

DOI: 10.7667/PSPC171210

考虑就地消纳与外送相协调的可再生能源生产模拟

崔德民¹, 赵海兵¹, 方燕琼², 孙海涛¹, 田怀源¹, 高文浩¹, 葛杨¹, 李晓博¹

(1. 国网山东省电力公司德州供电公司, 山东 德州 253008; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 为了实现高渗透率间歇性可再生能源就地消纳与外送相互协调, 通过分析可再生能源出力与负荷的相关性, 建立可再生能源机组生产模拟计算模型。同时优化考虑电网安全约束的不同电源开机组合, 开展电力系统生产模拟研究。基于可再生能源就地消纳和外送通道建设综合考虑后的经济性为约束的模型函数, 确定各个间歇性可再生能源的消纳电量、外送电量和弃电电量, 从而使得电网系统能够获得在就地消纳和外送相协调运行模式下的最优综合效益。最后通过算例及仿真结果对所提的模型进行验证。

关键词: 可再生能源; 生产模拟; 就地消纳; 外送通道建设; 互补性

Renewable energy production simulation considering the coordination between local consumption and transmission

CUI Demin¹, ZHAO Haibing¹, FANG Yanqiong², SUN Haitao¹, TIAN Huaiyuan¹, GAO Wenhao¹, GE Yang¹, LI Xiaobo¹

(1. Dezhou Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Dezhou 253008, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to realize the coordination between local consumption and transmission of renewable energy with high penetration and intermittent, through the correlation analysis of renewable energy output and load, the renewable energy production simulation model is established, and the optimization unit commitment is settled down considering grid security constraints, thus developing the production simulation of power system. Based on model function including the economy of the local consumption and delivery channel construction, the local consumption power, delivery power and abandoned power of every intermittent renewable energy is determined. Thus the grid system can achieve the best profits on the coordination of local consumption and transmission. Finally, an example is simulated and the results validate the model proposed in this paper.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577115).

Key words: renewable energy; production simulation; local consumption; delivery channel construction; complementarity

0 引言

随着世界能源紧缺、环境污染以及气候变化等问题的加剧, 可再生能源机组因其与传统电源相比, 具有较为优越的经济性与环保性, 所以大规模接入电网。但是, 可再生能源接入电网面临着极大的挑战。其中, 高渗透率的间歇性可再生能源的消纳问题尤为突出。国家能源局 2016 年的数据显示弃风弃光现象严重, 全国弃风量 497 亿 kWh, 甘肃、新疆、吉林三省份的弃风率分别为 43%、38%、30%。2016 年, 全国弃光量达到 465 亿度, 西北部分地区弃光

现象严重, 甘肃弃光率高达 33%, 新疆自治区全年弃光率达 32%^[1-3]。因此, 在满足可再生能源接入电网的稳定运行条件下, 电网需要安排更加合理的可再生能源出力计划, 需要更加合理增建外送通道, 进一步提高可再生能源的消纳比例。

众多学者针对间歇性可再生能源并网后的电力系统展开了广泛的研究, 其研究工作主要集中在并网容量优化的电源规划、考虑间歇性可再生能源发电的系统调度策略、考虑提高间歇性可再生能源的消纳能力以及可再生能源并网后对电力系统的影响这四个方面的研究。文献[4-8]研究了可再生能源的规划模型, 包括选址定容模型、综合规划模型、双层优化规划设计模型等等。文献[9-11]对可再生能源接入电

网后的调度策略进行了研究, 包括可再生能源出力计划及电网出力计划。文献[12-13]基于时序生产模拟方法, 研究了跨区电网可再生能源消纳能力分析模型, 提出了新能源消纳能力计算方法, 以提高电力系统新能源消纳水平。文献[14-17]对可再生能源并网后的影响进行分析, 包括可靠性、供电安全性等。为了提高能源利用率, 降低可再生能源的弃电率, 在保证电网安全运行的同时, 使电网获得更好的经济效益, 亟需对高渗透率间歇性可再生能源就地消纳与外送相协调展开研究。

基于上述分析, 本文通过分析可再生能源出力与负荷的相关性, 建立考虑就地消纳与外送相协调的可再生能源机组生产模拟计算模型, 同时优化考虑电网安全约束的不同电源开机组合, 开展电力系统生产模拟研究。基于可再生能源就地消纳和外送通道建设综合考虑后的经济性为约束的模型函数, 确定各个间歇性可再生能源的消纳电量、外送电量和弃电电量, 从而使得电网系统能够获得在就地消纳和外送相协调运行模式下的最优综合效益。最后通过算例及仿真结果对本文所提的模型进行验证。

