荷的一定备用比例。

(3) 系统运行安全约束:

系统运行安全约束包括考虑 DC-OPF 的节点电压约束式(17), 线路潮流约束式(18)一式(21)^[28]。

$$\theta^{\min} \leq \theta_{j,t,b} \leq \theta^{\max} \quad : (\varepsilon_{j,t,b}^L, \varepsilon_{j,t,b}^{L^+}) \quad \forall b \in B \quad (17)$$

$$-\sigma_l^e K_l^e \leq f_{j,t,l} \leq \sigma_l^e K_l^e \quad : (\mu_{j,t,l}^e, \mu_{j,t,l}^{e^+}) \quad \forall l \in L^e \quad (18)$$

$$-(1 - \sigma_l^e) M_l \leq f_{j,t,l} - B_l (\theta_{j,t,o(l)} - \theta_{j,t,r(l)}) \leq (1 - \sigma_l^e) M_l \quad : (\mu_{j,t,l}^L, \mu_{j,t,l}^{L^+}) \quad \forall l \in L^e \quad (19)$$

$$-K_l^o - \sigma_l^n K_l^n \leq f_{j,t,l} \leq K_l^o + \sigma_l^n K_l^n \quad : (\psi_{j,t,l}^o, \psi_{j,t,l}^{o^+}) \quad \forall l \in L^o \quad (20)$$

$$f_{j,t,l} = B_l (\theta_{j,t,o(l)} - \theta_{j,t,r(l)}) \quad : (\psi_{j,t,l}^L) \quad \forall l \in L^o \quad (21)$$

式中: K_l^e 为初始线路容量; $\theta_{j,t,b}$ 为节点电压; $\theta^{\min}, \theta^{\max}$ 分别为节点电压的极小值与极大值; B_l 为线路 l 的电纳; M_l 为一个极大值。式(17)为节点电压约束; 式(18)一式(21)为新建线路的潮流约束; 式(19)和式(20)为考虑线路扩容的初始线路的潮流约束。

下层约束式(7)一式(21)对应的拉格朗日乘子变量分别为 $m_{j,t,g}^{G^+}, m_{j,t,g}^{G^-}, m_{j,t,g}^{RU}, m_{j,t,g}^{RD}, m_{j,t,g}^g, m_{j,t,g}^{ru}, m_{j,t,g}^{rd}, m_{j,t,d}^d, m_{j,t,b}^{DD}, m_{j,t,b}^{DU}, \lambda_{j,t}^1, \lambda_{j,t}^{ru}, \lambda_{j,t}^{rd}, \varepsilon_{j,t,b}^L, \varepsilon_{j,t,b}^{L^+}, \mu_{j,t,l}^e, \mu_{j,t,l}^{e^+}, \mu_{j,t,l}^L, \mu_{j,t,l}^{L^+}, \psi_{j,t,l}^o, \psi_{j,t,l}^{o^+}, \psi_{j,t,l}^L$ 。其中, $\lambda_{j,t}^{ru}, \lambda_{j,t}^{rd}$ 为系统上备用、下备用约束的拉格朗日乘子变量, 在下层表征最终备用市场出清价格。DC-OPF 下系统 LMP 为下层模型拉格朗日函数形式下对单位负荷的偏导^[29], 可由式(22)计算。

$$\lambda_{j,t,b}^{lmp} = \lambda_{j,t}^1 + h(\mu_{j,t,l}^e, \mu_{j,t,l}^{e^+}, \psi_{j,t,l}^o, \psi_{j,t,l}^{o^+}, \psi_{j,t,l}^L) \quad (22)$$

式中: $\lambda_{j,t}^1$ 代表 LMP 的发电边际成本分量; $h(\cdot)$ 代表输电线路的阻塞分量, 与线路潮流约束式(18)一式(21)有关。

3 求解算法

3.1 MINLP 表达式

考虑到下层市场出清模型是一个线性规划问题, 利用下层主辅能量市场出清模型的 KKT 条件将原双层问题等价转化为含 MPEC 的单层 MINLP 问题, 基于式(1)的目标函数可表征为

$$\min_{x^u} 365 \sum_{j \in J} w_j \left(\sum_{t \in T} \sum_{d \in D} c_{j,t}^D p_{j,t,d}^d + \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \left(-\alpha_m D_{j,t,m}^d + \frac{1}{2} \beta_d D_{j,t,m}^d{}^2 \right) + \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} \left(c_{j,t}^G p_{j,t,g}^g + c_{j,t}^{ru} r_{j,t,g}^{ru} + c_{j,t}^{rd} r_{j,t,g}^{rd} - \lambda_{j,t,g}^{lmp} p_{j,t,g}^g - \lambda_{j,t,g}^{ru} r_{j,t,g}^{ru} - \lambda_{j,t,g}^{rd} r_{j,t,g}^{rd} \right) \right) + \frac{r(1+r)^{M_n}}{(1+r)^T - 1} \left(\sum_{l \in L^e} \rho_l^e \sigma_l^e K_l^e + \sum_{l \in L^o} \rho_l^o \sigma_l^o K_l^o \right) \quad (23)$$

s.t.

式(3)、式(4), 式(7)一式(21), 式(A1)一式(A17)

$$G_{j,t,b}^{\text{re}} - p_{j,b}^{\text{d}} + p_{j,b}^{\text{g}} - \sum_{l|b \in o(l)} f_{j,t,l} + \sum_{l|b \in r(l)} f_{j,t,l} = D_{j,t,b}^{\text{d}} \quad (24)$$

$$m_{j,t,d}^{\text{DU}} - m_{j,t,d}^{\text{DD}} - \lambda_{j,t,b}^{\text{imp}} + \phi^G \lambda_{j,t,n}^{\text{ru}} + \phi^D \lambda_{j,t,n}^{\text{rd}} = 0 \quad \forall j,t,b \quad (25)$$

$$c_{j,t}^D - \lambda_{j,t,d}^{\text{imp}} + m_{j,t,d}^D - m_{j,t,d}^{\text{d}} = 0 \quad \forall j,t,d \quad (26)$$

$$c_{j,t}^G + m_{j,t,g}^{G^+} - m_{j,t,g}^{G^-} - m_{j,t,g}^g = 0 \quad \forall j,t,g \quad (27)$$

$$c_{j,t}^{\text{ru}} + m_{j,t,g}^{G^+} + m_{j,t,g}^{\text{RU}} - m_{j,t,g}^{\text{ru}} - \lambda_{j,t}^{\text{ru}} = 0 \quad \forall j,t,g \quad (28)$$

$$c_{j,t}^{\text{rd}} + m_{j,t,g}^{G^-} + m_{j,t,g}^{\text{RD}} - m_{j,t,g}^{\text{rd}} - \lambda_{j,t}^{\text{rd}} = 0 \quad \forall j,t,g \quad (29)$$

$$\mu_{j,t,l}^{\text{L}^+} - \mu_{j,t,l}^{\text{L}^-} + \mu_{j,t,l}^{\text{f}^+} - \mu_{j,t,l}^{\text{f}^-} + \lambda_{j,t,r(l)}^{\text{l}} - \lambda_{j,t,o(l)}^{\text{l}} = 0 \quad \forall j,t,l \in L^e \quad (30)$$

$$\psi_{j,t,l}^{\text{f}^+} - \psi_{j,t,l}^{\text{f}^-} + \psi_{j,t,l}^{\text{L}} + \lambda_{j,t,r(l)}^{\text{l}} - \lambda_{j,t,o(l)}^{\text{l}} = 0 \quad \forall j,t,l \in L^o \quad (31)$$

$$\sum_{l \in L^e | b \in r(l)} (\mu_{j,t,l}^{\text{L}^+} - \mu_{j,t,l}^{\text{L}^-}) B_l - \sum_{l \in L^e | b \in o(l)} (\mu_{j,t,l}^{\text{L}^+} - \mu_{j,t,l}^{\text{L}^-}) B_l + \sum_{l \in L^o | b \in r(l)} \psi_{j,t,l}^{\text{L}} B_l - \sum_{l \in L^o | b \in o(l)} \psi_{j,t,l}^{\text{L}} B_l + \varepsilon_{j,t,b}^{\text{L}^+} - \varepsilon_{j,t,b}^{\text{L}^-} = 0 \quad \forall j,t,l \quad (32)$$

将式(7)一式(21)和式(24)一式(32)作为上层规划问题的新约束条件, 式(24)一式(32)与式(A1)一式(A17)为下层市场出清问题基于 KKT 的约束条件。

3.2 线性化处理过程

附录式(A1)一式(A17)中约束以 $0 \leq x \perp y \geq 0$ 的模式出现, 互补松弛条件作为非线性等式, 其生成的约束非线性凸显, 进一步通过 Fortuny-Amat 线性化方法将其转化为 MILP 约束表达式为^[30]

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq M_h u \\ 0 \leq y \leq M_h (1-u) \end{cases}, u \in \{0,1\} \quad (33)$$

式中: M_h 为大的正数; u 为 0-1 变量。

此外, 目标函数式(23)中, $\lambda_{j,t,g}^{\text{imp}}, p_{j,t,g}^{\text{g}}, \lambda_{j,t,g}^{\text{ru}}, r_{j,t,g}^{\text{ru}}, \lambda_{j,t,g}^{\text{rd}}, r_{j,t,g}^{\text{rd}}$ 等作为双线性连续变量, 亦具有非线性特征, 采用二进制展开法进一步进行离散线性化处理。设双线性连续变量为 x, y , 即目标函数中含有 $x \cdot y$ 项。

$$\text{s.t. } 0 \leq x \leq x^{\text{max}}, y \geq 0 \quad \forall j,t,b \quad (34)$$