1 模型设计

本文考虑可再生能源就地消纳与外送相协调问题和常规机组开机组合问题的层级关系, 建立双层优化模型。上层优化模型考虑可再生能源与负荷的互补性, 确定可再生能源就地消纳电量、外送电量、弃电电量。在确定可再生能源就地消纳电量与外送电量后, 将可再生能源时序出力曲线从原始时序负荷曲线中减去, 作为净负荷曲线^[18]。下层在上层所得到的净负荷曲线的基础上, 以常规机组的发电成本和启停成本最小为目标, 求解常规机组的开机组合问题。本文所提出的模型框架设计图如图 1 所示。

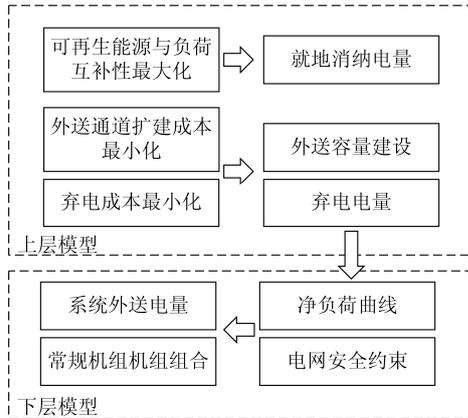


图 1 模型框架设计图

Fig. 1 Model framework

2 上层模型构建

2.1 可再生能源与负荷的互补性

可再生能源与负荷互补性可用可再生能源机组的时序出力曲线与时序负荷曲线距离来衡量。曲线距离可类比于欧式空间中两点距离的定义。如果可再生能源机组的时序出力曲线与时序负荷曲线距离越小, 可认为两者互补性越强。首先给出欧式距离定义。

假设空间中的两点 i 与 j , 两点间的欧式距离可定义为

$$\rho_{i,j} = \sqrt{(i-j)^2} \quad (1)$$

因此, 类比于欧式距离的定义, 给出衡量曲线互补性的定义: 曲线间的距离^[19]。

曲线与曲线的距离可定义为

$$D_{i,j} = \sqrt{\sum_{k \in N} (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (2)$$

式中: N 为曲线上的点的集合; k 为曲线上的点, x_{ik} 表示曲线 i 上的点 k ; x_{jk} 表示曲线 j 上的点 k 。

2.2 目标函数

为了实现可再生能源就地消纳与外送相协调, 目标函数需考虑可再生能源就地消纳时与负荷的互补性最大, 同时需考虑可再生能源外送时所可能产生的联络线扩建成本或弃电成本。

$$\min F = [F_1, F_2, F_3] \quad (3)$$

可再生能源就地消纳电量的确定遵循可再生能源与负荷的互补性最强的原则, 即可再生能源就地消纳出力曲线与负荷曲线的距离最小。

$$F_1 = \sqrt{\sum_{t \in T} (\sum_{i \in N} x_i P_{i,t} - LD_t)^2} \quad (4)$$

式中: N 为虚拟电厂内所有可组合的机组数目; T 为调度周期; $P_{i,t}$ 为 t 时刻机组 i 的出力计划; LD_t 为 t 时刻的负荷预测值; x_i 是可再生能源机组 i 的消纳比例。

故而, 可再生能源机组在 t 时刻的预期外送电量为

$$\sum_{i \in N} (1 - x_i) P_{i,t} \quad (5)$$

若外送电量小于联络线限制, 则全部外送。此时可认为外送成本为 0。

若外送电量大于联络线限制, 则根据外送通道扩建成本及弃电成本最小为原则选择扩建比例和弃电比例。

假设最优扩建容量为 PCC , 则扩建成本为

$$F_2 = \mu \text{PCC} \quad (6)$$

故而，可再生能源机组的弃电成本为

$$F_3 = \gamma \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in N} (1 - x_i) P_{i,t} - \text{PCC}_{\max} - \text{PCC} \right) \quad (7)$$

式中： μ 为扩建成本系数； γ 为弃电成本系数； PCC_{\max} 为电网现有联络线最大外送功率限制。

3 下层模型构建

3.1 目标函数

为实现系统的经济性与环保性，传统的机组组合问题的目标函数是总的发电成本最小^[20-24]，可表述为

$$\min C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (\delta_{i,t} f(P_{i,t}) + \delta_{i,t} (1 - \delta_{i,t-1}) S_{i,t}) \quad (8)$$

$$f(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (9)$$

式中： C 为常规机组的发电成本和启停成本； N_G 为常规机组集合； $\delta_{i,t}$ 为 t 时刻常规机组 i 的启停状态； $f(P_{i,t})$ 为常规机组 i 的成本函数； $S_{i,t}$ 为 t 时刻常规机组 i 的启动成本； a_i 、 b_i 、 c_i 分别为成本函数的二次项系数、一次项系数、常系数。

3.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N \delta_{i,t} P_{i,t} = P_{L,t} + P_t, \forall t \in T \quad (10)$$

式中： $P_{L,t}$ 为 t 时刻系统的净负荷； P_t 为 t 时刻系统的外送电量。

(2) 常规机组容量约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (11)$$

式中， $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为常规机组 i 的出力下限和上限。

(3) 常规机组爬坡率约束

$$-R_{iD} \Delta t \leq P_{i,t+\Delta t} - P_{i,t} \leq R_{iU} \Delta t \quad (12)$$

式中： R_{iD} 、 R_{iU} 分别为常规机组 i 的下坡率和上坡率； Δt 为时段长度。

(4) 常规机组最小启停时间约束

$$T_{i,t}^{\text{ON}} \geq M_i^{\text{ON}} \quad (13)$$

$$T_{i,t}^{\text{OFF}} \geq M_i^{\text{OFF}} \quad (14)$$

式中： $T_{i,t}^{\text{ON}}$ 、 $T_{i,t}^{\text{OFF}}$ 为常规机组 i 在 t 时刻的连续运行时间和连续停运时间； M_i^{ON} 、 M_i^{OFF} 为常规机组 i 的最小连续运行时间和最小连续停运时间。

(5) 网络潮流约束^[25]

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} = -U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (15)$$

式中： P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为网络向节点 i 注入的有功功率和无功功率； P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为网络中节点 i 负荷的有功部分和无功部分； U_i 、 U_j 分别为节点 i 、节点 j 的电压； G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为支路 ij 之间的电导、电纳和相角差。

(6) 网络节点电压约束^[25]

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (16)$$

式中， $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 i 电压的下限和上限。

4 算例分析

4.1 系统数据

为验证上述模型，本文构建了一个包含三台风力发电机组、三台光伏发电机组、两台常规机组的系统，并于 IEEE 30 系统的节点 25 处接入。在含可再生能源的系统中，常规机组和可再生能源机组的相关参数如表 1、表 2 所示，可再生能源机组的典型出力预测曲线和典型负荷预测曲线如图 2 所示，数据参考文献^[26]。该系统初始外送通道最大功率限制为 0.1 MW。算例分别对外送通道扩建前后的两个场景进行了生产模拟，其中场景 1 表示该系统不扩建外送通道，场景 2 表示该系统扩建外送通道（该场景下外送通道建设成本系数设为 10 元/kW，弃电成本系数设为 0.5 元/kW）。

表 1 机组参数

Table 1 Generator coefficients

类型	出力下限/MW	出力上限/MW	爬坡率/(kW/min)
WT1	0	2	—
WT2	0	2	—
WT3	0	3	—
PV1	0	1	—
PV2	0	2	—
PV3	0	3	—
G1	0	2	20
G2	0	1	10