式中, x^{max} 为变量 x 的最大阈值。

将 x^{max} 离散处理为 $x_i^{\text{max}} = i/Nx^{\text{max}}, i \in N, x_i^{\text{max}}$ 为 x^{max} 在第 i 个刻度的离散值。

新增离散变量 z 替代目标函数总的 $x \cdot y$ 项, 新

增 0-1 变量 ρ_i, α_i, μ , 设

$$z_i = \begin{cases} x_i^{\text{max}} y, & \text{if } \alpha_i = \rho_i = 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (35)$$

需满足以下约束。

$$x = \sum_i \alpha_i x_i^{\text{max}}, \sum_i \alpha_i = 1 \quad (36)$$

$$\mu = \begin{cases} 1, & \text{if } y \geq 0 \\ 0, & \text{if } y < 0 \end{cases}, \rho_i = \begin{cases} 1, & \text{if } z_i \geq 0 \\ 0, & \text{if } z_i < 0 \end{cases} \quad (37)$$

$$0 \leq y \leq M_g \mu \quad (38)$$

$$\begin{cases} \alpha_i \leq \rho_i \\ \alpha_i \leq \mu \\ \mu + \rho_i - 1 \leq \alpha_i \end{cases} \quad (39)$$

$$\begin{cases} z_i \leq x_i^{\text{max}} y \\ 0 \leq z_i \leq M_g \alpha_i \end{cases} \quad (40)$$

式中: 取 α_i 作为 0-1 指标变量, $\alpha_i = 1$ 时 x 取值 x_i^{max} ; 同理 μ 与 z_i 在 $y \geq 0$ 与 $z_i \geq 0$ 时皆取 1; M_g 为一个极大的正数。式(38)保证了当 $\mu, \alpha_i = 1$ 时, 有 $\rho_i = 1$; 式(39)保证了 z_i 的取值范围在 x, y 极值约束范围内。通过增加 0-1 变量, 由此可将目标函数中的双线性变量转换为离散线性变量。由此, 可得到原 MINLP 问题的 MILP 表达式, 由商业软件可直接求解。

4 算例结果

采用系统改进的 Garver-6 系统与西南某电网 91 节点 500 kV 系统分别对所提方案进行验证。在算例中, 取新能源备用率 $\phi^G = 3\%$, 负荷备用率 $\phi^D = 3\%$, 设新能源弃电成本为 50 元/MWh, 贴现率 $r = 10\%$, 工程年限 $T = 10$ 年, 典型日集合 $J = 3T = 24$ h。其中, 单回线路单位长度的造价为 5 万元/MW。

4.1 Garver-6 节点系统

改进的 Garver-6 系统含 1 台风电场, 2 台常规发电机组, 6 个负荷节点, 7 条可新建线路(如图 2 蓝色虚线所示)与 5 条原始/可扩建的输电线路(如图 2 黑线所示), 改进的系统网络参数见附表 1, 设每条输电线路可建最多 2 回线路(计及原有线路)。该系统母线 1、2 与常规机组连接, 机组 G1 = 300 MW, G2 = 80 MW, 母线 6 安装风电场 WT = 200 MW, 如图 2 所示。

将仅计及系统运行成本的输电线路扩展方案 A 与计及主辅市场出清结果的输电线路扩展方案 A 进行对比, 具体规划及年投资结果与典型日平均运行成本如表 1 和表 2 所示。与方案 A 相比, 方案 B 的

输电线路扩展需求投资经济性更优, 仅为方案 A 的 1/2。方案 B 的系统运行成本虽然高于方案 A, 但统筹考虑了负荷需求效用及市场出清结果的方案 B 有利于激励用户用电需求、提升用户市场参与积极性、增加系统用户效用, 促进新能源的进一步消纳。

进一步对比不同新能源装机占比下方案 B 的规划方案差异, 当新能源渗透率分别为 20%、40%、60% 时, 系统规划方案表 3 所示。由表 3 可知, 系统新能源占比的增加使得系统对输电网新建线路及扩展线路的需求逐渐增加, 规划成本亦随之增加。且新能源渗透率对系统边际节点价格影响显著, 与 20% 渗透率下新能源系统相比, 40% 新能源占比的电力系统由于新能源发电充裕, 系统运营商可选择更优质经济的常规机组发电, 从而有助于降低系统边际节点价格。随着新能源发电比例的阶越式提升, 线路阻塞现象显征, 系统内新能源弃电成本大幅上升, 系统内平均节点电价亦有不同程度的提升。