表 2 常规机组的成本系数

Table 2 Cost coefficients of conventional units

	a	b	c	$S_{i,t}$	M_i^{ON}	M_i^{OFF}
G1	0.03	0.5	0.8	50	1	1
G2	0.05	0.6	1.0	50	1	1

4.2 上层优化结果

采用多目标粒子群优化算法对上层模型进行求解, 可得到不同场景下可再生能源机组的最优消纳比例见图 3, 不同场景下系统成本见表 3。

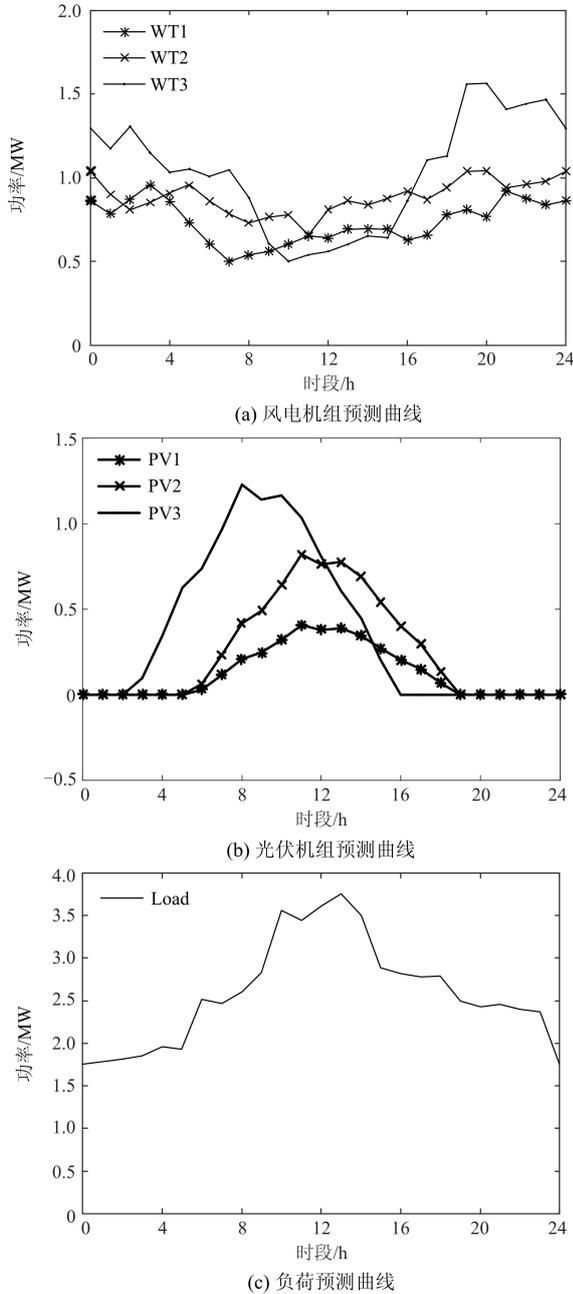


图 2 出力预测曲线和负荷预测曲线
Fig. 2 Output and load forecast curve

表 3 不同场景下的系统成本

Table 3 Costs under different scenarios

	外送容量 建设/MW	总成本/元	弃电 成本/元	外送通道建 设成本/元
场景 1	0	87 213.8	87 213.8	0
场景 2	0.545 6	77 742.5	23 182.5	54 560

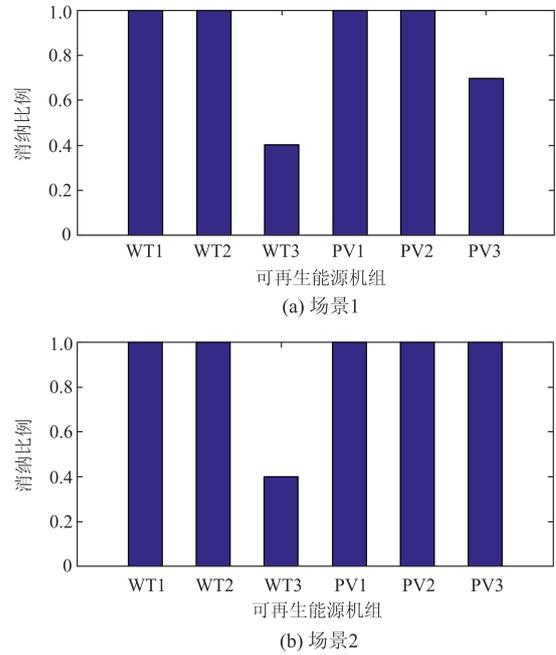


图 3 可再生能源机组的消纳比例

Fig. 3 Optimal consumptive proportion of renewable energy

由表 1 可知, 在场景 1 中, 若只考虑可再生能源机组的就地消纳问题, 不考虑系统的外送通道建设, 该系统的弃电量总额高达 17.443 8 MW, 弃电成本为 87 213.8 元。在场景 2 中, 由于考虑了外送通道建设, 最优外送扩建容量为 0.545 6 MW, 弃电量总额为 4.636 2 MW, 系统总成本为 77 742.5 元, 其中弃电成本为 23 182.5 元, 外送通道建设成本为 54 560 元。由此可见, 对于有大量可再生能源机组接入的系统, 考虑可再生能源机组就地消纳与外送相协调是十分必要的。