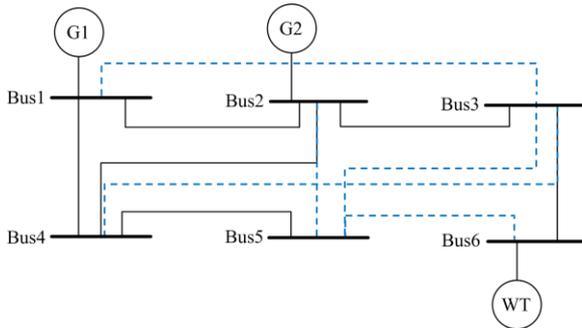


图 2 改进的 Garver-6 节点系统
Fig. 2 Modified Garver-6 bus system

表 1 不同方案的 Garver-6 输电线路扩展情况

Table 1 Transmission expansion results of Garver-6 system of different cases

方案	新建线路	扩展线路	投资金额/万元
A	1-6、2-5、3-4	3-6	1150
B	5-6	1-4	625

表 2 不同方案的 Garver-6 日运行结果

Table 2 Daily operation results of Garver-6 system of different cases

方案	总发电量/MWh	负荷/MWh	弃电量/MWh	系统运行成本/元	系统用户效用
A	1134.2	1080	54.2	16 413.3	2639
B	1445.3	1421	24.3	19 104.3	3378

表 3 不同新能源渗透率下规划方案对比

Table 3 Transmission expansion results with different renewable energy penetration

新能源占比/%	新建线路	扩展线路	投资金额/万元	平均节点电价	弃电率/%
20	2-4	1-4	1160	20	0
40	1-6、3-4	1-4、3-6	1960	18	8
60	1-6、2-5、3-4	1-4、3-6	2480	24.28	32.3

4.2 西南电网 500 kV 系统

西南电网小水电密集, 在其 91 节点 500 kV 系统内, 水电站建有 21 个, 火电站仅建有 7 个, 原始网络及扩展方案见附表 2。系统内已建成的输电线路为 108 条, 可新建线路有 26 条, 假设每条支路的线路上限为 2 条, 系统内日最大负荷为 25 400 MW, 水电站最高出力为 22 065 MW。该系统结构如图 3 所示。

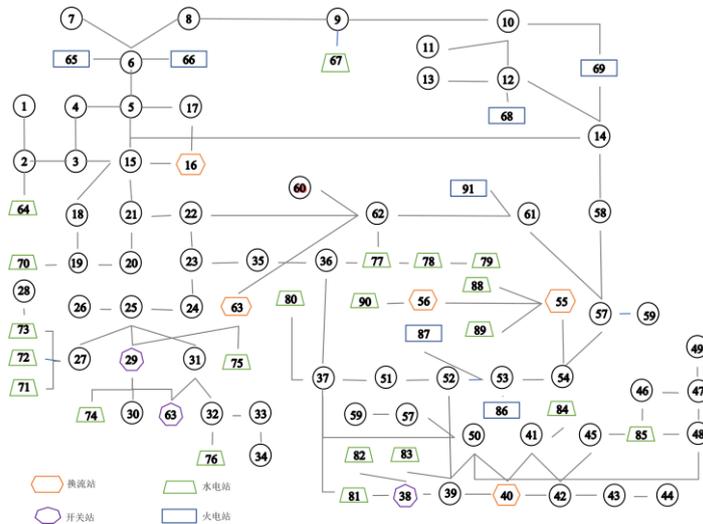


图 3 西南某电网 91 节点 500 kV 系统

Fig. 3 91-bus 500 kV system of Southwest grid in China

具体规划及年投资结果与日运行成本如表 4 和表 5 所示。从投资经济性来看,方案 A 下新建线路为 9 条,扩展线路 21 条,投资金额为 29 910 万元;方案 B 下新建线路 11 条,扩展线路 16 条,投资金额为 279 010 万元,方案 B 经济性较优。从日运行结果来看,虽然方案 B 系统运行成本略高于方案 A,但方案 B 水电弃电量较少、系统效用指标较优。

表 4 西南电网 91 节点 500 kV 输电线路扩展方案

Table 4 Transmission expansion results of 91-bus 500 kV system of Southwest power grid in China

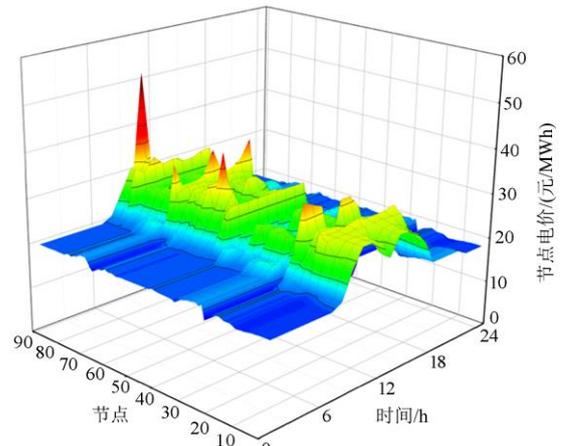
方案	新建线路	扩展线路	投资金额/ 万元
A		12-14、19-26、23-24、 37-36、38-39、41-42、 32-78、22-58、51-88、 42-43、43-44、40-45、	29 910
	49-90、15-91、52-84、	45-50、48-49、37-51、	
	24-68、59-97、44-75	52-56、54-55、54-57、 57-58、57-61、57-59、 60-62、62-63、14-58	
		20-21、23-24、37-36、 32-78、20-24、22-58、 38-39、40-45、45-50、	
	51-88、49-90、15-91、	48-49、37-51、52-56、	
B	14-21、52-84、62-69、	54-55、54-57、57-58、	279 010
	24-68、59-87	57-61、57-59、60-62、 14-58	

表 5 西南电网 91 节点 500 kV 日运行结果

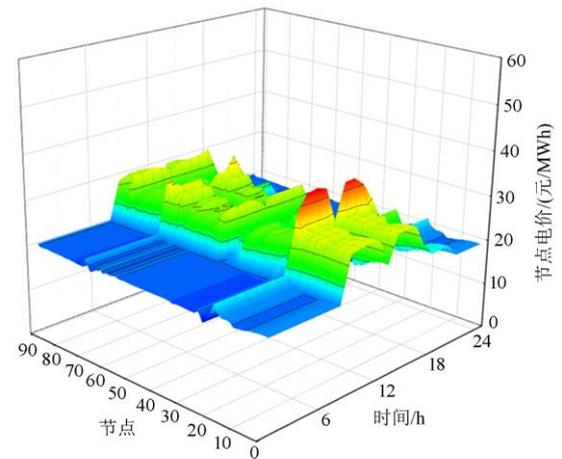
Table 5 Daily operation results of 91-bus 500 kV system of Southwest power grid in China

方案	总发电量/ MWh	负荷/ MWh	弃电量/ MWh	系统运行 成本/万元	系统用户 效用
A	357 066	338 268	18 798	593.7	112.2×10 ⁴
B	356 743	342 120	14 623.3	605.3	118.8×10 ⁴

进一步对比了不同规划方案下某典型日系统内部节点的边际节点价格,规划方案 A 与方案 B 下全天节点电价如图 4 与表 6 所示。在负荷高峰时期(中午时段),两种方案下的系统节点电价均有不同程度的提升,但计及主辅能量市场出清结果的方案 B 下的平均边际节点电价较方案 A 低约 1.52 元/MWh。且随着负荷率的增加,系统阻塞现象明显,不同节点的节点电价出现波动,方案 A 节点电价最高可达 51.511 元/MWh,规划方案 B 下的节点电价波动明显较低。较低且平稳的边际节点电价有利于稳定市场交易秩序,激励源荷多主体参与市场交易,并促进可再生能源的就地消纳,实现市场供需态势均衡及效用优化。



(a) 方案A



(b) 方案B

图 4 某典型日不同规划方案下系统节点电价

Fig. 4 Daily LMP of different transmission planning cases

表 6 西南电网 91 节点 500 kV 日节点电价

Table 6 Daily LMP results of 91-bus 500 kV system of Southwest power grid in China

方案	平均节点电价/ (元/MWh)	最高节点电价/ (元/MWh)	绝对均差/ (元/MWh)
A	22.092	51.511	3.2358
B	20.571	37.906	1.6077

5 结论

本文提出了一种主能量市场及备用市场出清价格驱动下的输电系统双层规划模型,以边际节点价格与上/下备用价格引导输电网扩展规划。通过将下层多级市场出清模型基于 KKT 条件作为约束代入上层规划模型,将双层问题转化为单层 MINLP 表达式,用 Fortuny-Amat 线性化及双线性变量离散线性化方法将 MILNLP 问题转 MILP 问题求解。采用

改进 Garver-6 节点系统和西南 500 kV 输电网为算例对本文所提出的双层规划模型仿真验证, 结果表明, 与传统不计及市场出清结果的规划方法相比, 所提出的方法: 1) 投资经济性较优, 在保障系统安全稳定运行的前提下规划方案投资金额更少; 2) 系统用户效用较优, 所提出的双层规划模型可统筹考虑系统运行成本与用户负荷效用, 有利于激励用户更大的用电需求和市场交易需求, 实现可再生能源的全面消纳; 3) 系统边际节点价格较稳定, 所提出规划方案有利于减轻尖峰负荷场景下线路阻塞, 保障全系统的供需均衡态势及市场交易的公平性。