为探讨扩建成本系数和弃电成本系数对系统成本及外送通道建设容量的影响, 分别改变扩建成本系数和弃电成本系数, 系统的最优外送容量变化曲线如图 4、图 5 所示。

由图 4 可以看出, 随着外送通道建设成本系数的增大, 系统的最优外送容量逐渐减小, 这是因为外送通道建设成本过高, 系统更倾向于选择弃电, 而不愿意选择扩建外送通道。当扩建外送通道的成本大于系统弃电总成本时, 此时外送通道建设成本系数为 120 元/kW, 系统只按照原有的外送通道送电, 不选择扩建外送通道, 多余的电量无法消纳。由图 5 可以看出, 随着弃电成本系数的增大, 系统的最优外送容量逐渐增大。当弃电成本系数增大到 55 元/kW 时, 系统最优外送容量基本保持不变, 为 0.949 MW。这是由于可再生能源机组的出力有限, 系统最大外送容量应小于系统内所有可再生能源机

组最大出力之和，避免了外送通道容量的浪费。由此看出，为了增大可再生能源的利用率和消纳比例，可以适当增大弃电惩罚系数，鼓励系统扩建外送通道。

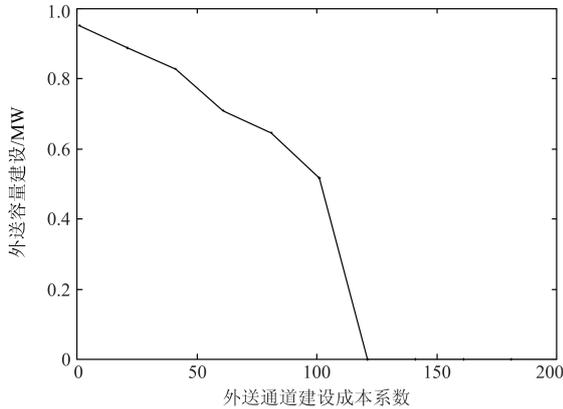


图 4 不同外送通道建设成本系数下系统最优外送容量

Fig. 4 Optimal delivery capacity under different delivery cost coefficients

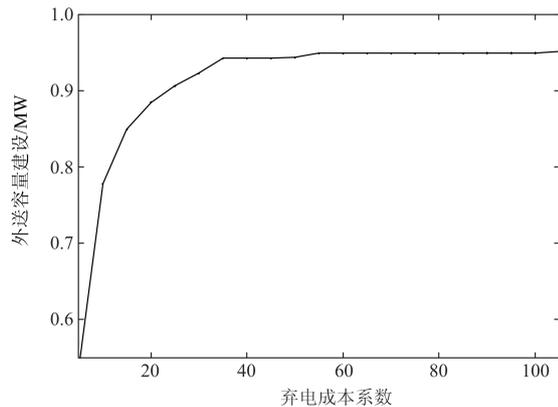


图 5 不同弃电成本系数下系统最优外送容量

Fig. 5 Optimal delivery capacity under different abandoned electricity cost coefficients