然而, 本文暂未考虑供需主体竞标的博弈行为, 以及其余市场机制及市场出清模式对输电网扩展的影响, 后续将针对以上问题进一步深入研究分析。

附录

互补松弛约束:

$$0 \leq p_{j,t,g}^g + r_{j,t}^{ru} - G_g^{\max} \perp m_{j,t,g}^+ \geq 0 \quad \forall j,t,g \quad (A1)$$

$$0 \leq r_{j,t}^{rd} - p_{j,t,g}^g + G_g^{\min} \perp m_{j,t,g}^- \geq 0 \quad \forall j,t,g \quad (A2)$$

$$0 \leq r_{j,t,g}^{ru} - R_g^{RU} \perp m_{j,t,g}^{RU} \geq 0 \quad \forall j,t,g \quad (A3)$$

$$0 \leq r_{j,t,g}^{ru} \perp m_{j,t,g}^{ru} \geq 0 \quad \forall j,t,g \quad (A4)$$

$$0 \leq r_{j,t,g}^{rd} \perp m_{j,t,g}^{rd} \geq 0 \quad \forall j,t,g \quad (A5)$$

$$0 \leq p_{j,t,d}^d - G_{j,t,d}^{re} \perp m_{j,t,d}^D \geq 0 \quad \forall j,t,d \quad (A6)$$

$$0 \leq p_{j,t,d}^d \perp m_{j,t,d}^d \geq 0 \quad \forall j,t,d \quad (A7)$$

$$0 \leq \phi^G \sum_{b \in B} G_{j,t,b}^{re} + \phi^D \sum_{b \in B} D_{j,t,b}^d - \sum_{g \in G} r_{j,t,g}^{ru} \perp \lambda_{j,t}^{ru} \geq 0 \quad \forall j,t \quad (A8)$$

$$0 \leq \phi^G \sum_{b \in B} G_{j,t,b}^{re} + \phi^D \sum_{b \in B} D_{j,t,b}^d - \sum_{g \in G} r_{j,t,g}^{rd} \perp \lambda_{j,t}^{rd} \geq 0 \quad \forall j,t$$

附表 2 西南电网 500 kV 系统输电网扩建备选集参数

Attached Table 2 Candidate expansion set of 500 kV system of Southwest power grid in China

	支路
已建线路/	1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 6-8, 9-8, 9-10, 11-10, 12-10, 12-13, 12-14, 15-14, 15-16, 15-5, 17-5, 15-3, 16-17, 15-18, 15-21, 18-19, 20-19, 20-21, 19-26, 25-26, 25-24, 23-24, 23-22, 21-22, 25-27, 25-29, 25-31, 27-29, 30-29, 31-32, 32-33, 34-33, 35-23, 35-36, 37-36, 37-50, 39-50, 39-38, 39-38, 39-40, 40-41, 42-41, 42-43, 44-43, 42-45, 40-45, 50-45, 50-48, 48-47, 48-49, 46-47, 37-51, 52-51, 52-39, 52-56,
可扩建线路	55-56, 54-55, 54-53, 53-52, 54-57, 58-57, 61-57, 59-57, 61-62, 60-62, 63-62, 22-62, 58-14, 63-29, 63-31, 64-2, 66-6, 67-9, 68-12, 69-10, 70-19, 71-27, 72-27, 73-27, 73-28, 74-29, 75-63, 76-32, 77-36, 77-62, 77-78, 78-79, 80-37, 81-37, 81-38, 82-38, 83-39, 84-41, 85-45, 85-46, 85-48, 86-53, 87-53, 88-55, 89-55, 90-56, 91-61
可新建线路	32-78, 41-83, 51-61, 20-24, 3-19, 4-65, 22-58, 51-88, 41-77, 41-78, 49-90, 15-91, 30-76, 21-14, 54-68, 50-79, 51-91, 52-84, 15-71, 62-69, 3-70, 32-84, 24-68, 59-87, 44-75, 7-64,

参考文献

[1] 张瑶, 王傲寒, 张宏. 中国智能电网发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 180-187.
ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview

$$0 \leq \theta_{j,t,b} - \theta^{\max} \perp \varepsilon_{j,t,b}^L \geq 0 \quad \forall j,t,b \quad (A9)$$

$$0 \leq \theta^{\min} - \theta_{j,t,b} \perp \varepsilon_{j,t,b}^L \geq 0 \quad (A10)$$

$$0 \leq (1 - \sigma_l^e) M_l + B_l (\theta_{j,t,o(l)} - \theta_{j,t,r(l)}) - f_{j,t,l} \perp \mu_{j,t,l}^L \geq 0 \quad \forall j,t,l \in L^e \quad (A11)$$

$$f_{j,t,l} \perp \mu_{j,t,l}^L \geq 0 \quad (A12)$$

$$0 \leq f_{j,t,l} - B_l (\theta_{j,t,o(l)} - \theta_{j,t,r(l)}) + (1 - \sigma_l^e) M_l \perp \mu_{j,t,l}^L \geq 0 \quad \forall j,t,l \in L^e \quad (A13)$$

$$0 \leq \sigma_l^e K_l^e - f_{j,t,l} \perp \mu_{j,t,l}^{f+} \geq 0 \quad \forall j,t,l \in L^e \quad (A14)$$

$$0 \leq f_{j,t,l} + \sigma_l^e K_l^e \perp \mu_{j,t,l}^{f-} \geq 0 \quad \forall j,t,l \in L^e \quad (A15)$$

$$0 \leq K_l^o + \sigma_l^n K_l^n - f_{j,t,l} \perp \psi_{j,t,l}^{f+} \geq 0 \quad \forall j,t,l \in L^o \quad (A16)$$

$$0 \leq K_l^o + \sigma_l^n K_l^n + f_{j,t,l} \perp \psi_{j,t,l}^{f-} \geq 0 \quad \forall j,t,l \in L^o \quad (A17)$$

附表 1 Garver-6 系统扩建备选集参数

Attached Table 1 Candidate expansion set of Garver-6 system

线路编号	支路	线路容量/ MW	原有线路 回数	可扩建线路 回数
1	1-2	128	1	1
2	1-4	128	1	1
3	2-3	80	1	1
4	3-6	104	1	1
5	4-5	132	1	1
6	2-4	104	0	1
7	5-6	72	0	1
8	1-3	56	0	1
9	2-5	104	0	1
10	3-5	64	0	1
11	3-4	64	0	1
12	1-6	64	0	1

of smart grid development in China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 180-187.

[2] 柳璐, 程浩忠, 吴耀武, 等. 面向高比例可再生能源的输电网规划方法研究进展与展望[J]. 电力系统自动化,

- 2021, 45(13): 176-183.
- LIU Lu, CHENG Haozhong, WU Yaowu, et al. Research progress and prospects of transmission expansion planning method for high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 176-183.
- [3] 杨洪朝, 杨迪, 孟科. 高比例可再生能源渗透下多虚拟电厂多时间尺度协调优化调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 60-68.
- YANG Hongzhao, YANG Di, MENG Ke. Multi-time scale coordination optimal scheduling of multiple virtual power plants with high-penetration renewable energy integration[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 60-68.
- [4] 程浩忠, 李隽, 吴耀武, 等. 考虑高比例可再生能源的交直流输电网规划挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 19-27.
- CHENG Haozhong, LI Jun, WU Yaowu, et al. Challenges and prospects for AC/DC transmission expansion planning considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 19-27.
- [5] 张鑫, 李媛媛, 吉平. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划方法[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 372-381.
- ZHANG Xin, LI Yuanyuan, JI Ping. A planning approach for AC/DC hybrid power grid with high proportion of renewable energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 372-381.
- [6] 王富阳, 刘友波, 胥威汀, 等. 计及市场化电价信号方向的含高比例水电输电网扩展规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 190-198.
- WANG Fuyang, LIU Youbo, XU Weiting, et al. Expansion planning of transmission network with high proportion of hydropower considering guidance of marketized electricity price signal[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 190-198.
- [7] 薛晨, 任景, 马晓伟, 等. 面向高比例新能源消纳的西北调峰辅助服务市场机制及实践[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 19-28.
- XUE Chen, REN Jing, MA Xiaowei, et al. Mechanism of peak regulation auxiliary electricity market in the presence of high-penetration renewable energy and its practice in northwest China[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 19-28.
- [8] 徐小琴, 郑旭, 王思聪, 等. 基于改进遗传退火算法的输电网协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 124-131.
- XU Xiaoqin, ZHENG Xu, WANG Sicong, et al. Coordinated planning method of transmission and distribution network based on an improved genetic annealing algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 124-131.
- [9] 刘自发, 于寒霄, 王帅, 等. 综合考虑运行效率和弃风损失的输电网规划[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 827-834.
- LIU Zifa, YU Hanxiao, WANG Shuai, et al. Transmission grid planning considering operation efficiency and wind curtailment loss[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 827-834.
- [10] 李瑜, 孙东磊, 王明强, 等. 火电机组灵活性改造与输电网规划多阶段联合决策方法[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 344-352.
- LI Yu, SUN Donglei, WANG Mingqiang, et al. Multi-stage joint planning decision-making for transmission network and thermal power unit flexibility reformation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 344-352.
- [11] 林芝羽, 李华强, 苏韵掣, 等. 计及灵活性承载度的电网评估与扩展规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 46-57.
- LIN Zhiyu, LI Huaqiang, SU Yunche, et al. Evaluation and expansion planning method of a power system considering flexible carrying capacity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 46-57.
- [12] 李俊伟, 柳璐, 程浩忠, 等. 高比例可再生能源接入下考虑输配协同的输电网规划测试系统[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 19-27.
- LI Aowei, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Transmission expansion planning test system considering transmission and distribution coordination with integration of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 19-27.
- [13] KARMAKAR N, BHATTACHARYYA B. Hybrid intelligence approach for multi-load level reactive power planning using VAR compensator in power transmission network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 330-346.
- [14] 张立波. 基于不确定性理论的输电网规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- ZHANG Libo. Research on transmission system planning based on uncertainty theory[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [15] LIU D, CHENG H, FANG S. Coupled stochastic and robust transmission expansion planning[C] // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA.
- [16] LI Chengxin, DONG Zhaoyang, CHEN Guo, et al. Flexible transmission expansion planning associated with