4.3 下层优化结果

图 6 为由上层优化结果计算得到的净负荷曲线

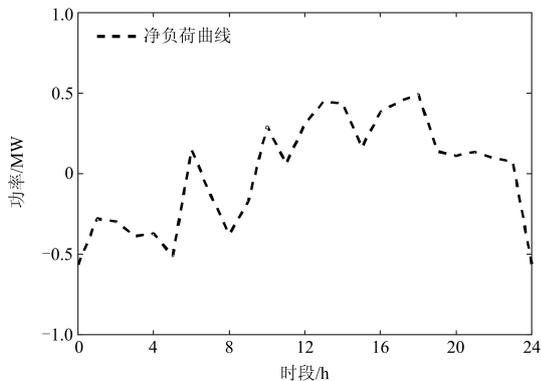


图 6 净负荷曲线

Fig. 6 Net load curve

线。在该净负荷曲线下，采用粒子群优化算法对下层模型进行求解，得到常规机组的开机组合结果及系统外送功率，见图 7 所示。

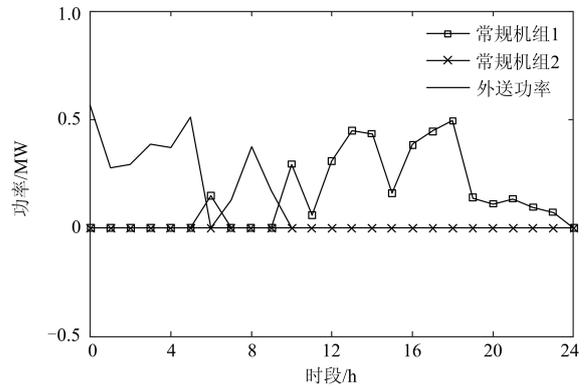


图 7 常规机组出力及系统外送功率

Fig. 7 Output of conventional units and delivery power

由图 7 的结果可以看出，由于 G1 的单位发电成本较低，所以系统会优先调度 G1。只有当 G1 的出力或爬坡速率受到约束时，系统才选择启动 G2。在时刻 1 至时刻 5、时刻 7 至时刻 9，系统外送可再生能源机组的盈余功率，而时刻 6、时刻 10 至时刻 24，由常规机组提供功率以满足系统功率差额。

5 结论

由于高渗透率可再生能源接入电力系统，需要考虑可再生能源就地消纳与外送相协调的问题，本文通过分析可再生能源出力与负荷的相关性，建立就地消纳和外送通道建设综合考虑后的可再生能源机组生产模拟计算模型，从而使得电网系统能够获得在就地消纳和外送相协调运行模式下的最优综合效益。与此同时，本文还探讨了外送通道建设成本系数和弃电成本系数对系统最优外送容量的影响。通过调节成本系数，可以促进系统积极消纳可再生能源，提高可再生能源的利用率。

参考文献

[1] 罗剑波, 陈永华, 刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 140-146.
 LUO Jianbo, CHEN Yonghua, LIU Qiang. Overview of large-scale intermittent new energy grid-connected control technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 140-146.

[2] 刘畅, 吴浩, 高长征, 等. 风电消纳能力分析方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 61-66.
 LIU Chang, WU Hao, GAO Changzheng, et al. Study on

- analysis method of accommodated capacity for wind power[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(4): 61-66.
- [3] 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.
- [4] 万振东. 考虑大规模风电消纳能力的电网灵活规划[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
WANG Zhendong. Flexible transmission system expansion considering accommodation capacity of large scale wind power[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [5] 初壮, 李钊, 白望望. 计及不确定性和环境因素的多类型分布式电源选址定容[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(13): 34-41.
CHU Zhuang, LI Zhao, BAI Wangwang. Optimal siting and sizing of distributed generations considering uncertainties and environmental factors[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(13): 34-41.
- [6] GU Y, MCCALLEY J D, NI M. Coordinating large-scale wind integration and transmission planning[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(4): 652-659.
- [7] 乔嘉庚, 徐飞, 鲁宗相, 等. 基于相关机会规划的风电并网容量优化分析[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(10): 84-87.
QIAO Jiageng, XU Fei, LU Zongxiang, et al. Optimization analysis model of grid-connected wind capacity based on dependent chance programming[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(10): 84-87.
- [8] 李文升, 宋豪, 赵晶, 等. 分布式电源接入馈线优化规划研究[J]. *智慧电力*, 2017, 45(12): 62-68.
LI Wensheng, SONG Hao, ZHAO Jing, et al. Feeder optimization planning considering distributed generation connected to distribution network[J]. *Smart Power*, 2017, 45(12): 62-68.
- [9] 黄裕春, 杨甲甲, 文福拴, 等. 计及接纳间歇性电源能力的输电系统规划方法[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(4): 28-34.
HUANG Yuchun, YANG Jiajia, WEN Fushuan, et al. Transmission system planning considering capability of accommodating intermittent generation sources[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(4): 28-34.
- [10] 张君则, 艾欣. 基于粒子群算法的多类型分布式电源并网位置与运行出力综合优化算法[J]. *电网技术*, 2014, 38(12): 3372-3377.
ZHANG Junze, AI Xin. A particle swarm optimization based comprehensive optimization algorithm for grid-connected positions and operation parameters of multi-type distribution generation[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(12): 3372-3377.
- [11] 郭思琪, 袁越, 张新松, 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 122-129.
GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 122-129.
- [12] 牛东晓, 李建锋, 魏林君, 等. 跨区电网中风电消纳影响因素分析及综合评估方法研究[J]. *电网技术*, 2015, 40(4): 1087-1093.
NIU Dongxiao, LI Jianfeng, WEI Linjun, et al. Study on technical factors analysis and overall evaluation method regarding wind power integration in trans-provincial power grid[J]. *Power System Technology*, 2015, 40(4): 1087-1093.
- [13] 董存, 李明节, 范高锋, 等. 基于时序生产模拟的新能源年度消纳能力计算方法及其应用[J]. *中国电力*, 2015, 48(12): 166-172.
DONG Cun, LI Mingjie, FAN Gaofeng, et al. Research and application of renewable energy accommodation capability evaluation based on time series production simulation[J]. *Electric Power*, 2015, 48(12): 166-172.
- [14] NOCK D, KRISHNAN V, MCCALLEY J D. Dispatching intermittent wind resources for ancillary services via wind control and its impact on power system economics[J]. *Renewable Energy*, 2014, 71(2): 396-400.
- [15] CHEUNG K W, RIOS-ZALAPA R. Smart dispatch for large grid operations with integrated renewable resources[C] // *Innovative Smart Grid Technologies*, January 17-19, 2011, Anaheim, USA: 1-7.
- [16] 王深哲, 高山, 李海峰, 等. 含风电接入的电网规划方案电能质量评估[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(8): 56-65.
WANG Shenzhe, GAO Shan, LI Haifeng, et al. Evaluation of power quality in grid planning scheme with wind power integration[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(8): 56-65.
- [17] 黄雄峰, 翁杰, 张宇娇. 微电网建设规划方案评估与选择[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(21): 76-81.
HUANG Xiongfeng, WENG Jie, ZHANG Yujiao.

Evaluation and selection of microgrid construction planning schemes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 76-81.

[18] 固豫宏, 胡兆光, 田建伟, 等. 含能效电厂的电力系统生产模拟[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 27-31.
GU Yuhong, HU Zhaoguang, TIAN Jianwei, et al. Power system production simulation including efficiency power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 27-31.

[19] 朱晓清, 林健良, 周鑫. 基于负荷曲线距离和形状的负荷分类方法[C] // 青年通信国际会议, 2011, 澳门, 277-280.
ZHU Xiaoqing, LIN Jianliang, ZHOU Xin. A load classification method based on the distance and shape of load curve[C] // The International Conference of Youth Communication, 2011, Macao: 277-280.

[20] 夏清, 钟海旺, 康重庆. 安全约束机组组合理论与应用的发展和展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 94-103.
XIA Qing, ZHONG Haiwang, KANG Chongqing. Review and prospects of the security constrained unit commitment theory and applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 94-103.

[21] 韦化, 龙丹丽, 黎静华. 求解大规模机组组合问题的策略迭代近似动态规划[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4420-4429.
WEI Hua, LONG Danli, LI Jinghua. Policy iteration-approximate dynamic programming for large scale unit commitment problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4420-4429.

[22] 刘芳, 潘毅, 杨军峰, 等. 风电 - 火电 - 抽水蓄能联合优化机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 766-775.
LIU Fang, PAN Yi, YANG Junfeng, et al. Unit commitment model for combined optimization of wind power-thermal power-pumped storage hydro[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 766-775.

[23] 吕翔, 刘国静, 周莹. 含抽水蓄能的风水火联合机组组合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 35-43.
LÜ Xiang, LIU Guojing, ZHOU Ying. Research on combined unit commitment of wind power-hydro power-thermal power for the power system with pumped hydro storage[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 35-43.

[24] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-016-0017-x.

[25] 方燕琼, 甘霖, 艾芊, 等. 基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 61-69.
FANG Yanqiong, GAN Lin, AI Qian, et al. Stackelberg game based bi-level bidding strategy for virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 61-69.

[26] 范松丽, 艾芊, 贺兴. 基于机会约束规划的虚拟电厂调度风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4025-4034.
FAN Songli, AI Qian, HE Xing. Risk analysis on dispatch of virtual power plant based on chance constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4025-4034.

收稿日期: 2017-08-12; 修回日期: 2017-11-20

作者简介:

崔德民(1968—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向可再生能源规划与并网运行技术。

(编辑 葛艳娜)