- large-scale wind farms integration considering demand response[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(15): 2276-2283.
- [17] 范宏, 金义雄, 程浩忠, 等. 兼顾输电利润和社会成本的输电网二层规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 106-111.
FAN Hong, JIN Yixiong, CHENG Haozhong, et al. Transmission network planning considering transmission profit and social cost based on bi-level programming[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 106-111.
- [18] 柳璐, 程浩忠, 马则良, 等. 考虑全寿命周期成本的输电网多目标规划[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 46-54, 19.
LIU Lu, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Multi-objective transmission expansion planning considering life cycle cost[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 46-54, 19.
- [19] BUYGI M O, BALZER G, SHANECHI H M, et al. Market-based transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 2060-2067.
- [20] 王一哲, 汤涌, 董朝阳. 电力市场环境下输电网混合性规划模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 35-40, 127.
WANG Yizhe, TANG Yong, DONG Zhaoyang. Hybrid criterion planning model for transmission system planning under electricity market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 35-40, 127.
- [21] 胥威汀, 杨宇玄, 周笑言, 等. 考虑输电阻塞盈余的输电网双层扩展规划模型[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 113-120.
XU Weiting, YANG Yuxuan, ZHOU Xiaoyan, et al. Two-level expansion planning model of transmission network considering transmission congestion surplus[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(4): 113-120.
- [22] HESAMZADEH M R, BIGGAR D R, HOSSEINZADEH N, et al. Transmission augmentation with mathematical modeling of market power and strategic generation expansion-part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2040-2048.
- [23] SHAN J, SARAH M R. Capacity expansion in the integrated supply network for an electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2275-2284.
- [24] 张玥, 王秀丽, 曾平良, 等. 基于Copula理论考虑风电相关性的源网协调规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 102-108.
ZHANG Yue, WANG Xiuli, ZENG Pingliang, et al. Copula theory based generation and transmission co-planning considering wind power correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 102-108.
- [25] 舒隽, 韩笑, 韩冰, 等. 考虑电力市场中市场力缓解的电网规划[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3616-3621.
SHU Jun, HAN Xiao, HAN Bing, et al. Transmission planning considering market power mitigation in electricity market[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3616-3621.
- [26] 王泽祺, 刘友波, 沈晓东, 等. 考虑风险测度的配电网精准投资项目优选模型[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 216-226.
WANG Zeqi, LIU Youbo, SHEN Xiaodong, et al. Risk constrained investment portfolio model for distribution network projects with efficiency optimization[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 216-226.
- [27] 王一哲, 汤涌, 董朝阳, 等. 应用于输电网中长期规划的混合性规划模型[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2094-2100.
WANG Yizhe, TANG Yong, DONG Zhaoyang, et al. A hybrid criterion model for transmission system medium and long terms expansion planning[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2094-2100.
- [28] ALEXANDRE M, GORAN S, RODRIGO M, et al. A five-level MILP model for flexible transmission network planning under uncertainty: a min-max regret approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 486-501.
- [29] 王宣元, 高峰, 康重庆, 等. 扩展的节点电价算法研究[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3587-3596.
WANG Xuanyuan, GAO Feng, KANG Chongqing, et al. Analysis of extended locational marginal price[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3587-3596.
- [30] WANG X, LI F, DONG J, et al. Tri-level scheduling model considering residential demand flexibility of aggregated HVACs and EVs under distribution LMP[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3990-4002.

收稿日期: 2021-10-13; 修回日期: 2022-01-07

作者简介:

刘方(1989—), 男, 博士, 研究方向为电力系统规划、人工智能技术在电力系统运行分析中的应用等; E-mail: lffl00@163.com

刘友波(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统数据科学与人工智能技术, 售电市场与能效。E-mail: liuyoubo@scu.edu.cn

(编辑 周金梅)